

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIEROS INDUSTRIALES**



**TRANSDUCTORES BASADOS EN
FERROELECTRETOS PARA
APLICACIONES ULTRASÓNICAS EN
AIRE**

Joao Luis Ealo Cuello

Ingeniero Mecánico

TESIS DOCTORAL

2009



*Grupo de Localización y exPloración para
Sistemas Inteligentes (LOPSI)
Instituto de Automática Industrial (IAI)
Consejo Superior de Investigaciones
Científicas (CSIC)*

*Departamento de Ingeniería Mecánica y
Fabricación
Universidad Politécnica de Madrid*

TRANSDUCTORES BASADOS EN FERROELECTRETOS PARA APLICACIONES ULTRASÓNICAS EN AIRE

Autor:

Joao Luis Ealo Cuello
Ingeniero Mecánico

Directores:

Dr. D. Fernando Seco Granja
Doctor en Ciencias Físicas

Dr. D. Julio Muñoz
Doctor Ingeniero Industrial

Madrid
2009

Título:

TRANSDUCTORES BASADOS EN FERROELECTRETOS PARA
APLICACIONES ULTRÁSÓNICAS EN AIRE

Autor:

Joao Luis Ealo Cuello

Tribunal:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Suplentes:

Acuerdan otorgar la calificación de:

Madrid, ____ de _____ de 2009

A mi esposa Magally.

Agradecimientos

A mi ya no tan pequeña familia (pronto seremos cuatro), la cual ha sido un verdadero fortín, en el que he hallado el sosiego necesario para afrontar los no pocos períodos de duda e incertidumbre durante el desarrollo de este trabajo. A mis padres y hermanos por el amor incondicional que siempre me han ofrecido y me han hecho sentir a pesar de la distancia.

A mis compañeros del IAI-CSIC, por hacer más amena la no fácil experiencia de vivir lejos de los seres queridos. Gracias por alentarme, ayudarme y soportarme durante todos estos años de estudio.

A los investigadores Antonio Ramón Jiménez, Fernando Seco, Carlos Prieto, Jorge Camacho, Carlos Fritsch y Julio Muñoz por su invaluable apoyo y orientación a lo largo de esta aventura doctoral.

A todo el personal de apoyo del Instituto de Automática Industrial por tantísimos favores recibidos a tiempo y fuera de tiempo. Gracias por vuestra paciencia.

A la Universidad del Valle por su respaldo durante todo este tiempo.

Al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) por el apoyo brindado a través del proyecto LOCA (Nuevas Estrategias de Localización en Entornos Interiores utilizando Tecnología Ultrasónica y RFID). De igual forma, al Ministerio de Ciencia y Tecnología, por el soporte ofrecido a través de los proyectos PARMEI (Posicionamiento Absoluto de Robots Móviles en Espacios Interiores) y RESELAI (Integración de redes de sensores acústicos, de visión y RFID para localización en ambientes inteligentes).

A tí, Jesús, por darle sentido a mi vida y a lo que hago.

Índice general

1. TECNOLOGÍAS DE TRANSDUCCIÓN UTILIZADAS PARA GENERAR ULTRASONIDOS EN AIRE.	1
1.1. El Aire como Medio de Propagación	2
1.2. Los Sistemas Emisor-Receptor con Ultrasonidos: Generalidades	4
1.3. Tecnologías Utilizadas en US-A: Panorama Actual.	7
1.4. Los Ferroelectretos Celulares (FCel)	12
1.4.1. Principio de Operación.	14
1.4.2. Materiales Ferroelectretos	17
1.4.3. Propiedades Electromecánicas de los Ferroelectretos	20
1.4.4. Eficiencia en la Generación y Detección de Ultrasonidos	25
1.4.5. Aplicaciones de los Ferroelectretos	27
1.5. Resumen y Conclusiones	28
2. CARACTERIZACIÓN DE TRANSDUCTORES FABRICADOS CON Emfit.	31
2.1. Introducción	31
2.2. Materiales y Métodos	37
2.2.1. Proceso de Fabricación de los transductores	37
2.2.2. Fijación de la película	38
2.2.3. Instrumentación	39
2.3. Caracterización de Transductores Emfit	41
2.3.1. Respuesta en Frecuencia	41

2.3.1.1.	Transductores de Capa Simple	41
2.3.1.2.	Transductores Multicapa	45
2.3.2.	Modo de Vibración de la Superficie Radiante	46
2.3.2.1.	Transductores de Capa Simple	46
2.3.2.2.	Transductores Multicapa	52
2.3.3.	Radiación acústica de Transductores Emfit	53
2.4.	Modelo Electromecánico de Transductores Emfit	58
2.4.1.	Deducción del Modelo	59
2.4.2.	Identificación del Modelo Electromecánico para transductores Apilados.	63
2.4.2.1.	Paso 1: Estimación de la masa dinámica m_1	63
2.4.2.2.	Paso 2: Obtención de k_1 , $C_t = C_1 + C_{air}$ y q_0	64
2.4.2.3.	Paso 3: Obtención de m_2 , k_2 y C_2	69
2.5.	Trabajo Futuro	71
2.6.	Conclusiones	73
3.	TRANSDUCTORES DE SUPERFICIE DESARROLLABLE BA- SADOS EN FERROELECTRETOS CELULARES (FCel)	75
3.1.	Introducción	75
3.1.1.	Las Superficies Desarrollables.	76
3.1.2.	Transductores Cilíndricos y Esféricos	78
3.1.3.	Generación de Vórtices Acústicos	80
3.2.	Materiales y Métodos	82
3.2.1.	Descripción de prototipos	83
3.2.2.	Instrumentación	84
3.3.	Radiación Acústica de Emisores Finitos	87
3.3.1.	Emisor Finito sobre un Substrato Cilíndrico	88
3.3.2.	Radiación de un Emisor sobre un Substrato Esférico.	92
3.3.3.	Radiación de una Fuente con Dislocación Helicoidal	93
3.4.	Resultados	98
3.4.1.	Efecto de la Curvatura del Substrato	98
3.4.2.	Medidas Acústicas y Validación	102
3.4.3.	Pauta de Emisión Panorámica	104

3.4.3.1.	Comparación con un transductor de PVDF	106
3.4.4.	Configuración de un Campo Acústico Omnidireccional	107
3.4.5.	Generación de un Frente de Onda Helicoidal o Vórtice Acústico	112
3.5.	Trabajo Futuro	119
3.6.	Conclusiones.	123
4.	SISTEMAS PHASED ARRAYS BASADOS EN FERROELECTRETOS CELULARES (FCel)	125
4.1.	Introducción	125
4.2.	Materiales y Métodos.	128
4.2.1.	Instrumentación.	128
4.2.2.	Fijación de la Película	131
4.2.3.	Descripción de Prototipos	132
4.3.	Conformación del Haz Ultrasónico con Phased Arrays: Teoría	132
4.4.	Nuevo Método de Fabricación de Arrays con Ferroelectretos	135
4.5.	Caracterización Experimental y Validación	140
4.5.1.	Análisis de la Respuesta de un monoelemento fabricado con ZCPT	140
4.5.2.	Distribución de Sensibilidad de los Elementos	142
4.5.3.	Medición del Nivel de Acople Electromecánico (crosstalk) entre Elementos	143
4.5.4.	Conformación del Haz Ultrasónico (“Beamforming”).	146
4.5.5.	Imagen Acústica en pulso-eco	147
4.6.	Evaluación sin Contacto de Textiles con Ferroelectretos	152
4.6.1.	Simulación del Haz Ultrasónico	156
4.6.2.	Resultados Experimentales	157
4.7.	Trabajo Futuro	162
4.7.1.	Límites dimensionales del método propuesto.	162
4.7.2.	Arrays de FCell sobre Superficies Desarrollables	163
4.7.3.	Validación de arrays no uniformes o dispersos	165
4.8.	Conclusiones	168
5.	CONCLUSIONES Y CONTRIBUCIONES ORIGINALES	171

Índice de figuras

1.1.	Absorción por unidad de longitud de onda para ondas acústicas en aire a 293.15 K, 101.325 kPa y 70 % de humedad relativa. Tomado del American National Standards Institute. $f_{r,N}$ y $f_{r,O}$ son las frecuencias de relajación vibracional del nitrógeno y el oxígeno respectivamente.	3
1.2.	Representación de un transductor electrostático.	9
1.3.	Diagrama esquemático de un transductor micromecanizado. Tomado de [80]	9
1.4.	Principio de funcionamiento de transductores fabricados con PVDF para US-A. Izquierda: Transductor propuesto por Fiorillo [41]. Derecha: Transductor cilíndrico con patrón de emisión panorámico [83]. . .	10
1.5.	Esquema de un transductor fabricado con PVDF corrugado para aplicación en US-A. Tomado de [123].	11
1.6.	Izquierda: Sección transversal de un ferroelectreto celular (Película electromecánica Emfit), tomada por nosotros utilizando microscopía electrónica. Derecha: Representación esquemática de la distribución no simétrica de carga eléctrica permanentemente almacenada en el interior del material.	13
1.7.	Separación de cargas en polímeros piezoeléctricos. La separación es mucho menor en el material ferroeléctrico (a) que en el ferroelectreto (c). Los resortes (b) representan la fuerzas de acoplamiento dentro y entre los dipolos. Tomado de [75]	15

1.8.	Respuesta en frecuencia del coeficiente d_{33} para voltajes dc, adicionales a la polarización permanente, entre -1000 y 1000 V; medidos interferométricamente sobre una película ferroelectreto. Tomado de [61].	16
1.9.	Modelo de distribución de carga dentro del polímero celular.	18
1.10.	Izquierda: Procedimiento para fabricar una película fluorocarbonada de estructura celular (a) y fotografía de la sección transversal de una película de 5 capas (b). Derecha: Modelo esquemático de la distribución de carga en una muestra de película fluorocarbonada de tres capas después de ser polarizada. Tomado de [142].	19
1.11.	Coefficiente piezoeléctrico d_{33} y módulo de elasticidad c_{33} de diferentes ferroelectretos basados en PPc; cargados con el mismo procedimiento. Tomado de [133]	22
1.12.	Resonancia en modo espesor como función de la densidad relativa. Medida con muestras de PPc con diferente estado de inflamamiento. Tomado de [134].	22
1.13.	Velocidad del sonido como función de la densidad relativa. Calculada para diferentes ferroelectretos basados en PP. Tomado de [133]	23
1.14.	Frecuencia de resonancia versus espesor, para películas ferroelectreto VHD50; después de metalizadas. Tomado de [144]	24
1.15.	Resumen cualitativo de las características principales de los transductores fabricados con las diferentes tecnologías utilizadas para la generación de US-A	29
2.1.	Coefficiente piezoeléctrico d_{33} y módulo de elasticidad c_{33} como función de la densidad (tamaño de cavidades interiores) de ferroelectretos fabricados a partir de polipropileno. Izquierda: Resultados experimentales. Derecha: Representación esquemática de los resultados. Tomado de [139].	33
2.2.	Izquierda: Sección transversal de la película electromecánica Emfit, tomada utilizando un microscopio electrónico de barrido perteneciente al Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros - CSIC. Derecha: Representación esquemática de la distribución no simétrica de carga eléctrica permanentemente almacenada en el interior del material.	33

2.3.	Fotografías de la película Emfit, tomadas utilizando microscopía electrónica. Arriba: sección transversal de la muestra y dimensiones. Abajo: Imágenes correspondientes al electrodo superior de aluminio.	34
2.4.	Impedancia eléctrica de la película Emfit, medida en nuestro laboratorio.	35
2.5.	Representación esquemática de un transductor de capa simple fabricado con Emfit.	38
2.6.	Diferentes partes de un transductor apilado de dos capas(izquierda). Representación esquemática y conexión eléctrica (derecha)	38
2.7.	Instrumentación utilizada en la caracterización electromecánico-acústica de la película Emfit.	40
2.8.	Respuesta en frecuencia promedio de los emisores fabricados con tres diferentes tipos de adhesivos. Obtenida a partir de 361 puntos de medida diferentes sobre cada transductor.	42
2.9.	Velocidad promedio de la superficie de los emisores planos fabricados con excitación a la frecuencia de resonancia (320 kHz); para tres diferentes niveles de voltaje. Respuestas obtenidas a partir de la envolvente de la respuesta ante una excitación periódica multiplicada por una ventana gaussiana.	43
2.10.	Respuesta en frecuencia promedio de cuatro diferentes prototipos planos fabricados con ECPT.	44
2.11.	Coefficiente piezoeléctrico promedio d_{33} de un transductor de capa simple fabricado con Emfit y ECPT. Obtenido por interferometría sobre 256 puntos diferentes del transductor.	45
2.12.	Respuesta en frecuencia promedio medida por interferometría, de 4 prototipos diferentes de doble capa, fabricados con Emfit y ECPT, en configuración antiparalela.	46
2.13.	Coefficiente piezoeléctrico d_{33} para prototipos de capa simple y doble.	47
2.14.	Cuantificación del comportamiento tipo pistón utilizando un análisis de correlación. Distribución de la fase relativa de los puntos de medida sobre el transductor con respecto a la moda, expresada como un porcentaje del período correspondiente. Total de puntos de medida: 361	48

2.15. Arriba-Izq: Respuesta típica de un punto sobre la superficie del transductor ante una excitación monofrecuencia. Arriba-der: Perfil instantáneo de velocidad superficial a 50 kHz y 114 Vp de excitación, a mínima amplitud. Abajo: Amplitud instantánea de la velocidad de todos los puntos medidos sobre la superficie.	49
2.16. Arriba-Izq: Respuesta típica de un punto sobre la superficie del transductor ante una excitación monofrecuencia. Arriba-der: Perfil instantáneo de velocidad superficial a 50 kHz y 114 Vp de excitación, a máxima amplitud. Abajo: Amplitud instantánea de la velocidad de todos los puntos medidos sobre la superficie.	49
2.17. Arriba-Izq: Respuesta típica de un punto sobre la superficie del transductor ante una excitación monofrecuencia. Arriba-der: Perfil instantáneo de velocidad superficial a 200 kHz y 114 Vp de excitación, a mínima amplitud. Abajo: Amplitud instantánea de la velocidad de todos los puntos medidos sobre la superficie.	50
2.18. Arriba-Izq: Respuesta típica de un punto sobre la superficie del transductor ante una excitación monofrecuencia. Arriba-der: Perfil instantáneo de velocidad superficial a 200 kHz y 114 Vp de excitación, a máxima amplitud. Abajo: Amplitud instantánea de la velocidad de todos los puntos medidos sobre la superficie.	50
2.19. Arriba-Izq: Respuesta típica de un punto sobre la superficie del transductor ante una excitación monofrecuencia. Arriba-der: Perfil instantáneo de velocidad superficial a 320 kHz y 114 Vp de excitación, a mínima amplitud. Abajo: Amplitud instantánea de la velocidad de todos los puntos medidos sobre la superficie.	51
2.20. Arriba-Izq: Respuesta típica de un punto sobre la superficie del transductor ante una excitación monofrecuencia. Arriba-der: Perfil instantáneo de velocidad superficial a 320 kHz y 114 Vp de excitación, a máxima amplitud. Abajo: Amplitud instantánea de la velocidad de todos los puntos medidos sobre la superficie.	51
2.21. Gráfica resumen de la distribución espacial instantánea de la velocidad superficial de un transductor plano a diferentes frecuencias. Medidas utilizando interferometría.	52

2.22. Patrón vibratorio de la superficie radiante de un transductor de dos capas fabricado con Emfit. Arriba: Perfil vibratorio en diferentes instantes de tiempo. Abajo: Respuesta chirp típica de un punto sobre la superficie.	54
2.23. Sensibilidad en transmisión de un transductores de dimensión 20×20 mm, a 30 cm de distancia sobre el eje principal. Izquierda: Prototipo de capa simple. Derecha: Prototipo de capa doble. Medidas realizadas con un micrófono de 1/4 in.-4939; Brüel & Kjaer.	55
2.24. Comparación entre los patrones de radiación medido (prototipo 1) y estimado del campo lejano de un transductor plano, cuadrado, de 20 mm de lado y fabricado con una capa simple de Emfit.	56
2.25. Comparación entre los patrones de radiación medido (prototipo 1) y estimado del campo lejano de un transductor plano , cuadrado, de 20 mm de lado y fabricado con dos capas de Emfit.	57
2.26. Representación esquemática de un transductor de capa simple y su modelo electromecánico de un grado de libertad.	60
2.27. Representación esquemática de un transductor de dos capas y su modelo equivalente de dos GDL.	62
2.28. Respuesta en frecuencia promedio de un emisor plano con y sin masa añadida (Δm) en el electrodo superior; medida por interferometría y sin cambiar la película activa. Desviación estándar como porcentaje del promedio.	65
2.29. Distribución estadística de los parámetros constitutivos de un modelo dinámico para transductores de capa simple fabricados con Emfit. . .	66
2.30. Resultados del proceso de optimización. Ajuste entre la respuesta promedio medida y su contraparte resultante del modelo identificado para un transductor de capa simple.	66
2.31. Respuesta en frecuencia promedio de 4 prototipos diferentes de capa simple y respuesta del modelo identificado.	67
2.32. Arriba: Ajuste del modelo de 1GDL a la respuesta promedio de 4 transductores diferentes de capa simple. Abajo: Parámetros del modelo correspondientes al ajuste mostrado arriba. m_1 y q_0 constantes. . . .	68

2.33. Predicción inicial de la respuesta en frecuencia, a partir de los resultados obtenidos de la identificación paramétrica del modelo de capa simple. $m_1 = 5,49$ mg, $m_2 = 57,2$ mg, $k_1 = k_2 = 1,93 \times 10^7$ N/m, $C_1 = C_2 = 2,17$ Ns/m, $C_{air}=0.16$ Ns/m y $q_0 = 1,085 \times 10^{-7}$ C.	69
2.34. Ajuste del modelo electromecánico de 2 GDL a la respuesta medida de 4 prototipos de doble capa fabricados con Emfit y ECPT.	71
2.35. Parámetros obtenidos del proceso de identificación paramétrica utilizando la respuesta medida de 4 prototipos de doble capa diferentes.	72
2.36. Transductor de doble capa, cuya capa superior ha sido modificada con agujeros.	73
3.1. Diferentes tipos de superficies desarrollables. Arriba-Izq:Cilindro generalizado. Arriba-Der: Superficie cónica general. Abajo Izq: Icositetraedro pentagonal. Abajo-Der:Superficie de hélice circular	77
3.2. Principio de funcionamiento de un transductor fabricado con PVDF para aplicación en aire. Las líneas punteadas representan las posiciones extremas, deformadas, de la zona activa del transductor.	80
3.3. Planos de fase constante de un frente de onda con dislocación de tornillo (frente de onda helicoidal). La dirección de propagación se indica con la flecha, la cual está colineal con el eje del haz.	81
3.4. Transductores fabricados utilizando substratos de aluminio cónico y cilíndrico. Prototipos fabricados con ECPT.	84
3.5. Diseño de montaje del substrato del transductor cuasiesférico. Dimensiones en mm.	85
3.6. Transductor cuasi-esférico fabricado con FCel. Diámetro nominal 60 mm. Cada anillo cónico es eléctricamente independiente. Izq: Substrato. Centro: Conexionado interior. Der: Prototipo final.	85
3.7. Izq: Prototipo fabricado con película Emfit y adherido al substrato con ECPT. Dislocación p de 1λ a 100 kHz en aire. Diámetro exterior: 40 mm. Centro: Representación del substrato helicoidal utilizado. Der: Representación de un frente de ondas helicoidal.	86
3.8. Representación de transductor finito sobre un substrato cilíndrico. Convenciones.	88

3.9. Campo lejano radiado por una fuente cilíndrica finita vibrando en modo espesor a diferentes frecuencias. ($v(a, \phi, z) = v_n$, $2\alpha = 180^\circ$, $L=10$ mm, $a = 15$ mm)	91
3.10. Representación de casquete esférico. Convenciones.	92
3.11. Ancho de un haz gaussiano $w(z)$ como función de la distancia axial z . w_0 Ancho en $z = 0$ (beam waist); b Profundidad del foco; z_R Distancia de Rayleigh; Θ Angulo total de propagación	94
3.12. Representación teórica típica de un haz gaussiano generado con láser. Variación del radio del frente de ondas con la distancia de propagación z	94
3.13. Campo instantáneo helicoidal gaussiano, simulado, con carga topológica unitaria $m = -1$. Izquierda: Presión. Derecha: Fase	96
3.14. Campo instantáneo helicoidal gaussiano, simulado, con carga topológica tres $m = -3$. Izquierda: Presión. Derecha: Fase	96
3.15. Magnitud del campo de presión azimutal de un haz helicoidal gaussiano. $w_0 = 20$ mm, frecuencia 100 kHz, $m = -1$	96
3.16. Estimación de la magnitud campo azimutal radiado por un transductor con las dimensiones del prototipo fabricado, con (izquierda) y sin (derecha) dislocación helicoidal en la fase. Predicción realizada utilizando el Método de las Fuentes Puntuales. $m = -1$, frecuencia 100 kHz.	97
3.17. Respuesta en frecuencia medida a diferentes radios de curvatura sobre un transductor cónico, usando interferometría. Comparación con la obtenida con un transductor plano.	99
3.18. Perfil de la velocidad instantánea [mm/s] de cuatro transductores cilíndricos con diferentes radios de curvatura. Medidas realizadas con interferometría, a 70 kHz y máxima amplitud de la velocidad en el ciclo de oscilación.	100
3.19. Perfil de velocidad instantáneo de un transductor cilíndrico fabricado con FCel; en cuatro instantes distintos de un ciclo de oscilación a 70 kHz. Arr.-Izq.:Cerca de velocidad nula. Arr.-Der. y Abj.-Der.: a valores positivos de velocidad. Abj.-Izq.: a velocidad mínima negativa. El círculo continuo denota la referencia de velocidad nula.	101

3.20. Patrón de radiación del campo lejano horizontal producido por un emisor EMFi semi-cilíndrico (180° de área activa) con relación de aspecto $\frac{L}{a} = \frac{2}{3}$. ($L = 20$ mm, $\alpha = 90^\circ$, $a = 15$ mm). Estimación vs Medidas.	103
3.21. Patrón de radiación del campo lejano vertical producido por un emisor EMFi semi-cilíndrico (180° de área activa) con relación de aspecto $\frac{L}{a} = \frac{2}{3}$. ($L = 20$ mm, $\alpha = 90^\circ$, $a = 15$ mm). Estimación vs Medidas.	104
3.22. Sensibilidad en transmisión de un transductor cilíndrico fabricado con FCell a diferentes frecuencias. Diámetro 30 mm, Altura: 20 mm	105
3.23. Medida de la homogeneidad del patrón panorámico emitido a diferentes frecuencias	107
3.24. Representación del dominio acústico usado para estimar usando elementos finitos, el campo radiado por un emisor cuasiesférico	109
3.25. Pauta direccional normalizada de un pistón esférico y otro cuasiesférico, a diferentes ratios s/λ . $s = 7,12$ mm, $R = 30$ mm, $\alpha = 41^\circ$	109
3.26. Diferencias entre el campo radiado por un pistón esférico y otro cuasiesférico, a diferentes ratios s/λ . $s = 7,12$ mm, $R = 30$ mm.	110
3.27. Directividad estimada y medida en campo lejano de un transductor esférico y otro cuasiesférico ($2\alpha = 81,82^\circ$, $R = 60$ mm)	111
3.28. Amplitud instantánea (normalizada) de la presión en un plano ubicado a 100 mm del transductor, en cuatro instantes distintos de un período de oscilación τ [0 ; $\tau/4$; $\tau/2$; $3\tau/4$]. Carga topológica $m = -1$. Izquierda: Medida. Derecha: Simulada.	113
3.29. Amplitud instantánea (normalizada) de la presión en un plano ubicado a 200 mm del transductor, en cuatro instantes distintos de un período de oscilación τ [0 ; $\tau/4$; $\tau/2$; $3\tau/4$]. Carga topológica $m = -1$. Izquierda: Medida. Derecha: Simulada.	114
3.30. Magnitud (arriba) y fase (abajo) de un frente de ondas helicoidal en un plano perpendicular al eje principal en campo cercano, a 100 mm del transductor. Carga topológica -1. Izquierda: Valores medidos. Derecha: Valores simulados.	115

3.31. Magnitud (Arriba) y fase (Abajo) de un frente de ondas helicoidal en un plano perpendicular al eje principal en campo lejano, a 200 mm del transductor. Carga topológica 1. Izquierda: Valores medidos. Derecha: Valores simulados.	116
3.32. Evolución temporal de la presión a lo largo de 51 puntos de medida que atraviesan transversalmente el haz helicoidal observado a 200 mm.	117
3.33. Planos de fase constante de un vórtice ultrasónico generado con un transductor Emfit, medidos instantáneamente en el plano (X,Y,200 mm)	118
3.34. Representación del problema de radiación acústico, tanto inverso como directo.	120
3.35. Arriba:Representación de un discriminador angular de posición utilizando FCell. Abajo: Forma y dimensiones de los electrodos interiores del primer prototipo ya construido.	121
3.36. Resultados preliminares obtenidos con un discriminador angular de diámetro $\Phi = 40$ mm, a 140 kHz	122
3.37. Substrato con dislocación de tornillo en la dirección radial para generar un campo con una singularidad en la fase.	122
4.1. Diagrama de la instrumentación utilizada.	129
4.2. Sistema de coordenadas para la estimación del campo de presión de un array unidimensional.	130
4.3. Representación del funcionamiento de un sistema phased array.	133
4.4. Representación de la sección transversal de un array fabricado con el procedimiento propuesto	136
4.5. Partes del montaje de un array lineal unidimensional usando ferroelectretos celulares (izquierda) y fotografía de uno de los prototipos fabricados (derecha).	137
4.6. Fotografía de la cinta ZCPT pegada sobre los electrodos inferiores de la PCB. Encima se adhiere la cara no metalizada de la película Emfit.	138
4.7. Respuesta en frecuencia de un transductor monoelemento fabricado utilizando ZCPT y ECPT. La desviación estándar se presenta como un porcentaje respecto al promedio. Obtenida mediante interferometría.	141

4.8. Patrón de emisión horizontal, en campo lejano y a 90 kHz, de un emisor plano (10 mm x 20 mm) fabricado con ZCPT.	142
4.9. Desviación de la sensibilidad acústica de los elementos, medida en los 2 prototipos de array y calculada en decibelios relativos a sus respectivas respuestas promedio.	143
4.10. Arriba: Nivel de acoplamiento promedio medido entre los elementos 16 y 17. Abajo: Desviación estándar como porcentaje respecto al promedio. 145	
4.11. Amplitud de la velocidad superficial en puntos diferentes entre los elementos 15 y 16; ambos activados con un único pulso de banda ancha utilizando el sistema SITAU	146
4.12. Comparación entre la señal real (punteada) y la sintética (continua), correspondientes a un elemento del array excitado con 3 pulsos cuadrados a 100 kHz.	147
4.13. Haz ultrasónico enfocando a 200 mm y sin deflexión. Arriba-Izquierda: Resultados de Simulación. Arriba-Derecha: Resultados experimentales. Rango dinámico de la imagen 35 dB. Abajo: Patrón lateral de haz en el foco. Frecuencia 100 kHz.	148
4.14. Haz ultrasónico enfocando a 200 mm y deflectado 30 grados. Arriba-Izquierda: Resultados de Simulación. Arriba-Derecha: Resultados experimentales. Rango dinámico de la imagen 35 dB. Abajo: Patrón lateral de haz en el foco. Frecuencia 100 kHz.	149
4.15. Circuito del pre-amplificador de alta impedancia de entrada para transductores basados en FCell.	151
4.16. Imagen en pulso eco de un reflector ubicado a 150 mm del array. Frecuencia de excitación de 150 kHz. Arriba-izq.: Imagen simulada. Arriba-Der.: Imagen obtenida de los datos reales. Rango dinámico de las imágenes 35 dB. Abajo: Comparación entre los valores de la imagen real y simulada, a radio constante, pasando por la ubicación del reflector (“Point Spread Function”)	152

4.17. Imagen en pulso eco de un reflector ubicado a 150 mm del array. Frecuencia de excitación de 300 kHz. Arriba-izq.: Imagen simulada. Arriba-Der.: Imagen obtenida de los datos reales. Rango dinámico de las imágenes 35 dB. Abajo: Comparación entre los valores de la imagen real y simulada, a radio constante, pasando por la ubicación del reflector (“Point Spread Function”)	153
4.18. Aparato experimental utilizado para inspeccionar textil en modo transmisión.	155
4.19. Esquema con los diferentes defectos incluidos en la muestra de textil.	156
4.20. Izquierda: Estimación del campo emitido por el array en el plano de muestra, paralelo al array, a una distancia de 51 mm. Frecuencia 300 kHz. Derecha: Representación tridimensional que incluye el array y el campo de la izquierda.	157
4.21. Estimación del campo acústico resultante de la combinación de los patrones del emisor y del receptor en el plano de la muestra (arriba) y sobre la línea de inspección (X,Y=0,Z=51mm).	158
4.22. Detección de fibras faltantes (Defecto 1) y mancha de vaselina (Defecto 2) utilizando un sistema de inspección ultrasónico basado en transductores FCell. Arriba: Fotografía del defecto. Mitad: Imagen acústica correspondiente (C-Scan). Abajo: Nivel de relación señal ruido obtenido en la zona inspeccionada	159
4.23. Detección ultrasónica de 4 fibras faltantes (Defectos 3 y 4) en un tejido plano. Arriba: fotografía del defecto. Mitad: Nivel de relación señal ruido obtenido en la zona inspeccionada. Abajo: C-Scan.	160
4.24. Inspección de una mancha de aceite (Defecto 5) con ultrasonidos generados con transductores FCell.	161
4.25. Comparación teórico-experimental del patrón lateral emitido por un array de 32 elementos, paso 1.6 mm y distancia inter-elemento de 0.4 mm. Distancia focal 78 mm. Señal de excitación 100 kHz.	163
4.26. Diseño de un array cóncavo sobre PCB flexible.	164
4.27. Arriba-Izq: Array 2D uniforme de 30 elementos de 3 mm x 5 mm. Arriba-Der.: Campo acústico enfocando a 200 mm, a 100 kHz. Abajo: Patrones laterales sobre los planos X=0 e Y=0.	166

4.28. Arriba-Izq: Array 2D disperso de 30 elementos de 3 mm x 5 mm. Arriba-Der.: Campo acústico enfocando a 200 mm, a 100 kHz. Abajo: Patrones laterales sobre los planos X=0 e Y=0.	167
--	-----

Índice de tablas

1.1. Impedancia acústica de diferentes medios y estimación del coeficiente de transmisión entre ellos.	2
1.2. Tipos de sistemas ultrasónicos y sus aplicaciones típicas.	5
1.3. Comparación del coeficiente d_{33} de diferentes materiales piezoeléctricos.	17
1.4. Propiedades de materiales utilizados en ultrasonidos para aplicaciones en aire. * Límite superior reportado con mediciones cuasiestáticas . .	26
1.5. Diferentes dispositivos y aplicaciones propuestos por [46] para desarrollar con ferroelectretos	27
2.1. Parámetros conocidos para el proceso de identificación paramétrica .	64
4.1. Propiedades Físicas de la ZCPT.	131
4.2. Distintas posibilidades de fabricación de arrays con ferroelectretos celulares	139
4.3. Variación de la amplitud medida para todos los defectos examinados .	162

Resumen

Los polímeros de estructura celular e internamente cargados de manera cuasi permanente, constituyen una nueva clase de materiales con propiedades electromecánicas interesantes. Gracias a que su respuesta piezoeléctrica guarda semejanza con la que exhiben los materiales ferroeléctricos, se ha acuñado para ellos el término *ferroelectretos*. Su reciente aparición y sus características físicas inusuales abren nuevas alternativas en el diseño de transductores ultrasónicos, haciendo necesario cuantificar su potencial real en diversidad de usos, entre los que se cuentan las aplicaciones ultrasónicas que utilizan el aire como medio de propagación.

Los ferroelectretos poseen varias características prometedoras para la construcción de transductores ultrasónicos. Su alta sensibilidad expresada en términos del coeficiente piezoeléctrico d_{33} , su amplio rango de frecuencia utilizable entre 30 kHz y 2 MHz, su baja impedancia acústica (≈ 0.03 MRayls) y su incomparable flexibilidad mecánica, les hacen especialmente atractivos para fabricar transductores ultrasónicos de excelentes prestaciones en aplicaciones en aire. Además de lo anterior, cabe resaltar que los ferroelectretos son una tecnología de fácil uso y manipulación, así como de bajo coste.

El único material ferroelectreto disponible comercialmente en el momento actual es la película electromecánica EmfitTM. Por esta razón los resultados mostrados en este trabajo están basados en transductores fabricados con ésta película. A la fecha se han desarrollado películas con prestaciones superiores en cuanto a sensibilidad y se espera que en el futuro cercano estén también disponibles en el mercado. No obstante, utilizando la película Emfit, ha sido posible demostrar el potencial y la versatilidad de los ferroelectretos en aplicaciones ultrasónicas en aire.

Este trabajo de tesis está dividido en cinco capítulos autocontenidos. Inicialmente se describe el estado actual de desarrollo de la tecnología, indicando sus ventajas y limitaciones, así como su potencial en aplicaciones ultrasónicas en aire (US-A). De igual manera, se presenta un estado del arte de las diferentes tecnologías utilizadas en US-A con el fin de enmarcar a los ferroelectretos dentro del panorama actual constituido por las cerámicas piezoeléctricas, los piezocompuestos, los dispositivos electrostáticos y los polímeros piezoeléctricos como el PVDF.

En el capítulo dos, se presenta la caracterización de la película Emfit como ma-

terial base para el desarrollo de transductores. Utilizando medidas obtenidas por interferometría láser, se presenta la caracterización y el análisis vibro-acústico de dispositivos de geometría plana, tanto de capa simple como multicapa. Igualmente, se demuestra que, a pesar de la no homogeneidad de la película Emfit y de su patrón vibratorio, la respuesta dinámica de dispositivos de capa múltiple puede ser estimada utilizando un modelo electromecánico acoplado y de parámetros concentrados; el cual es identificado utilizando la respuesta de transductores previamente caracterizados. Dicho modelo, que incluye el efecto del adhesivo usado en la fijación de la película a un sustrato, permite predecir adecuadamente las frecuencias de resonancia de transductores multicapa, lo cual resulta de gran utilidad al diseñar los transductores.

El capítulo tres introduce un nuevo concepto en el diseño de transductores ultrasónicos. Gracias a la gran flexibilidad mecánica de la película Emfit, a su modo de vibración tipo pistón y sensibilidad inalterables por la geometría curvada del sustrato, resulta posible concebir lo que en este trabajo se ha denominado *transductores ultrasónicos de superficie desarrollable*. A lo largo del capítulo se presenta una comparación teórico-experimental de la respuesta acústica de transductores novedosos fabricados con Emfit, sobre sustratos cilíndricos, cuasiesféricos y helicoidales, para generar, entre otras posibilidades, patrones de radiación panorámicos, omnidireccionales y vórtices acústicos.

Posteriormente, en el cuarto capítulo se presenta un nuevo proceso, económico y confiable, para la fabricación de arrays de transductores con ferroelectretos, el cual reduce considerablemente la instrumentación requerida para la conformación del multitransductor. Arrays lineales fabricados con la metodología propuesta son caracterizados y sus respuestas son contrastadas con simulaciones teóricas de campo acústico. De igual manera se reporta el potencial de utilización de multitransductores en sistemas con arreglo en fase (phased arrays). En este sentido, resultados pioneros son presentados en la inspección de defectos en materiales textiles.

Finalmente, el último capítulo condensa los resultados más relevantes de nuestra investigación con ferroelectretos para aplicaciones ultrasónicas en aire, resaltando las aportaciones originales de la siguiente tesis. A su vez se presentan posibles vías para extender en el futuro el trabajo documentado.

Abstract

Internally charged, cellular polymer electrets are a new class of materials which exhibit interesting electromechanical characteristics. Due to its piezoelectric behaviour, which resembles that of ferroelectric materials, the name *ferroelectret* has been coined for this kind of materials. Its recent appearance and remarkable properties open up new possibilities for the design and development of ultrasonic transducers. Therefore, there is a need for quantifying the real potential of ferroelectrets in different fields, such as air-coupled ultrasonic applications, which comprises the main objective of this dissertation.

Ferroelectret technology is an excellent candidate for the current demand to develop airborne ultrasonic transducers, which satisfy, at the design stage, the trade-off among directivity, bandwidth, sensitivity and cost. This is possible thanks to its high d_{33} piezoelectric coefficient, its wide frequency range of operation (from 30 kHz up to 2 MHz), its low acoustic impedance (≈ 0.03 MRayls) which results in a good adaptation to the air and its unprecedented mechanical flexibility. Furthermore, ferroelectrets are easy to use and have a low fabrication cost.

Up to our knowledge, the electromechanical film EmfitTM is the only ferroelectret material commercially available. For this reason, all the experimental results included in this work have been accomplished using this film. At present, different ferroelectret foils, which exhibit a superior performance compared to that of the Emfit, have been developed by several researchers at a laboratory scale. However, the Emfit film electromechanical characteristics allowed us to demonstrate the potential and versatility of ferroelectrets in air-coupled applications.

This thesis consists of five self-contained chapters. First, a complete state of the art of the ferroelectret technology is introduced. This includes the advantages and limitations of this material along with its potential in airborne ultrasound applications. Likewise, an outline of the well-known technologies used in air applications is shown in order to allow the reader to locate the ferroelectrets in the current scene.

Chapter two includes characterization results of Emfit-based ultrasonic transducers. These are obtained using laser interferometry to measure the performance of single and double-layer prototypes fabricated on flat substrates. Moreover, we show that in spite of the anisotropy of the ferroelectret Emfit film and the inhomogeneity

of its vibratory behaviour, the average frequency response of multilayer transducers in air is fairly well predicted with lumped-element coupled models.

In chapter three, a new concept of ultrasonic transducers is introduced. Thanks to the high mechanical flexibility of the Emfit film along with its piston-like vibratory behaviour, which remains unaltered when the film is glued on a curved substrate, it is possible to develop, what we have called, *developable surface ultrasonic transducers*. This result opens up the possibility of designing transducers with custom acoustic pattern, as long as the film is fixed on the substrate of a developable surface. Different transducer prototypes of special directivity patterns are modelled and empirically characterized, namely, omnidirectional and panoramic transducers and an acoustic vortex generator.

Subsequently, in the fourth chapter, a novel procedure that considerably simplifies the fabrication process of ferroelectret-based multielement array transducers is proposed and evaluated. Also the potential of ferroelectrets being used as active material for air-coupled ultrasonic transducer design is shown. Furthermore, we demonstrate the feasibility of using a ferroelectret-based phased array for the inspection of woven textiles.

Last chapter summarized the most relevant result of our research on ferroelectret-based transducers for airborne ultrasound applications. The main original contributions are carefully highlighted.

TECNOLOGÍAS DE TRANSDUCCIÓN UTILIZADAS PARA GENERAR ULTRASONIDOS EN AIRE.

Gracias al desarrollo de nuevos materiales y al avance actual en la automatización de los procesos de manufactura, los ultrasonidos en aire (US-A) se han posicionado como una herramienta viable e interesante para una gran variedad de aplicaciones, entre las que se incluyen la medida de distancia en sistemas robóticos, imagen acústica, mediciones de flujo y temperatura de gases, monitorización *in situ* de procesos, microscopía acústica, interacción hombre-máquina, entre otros [103] [64] [49] [45] [15]. En este capítulo introductorio se presenta un resumen de las tecnologías actualmente utilizadas para la generación de US-A, haciendo también una breve descripción de sus respectivos principios de funcionamiento, sus ventajas y posibles limitaciones, así como su potencial en el diseño específico de transductores. Especial relevancia se otorga a los ferroelectretos celulares, en los que se ha centrado la mayor parte de la investigación de este trabajo, los cuales se presentan como una nueva alternativa para la fabricación y diseño de transductores ultrasónicos en aire. Finalmente, se presenta una comparación cualitativa de las diferentes tecnologías con base en criterios como impedancia acústica, sensibilidad, facilidad de uso, flexibilidad mecánica, ancho de banda disponible, coste, robustez y madurez de la tecnología. Con todo ello, el capítulo presente busca dar al lector una visión suficientemente amplia y a la vez completa

$Z_{aire} = 420 \text{ Rayl}$ Medio 1	$Z_{agua} = 1,5 \text{ MRayl}$ Medio 2	$Z_{aluminio} = 17 \text{ MRayl}$ Coef. Transm (T)	$Z_{acero} = 45 \text{ MRayl}$ Pérdidas dB
Agua	Aluminio	0.3	-10
Aire	Aluminio	0.0001	-80
Agua	Acero	0.13	-18
Aire	Acero	0.000037	-88

Tabla 1.1: Impedancia acústica de diferentes medios y estimación del coeficiente de transmisión entre ellos.

del panorama actual de los transductores ultrasónicos para aplicaciones en aire.

1.1. El Aire como Medio de Propagación

En US-A resulta determinante la selección adecuada del tipo de transductor a utilizar, en concordancia con los requerimientos de cada caso. Para ello, además de las características propias de cada tecnología de material transductor, resulta fundamental tener en cuenta las limitaciones que añade el hecho de utilizar aire como medio de propagación, las cuales se resumen a continuación:

- *Desadaptación de Impedancias.* La impedancia acústica del medio se define como $Z = \rho c$, donde ρ representa la densidad y c la velocidad de propagación. El concepto es análogo al de la impedancia eléctrica en un circuito. Por consiguiente, la diferencia de impedancias entre dos medios determina la cantidad de energía que atraviesa de un medio a otro. Los valores de impedancia del aire, el agua, el aluminio y el acero se dan en la tabla 1.1 como referencia. En general, si una onda acústica plana incide normalmente desde un medio de impedancia Z_1 sobre otro de impedancia Z_2 , solo una fracción de la energía acústica logrará atravesar la interfaz que conecta ambos medios. Dicha fracción se conoce como el coeficiente de transmisión T y está dado por:

$$T = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (1.1)$$

También en la tabla 1.1, se muestran los valores de pérdida por inserción en decibelios ocasionados por la diferencia de impedancia entre dos medios. Por

ejemplo, en el caso de una interfaz agua-aluminio, un 30 % de la energía acústica es transmitida y el 70 % restante es reflejada. Sin embargo, si utilizamos el mismo haz ultrasónico, pero en lugar de agua empleamos aire, solamente 1/10000 de la energía es transmitida al aluminio, lo cual equivale a una pérdida de aproximadamente 80 dB. Si en lugar de aluminio empleáramos acero, la pérdida sería de 88 dB. De forma similar ocurre con la energía acústica transmitida al medio desde un transductor ultrasónico. Por tanto, resulta fundamental para US-A emplear transductores cuyo material base posea una impedancia acústica baja, tan similar a la del aire como sea posible.

- *Atenuación por absorción.* Aunque la mayor dificultad en US-A surge por el desacople de impedancias, la absorción del ultrasonido en el aire es también importante, principalmente a frecuencias superiores a 1 MHz [18]. La distancia a la cual la amplitud de una señal es reducida en $1/e$, llamada distancia de extinción [60], es inversamente proporcional al cuadrado de la frecuencia acústica. Por ejemplo a 100 kHz, 450 kHz y 1 MHz, la distancia de extinción es de aproximadamente 2.3 m, 26 cm y 34 mm respectivamente. Ver figura 1.1

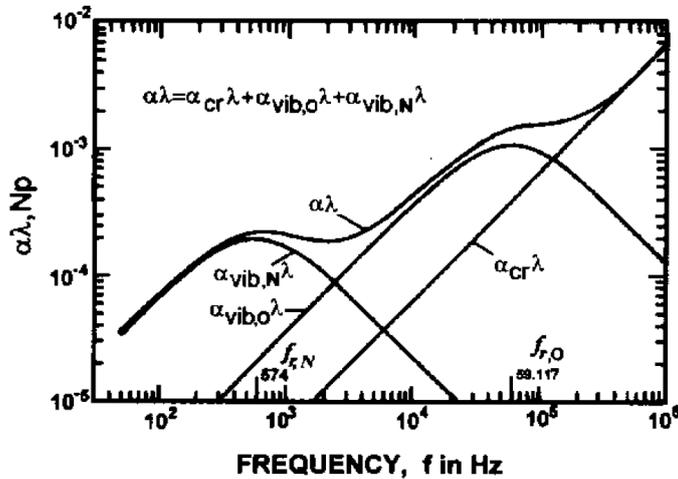


Figura 1.1: Absorción por unidad de longitud de onda para ondas acústicas en aire a 293.15 K, 101.325 kPa y 70 % de humedad relativa. Tomado del American National Standards Institute. $f_{r,N}$ y $f_{r,O}$ son las frecuencias de relajación vibracional del nitrógeno y el oxígeno respectivamente.

- *La estabilidad del canal de propagación* resulta fundamental para interpretar correctamente los resultados, no obstante, ésta depende críticamente de la temperatura y la humedad. Pequeñas variaciones en la temperatura pueden introducir gradientes térmicos que influyen de manera importante la calidad de las señales [8].
- *Baja velocidad de propagación.* Este inconveniente tiene mayor relevancia en aplicaciones de medida de rango, tales como el control de posición o sistemas de seguimiento, así como en la inspección en línea de defectos. El tiempo necesario para obtener una medida nunca podrá ser inferior al empleado en la propagación de la onda desde su emisión hasta su recepción.
- *Interferencia acústica.* Valores de densidad espectral máxima de ruido han sido reportados en un rango de frecuencia de hasta 40 kHz [11]. A su vez, ruido ultrasónico es creado en actividades que se realizan con frecuencia: dejar caer un lápiz sobre una superficie rígida, zarandear un juego de llaves, utilizar un teclado de un ordenador, así como el chasquido que se produce al abrir un bolsa de patatas fritas, son algunos ejemplos. Aún más, cabe mencionar como posibles fuentes de ruido ultrasónico los ventiladores, acondicionadores de aire, sistemas repelentes de ratas, alarmas antirrobo, máquinas de cocina, etc. Debido a ello, resulta siempre complicado estimar con exactitud la posición de un móvil ubicado junto una fuente de ruido. Este problema aún no ha sido investigado a fondo y es de actual interés científico [55].

1.2. Los Sistemas Emisor-Receptor con Ultrasonidos: Generalidades

Muchos sistemas ultrasónicos se basan en la obtención de información de su entorno por emisión y recepción de señales propagadas por el mismo. Dependiendo de cómo la señal ultrasónica ha sido modificada desde que sale de un emisor hasta que es recibida por un receptor, los sistemas ultrasónicos de transducción se pueden dividir en dos categorías generales a saber: 1. Sistemas de medida de distancia y 2. Sistemas de sensado o caracterización del canal de propagación, que engloba a todas aquellas

aplicaciones de caracterización del medio en los que la onda ultrasónica es modificada ya sea en su fase, en su amplitud o en su tiempo de vuelo.

Los sistemas basados en la medida de distancia emplean el tiempo de vuelo (TOF) y la amplitud de la señal recibida (eco) para determinar la presencia, distancia y tipo de reflector. Diferentes métodos inteligentes de evaluación y tipos de procesamiento permiten reconocer y clasificar los objetos, así como lograr su seguimiento. Este tipo de sistemas se utiliza principalmente en aplicaciones robóticas tales como sistemas de posicionamiento local con ultrasonidos (US-LPS) [125], navegación autónoma de robots [59], ecolocalización [117], sistemas de visión acústica, entre otros.

En las aplicaciones que emplean el segundo tipo de sistemas ultrasónicos, se evalúa el efecto de las variables a medir sobre la onda acústica transmitida. Por tanto, los parámetros a cuantificar suelen ser la velocidad de propagación, los cambios locales en la propagación (difracción y refracción), la dependencia de las variaciones observadas con la orientación y la frecuencia (anisotropía y dispersión), la atenuación, la impedancia acústica, el nivel de scattering, entre otros. Como aplicaciones generales encontramos los ensayos no destructivos (END), así como la estimación de propiedades mecánicas y termodinámicas del medio de propagación. Ver tabla 1.2

Sistemas Ultrasónicos	
Basados en medida de distancia	Caracterización del canal de propagación
Medidas de rango y espesores, posicionamiento mecánico, control de nivel en líquidos y sólidos, detección de objetos y/o personas, conteo de alta velocidad, Medición de tensión en bandas, Scanners 2D y 3D, imagen acústica, control y seguimiento de móviles, etc.	Medida de flujos volumétricos y de masa, concentración en gases, temperatura, presión dinámica, turbulencia en fluidos, constantes elásticas de materiales, inspección de defectos en transmisión, velocidad del sonido, propiedades físico-químicas de alimentos, reconocimiento de texturas, etc.

Tabla 1.2: Tipos de sistemas ultrasónicos y sus aplicaciones típicas.

En general, en US-A siempre son requeridos transductores con suficientes prestaciones en cuanto a:

1. Alta sensibilidad.
2. Ancho de banda.

3. Pauta direccional del campo emitido/recibido.
4. Baja impedancia acústica específica.
5. Robustez
6. Costo

Si bien siempre será mejor contar con dispositivos suficientemente robustos y de bajo costo, lograr que éstos presenten buenas prestaciones con respecto al resto de características no es un problema sencillo. A menudo resulta necesario optar por una solución de compromiso dependiendo de la tecnología utilizada o de la aplicación particular.

Una alta *sensibilidad* es siempre beneficiosa ya que valores altos de nivel de presión sonora (SPL) redundan en una relación señal/ruido (SNR) adecuada. Si además se dispone de un *ancho de banda* (BW) amplio (bajo factor de calidad Q), es posible aumentar el rango dinámico, empleando técnicas de espectro ensanchado (spread-spectrum), como por ejemplo en aplicaciones de inspección en modo transmisión [121]. También permite lograr mayores resoluciones en medidas de rango [104] ya que resulta posible emitir señales pulsadas de transitorios cortos; minimizando la zona muerta en aplicaciones en pulso-eco. No obstante, la amplitud de la respuesta acústica de un transductor disminuye conforme se aumenta su ancho de banda, por lo que en la práctica resulta siempre necesario llegar a una solución intermedia.

Seleccionar la *frecuencia ultrasónica de operación* viene determinado principalmente por el problema de aplicación. Incrementar la frecuencia, y por tanto disminuir la longitud de onda, permite obtener una mejor resolución en la medida de rango. Al mismo tiempo, el rango máximo de detección se reduce debido al efecto de la atenuación por absorción en el aire, como se vio anteriormente.

Con relación a la pauta direccional del campo ultrasónico emitido, dependiendo de la aplicación, puede resultar beneficioso tanto focalizar como hacer divergir adecuadamente la energía acústica. En el primer caso, se busca lograr patrones suficientemente estrechos y/o concentrar el haz emitido/recibido y así obtener una SNR adecuada. Para esto se suelen utilizar dispositivos planos adaptados a lentes de focalización (lente de Fresnel, espejos parabólicos, esféricos, etc.) [107]. En el segundo, se persigue garantizar una cobertura (área radiada) específica en conjunción con un nivel de

señal adecuado; lo cual es frecuente requerimiento en aplicaciones que involucren la medida precisa de rango a grandes distancias, tales como los US-LPS, la navegación autónoma, entre otras [126] [141]. En este caso, el patrón de emisión/recepción deseado puede ser obtenido diseñando transductores con geometrías complejas y modo de vibración adecuado como se menciona en el capítulo tres de este trabajo.

Finalmente, la impedancia acústica específica del material del transductor ultrasónico es también un factor determinante a tener en cuenta en US-A. La escasa adaptación de impedancias entre el aire y la gran mayoría de materiales de ingeniería usados en la fabricación de transductores causa que la mayor parte de la energía acústica se pierda por reflexión en el interior del propio transductor. Tradicionalmente se ha empleado, como medio de acoplamiento, agua en lugar del aire. Sin embargo, un acoplamiento fluido no resulta práctico en aplicaciones en las que no sea posible el contacto con el líquido o cuando el material a investigar es absorbente y pueda ocurrir la contaminación o daño de la muestra. Lo anterior, unido a los desarrollos recientes de nuevos materiales con baja impedancia acústica, ha originado que el uso del aire como acoplamiento sea cada vez más frecuente, convirtiéndose en un tema de creciente investigación en los últimos años [121] [49].

1.3. Tecnologías Utilizadas en US-A: Panorama Actual.

El panorama de las tecnologías de transductores para US-A ha estado dominado principalmente por las cerámicas piezoeléctricas, los piezocompuestos, los dispositivos electrostáticos y los polímeros piezoeléctricos, en particular, el fluoruro de polivinilideno (PVDF). En este trabajo, los ferroelectretos celulares son propuestos como una nueva alternativa viable e interesante para desarrollar transductores ultrasónicos.

En general, los transductores ultrasónicos mayoritariamente usados en US-A son fabricados utilizando *cerámicas piezoeléctricas (PZTs)*. Son, sin duda, la tecnología de mayor madurez en el panorama actual. Son inherentemente resonantes y por tanto de sensibilidad elevada, sin embargo requieren de una construcción especial para lograr un amortiguamiento adecuado y aumentar su muy escaso ancho de banda. Su impedancia característica (16 - 46 Mrayls) es muy diferente a la del aire

(≈ 400 Rayls), por lo que una capa de adaptación de $1/4$ de longitud de onda suele ser utilizada en la superficie activa para mejorar la eficiencia de transmisión. Para fabricar estas capas de adaptación se emplean materiales con muy baja densidad y velocidad de propagación, baja atenuación y buena sintonización a la frecuencia de trabajo, lo que con frecuencia es difícil de lograr [48]. Sin embargo, el uso de éstas en general limita el ya de por sí escaso ancho de banda del transductor. En cuanto al patrón de emisión/recepción, éste está determinado por el tamaño del transductor, así como por el modo de vibración a la frecuencia de resonancia, la cual a su vez depende de la geometría del transductor. Por ejemplo, transductores esféricos con un patrón omnidireccional donde la frecuencia de resonancia asociada depende del radio exterior y su espesor de pared [67].

Por su parte, los *piezocompuestos*, formados por una combinación de elementos piezocerámicos embebidos en una matriz polimérica pasiva, ofrecen una mejora en comparación con los PZTs estándar. Estos transductores suelen ser más eficientes, poseen un mayor ancho de banda y al tener una impedancia menor (3-15 MRayls) su adaptación con el aire es mejor [54] [43]. A pesar de ello, debido a la necesidad de utilizar una capa de adaptación para US-A, los piezocompuestos, al igual que los tradicionalmente basados en cerámicas piezoeléctricas, son principalmente utilizados en aplicaciones de banda estrecha.

Debido a la dificultad para fabricar materiales con impedancia característica baja, menor a 1 MRayl, surgió el interés por dispositivos con mecanismo de transducción de tipo *electrostático*. Básicamente, el transductor ultrasónico opera como una capacitancia variable compuesta por un substrato rígido (backplate) y una membrana delgada y flexible. Ver figura 1.2. Para lograr frecuencias de operación en la región de los MHz, es necesario utilizar membranas con espesores de menos de $5 \mu\text{m}$ [80].

Inicialmente los transductores capacitivos utilizaban backplates metálicos maquinados en conjunto con membranas poliméricas metalizadas, siendo posible operar hasta frecuencias cercanas a los 200 kHz. Posteriormente, se demostró que el tamaño, forma y características de la superficie del backplate tenían una influencia marcada en el ancho de banda y la sensibilidad del transductor resultante. Por esta razón, desde comienzos de los años noventa se ha investigado en técnicas de micromecanizado para lograr un mayor control sobre el acabado de las superficies. Diferentes esquemas de fabricación han sido propuestos, logrando transductores capacitivos mi-

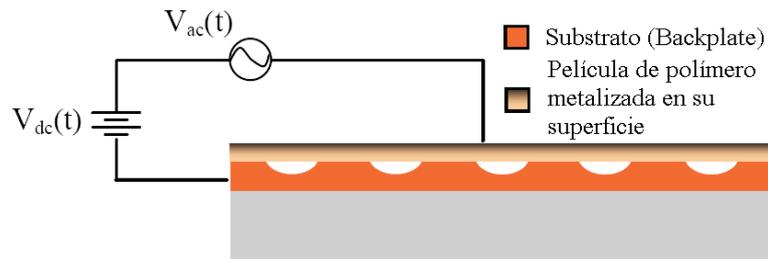


Figura 1.2: Representación de un transductor electrostático.

chromatados (cMUTs) que pueden operar a frecuencias mayores a 2 MHz [53] [92]. La figura 1.3 muestra un ejemplo típico de un transductor micromecanizado. Los agujeros grabados (etch holes) son típicamente de $3 \mu\text{m}$ de diámetro.

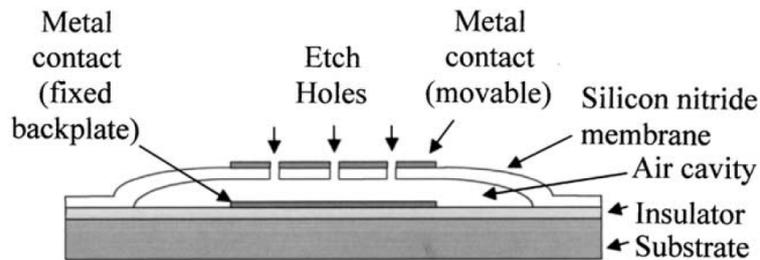


Figura 1.3: Diagrama esquemático de un transductor micromecanizado. Tomado de [80]

En general, la necesidad de emplear procesos de fabricación especiales, hace que construir estos dispositivos no sea económico. No obstante, recientemente han sido propuestos métodos de fabricación de menor costo utilizando MUMPS (multi-user microelectromechanical systems (MEMS) processes) [90] [76]. Los cMUTs poseen un ancho de banda mucho mayor que los piezocerámicos, aunque su eficiencia es menor que la de los piezocompuestos. Además, cuentan con el potencial de ser fácilmente integrados en circuitos electrónicos [22].

Los *transductores electrostáticos* o capacitivos, al poseer un material polimérico en su superficie, presentan una impedancia acústica baja y por tanto la adaptación con el aire es mejor que al usar PZTs o piezocompuestos ($\approx 4.7 \text{ MRayls}$). Sus principales desventajas son la necesidad de utilizar un voltaje de polarización,

su menor robustez y la complejidad de su proceso de fabricación, así como la poca versatilidad para lograr un patrón de emisión distinto al propio de los emisores planos. No obstante, en relación con este último aspecto, desarrollos recientes sobre superficies esféricas para enfocar el campo y lograr mayores sensibilidades han sido reportados [114]. La utilización de transductores capacitivos en US-A experimenta un importante desarrollo en aplicaciones tales como inspección/caracterización de materiales, imagen acústica, entre otras [64].

De otra parte, transductores fabricados con polímeros piezoeléctricos, como el **fluoruro de polivinilideno (PVDF)**, han sido utilizados en US-A. Diferentes configuraciones de transductores han sido reportadas, dependiendo del tipo de película utilizado, ya sea lisa o corrugada. En aplicaciones en aire, a bajas frecuencias, la generación con transductores de PVDF es lograda a través de variaciones en el perímetro descrito por la parte activa, no fija, del transductor. Esto es posible haciendo uso de películas anisotrópicas orientadas uniaxialmente, en los que el coeficiente piezoeléctrico longitudinal d_{31} es mucho mayor que el d_{32} . Ver figura 1.4

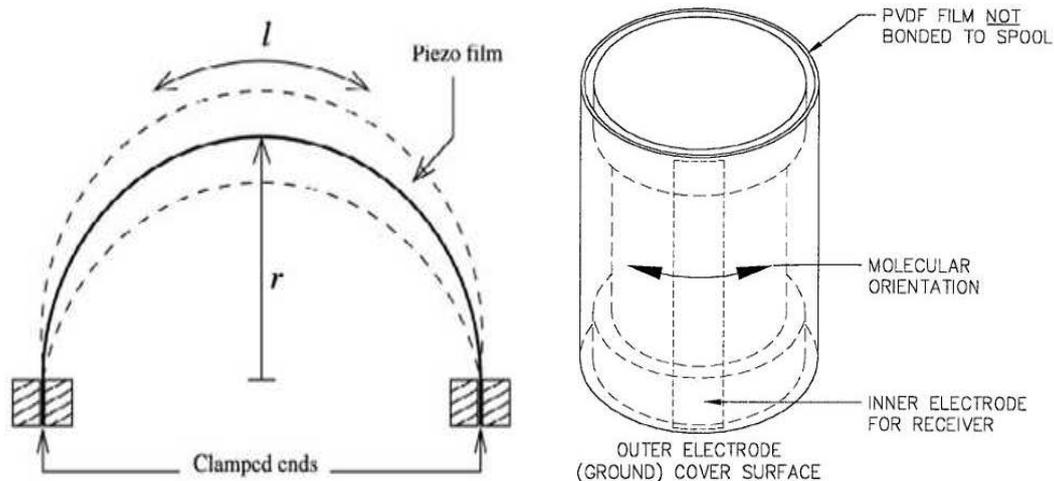


Figura 1.4: Principio de funcionamiento de transductores fabricados con PVDF para US-A. Izquierda: Transductor propuesto por Fiorillo [41]. Derecha: Transductor cilíndrico con patrón de emisión panorámico [83].

Empleando la película en su versión lisa, es posible diseñar transductores con buenas características en lo que a ancho de banda (8–10 kHz para una frecuencia

central alrededor de los 40 kHz) y potencia acústica se refiere, aunque su sensibilidad en transmisión suele ser un orden de magnitud menor que la de los piezo-cerámicos. A altas frecuencias, en el rango de los MHz, recientemente aplicaciones en imágenes acústica con transductores monoelementos apilados y focalizados han sido reportadas utilizando P(VDF/TrFE), copolímero del PVDF [119]. Los transductores de PVDF no son costosos y son mecánicamente más resistentes que los capacitivos. Como ventaja adicional, la película de PVDF posee una mejor adaptación con el aire que las cerámicas piezoeléctricas, con una impedancia acústica de aproximadamente 4.5 MRayls [24] [55] [41].

Usando PVDF corrugado, recientemente han sido diseñados transductores que, gracias a las múltiples ondulaciones hechas a la película lisa, proporcionan una mayor respuesta acústica comparada con la que se obtendría con transductores planos fabricados con la película PVDF original [123]. Su frecuencia recomendada de operación está entre los 200 y 300 kHz, lo que los hace útiles en aplicaciones de medida de rango cortas. El ancho de banda reportado de estos dispositivos (33 % relativo a una frecuencia de resonancia de 200 kHz) es similar al que exhiben los transductores fabricados con película lisa. En cuanto al patrón de radiación, los transductores corrugados emulan la directividad de un emisor plano de dimensiones similares.

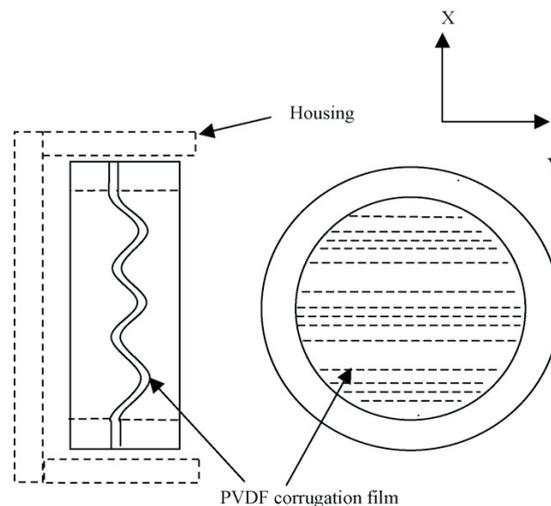


Figura 1.5: Esquema de un transductor fabricado con PVDF corrugado para aplicación en US-A. Tomado de [123].

A pesar de las ventajas que presenta el PVDF, su principio de operación basado en

variaciones de su longitud y su frecuencia de operación, determinada por el montaje mecánico, hacen que no sea recomendable para aplicaciones en la que sea necesario lograr patrones de radiación acústica arbitrarios, a medida o especificados. Sin embargo, debido al modo de vibración radial propio de los transductores fabricados con película lisa, obtener patrones de emisión panorámicos o polares (omnidireccionalidad en 2 dimensiones) es fácilmente realizable utilizando configuraciones cilíndricas [83] [35]. También, cabe mencionar que en los desarrollos reportados a la fecha, en aplicaciones como los sistemas de posicionamiento con ultrasonidos (US-LPS), se ha intentado lograr, para maximizar la cobertura, un patrón omnidireccional utilizando transductores de poco tamaño, con resultados parcialmente exitosos debido a la menor potencia acústica resultante [55].

En resumen, el panorama actual de los transductores empleados en US-A resulta diverso en el sentido de que las tecnologías existentes poseen características que se complementan unas a otras. Esto confirma el problema de compromiso siempre presente a la hora de diseñar transductores para una aplicación particular. Los nuevos ferroelectretos aparecen como nueva alternativa de diseño y desarrollo de transductores para US-A. Como se presenta a continuación, sus características electromecánicas y acústicas, así como su principio de operación, les hacen excelentes candidatos para fabricar transductores versátiles, con buenas prestaciones en cuanto a sensibilidad, ancho de banda, adaptación con el aire y facilidad de manipulación del patrón de emisión/recepción, sin dejar de lado su bajo coste.

1.4. Los Ferroelectretos Celulares (FCel)

En un ferromagneto, los dipolos magnéticos se ordenan en paralelo para dar una polarización permanente o magnetización, la cual presenta un comportamiento histérico en respuesta a un campo magnético periódico de suficiente intensidad. De forma análoga, los materiales aislantes eléctricos, cuyos dipolos se ordenan de forma parecida a los dipolos magnéticos de un ferromagneto, son llamados *ferroeléctricos*; aunque usualmente no poseen contenido de hierro.

En ferroelectricidad es posible también la polarización permanente de dipolos eléctricos, así como la histéresis de tal polarización en respuesta a un campo eléctrico periódico. Sin embargo, materiales no polares, es decir, que no poseen dipolos

moleculares permanentes, también pueden exhibir un comportamiento muy parecido al de un ferroeléctrico, como ha sido demostrado con diferentes plásticos porosos o celulares (foamed plastics). Para lograrlo, las cavidades interiores del polímero son sometidas a campos eléctricos elevados que generan dentro de ellas pequeñas descargas de microplasma, parecidas a un rayo. El material resultante posee cargas eléctricas positivas y negativas en las superficies opuestas de sus cavidades interiores, y se le denomina *ferroelectreto* [75]. Ver figura 2.2. Si bien el prefijo ferro viene dado por su comportamiento similar al de los materiales ferroeléctricos, el término electreto viene relacionado con la definición dada por Sessler [112], la cual expresa que un electreto es un material dieléctrico que exhibe una distribución de carga eléctrica cuasi-permanente, es decir que la constante de tiempo del decaimiento de la carga es mucho mayor que el período de uso o investigación del material.

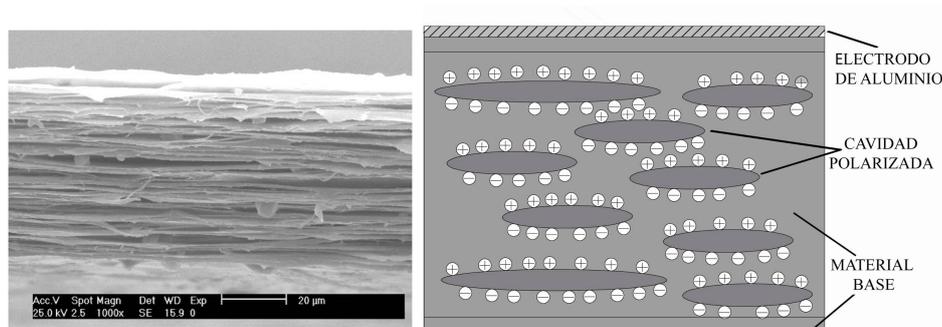


Figura 1.6: Izquierda: Sección transversal de un ferroelectreto celular (Película electromecánica Emfit), tomada por nosotros utilizando microscopía electrónica. Derecha: Representación esquemática de la distribución no simétrica de carga eléctrica permanentemente almacenada en el interior del material.

Cabe anotar que los electretos no sólo pueden exhibir una polarización interna debido a cargas atrapadas, como en el caso de los materiales no polares, sino también a dipolos moleculares orientados (llamados electretos polares) e inclusive a la combinación de ambos efectos. Tal vez el polímero piezoeléctrico más conocido, y que también posee la característica de electreto, es el PVDF, en el cual la actividad piezoeléctrica surge del cambio en la densidad dipolar de la red cristalina ante la aplicación de un esfuerzo mecánico o de un campo eléctrico. Para mayores detalles sobre polímeros ferroeléctricos, ver [84].

1.4.1. Principio de Operación.

En el caso de los nuevos ferroelectretos, no polares, el origen de la actividad piezoeléctrica es completamente diferente al propio de los polímeros ferroeléctricos. Los polímeros celulares, cargados internamente, resultan materiales inusuales en los que la simetría de centro se rompe a nivel macroscópico (las dimensiones de las cavidades interiores son del orden $100 \times 100 \times 10 \mu\text{m}^3$) y no “nanoscópico”, como ocurre en el PVDF, donde las dimensiones de una celda unitaria es de $0,858 \times 0,49 \times 0,256 \text{ nm}^3$ para la fase β . Por tanto, las cavidades cargadas de los polímeros celulares, perfectamente orientadas, constituyen “dipolos macroscópicos” intencionalmente creados [131]. Ver figura 1.7-c. La separación entre cargas ocurre gracias a que las superficies superior e inferior de las cavidades interiores creadas en el polímero base poseen cargas opuestas. La figura 1.7 también pretende mostrar la diferencia en el origen de la piezoelectricidad entre el PVDF y los ferroelectretos. El modelo más simple de piezoelectricidad se muestra en la figura 1.7-b, y está compuesto de partículas cargadas negativa y positivamente que está interconectadas por medio resortes de diferente constante de rigidez. Según el modelo propuesto por los hermanos Curie [108], el coeficiente piezoeléctrico e del material está dado por:

$$e = \frac{\partial T}{\partial E} = \frac{\partial D}{\partial S} = \frac{nq}{2} \frac{k_2 - k_1}{k_2 + k_1} a; \quad (1.2)$$

donde T , S , D y E son, respectivamente la tensión y la deformación mecánicas, el desplazamiento eléctrico y el campo eléctrico; n es la densidad de número de dipolos, q es la carga de la partículas que forman los dipolos, k_1 y k_2 son las constantes de resorte, y a es la longitud de la celda unitaria. Por consiguiente, el efecto piezoeléctrico es directamente proporcional a la diferencia en las constantes de los resortes. En los polímeros ferroeléctricos, una deformación positiva en la dirección 3 incrementa la distancia entre cadenas de dipolos, debido que las fuerzas electrostáticas y de van der Waals entre las cadenas son pequeñas en comparación con los fuertes enlaces covalentes que conforman la cadena ($k_1 > k_2$). Ver figura 1.7-a Por consiguiente, el incremento en el espesor lleva consigo un decremento en la densidad dipolar y por tanto una disminución de la carga en los electrodos y un valor negativo en el coeficiente piezoeléctrico $e_{33} = d_{33}/s^E$ (s^E es la compliancia a campo eléctrico constante o cero). En el caso de los polímeros celulares, una deformación positiva en la dirección

3 también incrementa el espesor de la muestra. Este incremento ocurre predominantemente en las cavidades interiores del material ($k_2 > k_1$), por lo que el momento dipolar incrementa en conjunto con la carga en los electrodos. En consecuencia, los ferroelectretos poseen un coeficiente piezoeléctrico e_{33} positivo y por ende su piezoelectricidad es intrínseca. Cabe anotar que los coeficientes piezoeléctricos de los polímeros celulares tienen el mismo signo que los correspondientes a las cerámicas piezoeléctricas, tales como los PZTs. Dado que los polímeros pertenecen al grupo de

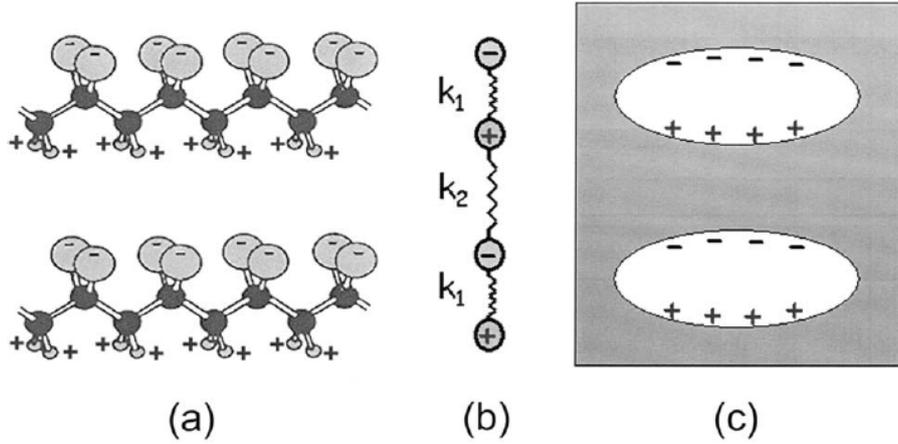


Figura 1.7: Separación de cargas en polímeros piezoeléctricos. La separación es mucho menor en el material ferroeléctrico (a) que en el ferroelectreto (c). Los resortes (b) representan la fuerzas de acoplamiento dentro y entre los dipolos. Tomado de [75]

simetría ortorómbica $mm2$, el tensor piezoeléctrico está compuesto por 5 coeficientes piezoeléctricos, a saber: longitudinales d_{31} y d_{32} , transversal d_{33} y cortantes d_{15} y d_{24} :

$$d = \frac{\partial D_i}{\partial T_\alpha} = \frac{\partial S_\alpha}{\partial E_i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

donde los subíndices $i = 1 - 3$ y $\alpha = 1 - 6$. Si bien los valores de los coeficientes longitudinales de los ferroelectretos son prácticamente despreciables, en comparación con los propios del PVDF ($d_{31} = 16$ pC/N y $d_{32} = 3$ pC/N para PVDF uniaxialmente estirado y $d_{31} = d_{32} = 5$ pC/N para PVDF biaxialmente estirado), no ocurre igual con el coeficiente piezoeléctrico transversal d_{33} , el cual determina la sensibili-

dad del material ante esfuerzos normales a la superficie. En general valores de d_{33} de hasta varios cientos de pC/N o pm/V han sido reportados, tanto para el efecto piezoeléctrico directo como inverso, utilizando polímeros celulares basados en películas de polipropileno (PP), lo cual equivale a un orden de magnitud por encima que los polímeros ferroeléctricos convencionales [134] [87] [86] [63]. Cabe destacar que a través de diferentes procedimientos especiales han sido reportados valores cuasiestáticos de coeficientes piezoeléctrico d_{33} , de 790 pC/N [97] y 2000 pC/N [143], utilizando polipropileno celular. La tabla 1.3 muestra una comparación entre los valores típicos de coeficiente piezoeléctrico d_{33} de diferentes tecnologías de transductores.

Si bien los ferroelectretos no requieren un voltaje de polarización como los transductores electrostáticos, recientemente ha sido reportada la dependencia lineal del coeficiente d_{33} ante la aplicación de un voltaje dc, adicional a la polarización permanente, a la muestra de ferroelectreto [61]. Por ejemplo, en el rango ultrasónico, la sensibilidad medida interferométricamente, es casi duplicada aplicando un voltaje dc de 1000 V. Dicha dependencia se mantiene para voltajes dc tanto positivos como negativos. Ver figura 1.8.

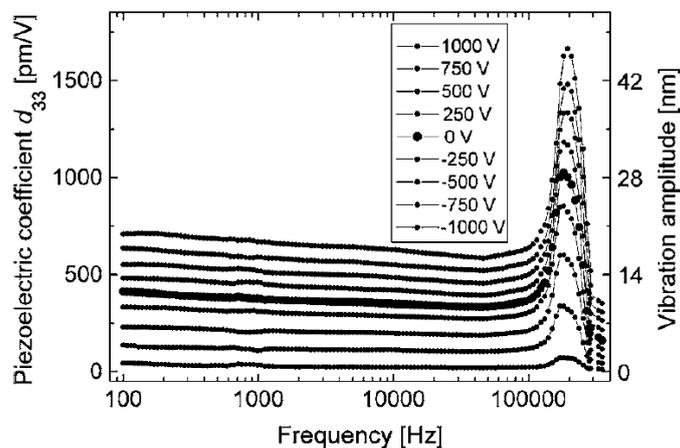


Figura 1.8: Respuesta en frecuencia del coeficiente d_{33} para voltajes dc, adicionales a la polarización permanente, entre -1000 y 1000 V; medidos interferométricamente sobre una película ferroelectreto. Tomado de [61].

Material	d_{33} [pC/N]
Cuarzo	$2(d_{11})$
PZT	171
PVDF	-33
Polipropileno Celular	100 - 2000

Tabla 1.3: Comparación del coeficiente d_{33} de diferentes materiales piezoeléctricos.

1.4.2. Materiales Ferroelectretos

El polipropileno celular (PPc) ha sido el primer material para el que se acuñó el término ferroelectreto. Inicialmente fue desarrollado por el Centro Finlandés de Investigación (VTT) y patentado en 1987 por Kirjavainen [69]. A la fecha es el único ferroelectreto que es producido de manera consistente en cuanto a calidad y cantidad. Su uso tecnológico está limitado a temperaturas entre la de transición vítrea y los 100°C, a la cual comienza a degradarse con el tiempo.

El PPc es un material poroso de celda cerrada que posee cavidades de forma cuasi elíptica, que algunos autores asemejan a la forma de un ojo o de una lente convergente. Las dimensiones de dichas cavidades oscilan entre 10 μm y 100 μm en la dirección lateral, mientras que su dimensión vertical depende del tratamiento de expansión a la cual sea sometido el material. Hasta ahora, las cavidades interiores en las películas poliméricas han sido creadas de tres formas diferentes [140]:

- El proceso de creación de las burbujas interiores puede ser iniciado en el polímero fundido antes o durante su extrusión, utilizando agentes químicos espumantes o la inyección de algún gas.
- Por medio de la iniciación de grietas en la vecindad de micropartículas orgánicas agregadas al material durante su extrusión. Posteriormente, por medio de procesos controlados de estiramiento y/o inflamiento del material, las grietas se convierten en cavidades de geometría irregular y por tanto anisotrópicas.
- Utilizando películas poliméricas saturadas con CO_2 supercrítico a presiones superiores a 6 MPa.

La película de PPc más investigada es la HS01 (HS indica High Sensitivity), cuya manufactura se realiza en tres pasos principales: 1. El PP es dopado con pequeñas

micropartículas y posteriormente es estirado en aproximadamente 10 veces la longitud original. El material resultante presenta cavidades aplanadas y en la literatura se hace referencia a él con el acrónimo OS01 (OS = Original Sensitivity). 2. La película de OS01 puede ser inflada siguiendo un proceso denominado “expansión por difusión gaseosa”, en el cual la muestra cambia de espesor gracias a la expansión del gas atrapado en las cavidades [69]. 3. el material poroso resultante es cargado eléctricamente por medio de la aplicación de una descarga de corona de por lo menos 20 kV. En este paso, microdescargas capacitivas ionizan el gas contenido en las cavidades interiores produciendo portadores de carga que se mueven por la acción del campo eléctrico hacia la superficies del polipropileno donde quedan atrapadas; como se muestra en la figura 1.9.

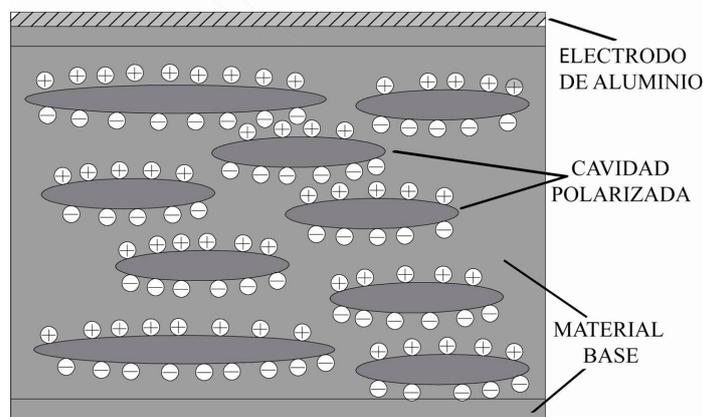


Figura 1.9: Modelo de distribución de carga dentro del polímero celular.

La película electromecánica EmfitTM, distribuida comercialmente por la empresa Emfit Ltd [2], es fabricada siguiendo el procedimiento descrito anteriormente para la HS01. Esta película constituye el material base utilizado en el desarrollo de los transductores descritos en este trabajo de tesis.

La gran desventaja de los ferroelectretos fabricados con PPc es la baja estabilidad térmica de la densidad de carga atrapada a temperaturas mayores a 50°C. Sin embargo, a temperatura ambiente y humedad moderada, su densidad de carga puede permanecer invariable por décadas. A mayor temperatura de almacenamiento y humedad, mayor será la velocidad de decaimiento de la densidad de carga.

Recientemente, materiales ferroelectreto fabricados con PET (PoliEtielen Teraf-

talato), COC (Copolímeros de Ciclo Olefina) y COP (Polímero de Ciclo Olefina) han sido manufacturados de manera similar al PPc, aunque con menor actividad piezoeléctrica [139].

Especial mención merecen los fluoropolímeros celulares, en particular el PTFE (politetrafluoretilen) y el FEP(copolímero fluorinado de polipropileno y etileno). Estos electretos no polares poseen la mayor estabilidad de densidad de carga entre los polímeros, lo que les hace especialmente adecuados para la fabricación de ferroelectretos. Sin embargo, con ninguno de los dos puede seguirse el proceso de manufactura de los ferroelectretos basados en PPc. Por consiguiente, para crear una estructura con cavidades de aire se utilizan capas de FEP [7] o capas alternadas de FEP y PTFE [142], las cuales se fusionan por calor, a la vez que se ejerce presión con una rejilla de metal. La figura 1.10 muestra el proceso de preparación así como una micrografía de la sección transversal de un ferroelectreto de cinco capas fabricado con FEP y PTFE. Los ferroelectretos celulares resultantes poseen un coeficiente piezoeléctrico, medido por interferometría, entre 150 pC/N y 700 pC/N, a frecuencias fuera de la resonancia. Además su densidad de carga es estable a temperaturas de hasta 90°C [142].

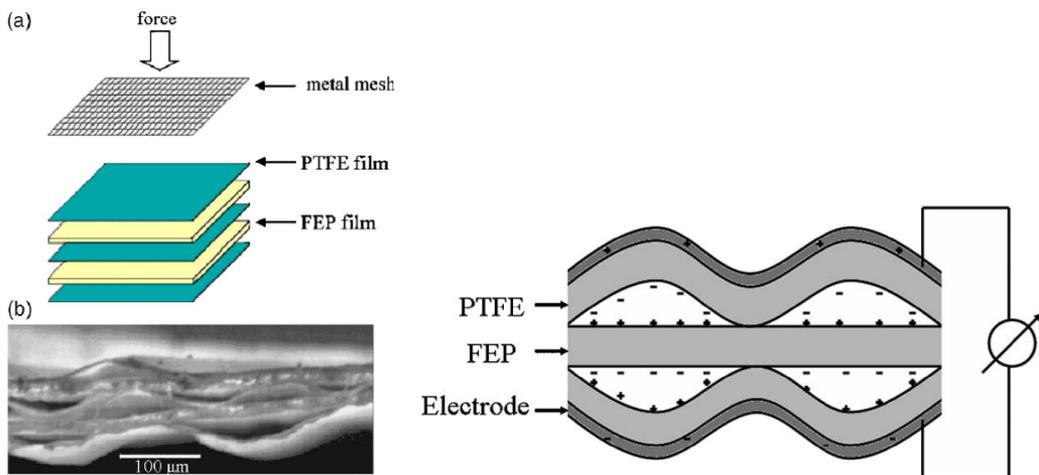


Figura 1.10: Izquierda: Procedimiento para fabricar una película fluorocarbonada de estructura celular (a) y fotografía de la sección transversal de una película de 5 capas (b). Derecha: Modelo esquemático de la distribución de carga en una muestra de película fluorocarbonada de tres capas después de ser polarizada. Tomado de [142].

1.4.3. Propiedades Electromecánicas de los Ferroelectretos

Determinar las propiedades electromecánicas de los ferroelectretos y su dependencia con el proceso de fabricación resulta fundamental para su posterior aplicación como transductores. Diversos métodos han sido propuestos para estimar los coeficientes piezoeléctricos de estos nuevos materiales. Entre ellos se encuentran métodos cuasiestáticos basados en la aplicación de una presión conocida sobre la muestra piezoeléctrica, perfilometría de contacto, dilatometría capacitiva, espectroscopía dieléctrica e interferometría láser, siendo éstos dos últimos los más utilizados.

El método de Espectroscopía Dieléctrica (ED) hace uso de la medida del espectro de la capacitancia compleja de una muestra de material. Además, con la información extraída de las resonancias piezoeléctricas del material, es posible determinar parámetros elásticos y piezoeléctricos del material [3]. Una película ferroelectreto de PPc puede ser considerada como un material piezoeléctrico homogéneo siempre que la longitud de onda sea mucho más grande que la dimensión de las cavidades interiores en la dirección 3 (a lo largo del espesor). Para una muestra de geometría rectangular de longitud l , ancho w y espesor h , donde $l \gg w \gg h$, tres frecuencias de resonancia distintas pueden ser obtenidas, correspondientes al modo respectivo de cada dimensión. Si la muestra está restringida lateralmente (“clamped”), únicamente el modo espesor es observado. Usualmente las vibraciones de espesor en películas delgadas pueden ser consideradas como lateralmente restringidas, incluso cuando los electrodos cubren la totalidad de la superficie de la muestra, ya que la frecuencia de resonancia en modo espesor es por lo menos 1 orden de magnitud mayor que la correspondiente a los modos laterales [81]. Para un material como el PPc, que posee coeficientes d_{31} y d_{32} pequeños (≈ 2 pC/N [86]), el factor de acoplamiento en la dirección 3 puede ser aproximado por:

$$k_t = d_{33} \sqrt{\frac{c_{33}}{\epsilon_{33}}} \quad (1.4)$$

donde c_{33} es el módulo de elasticidad y ϵ_{33} es la permitividad de la muestra a deformación constante. Este factor define la eficiencia del material transductor en la conversión de energía, tanto de eléctrica a mecánica, como a la inversa.

Bajo las mismas suposiciones anteriores, la capacitancia compleja \tilde{C} de una mues-

tra vibrando en modo espesor puede calcularse como:

$$\tilde{C}(\omega) = \frac{\epsilon_{33}lw}{h} \frac{1}{1 - k_t^2 \frac{\tan(\omega/4f_a)}{\omega/4f_a}} - iC_{loss} \quad (1.5)$$

donde ω es la frecuencia en radianes y el término $-iC_{loss}$ describe las pérdidas dieléctricas inherentes de la muestra. f_a es la frecuencia de antiresonancia del oscilador y se obtiene experimentalmente del espectro de la capacitancia. El valor teórico de f_a corresponde con la frecuencia de resonancia de una onda propagándose en la dirección 3 de una película delgada. Si la muestra está adherida a un substrato rígido, de la ecuación de movimiento de Newton, se obtiene:

$$f_a = \frac{1}{4h} \sqrt{\frac{c_{33}}{\rho}} \quad (1.6)$$

donde ρ es la densidad del ferroelectreto celular. Para el caso en que la muestra está únicamente restringida lateralmente, el valor de f_a es dos veces el obtenido con la ecuación (1.6).

Conocidos $C(\omega)$, ρ , h y f_a , es posible obtener los parámetros piezoeléctricos que caracterizan a una película ferroelectreto operando en modo espesor: c_{33} , k_t y d_{33} . Ver referencia [81].

Wegener, utilizando ED [134], reporta la dependencia entre la densidad relativa del material (ρ/ρ_{pp} , donde ρ_{pp} es la densidad del polipropileno) con el módulo de elasticidad y su correspondientes sensibilidad en la dirección 3, expresada en el valor del coeficiente d_{33} . Ver figura 1.11. El módulo de elasticidad presenta un mínimo conforme se incrementa el tamaño de las burbujas en el PPc. Sin embargo, mayores niveles de inflamamiento hacen que las burbujas cambien de una forma cuasi-elíptica a otra más parecida a una esfera, haciendo que la rigidez del material aumente, con una consecuente disminución en el valor del coeficiente d_{33} . Asimismo, en la figura 1.12 se muestra la frecuencia de resonancia en modo espesor como función de la densidad relativa, para diferentes películas de PPc. Se aprecia como la frecuencia de resonancia incrementa conforme aumenta la densidad relativa del material, alcanzándose frecuencias de hasta 2 MHz. Este comportamiento se atribuye al efecto combinado del módulo de elasticidad, el espesor de la película y su densidad, de acuerdo a lo expresado en la ecuación (1.6).

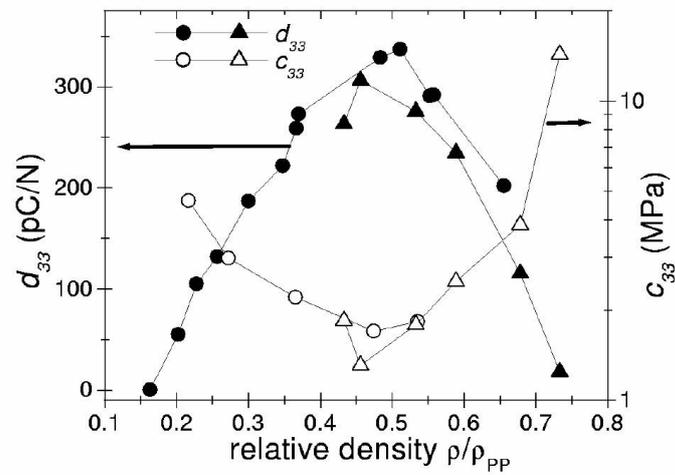


Figura 1.11: Coeficiente piezoeléctrico d_{33} y módulo de elasticidad c_{33} de diferentes ferroelectretos basados en PPc; cargados con el mismo procedimiento. Tomado de [133]

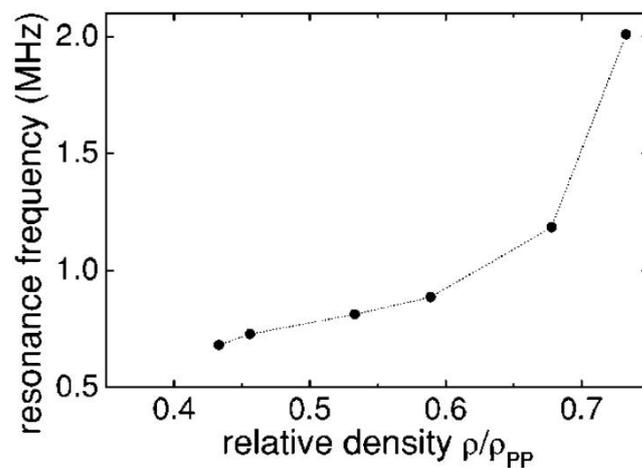


Figura 1.12: Resonancia en modo espesor como función de la densidad relativa. Medida con muestras de PPc con diferente estado de inflamamiento. Tomado de [134].

La figura 1.13 muestra la dependencia estimada entre la velocidad del sonido en el PPC v_3 , en la dirección del espesor de la película, con su densidad relativa. Se observa una velocidad del sonido de aproximadamente 150 m/s para densidades relativas extremas de aproximadamente 0.2 y 0.75, exhibiendo un mínimo a aproximadamente 0.5, el cual corresponde con un máximo en la sensibilidad del material. De la gráfica también es posible inferir la impedancia acústica característica del material $Z = \sqrt{\rho c_{33}} \approx 0,03$ MRayls para una densidad relativa de 0.5 y una densidad de 950 kg/m^3 del polipropileno. Este valor de impedancia acústica es el más bajo de todas las tecnologías utilizadas en US-A.

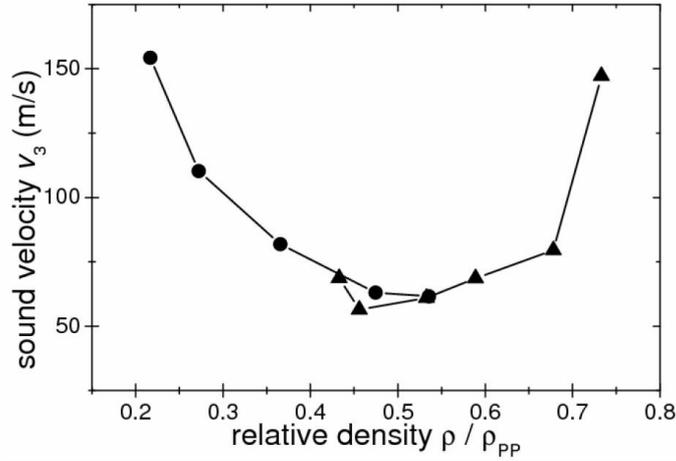


Figura 1.13: Velocidad del sonido como función de la densidad relativa. Calculada para diferentes ferroelectretos basados en PP. Tomado de [133]

De otra parte, la Interferometría Láser (IL) permite obtener el coeficiente d_{33} de manera directa, haciendo uso del efecto piezoeléctrico inverso. Un voltaje ac V es aplicado a la muestra y la variación del espesor (x) de la muestra es medido, de manera que $d_{33} = \frac{x}{V}$. Utilizando IL, Zhang et al. [144], presenta resultados de caracterización, utilizando interferometría láser, de las películas ferroelectreto VHD40 y VHD50 (espesores originales de $40 \mu\text{m}$ y $50 \mu\text{m}$ respectivamente) proporcionadas por el fabricante alemán Trespaphan y fabricadas con polipropileno. La figura 1.14 muestra la dependencia experimental entre el espesor y la frecuencia de resonancia de la película VHD50 después de ser sometida a cambios de espesor por medio de la aplicación de alta presión durante horas. La muestra medida fue adherida a un

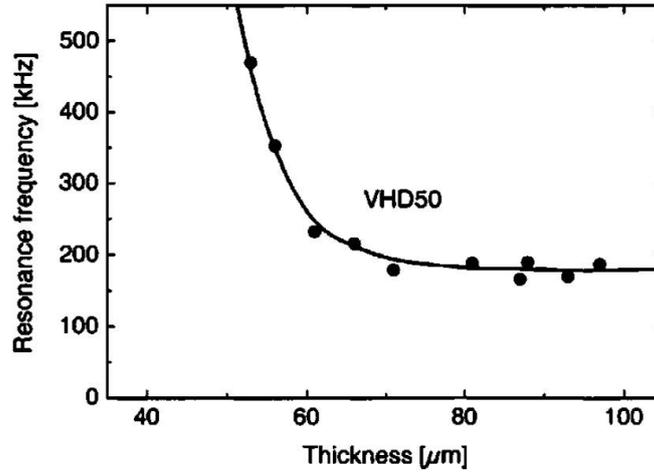


Figura 1.14: Frecuencia de resonancia versus espesor, para películas ferroelectreto VHD50; después de metalizadas. Tomado de [144]

substrato metálico utilizando cinta adhesiva de doble cara. En ese mismo trabajo, Zhang propone una modificación, basada en resultados experimentales, a la ecuación (1.6), de manera que:

$$f_a = \frac{1}{\sqrt{13}h} \sqrt{\frac{c_{33}}{\rho}} \quad (1.7)$$

A partir de esta ecuación, valores de módulo de Young de 4.4 MPa y 1.3 MPa son obtenidos de la figura 1.14 para espesores de 53 μm y 97 μm respectivamente.

A manera de conclusión, es importante resaltar que para obtener valores altos de sensibilidad (d_{33}) es necesario someter el material celular original a procesos de expansión que redunden en una disminución del módulo de elasticidad, así como en un incremento en la capacidad de carga (chargeability, del inglés) de las burbujas interiores. De acuerdo con la ley de Paschen [112], voltajes relativamente altos son necesarios para iniciar microdescargas en burbujas de espesor entre 1 μm y 5 μm . Sin embargo, después de ser expandidas hasta espesores de 10 μm o más, el voltaje requerido para cargar dichas cavidades se reduce, haciendo que las muestras sometidas a procesos de expansión sean cargadas más fácilmente [144].

Finalmente, al determinar las propiedades electromecánicas de los ferroelectretos, el valor obtenido de d_{33} está asociado al método con el cual es estimado. El motivo de

este comentario radica en que existe cierto descuido en la literatura al referirse a dicho coeficiente. Diferentes métodos pueden arrojar resultados distintos para la misma muestra, a la misma frecuencia y presión [142]. En general los valores obtenidos con métodos cuasiestáticos suelen arrojar valores de d_{33} más elevados, sin embargo, no son representativos del comportamiento del material en el rango ultrasónico. En cuanto al método ED, el valor de d_{33} obtenido se asume constante a diferentes frecuencias, sin embargo, los resultados obtenidos por interferometría láser (IL) muestran que existe una dependencia de dicho coeficiente con la frecuencia, la cual es mucho más notoria a frecuencias cercanas a la resonancia. Esta dependencia resulta determinante en US-A, por lo que la IL es el método preferido en este trabajo de tesis; también empleado extensamente por otros autores. Además permite realizar una medida de la distribución local de las propiedades de la muestra, lo cual no es posible con ED.

1.4.4. Eficiencia en la Generación y Detección de Ultrasonidos

Para comparar la eficiencia de un sistema emisor-receptor empleando diferentes tecnologías es necesario definir el régimen de aplicación. Por ejemplo, cuando se requieren señales pulsadas, a menudo es deseable contar con un ancho de banda plano. Por otra parte, con un ancho de banda estrecho es posible lograr eficiencias altas operando a la frecuencia de resonancia.

El factor de acoplamiento k_t , descrito en la sección anterior, define la eficiencia del material transductor en la conversión de energía, de eléctrica a mecánica y viceversa. Recientemente se ha introducido la cifra de mérito (FOM) para comparar la eficiencia de un sistema emisor-receptor de ultrasonidos en aire [19] [28]. Esta proporciona una medida del ratio entre la energía aplicada a un emisor y la recibida por un receptor de idénticas características ubicado en el campo lejano de aquel; considerando un frente de ondas plano y que las reflexiones mutuas son despreciables. La eficiencia de tal sistema emisor-receptor está dada por:

$$\frac{E_o}{E_i} = k_t^2 T_i T_o k_t^2 = k_t^4 \frac{Z_{transd}^2 Z_{air}^2}{(Z_{transd} + Z_{air})^4} \approx k_t^4 \frac{Z_{air}^2}{Z_{transd}^2}; \Leftrightarrow Z_{transd} \gg Z_{air} \quad (1.8)$$

donde, E_i representa la energía aplicada a la entrada del transductor emisor, E_o

Propiedad	Ferroelectretos	PVDF	Piezocomp.	PZTs
Densidad ρ [kg/m ³]	≈ 389	1780	1000-5000	4000-8000
Permitividad ϵ_{33} [10 kHz]	1.12-1.23	12	50-500	150-3500
Pérd. dieléct. $\tan\delta$. [10^{-3}]	1	10	1-100	1-10
Factor de acopl. k_t	0.044	0.11-0.15	0.65	0.35-0.55
d_{33} [pC/N]	25 - 2000*	20-35	50-300	70-600
Vel. sonido [m/s]	70 - 150	2200	≈ 3000	4000-6000
Imped. acústica [MRayl]	0.028	3.9	3-15	16-48
FOM [GRayl ⁻²]	4177	25	793	39
Temp. Oper. [°C]	-20 - 50	+80	+150	+300

Tabla 1.4: Propiedades de materiales utilizados en ultrasonidos para aplicaciones en aire. * Límite superior reportado con mediciones cuasiestáticas

es la energía a la salida del transductor receptor. T_i y T_o son, respectivamente, los coeficientes de transmisión de las interfases emisor-medio y medio-emisor. Z_{transd} y Z_{air} representan, respectivamente, las impedancias acústicas características del material de los transductores y del aire. De la ecuación anterior se define la figura de mérito como:

$$FOM = \frac{k_t^4}{Z_{transd}^2} \quad (1.9)$$

Las películas ferroelectretos basadas en PPc, incluyendo a la película Emfit, poseen un factor de acoplamiento bajo, de aproximadamente 0.044. Sin embargo, su impedancia acústica de apenas 0.03 MRayls, significativamente menor que las de otros materiales, hace que su FOM sea un orden de magnitud mayor que el correspondiente a las otras tecnologías tradicionalmente utilizadas en aire. Por consiguiente, la eficiencia de un sistema emisor-receptor fabricado con ferroelectretos resulta mayor que la de los piezocompuestos y PZTs. A la fecha, hasta donde nos consta, no se han reportado resultados experimentales que corroboren la validez de la FOM. No obstante, su deducción hace pensar que utilizando una electrónica adecuada tanto de excitación, como en recepción, es posible obtener una sensibilidad combinada por lo menos comparable a la de los transductores piezocerámicos o piezocompuestos. La tabla 1.4 resume los rangos típicos reportados en la literatura para las diferentes tecnologías empleadas en la fabricación de transductores para US-A.

Dispositivo	Área de aplicación	Ventaja relativa de los FCEl
Detector de movimiento	Bio-sensores, robótica, sistemas de control, etc.	Formas variables, alta sensibilidad, no intrusivos
Micro-actuadores	Microactuación, robótica sistemas de control, etc.	Formas variables, poca masa.
Transductores de presión	Biosensores sistemas de control, etc.	Forma variable, amplio rango de frecuencia, tamaño pequeño
Detectores de carga planos	Cuidado médico, seguridad, etc.	Grandes áreas, ligeros, alta sensibilidad, no intrusivo
Micrófono piezoeléctrico	Tecnología de las comunicaciones, etc.	Buena adaptación con el aire, buena sensibilidad.
Altavoces Piezoeléctricos	Control activo de ruido, industria musical	Buena adaptación con el aire, grandes áreas y formas variables
Transductores Ultrasónicos	Diagnóstico médico, comunicaciones	Buena adaptación con gases y fluidos, grandes áreas y formas variables

Tabla 1.5: Diferentes dispositivos y aplicaciones propuestos por [46] para desarrollar con ferroelectretos

1.4.5. Aplicaciones de los Ferroelectretos

A la fecha, diversas aplicaciones han sido sugeridas y demostradas utilizando ferroelectretos basados en PPc [46] [131]. Ver tabla 1.5. Estas aplicaciones son a menudo similares a las de otras películas piezoeléctricas como los polímeros ferroeléctricos. Sin embargo, la diferencia entre la propiedades estructurales de los ferroelectretos y los ferroeléctricos, hacen que sean especialmente adecuados para aplicaciones diferentes.

Algunos ejemplos de aplicaciones corresponden a sensores cuasiestáticos para la detección de movimiento, como también para control de tráfico de coches y otros vehículos, así como la detección de caminantes [94]. Otra área de aplicación es la monitorización de variables fisiológicas vitales como el pulso cardíaco [115] y la detección de sobresaltos durante el sueño [5]. Cabe resaltar la “silla EMFi” para balistocardiografía, la cual consiste en una silla común instrumentada con película ferroelectreto en el asiento y el respaldo [65] [10]. También, utilizando ferroelectretos basados en PP han sido implementados teclados, dispositivos tipo tablet sensibles al tacto, así como sensores de posición de la fuerza aplicada [39]. Un desarrollo novedoso en esta área lo constituye la combinación de los ferroelectretos con transistores de efecto de cam-

po para fabricar sensores de contacto, interruptores activados por presión e inclusive micrófonos y multitransductores flexibles de grandes áreas [50]. Además, sensores trabajando en el rango de frecuencia entre 50 Hz y 23 kHz son producidos para operar como micrófonos para instrumentos musicales. Esta aplicación es probablemente la más extendida, en términos del volumen de dispositivos manufacturados a la fecha [1].

En cuanto a la aplicación de los ferroelectretos como sensores y/o actuadores en US-A, aplicaciones como la caracterización e inspección de materiales sin contacto, así como la medida de flujo de gas, los sistemas de posicionamiento y navegación autónoma de robots, interfaces hombre-máquina, ecolocalización, entre otras, son de interés actual en el ámbito científico [37] [32] [34] [117].

1.5. Resumen y Conclusiones

El panorama actual de las tecnologías de transducción utilizadas en US-A se presenta diverso. Las condiciones propias de una aplicación determinada, en conjunto con las características de cada tecnología hacen que la tarea de diseñar transductores resulte, en general, en un problema de compromiso. Más aún, ocurre que las aparentes limitaciones de una tecnología para cierto uso, pueden resultar ventajosas en otro ámbito de aplicación. La figura 1.15 presenta un resumen del contenido del capítulo. Observando los esquemas es posible comparar cualitativamente las diferentes tecnologías utilizadas en US-A, teniendo como base criterios como sensibilidad, ancho de banda, madurez industrial de la tecnología, adaptación con el aire, robustez, facilidad de uso y manipulación, coste y flexibilidad mecánica. En este contexto los ferroelectretos celulares se presentan como una tecnología de fácil uso, de gran flexibilidad mecánica, bajo costo y además acústicamente adaptada para aplicaciones en aire. Su baja robustez, así como su inmadurez en aplicaciones de ámbito industrial son sus principales desventajas comparativas. Hasta la fecha, los valores reportados de sensibilidad acústica de los transductores basados en ferroelectretos, resultan moderados; principalmente debido a la baja sensibilidad de la película Emfit, la cual es la de mayor utilización al ser la única disponible comercialmente. Sin embargo, el potencial real de los ferroelectretos está aún por demostrarse, dependiendo de la aparición en el mercado de nuevas películas ferroelectreto, con mayor estabilidad térmica en su densidad de carga y con una sensibilidad incrementada en el rango ultrasónico;

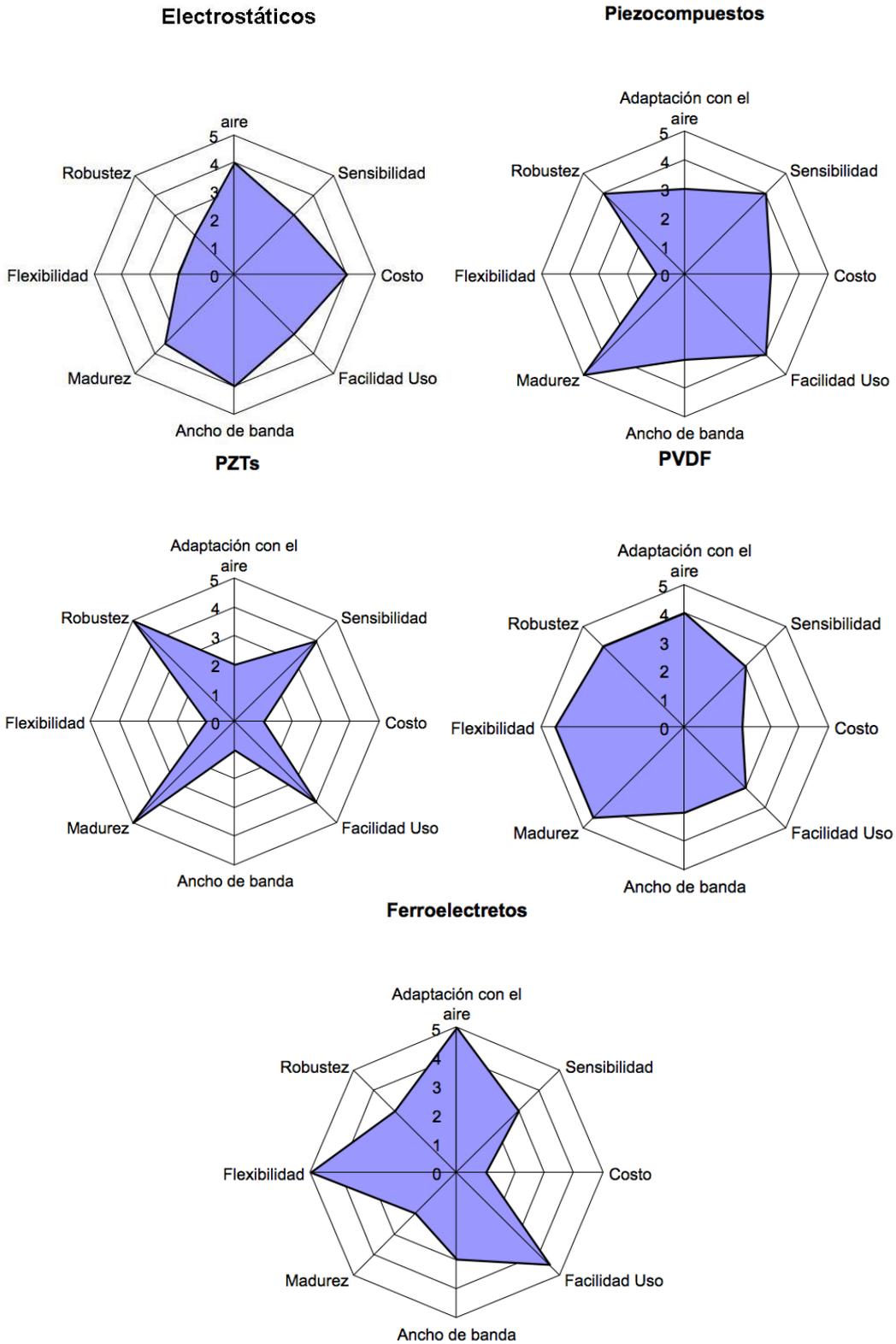


Figura 1.15: Resumen cualitativo de las características principales de las transductores fabricados con las diferentes tecnologías utilizadas para la generación de US-A

todo ello unido al diseño de una electrónica tanto de excitación y como de recepción especialmente adaptada a las características electromecánicas de los ferroelectretos. Mediante este trabajo científico pretendemos realizar una contribución a la utilización de los ferroelectretos celulares en aplicaciones ultrasónicas en aire.

CARACTERIZACIÓN DE TRANSDUCTORES FABRICADOS CON Emfit.

2.1. Introducción

Desde mediados de los años setenta se ha venido investigando con electretos fabricados a partir de diferentes materiales poliméricos como polietileno, poliuretano, Teflón, poliestireno, PVDF y polipropileno. En general, las películas estudiadas han estado constituidas por estructuras sólidas y homogéneas; sin embargo, materiales no uniformes, fabricados a partir de múltiples capas de diferente módulo de elasticidad y con carga espacial permanente, también han mostrado propiedades electromecánicas interesantes [66]. Fue a partir de las características observadas en estas estructuras multicapa que se concibieron los electretos de estructura celular de base polimérica, como la película Emfit (también conocida en la literatura como película electromecánica EMFi). Ésta fue patentada mundialmente en 1987 por Kirjavainen [69] y desarrollada originalmente en el Technical Research Centre of Finland (VTT). Actualmente es comercializada por la compañía finlandesa Emfit Ltd.

La película electromecánica Emfit es básicamente un electreto de estructura celular, cargado espacialmente y de manera permanente en sus cavidades interiores. Este tipo de película “imita” a los materiales ferroeléctricos, por lo que suelen ser llamados

ferroelectretos, ya que muestran características “piezoeléctricas” comparables a los materiales piezoeléctricos de naturaleza cerámica. Si bien los materiales electreto son comunes en la naturaleza (el cuarzo y otras formas de dióxido de silicio se dan naturalmente), hoy en día, la mayoría de los ferroelectretos se están fabricando a partir de polímeros, como polipropileno (PP), polietilenteraftalato (PET), fluoropolímeros, etc. [124] [95] [62] [113].

En el proceso de fabricación de la película, el material base, polipropileno, es coextruido y especialmente preparado con partículas inorgánicas en su interior, para posteriormente ser estirado biaxialmente. Durante este proceso de estiramiento, las partículas hacen las veces de concentradores de esfuerzos, ocasionando microgrietas que finalmente generan las cavidades interiores que conforman la estructura celular. Seguidamente, el tamaño de éstas es aumentado o modificado por medio de la inyección de gases a alta presión. La estructura ya inflada es estabilizada utilizando tratamientos térmicos por encima de la temperatura ambiente. Como resultado, el polímero celular obtenido es anisotrópico y exhibe un bajo módulo de elasticidad en la dirección normal al plano de la película (aproximadamente tres órdenes de magnitud por debajo del correspondiente al material base), estrechamente relacionado con la densidad obtenida. Esta característica es una de las razones principales de su buena sensibilidad como material cuasi “piezoeléctrico”. Ver figura 2.1. Finalmente, las cavidades interiores son cargadas permanentemente por medio de una descarga tipo corona, entre otros métodos de polarización, formando dipolos macroscópicos perfectamente orientados [93] [2].

La figura 2.2 muestra una fotografía de la sección transversal que hemos tomado con un microscopio electrónico de barrido perteneciente al Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros - CSIC, así como una representación esquemática de su espacio de carga. Claramente se observa la irregularidad de la distribución y tamaño de las cavidades interiores. Estos espacios internos de aire, resultantes del proceso de fabricación, actúan como dipolos permanentes, los cuales hacen que el material sea particularmente sensible a fuerzas dinámicas normales a su superficie. La película Emfit tiene un espesor de aproximadamente 65–70 μm y el tamaño nominal de las cavidades es de 3 μm en dirección vertical y oscila entre los 10 μm y los 100 μm en dirección horizontal. Asimismo, el electrodo superior de aluminio vaporizado posee un espesor de alrededor 150 nm. Ver figura 2.2 y 2.3.

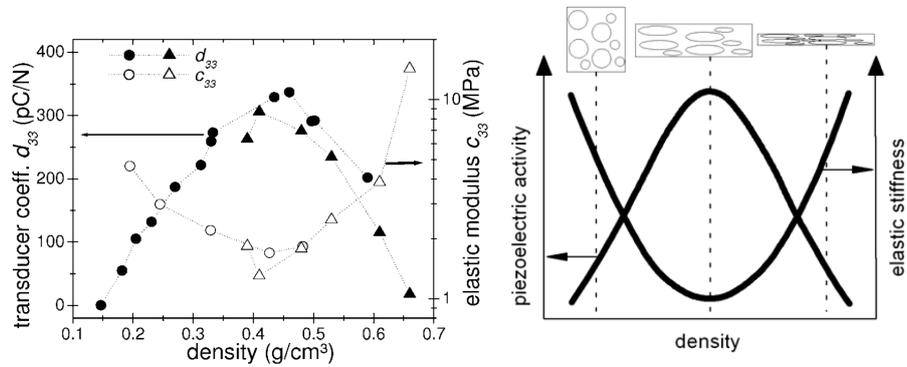


Figura 2.1: Coeficiente piezoeléctrico d_{33} y módulo de elasticidad c_{33} como función de la densidad (tamaño de cavidades interiores) de ferroelectretos fabricados a partir de polipropileno. Izquierda: Resultados experimentales. Derecha: Representación esquemática de los resultados. Tomado de [139].

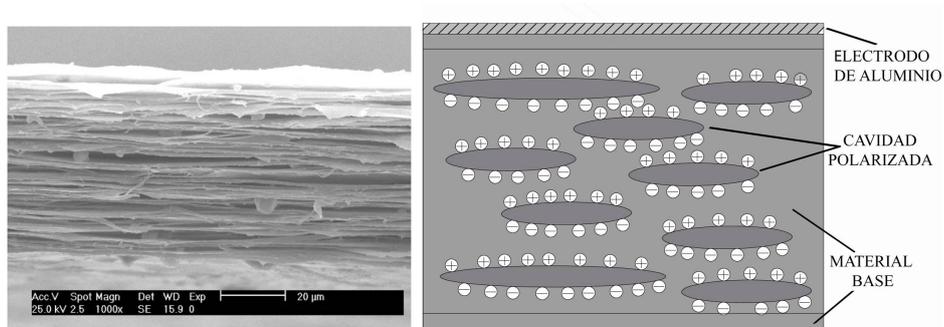


Figura 2.2: Izquierda: Sección transversal de la película electromecánica Emfit, tomada utilizando un microscopio electrónico de barrido perteneciente al Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros - CSIC. Derecha: Representación esquemática de la distribución no simétrica de carga eléctrica permanentemente almacenada en el interior del material.

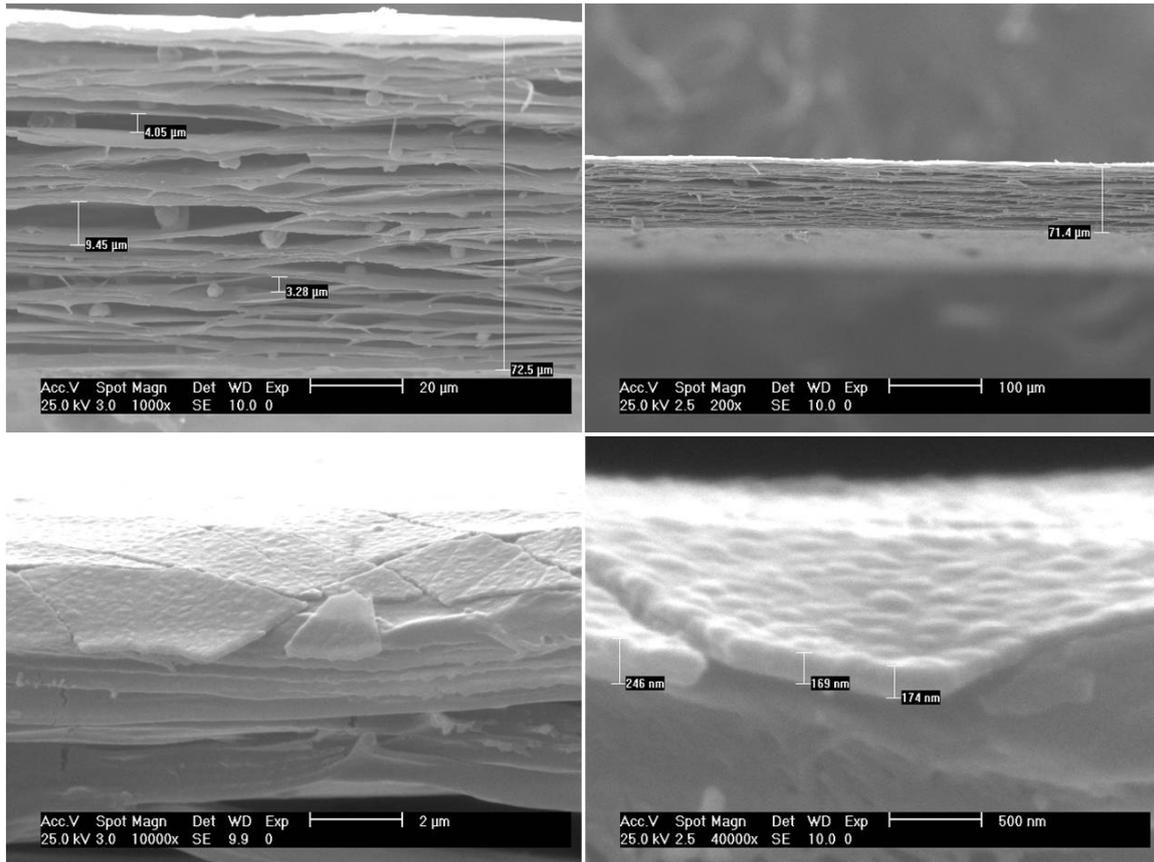


Figura 2.3: Fotografías de la película Emfit, tomadas utilizando microscopía electrónica. Arriba: sección transversal de la muestra y dimensiones. Abajo: Imágenes correspondientes al electrodo superior de aluminio.

En cuanto al modo de operación, la película Emfit funciona recíprocamente como sensor y actuador. Como sensor, su naturaleza es capacitiva y, al contrario que los transductores de este tipo, no requiere de un voltaje de polarización, gracias a su carga espacial permanente. Ver figura 2.4. Por contra, como actuador responde con cambios en el espesor producidos por un voltaje de excitación externo. Su respuesta, en cualquiera de los modos, no es estable a temperaturas superiores a 50°C, siendo ésta una de sus principales desventajas; actualmente se investiga con otros polímeros base distintos al polipropileno para superar esta limitación. Transductores hechos con fluoropolímeros han demostrado ser estables hasta temperaturas cercanas a los 90°C [142]. De otra parte, sus características dieléctricas son similares a las del material base, al igual que su resistencia y durabilidad.

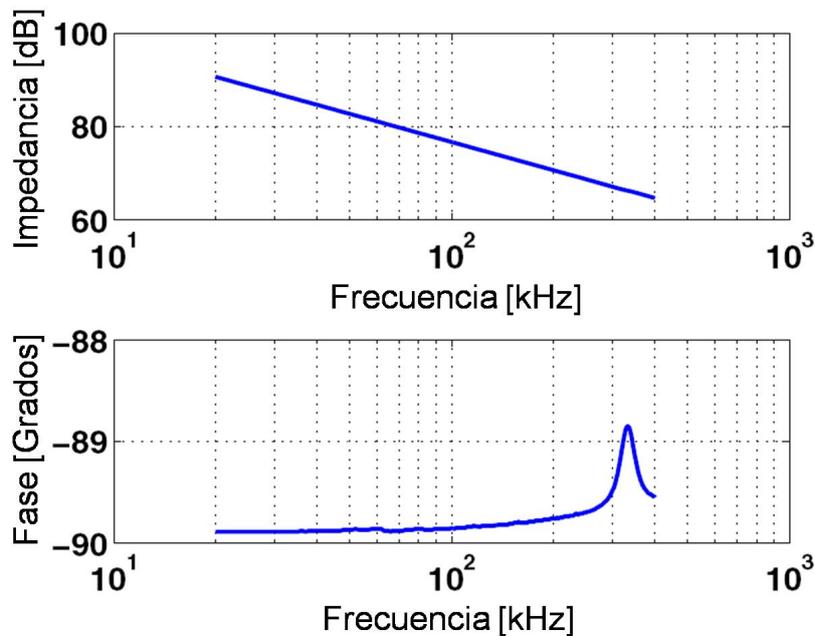


Figura 2.4: Impedancia eléctrica de la película Emfit, medida en nuestro laboratorio.

Las principales ventajas de la película Emfit para el diseño y fabricación de transductores ultrasónicos son:

- Su sensibilidad en la dirección d_{33} (≈ 100 pC/N, fuera de resonancia), medida por interferometría; comparable en orden de magnitud a la de los PZTs (100-

600 pC/N) y mayor que la que exhiben otros polímeros piezoeléctricos como el PVDF (≈ 33 pC/N) [29].

- Su inherente flexibilidad debida a la estructura celular interna y a su naturaleza polimérica. Esta característica plantea la posibilidad de que la película pueda ser adherida sobre cualquier superficie desarrollable, permitiendo fabricar transductores con una patrón de emisión/recepción especificado; superando en este sentido a las tecnologías actuales [72] [35]. A la fecha no existen trabajos reportados en los que se haga provecho de esta característica de los ferroelectretos celulares.
- Su amplio rango de frecuencia utilizable desde 20 kHz hasta su frecuencia de resonancia a aproximadamente 300 kHz abarca la mayoría de aplicaciones ultrasónicas en aire. Además, permite aprovechar los beneficios que presenta la utilización de señales codificadas y moduladas [74].
- Su buena adaptación con el aire. La impedancia acústica reportada (≈ 0.03 MRayls) es más parecida a la del aire (400 Rayls) que la de los transductores capacitivos (≈ 4.7 MRayls), PZTs (≈ 46 MRayls) y PVDF (≈ 4.5 MRayls) [72].
- Su facilidad de manipulación a la hora de fabricar los transductores.
- Su bajo coste. La película, con una de sus caras ya metalizada, tiene un precio de mercado aproximado de 0.2 euros/cm².

Cabe anotar que las características antes descritas corresponden a la película electro-mecánica tal como es suministrada por la empresa Emfit Ltd. Existen otras compañías que proporcionan películas celulares similares, pero sin polarizar. No obstante, hasta donde nos consta, Emfit Ltd. es la única compañía que proporciona la película en condiciones para ser utilizada en la fabricación de transductores.

A la fecha, la película Emfit ha sido utilizada en aplicaciones como sistemas de gran superficie para supervisión y vigilancia por identificación de pisadas [111], altavoces [1], pirómetros, sensores de fuerza [39], interruptores, teclados, sistemas de control y atenuación de ruido, sensores fisiológicos [65] [10] [5], ecolocalización [118] [117], entre otras [139]. En el ámbito de los Ultrasonidos en Aire (US-A), aparte de la aplicación en ecolocalización antes mencionada, se encuentran los trabajos realizados por

Bovtun et al. [20] y Lerch et al. [74], en los cuales transductores planos de capa única son utilizados en modo pulso-eco para demostrar el potencial de la película en la obtención de imágenes acústicas. Igualmente se presentan resultados de caracterización por espectroscopía dieléctrica. También cabe mencionar el trabajo de Degel et al., donde se muestran resultados preliminares en la caracterización de transductores multielementos fabricados con diferentes películas ferroelectreto, también sobre substratos planos [30]. Nuestra opinión después del examen del estado del arte, es que el potencial uso e impacto de los ferroelectretos en US-A, está aún prácticamente sin explorar.

En este capítulo se presentan los resultados de caracterización de la película electromecánica Emfit, así como de los transductores tanto de capa simple como de capa doble, fabricados sobre substratos planos. Igualmente, se muestra la deducción e identificación de un modelo electromecánico acoplado y de parámetros concentrados, derivado de una formulación carga-deformación, utilizando la ecuación de Lagrange. Finalmente, se presentan las conclusiones del estudio, así como algunas ideas de trabajo futuro.

2.2. Materiales y Métodos

2.2.1. Proceso de Fabricación de los transductores

La película ferroelectreto utilizada en este trabajo ha sido provista por la compañía Emfit Ltd. (Vaajakoski, Finlandia), con número de producto HS-03-20BR AL1. Ésta posee uno de sus lados metalizados y no ha sido sometida a ningún proceso de pre-envejecimiento.

Para fabricar los transductores de capa simple, la película, que tiene la apariencia y flexibilidad de una hoja de papel, se corta a la medida del área activa deseada utilizando unas tijeras o un “cutter”. Posteriormente, ésta es adherida sobre un substrato sólido utilizando un adhesivo como electrodo inferior. La cara metalizada de aluminio constituye el electrodo superior. Ver figura 2.5. Aunque en este capítulo se presentan resultados con transductores de substrato plano, la película también puede fácilmente adherirse a substratos de geometrías complejas, siempre que éstos posean una superficie que sea desarrollable, como se estudia en el capítulo 3.

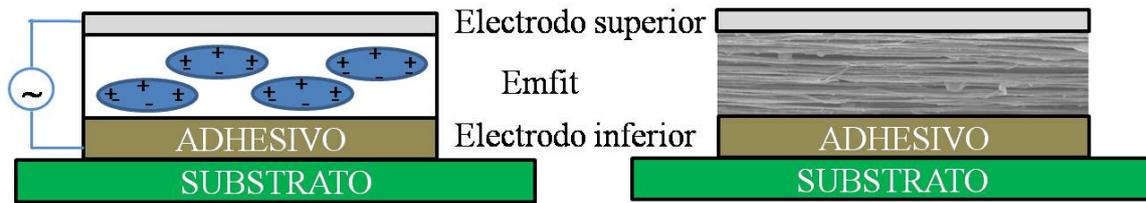


Figura 2.5: Representación esquemática de un transductor de capa simple fabricado con Emfit.

Para construir transductores de múltiples capas se sigue un proceso similar, utilizando un adhesivo para interconectar los elementos. La figura 2.6 muestra las diferentes partes, así como la conexión eléctrica de transductores apilados de dos capas. Nótese que las capas están dispuestas de manera que la polaridad interna de las capas adyacentes es opuesta. Esta configuración, conocida como antiparalela, permite poder excitar en fase todos los niveles que conforman el transductor apilado y maximizar así la respuesta acústica.

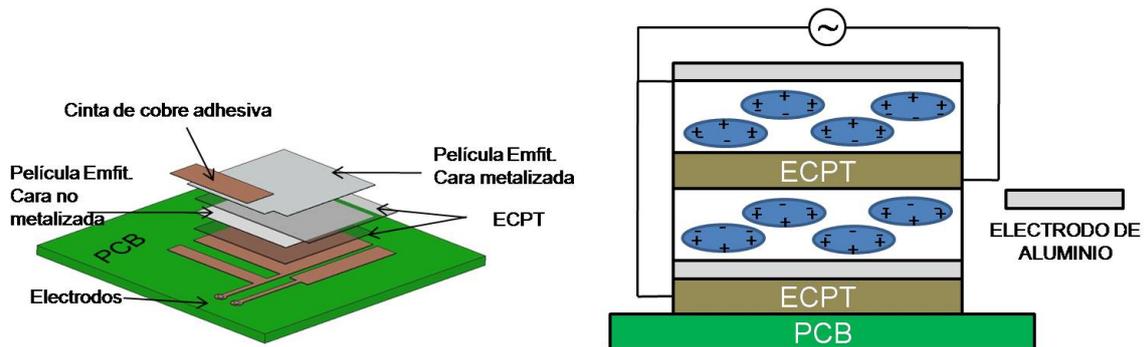


Figura 2.6: Diferentes partes de un transductor apilado de dos capas(izquierda). Representación esquemática y conexión eléctrica (derecha)

2.2.2. Fijación de la película

Con el ánimo de fabricar transductores de manera ágil y repetible, hemos explorado diferentes materiales para fijar la película activa al sustrato. Básicamente hemos utilizado dos tipos de adhesivos en la fabricación de los prototipos, a saber, epóxico conductor (ECP) y cintas plásticas de matriz acrílica, tanto conductoras como no

conductoras de electricidad. Específicamente hemos utilizados dos tipos de cintas adhesivas (fabricadas por 3M, St. Paul, MN), a saber: isotrópicamente conductoras de electricidad (ECPT) y no conductoras (NCPT). Utilizar cintas adhesivas garantiza una mayor uniformidad en el soporte y adhesión de la película, al contrario que la aplicación manual del epóxico conductor o inclusive la pintura de plata.

2.2.3. Instrumentación

La figura 2.7 muestra un diagrama de bloques de los equipos de laboratorio utilizados en la caracterización de los prototipos fabricados con Emfit. La instrumentación está compuesta de 4 partes principales, a saber, los sistemas de excitación, los instrumentos de medición y acondicionamiento de señales acústicas y vibratorias, las unidades de control de movimiento servocontroladas y un ordenador central que vía GPIB controla los dispositivos. Durante la caracterización, los prototipos fabricados con Emfit son colocados en las unidades de movimiento, las cuales permiten desplazamientos y rotaciones arbitrarios con precisiones de $2 \mu\text{m}$ y centésimas de grado respectivamente, para luego medir sus respectivos patrones vibratorios, al igual que el patrón de radiación acústico respectivo.

Las medidas interferométricas fueron tomadas con un vibrómetro láser (Polytec, Waldbronn, Alemania) dispuesto sobre una mesa antivibratoria, el cual permite obtener el perfil instantáneo de la velocidad superficial de los transductores con una resolución máxima de $0.5 \mu\text{m/s}$. Especial cuidado fue tenido en cuenta con el fin de evitar los efectos de la incidencia oblicua del haz láser sobre las muestras. También durante la experimentación y utilizando el mismo vibrómetro, se garantizó que los substratos no presentaban respuesta vibratoria alguna ante la excitación de los prototipos.

Las medidas acústicas fueron obtenidas a 30 cm de distancia del transductor, sobre el eje principal, utilizando un micrófono calibrado de campo libre de 1/4 de pulgada (1/4 in.-4939; Brüel & Kjaer, Naerum, Dinamarca). La rejilla de protección del micrófono fue removida con el fin de obtener máxima sensibilidad hasta 100 kHz. Cabe anotar que este tipo de micrófonos se orienta en sentido paralelo a las líneas de campo para minimizar el efecto del instrumento sobre la lectura de presión.

Teniendo en cuenta que no contábamos con una cámara anecoica, se utilizaron

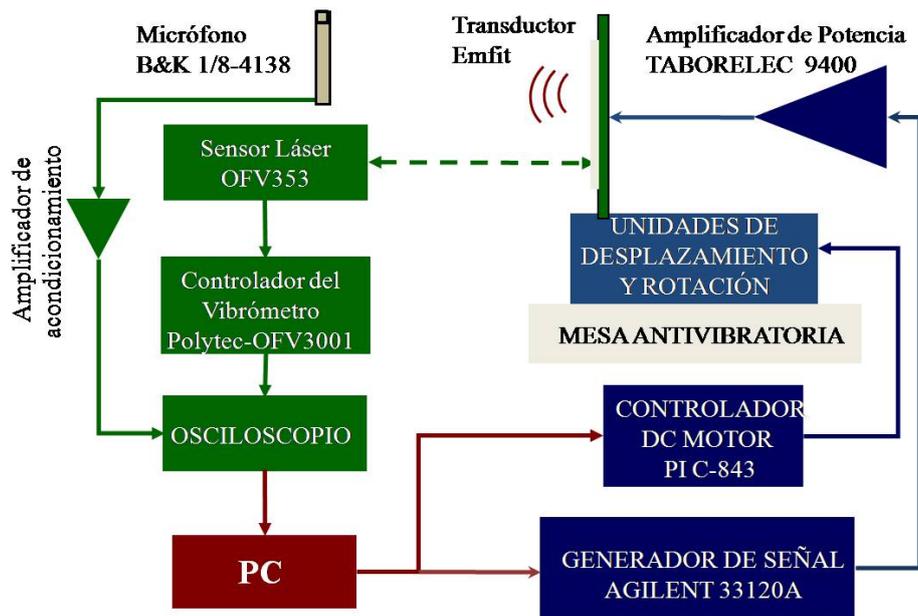


Figura 2.7: Instrumentación utilizada en la caracterización electromecánico-acústica de la película Emfit.

señales de excitación pulsadas con una tasa de repetición suficientemente baja para evitar la creación de campos estacionarios que pudieran afectar las medidas. Tanto señales monofrecuencia como tipo chirp fueron utilizadas para determinar la respuesta en frecuencia de los prototipos en el rango de 30 a 400 kHz. Estas fueron aplicadas utilizando un generador de señales (Modelo 33120A; Agilent Technologies, Santa Clara, CA) conectado a un amplificador de potencia (Modelo 9400; Tabor Electronics, Tel hanan, Israel) que permite aplicar voltajes de hasta 400 Vpp a frecuencias entre DC y 500 kHz. Las señales obtenidas fueron capturadas utilizando un osciloscopio conectado a un ordenador personal via GPIB.

También fueron realizadas medidas de impedancia eléctrica de un transductor de capa simple para corroborar la naturaleza capacitiva de la película Emfit, como se mostró anteriormente. Para ello se utilizó un analizador de impedancias HP/Agilent 4192A LF (5 Hz-13 MHz).

2.3. Caracterización de Transductores Emfit

En este apartado se presentan los resultados experimentales producto de la caracterización de transductores planos de capa simple y doble fabricados con película electromecánica Emfit. Inicialmente, el efecto del tipo de adhesivo utilizado sobre la respuesta en frecuencia es estudiado. Posteriormente, el patrón vibratorio, así como la correspondiente respuesta acústica es medido y analizado. Finalmente, se presenta el desarrollo de un modelo electromecánico que permite predecir la respuesta de transductores de capa simple fabricados con Emfit. Cabe anotar que la caracterización se realizó en el rango entre 30 kHz y 400 kHz puesto que es el rango de frecuencia de mayor interés en aplicaciones en aire y además es donde los transductores fabricados con Emfit poseen una sensibilidad apreciable. No obstante, es posible concebir transductores que al no estar adheridos a un sustrato rígido resuenan al doble de la frecuencia de resonancia aunque con menor sensibilidad.

2.3.1. Respuesta en Frecuencia

2.3.1.1. Transductores de Capa Simple

En primer lugar fue explorada la respuesta en frecuencia de transductores fabricados con diferentes tipos de adhesivos con el fin de indagar el posible efecto de éstos sobre la respuesta del transductor. El movimiento de la superficie de los transductores sobre un sustrato plano fue caracterizado realizando un barrido en forma de cuadrícula de 1 mm de distancia entre puntos. Señales de excitación tipo chirp fueron utilizadas para excitar los transductores en el rango de frecuencia entre 30 kHz y 400 kHz. Este tipo de señales se utilizó después de comprobar resultados similares a los obtenidos excitando con señales monofrecuencia.

El procedimiento de caracterización fue realizado para los prototipos fabricados con ECP, ECPT y NCPT. La figura 2.8 muestra la respuesta promedio para los tres tipos de adhesivos, así como la desviación estándar como porcentaje de la respuesta promedio. Se observa que los puntos de medida exhiben un comportamiento similar al de un sistema dinámico de segundo orden, con una frecuencia de resonancia alrededor de los 320 kHz. A bajas frecuencias (30–100 kHz), se obtienen valores de coeficiente piezoeléctrico d_{33} de aproximadamente 63 pm/V, 95 pm/V y 98 pm/V para NCPT,

ECPT y ECP respectivamente. La única diferencia significativa entre las respectivas respuestas en frecuencia de los transductores fabricados con ECPT Y NCPT es un factor de ganancia de cerca del 30%. Entretanto, la respuesta en frecuencia, por debajo de 200 kHz, resulta muy similar cuando se utiliza ya sea ECPT o ECP.

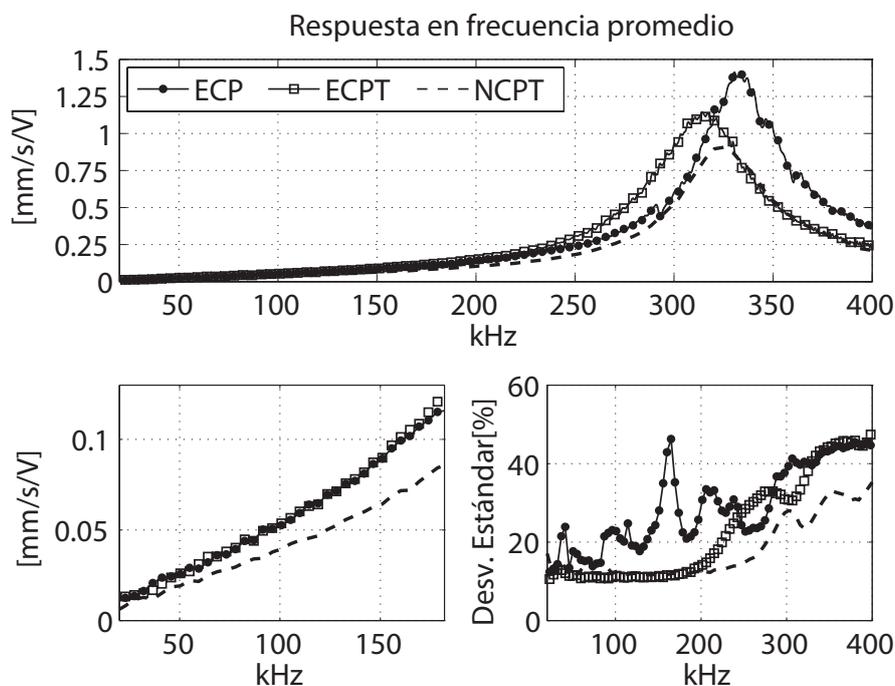


Figura 2.8: Respuesta en frecuencia promedio de los emisores fabricados con tres diferentes tipos de adhesivos. Obtenida a partir de 361 puntos de medida diferentes sobre cada transductor.

De la figura 2.8 también se observa que una menor variabilidad de la respuesta en frecuencia es obtenida cuando las cintas adhesivas son utilizadas. Por el contrario, mayor irregularidad ocurre con el ECP debido a la dificultad para lograr una aplicación manual homogénea que permita dar soporte uniforme a la película. A excepción de una mayor irregularidad en la respuesta cuando se usa ECP, el efecto de los adhesivos utilizados sobre la respuesta en frecuencia es despreciable. Esto se debe a que el módulo de elasticidad de los adhesivos es bastante mayor comparado con el de la película Emfit y por tanto éstos se comportan como una base rígida.

Usando señales tipo ráfaga, monofrecuencia, se observó que la desviación de la res-

puesta permanece inalterada conforme la amplitud de la excitación es incrementada hasta 114 Vp. Ver figura 2.9. Podría pensarse que conforme la amplitud incrementa, fenómenos locales de saturación dentro de la película pueden ocurrir, degradando por tanto la uniformidad de la vibración. Sin embargo, se observa en la figura 2.9-abajo que no existe dependencia directa o importante entre la variabilidad de la respuesta y la amplitud de la vibración. Utilizando los equipos de excitación disponibles hemos comprobado experimentalmente que la respuesta de los transductores satisface el principio de superposición de los sistemas lineales, por lo menos hasta 200 Vp de excitación. Experimentación a voltajes más altos no fue realizada debido a la limitación de voltaje máximo del amplificador de potencia disponible. Sin embargo, voltajes de hasta 300 Vp son posibles sin riesgo de daño de la película, de acuerdo con lo reportado en [118].

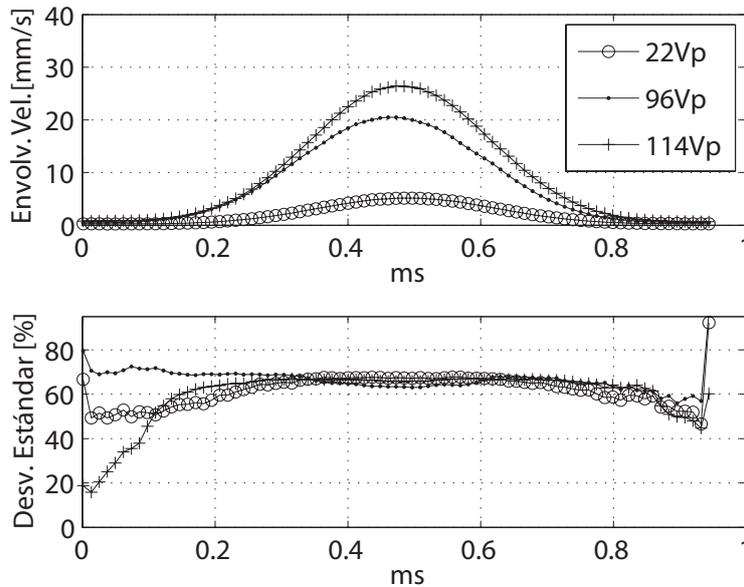


Figura 2.9: Velocidad promedio de la superficie de los emisores planos fabricados con excitación a la frecuencia de resonancia (320 kHz); para tres diferentes niveles de voltaje. Respuestas obtenidas a partir de la envolvente de la respuesta ante una excitación periódica multiplicada por una ventana gaussiana.

Los mejores resultados, en términos de sensibilidad, variabilidad de la respuesta y facilidad de fabricación, son obtenidos utilizando la cinta adhesiva ECPT. La figura

2.10 muestra la respuesta en frecuencia de 4 transductores planos diferentes de 20 mm por 20mm, fabricados con ECPT. Se aprecia que la respuesta comienza a ser irregular después de 150 kHz. Las frecuencias de resonancia aparecen dentro del rango de 280–330 kHz. No obstante, la respuesta por debajo de 150 kHz, es prácticamente la misma para todos los prototipos. Esta buena repetibilidad indica que el procedimiento de fabricación no es crítico, aunque sea realizado manualmente.

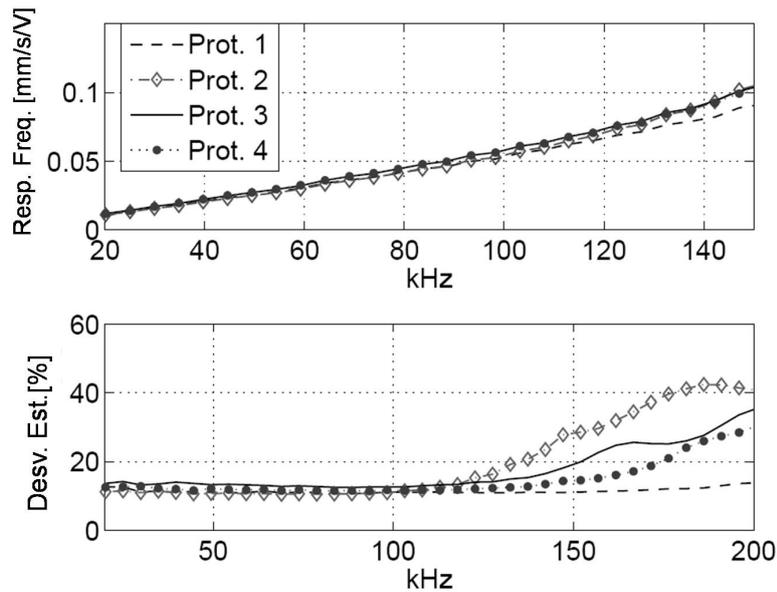


Figura 2.10: Respuesta en frecuencia promedio de cuatro diferentes prototipos planos fabricados con ECPT.

En conclusión, los mejores resultados son obtenidos cuando cintas plásticas de doble cara son utilizadas, específicamente la ECPT por sus mejores características eléctricas frente a la NCPT. El valor de coeficiente piezoeléctrico obtenido para el rango de frecuencias menores a 200 kHz está dentro del rango de los reportados en la literatura para la película Emfit (≈ 100 pC/N, ver figura 2.11), sin embargo, resultan bajos comparados con los valores que se presentan, en el mismo rango de frecuencia, con otras películas de polipropileno (superiores a 200 pC/N [70]) y fluorocarbonadas, las cuales presentan sensibilidades entre 150 y 700 pC/N [142]. No obstante, dichas películas no están disponibles comercialmente. Hasta donde nos consta, la película Emfit es el único ferroelectreto celular que se ofrece ya polarizado y listo para ser utilizado en la fabricación de transductores.

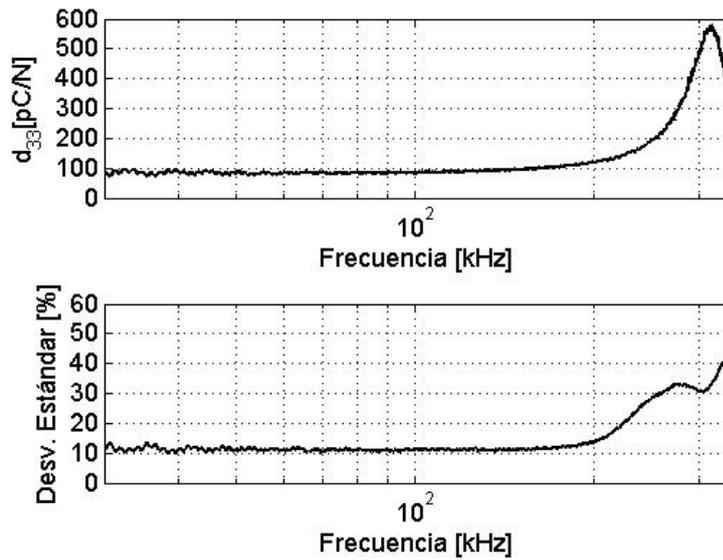


Figura 2.11: Coeficiente piezoeléctrico promedio d_{33} de un transductor de capa simple fabricado con Emfit y ECPT. Obtenido por interferometría sobre 256 puntos diferentes del transductor.

2.3.1.2. Transductores Multicapa

La figura 2.12 muestra la respuesta en frecuencia medida de 4 prototipos de doble capa fabricados según el procedimiento descrito en la gráfica 2.6. La cinta ECPT fue utilizada para conectar entre sí las dos capas de material y actúa como una masa intermedia que afecta a la respuesta en frecuencia. Como resultado, aparecen dos resonancias, una alrededor de los 85 kHz, estrechamente relacionada con la respuesta de la capa inferior y la densidad del adhesivo utilizado, y otra ligeramente desplazada hacia la derecha con respecto a la de un transductor de capa simple, a 340 kHz. Se observa también como la desviación estándar de la respuesta en distintos puntos de la superficie del transductor es bastante irregular después de la primera resonancia, alcanzando valores que superan el 50%. No obstante, la repetibilidad del resultado es significativa, confirmando la ventaja de fabricar prototipos utilizando cintas adhesivas.

Fabricar transductores de diferentes capas de material tiene como ventaja principal incrementar en magnitud de coeficiente d_{33} , el cual indica la sensibilidad tanto en emisión como en recepción del transductor. Para lograrlo, es necesario conectar

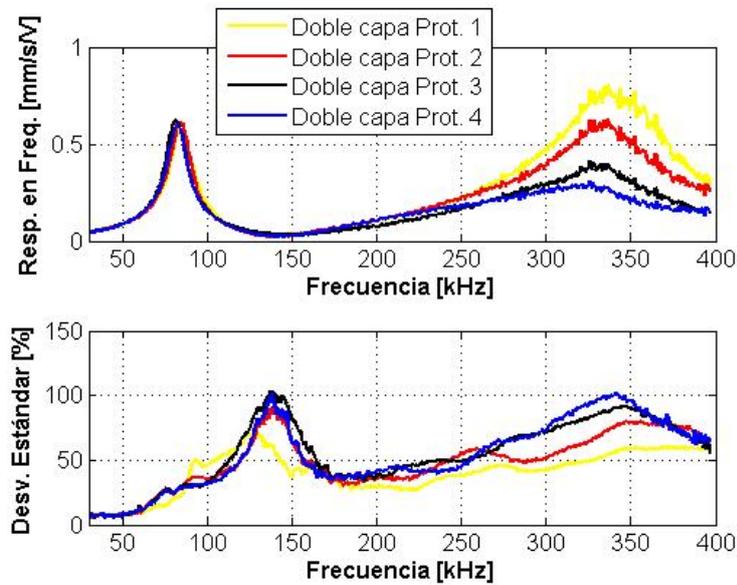


Figura 2.12: Respuesta en frecuencia promedio medida por interferometría, de 4 prototipos diferentes de doble capa, fabricados con Emfit y ECPT, en configuración antiparalela.

las diferentes capas en configuración antiparalela. De esta manera, los esfuerzos alternantes aplicados a dos capas adyacentes están en fase y la respuesta acústica se maximiza. Esto se debe a que, a una misma frecuencia el desplazamiento de la capa superior, en contacto con el medio de propagación, es el máximo posible, siempre que se vibre en el primer modo forzado.

En la figura 2.13 se muestra la comparación entre las sensibilidades de un prototipo de doble capa y otro de capa simple. Se observa como a frecuencias por debajo de la primera resonancia, la sensibilidad del prototipo multicapa es casi el doble que la del de capa simple. La ubicación de las frecuencias de resonancia está estrechamente relacionada con el adhesivo utilizado en la construcción, como se verá más adelante.

2.3.2. Modo de Vibración de la Superficie Radiante

2.3.2.1. Transductores de Capa Simple

La respuesta vibratoria instantánea de la superficie radiante de los transductores planos fue analizada para establecer el modo de vibración de la película adherida al

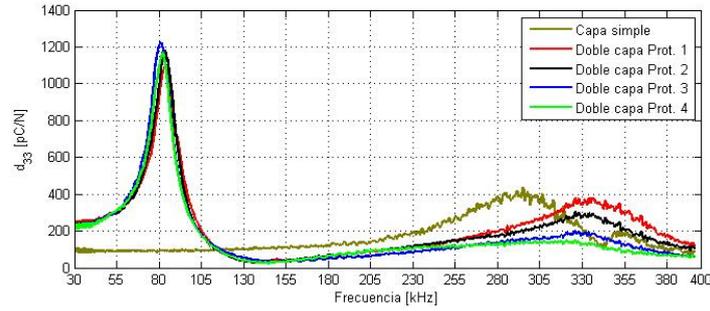


Figura 2.13: Coeficiente piezoeléctrico d_{33} para prototipos de capa simple y doble.

substrato.

Para cuantificar la uniformidad del perfil de velocidad normal de la superficie del transductor, fue realizado un análisis de correlación entre la señal temporal del voltaje de excitación y la respectiva respuesta temporal de velocidad de cada punto medido sobre la superficie. Señales monofrecuencia (moduladas por una envolvente gaussiana) fueron utilizadas para medir la distribución de la diferencia de fase instantánea entre las señales, a frecuencias distintas. La figura 2.14 muestra el histograma de la fase relativa de la velocidad de un punto dado en la superficie con respecto a la moda de las 361 fases relativas calculadas.

De la figura se concluye que por debajo de 100 kHz, las diferencias de fase en el perfil de velocidad de la superficie no son mayores al 20 % del período. Esta característica, junto con la baja variabilidad de la amplitud de la velocidad en el mismo rango de frecuencia, permite establecer que los emisores ultrasónicos fabricados con Emfit presentan un perfil constante de velocidad, o como suele denominarse en acústica, un comportamiento tipo pistón, formado por variaciones en fase del espesor. Por encima de 100 kHz, el perfil de velocidad se torna irregular. Las fluctuaciones observadas del perfil instantáneo de velocidad y del respectivo campo acústico, no se corresponden con los esperados si ocurriesen modos tipo placa. Por consiguiente, se concluye que éstas variaciones en el perfil deben ser causadas por una distribución aleatoria, no homogénea, de las propiedades internas de la película Emfit.

Las figuras 2.15 a 2.20 muestran el perfil instantáneo de velocidad de la superficie de un transductor plano a diferentes valores de frecuencia, un mismo voltaje de excitación y dos instantes de tiempo distintos. Este perfil se presenta de mane-

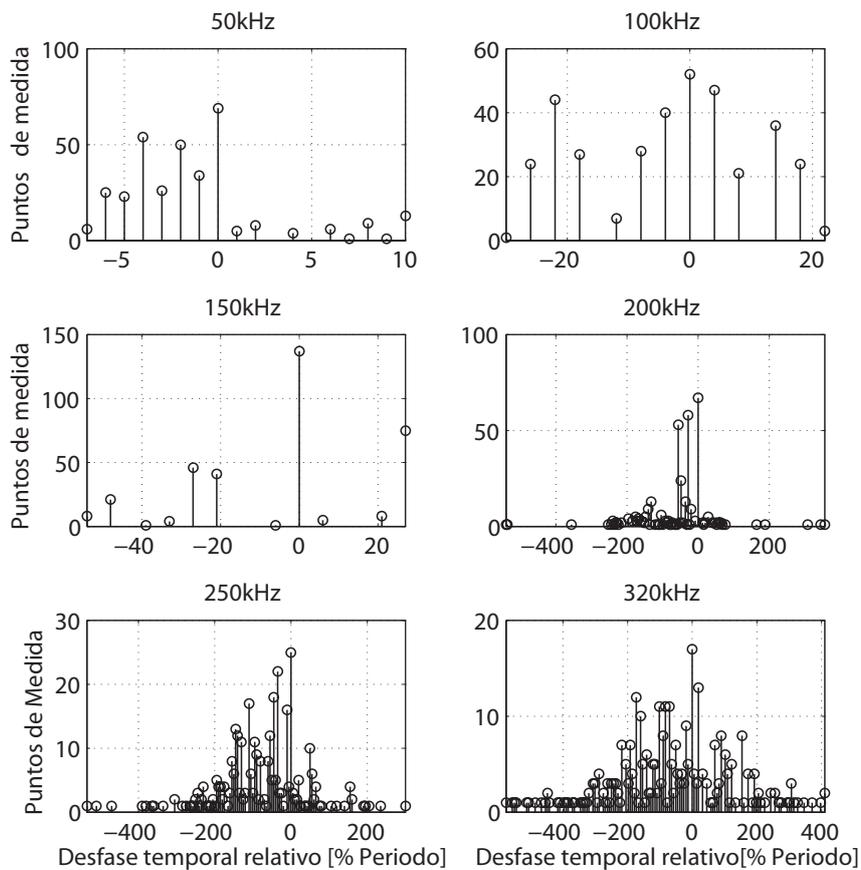


Figura 2.14: Cuantificación del comportamiento tipo pistón utilizando un análisis de correlación. Distribución de la fase relativa de los puntos de medida sobre el transductor con respecto a la moda, expresada como un porcentaje del período correspondiente. Total de puntos de medida: 361

ra espacial (arriba-derecha) y también, en la gráfica inferior, mostrando la amplitud instantánea de los 361 puntos de medida sobre el transductor. También se aprecia (arriba-izquierda) el perfil de velocidad de uno de los puntos de medida, indicando con el círculo rojo el instante al cual corresponde el perfil de velocidad.

Se puede observar el comportamiento predicho a partir del análisis de correlación. En resonancia (≈ 320 kHz) el patrón de vibración es completamente irregular y dista mucho del comportamiento tipo pistón observado a 50 kHz. Este análisis se realizó también utilizando una excitación tipo chirp de 20 a 400 kHz e igualmente se

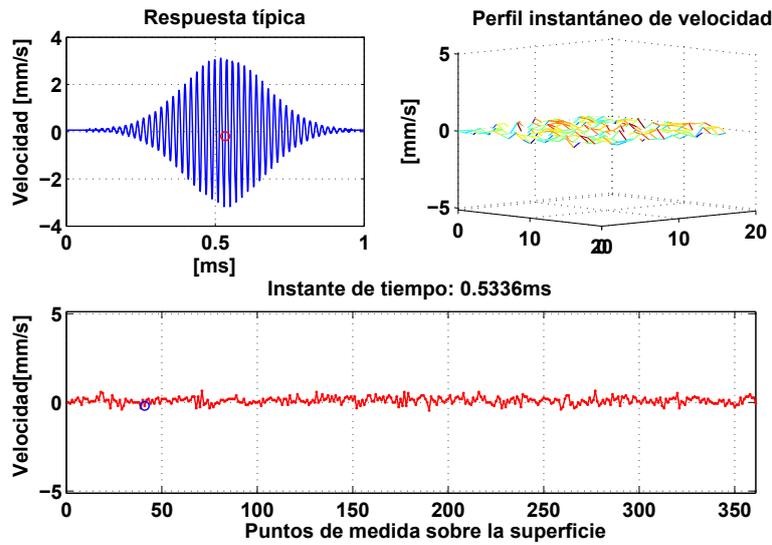


Figura 2.15: Arriba-Izq: Respuesta típica de un punto sobre la superficie del transductor ante una excitación monofrecuencia. Arriba-der: Perfil instantáneo de velocidad superficial a 50 kHz y 114 Vp de excitación, a mínima amplitud. Abajo: Amplitud instantánea de la velocidad de todos los puntos medidos sobre la superficie.

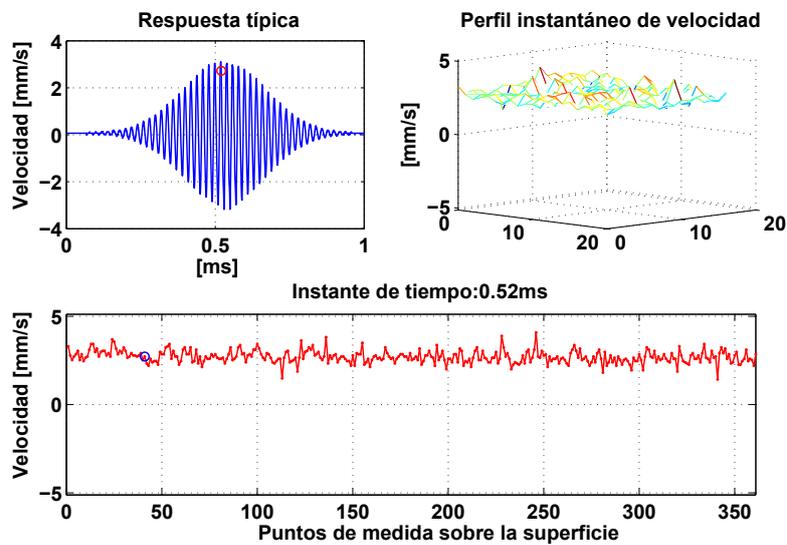


Figura 2.16: Arriba-Izq: Respuesta típica de un punto sobre la superficie del transductor ante una excitación monofrecuencia. Arriba-der: Perfil instantáneo de velocidad superficial a 50 kHz y 114 Vp de excitación, a máxima amplitud. Abajo: Amplitud instantánea de la velocidad de todos los puntos medidos sobre la superficie.

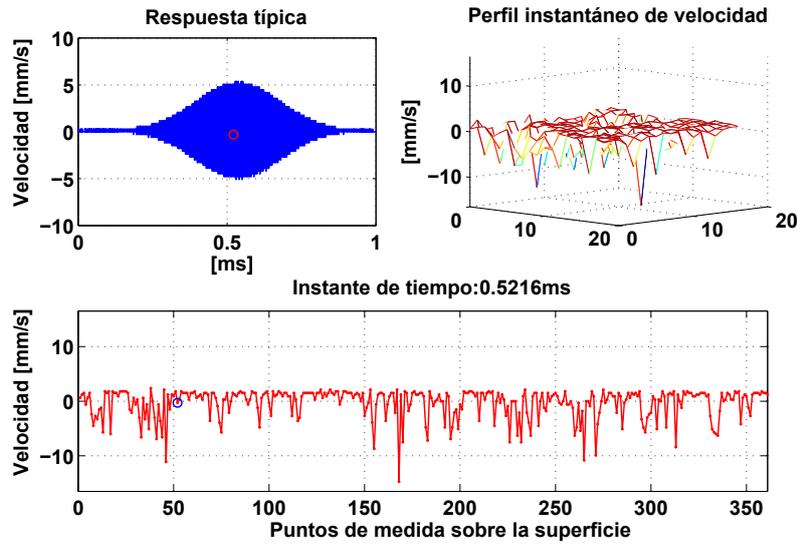


Figura 2.17: Arriba-Izq: Respuesta típica de un punto sobre la superficie del transductor ante una excitación monofrecuencia. Arriba-der: Perfil instantáneo de velocidad superficial a 200 kHz y 114 Vp de excitación, a mínima amplitud. Abajo: Amplitud instantánea de la velocidad de todos los puntos medidos sobre la superficie.

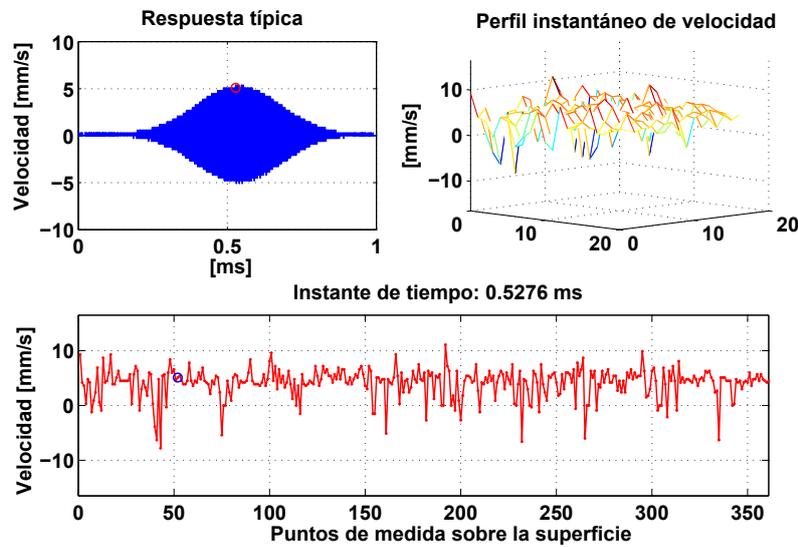


Figura 2.18: Arriba-Izq: Respuesta típica de un punto sobre la superficie del transductor ante una excitación monofrecuencia. Arriba-der: Perfil instantáneo de velocidad superficial a 200 kHz y 114 Vp de excitación, a máxima amplitud. Abajo: Amplitud instantánea de la velocidad de todos los puntos medidos sobre la superficie.

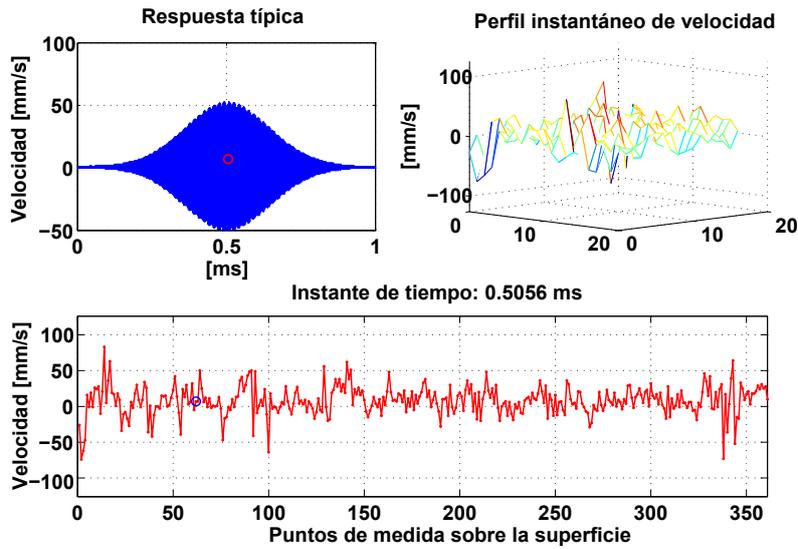


Figura 2.19: Arriba-Izq: Respuesta típica de un punto sobre la superficie del transductor ante una excitación monofrecuencia. Arriba-der: Perfil instantáneo de velocidad superficial a 320 kHz y 114 Vp de excitación, a mínima amplitud. Abajo: Amplitud instantánea de la velocidad de todos los puntos medidos sobre la superficie.

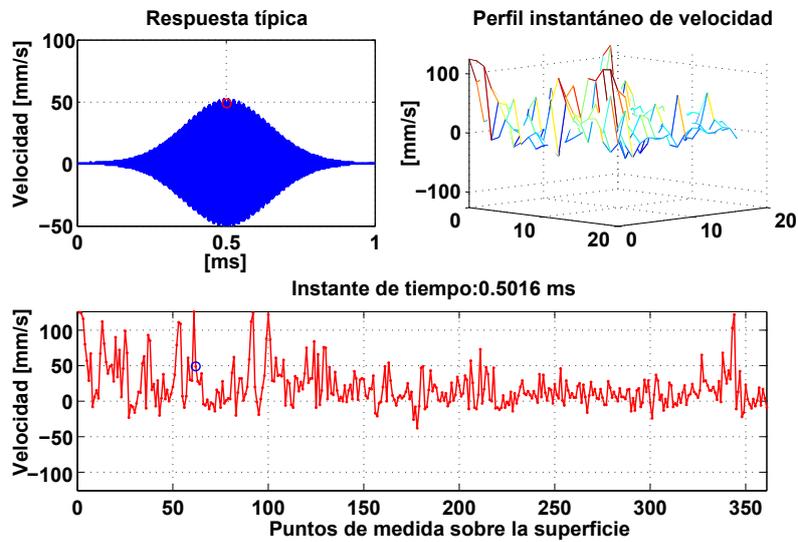


Figura 2.20: Arriba-Izq: Respuesta típica de un punto sobre la superficie del transductor ante una excitación monofrecuencia. Arriba-der: Perfil instantáneo de velocidad superficial a 320 kHz y 114 Vp de excitación, a máxima amplitud. Abajo: Amplitud instantánea de la velocidad de todos los puntos medidos sobre la superficie.

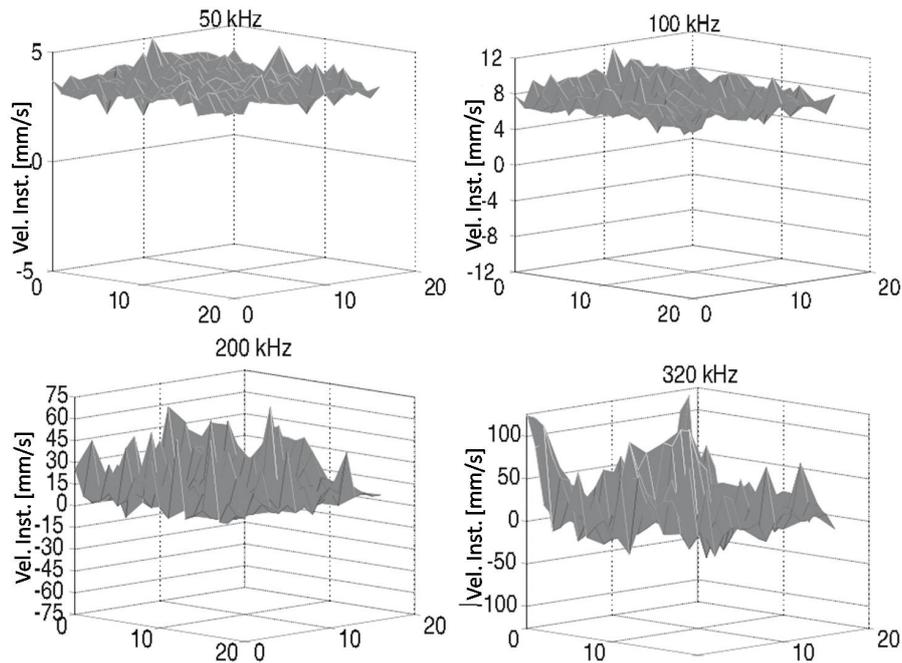


Figura 2.21: Gráfica resumen de la distribución espacial instantánea de la velocidad superficial de un transductor plano a diferentes frecuencias. Medidas utilizando interferometría.

constató la degradación del perfil constante de velocidad a frecuencias superiores a los 150 kHz. Ver figura 2.21. No obstante, para frecuencias por debajo de 150 kHz, el transductor vibra en modo espesor de manera casi ideal.

2.3.2.2. Transductores Multicapa

La figura 2.22 muestra el patrón vibratorio de la superficie radiante de un transductor de doble capa, obtenido a partir de la respuesta a un chirp con contenido frecuencial de 30 kHz a 400 kHz.

El patrón vibratorio observado es bastante regular a frecuencias por debajo de la primera resonancia, emulando el comportamiento de un pistón ideal. Conforme nos acercamos a la frecuencia de resonancia, el patrón se degrada, tal como ocurre con un transductor de capa simple. A frecuencias comprendidas entre la primera y la segunda resonancia, el transductor patrón vibratorio es bastante irregular. A manera de conclusión, apilando dos capas de Emfit es posible duplicar la sensibilidad a

frecuencias por debajo de la primera resonancia manteniendo una respuesta vibratoria uniforme. También, a la frecuencia de la primera resonancia (≈ 85 kHz), la amplitud de la respuesta, en comparación con un transductor de capa simple, es mayor en aproximadamente 20 dB, aunque el patrón vibratorio pierde homogeneidad y el ancho de banda se reduce a aproximadamente la mitad.

2.3.3. Radiación acústica de Transductores Emfit

Una vez determinado el modo de vibración de la película, mediciones acústicas fueron realizadas con el fin de determinar el efecto de la irregularidad del patrón vibratorio sobre el campo acústico, así como la sensibilidad acústica en transmisión de los prototipos. Estos resultados se compararon luego con la pauta acústica teórica producida por un transductor con un perfil de velocidad constante y de las mismas dimensiones que los prototipos construidos.

La figura 2.23 muestra las sensibilidades acústicas en transmisión, típicas de transductores de capa simple y doble. Los resultados están en completa concordancia con la respuesta de velocidad medida por interferometría, observándose una diferencia de hasta 20 dB entre las sensibilidades a 85 kHz, frecuencia a la cual tiene la primera resonancia un prototipo de capa doble. A esta frecuencia, y excitando con 150 Vp es posible obtener 110 dB de nivel de presión sonora utilizando un transductor de capa doble.

Cabe anotar que el micrófono utilizado en la caracterización tiene una respuesta en frecuencia plana solo hasta 100 kHz, después de la cual su sensibilidad decrece a razón de aproximadamente 20 dB por década.

El campo lejano radiado por un transductor plano de superficie activa cuadrada, de dimensión $L \times L$, vibrando armónicamente con velocidad normal constante está dado por la expresión [138]:

$$p(r, \theta, \phi) = \frac{-i\rho_0 c k L^2 v_n}{2\pi} \frac{\exp^{ikr}}{r} \operatorname{sinc}\left(\frac{kL}{2} \sin \theta \cos \phi\right) \operatorname{sinc}\left(\frac{kL}{2} \sin \theta \sin \phi\right) \quad (2.1)$$

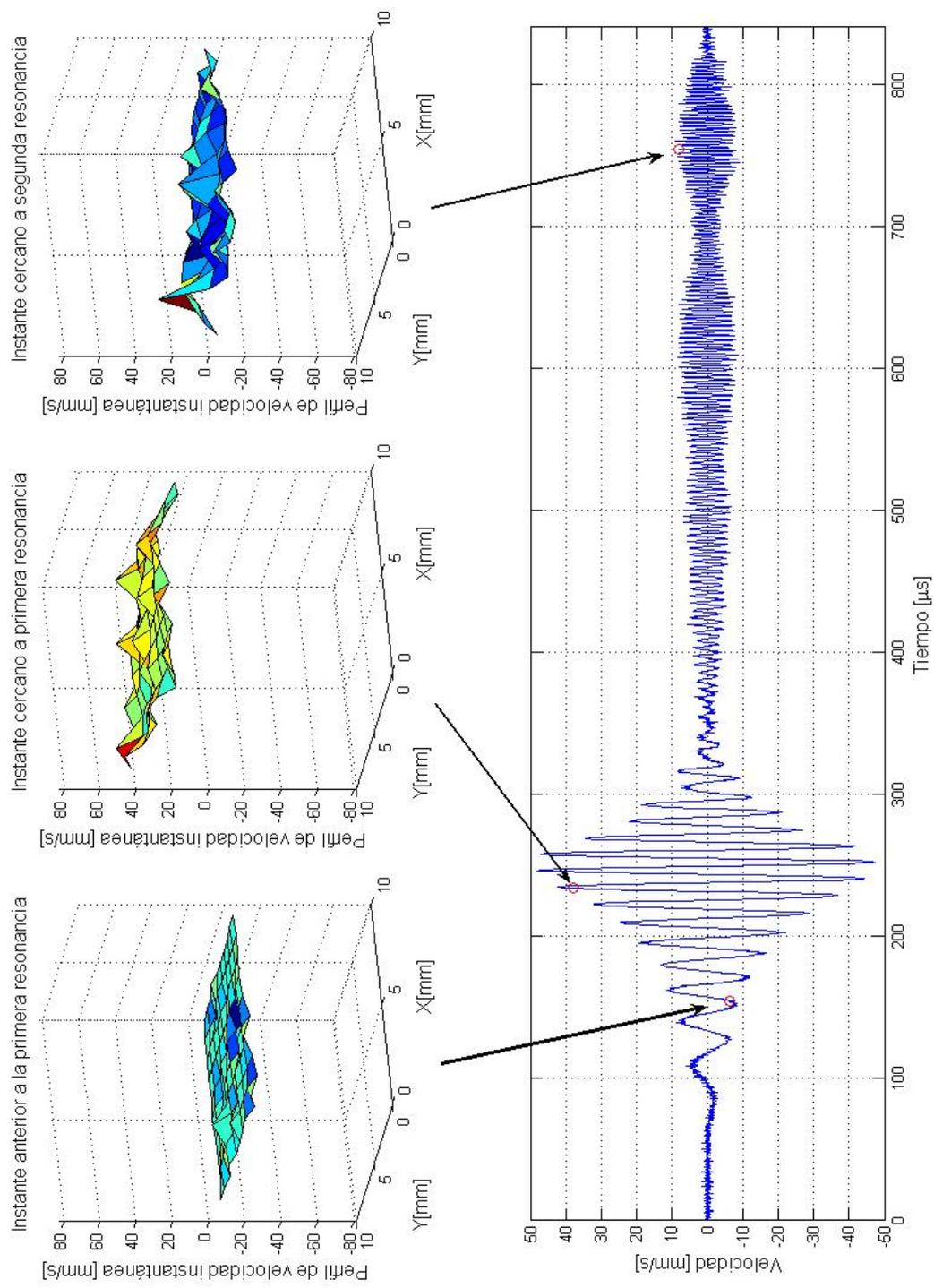


Figura 2.22: Patrón vibratorio de la superficie radiante de un transductor de dos capas fabricado con Emfit. Arriba: Perfil vibratorio en diferentes instantes de tiempo. Abajo: Respuesta chirp típica de un punto sobre la superficie.

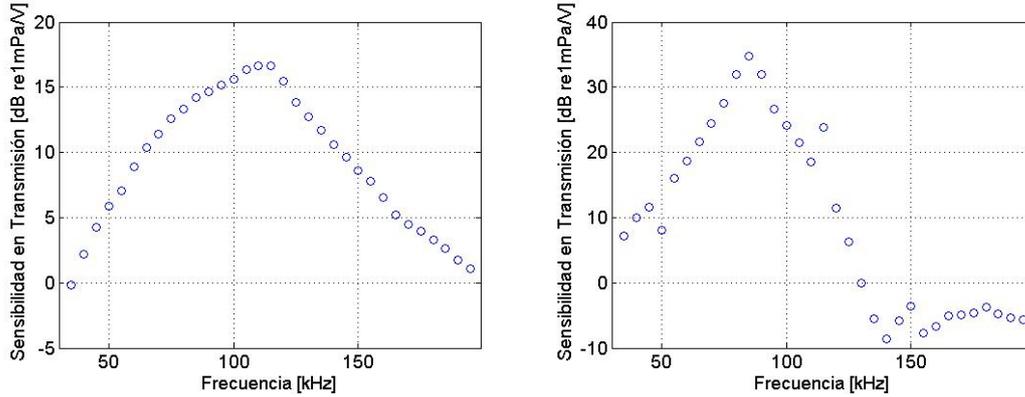


Figura 2.23: Sensibilidad en transmisión de un transductores de dimensión 20×20 mm, a 30 cm de distancia sobre el eje principal. Izquierda: Prototipo de capa simple. Derecha: Prototipo de capa doble. Medidas realizadas con un micrófono de 1/4 in.-4939; Brüel & Kjaer.

donde r, θ y ϕ corresponden a un sistema en coordenadas esféricas centrado en el centro del transductor. A su vez, ρ, c, k, L^2 y v_n corresponden respectivamente a la densidad del medio de propagación, la velocidad del sonido, el número de onda, el área del transductor y la amplitud de la velocidad normal de la superficie.

En las figuras 2.24 y 2.25, las simulaciones con el modelo teórico del campo lejano radiado sugieren que el efecto de las variaciones en el perfil de velocidad sobre el campo acústico es muy pequeño. El ajuste entre las pautas directivas teórica y medida, tanto para transductores de 1 y 2 capas, es bastante bueno, indicando que las fluctuaciones de la velocidad normal son suavizadas gracias al efecto integrador que ocurre en la conformación del campo acústico. Por tanto, se espera que a frecuencias inferiores a la primera resonancia el comportamiento de los transductores emule suficientemente bien el patrón de radiación de un pistón ideal. El error de estimación en el lóbulo principal no supera nunca los 3 dB. No obstante, éste puede ser debido al efecto de la distribución aleatoria de la velocidad, en combinación con la absorción acústica por la frecuencia, no considerada en la estimación. Cabe anotar que los valores de velocidad normal utilizados en la simulación corresponden con los valores promedios obtenidos de las respuestas en frecuencia mostradas en figuras 2.10 y 2.12 para los transductores de capa simple y doble respectivamente.

De los resultados anteriores se concluye que si bien no es posible garantizar una

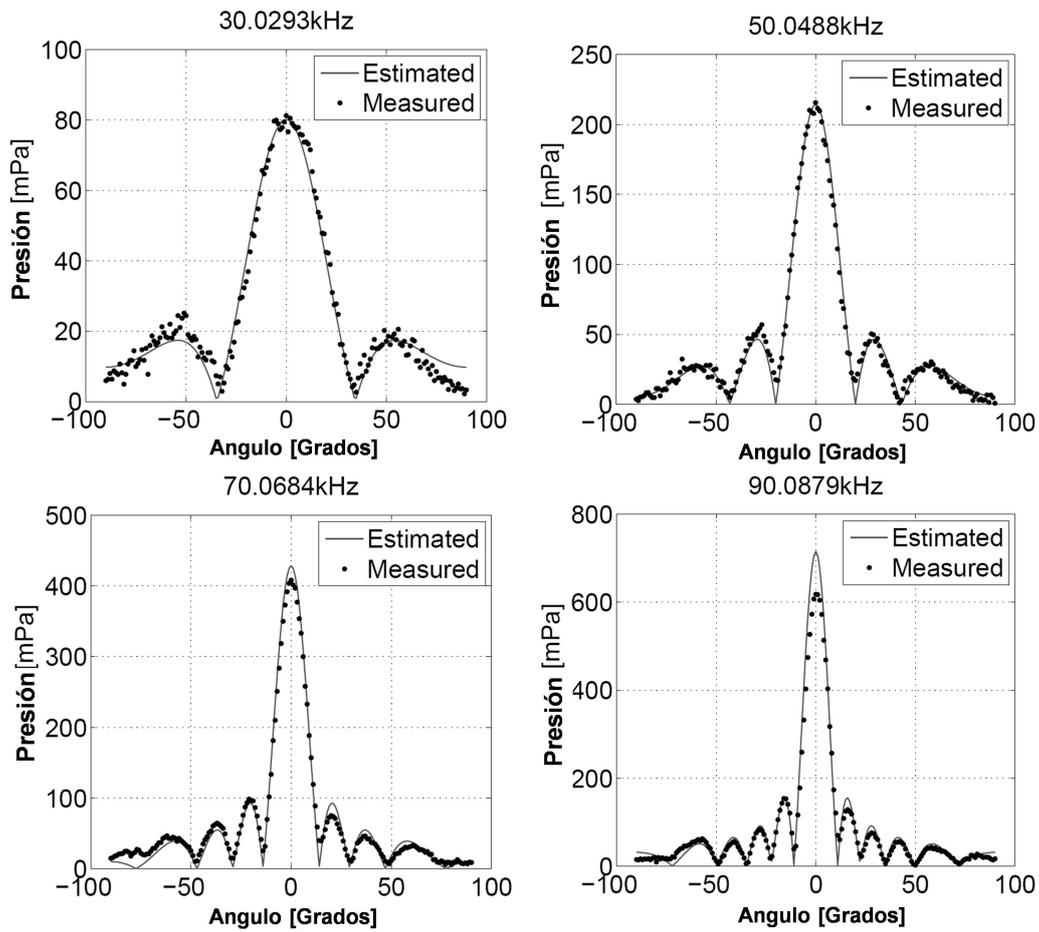


Figura 2.24: Comparación entre los patrones de radiación medido (prototipo 1) y estimado del campo lejano de un transductor plano, cuadrado, de 20 mm de lado y fabricado con una capa simple de Emfit.

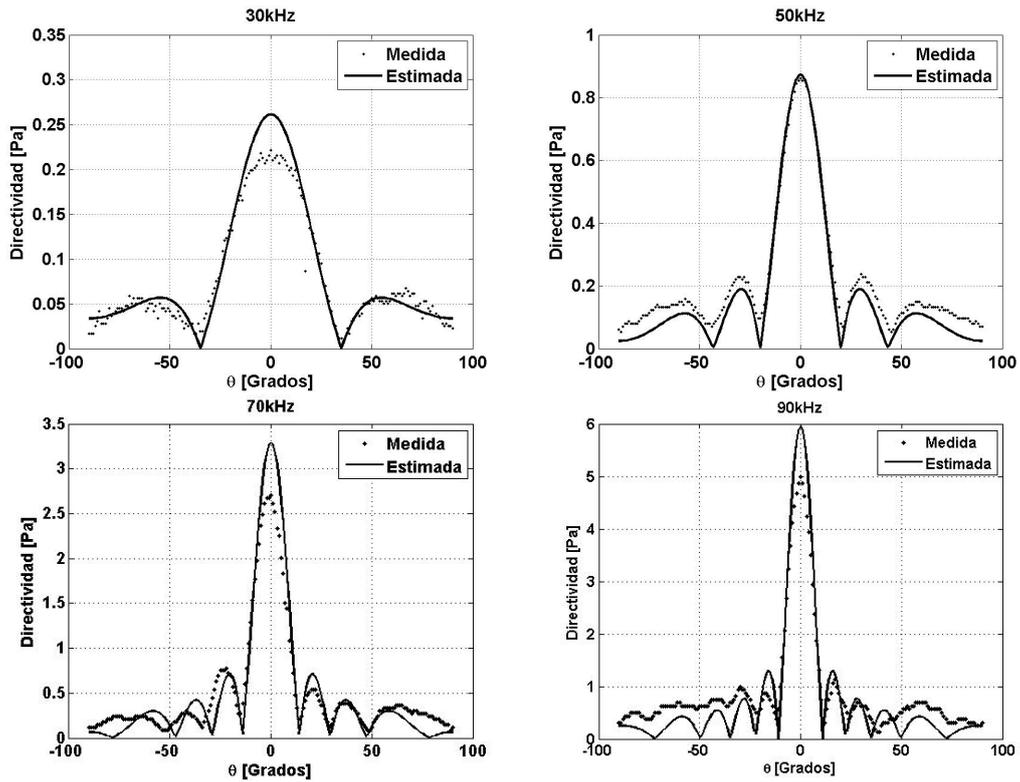


Figura 2.25: Comparación entre los patrones de radiación medido (prototipo 1) y estimado del campo lejano de un transductor plano , cuadrado, de 20 mm de lado y fabricado con dos capas de Emfit.

respuesta vibratoria tipo pistón a frecuencias cercanas a la resonancia ya que el efecto de las diferencias de fase y la mayor variabilidad del perfil de velocidad pueden llegar a ser significativos, esto no indica que los transductores no exhiban un campo acústico similar al de un transductor vibrando armónicamente con amplitud constante. En consecuencia, podrían ser utilizados inclusive a la frecuencia de resonancia, en aplicaciones de banda estrecha, tal como se demuestra en el capítulo 4, donde se presentan imágenes acústicas de buena calidad trabajando a la frecuencia de resonancia con transductores de capa simple. También, la figura 2.25 (abajo-derecha) confirma la semejanza entre el campo acústico de un prototipo de capa doble y el correspondiente al de un pistón plano, a 90 kHz, muy cerca de la resonancia (85 kHz).

2.4. Modelo Electromecánico de Transductores Emfit

Las características especiales de los ferroelectretos celulares los hacen particularmente adecuados para aplicaciones ultrasónicas en aire, donde la respuesta en frecuencia y, específicamente, la resonancia en modo espesor del dispositivo son esenciales. Poseer una frecuencia de resonancia ajustable resulta ventajoso en aplicaciones tanto de banda estrecha como de banda ancha. Por consiguiente, para el caso de los ferroelectretos celulares resulta necesario desarrollar modelos que permitan estimar eficientemente la respuesta de los transductores inclusive antes de fabricarlos y/o modificarlos. Modelos cuasiestáticos para predecir el coeficiente piezoeléctrico d_{33} y el módulo de elasticidad de películas ferroelectreto han sido propuestos por varios investigadores. El enfoque más común es una extensión del modelo propuesto para el micrófono de condensador o de electreto [113]. Este asume que el material está compuesto por capas alternadas de aire y de material base con una densidad de carga finita en sus fronteras [95] [71]. También, la respuesta dinámica medida utilizando espectroscopía dieléctrica ha sido modelada utilizando modelos de caja negra de transductores piezoeléctricos [81]. Formulaciones más complejas incluyen modelos estáticos utilizando elementos finitos [117] [124], así como modelos micromecánicos para describir el comportamiento piezoeléctrico observado a nivel macroscópico [52]. En este apartado, se presenta un enfoque distinto a los ya propuestos, el cual consi-

dera la película Emfit como un sistema viscoelástico masa-resorte-amortiguador. Si bien este tipo de modelos ha sido propuesto para transductores electrostáticos ranurados [136] [9], su aplicación en transductores basados en ferroelectretos no ha sido reportada y menos para el caso multicapa. Además, se demuestra que a pesar de la anisotropía de la película Emfit y de la no homogeneidad medida de su comportamiento vibratorio, la respuesta en frecuencia de transductores en el rango ultrasónico puede ser estimada utilizando un modelo electromecánico acoplado y de parámetros concentrados. Este tipo de modelos resulta de gran utilidad como herramienta para la optimización del diseño electrónico, así como para predecir la respuesta en aire bajo diferentes tipos de excitación y carga, y para estimar el comportamiento de transductores apilados.

Finalmente, cabe mencionar que aunque gran atención se ha prestado en la literatura a los modelos de capa simple, no ha sido éste el caso para los transductores multicapa, resultantes de apilar varias capas de película activa para lograr un incremento en la sensibilidad del transductor [66]. Aunque transductores de este tipo han sido fabricados y caracterizados en [63] [132], no se presentan modelos que permitan predecir el comportamiento dinámico de los transductores y que además incluyan el efecto del adhesivo utilizado en la configuración del transductor. Por tanto, la presente investigación supone un aporte en este sentido.

2.4.1. Deducción del Modelo

A pesar del hecho de que una mejor comprensión del comportamiento de los ferroelectretos ha sido obtenida a partir de los modelos ya propuestos, éstos no proporcionan suficientes consideraciones prácticas, basadas en la experimentación, que permitan al usuario final predecir el comportamiento de los transductores que pretende diseñar. En particular, parámetros como la masa dinámica equivalente de la película, el módulo de elasticidad, así como la estimación de la ubicación de sus frecuencias de resonancia resultan determinantes. Además, escasa atención ha sido dada a la no homogeneidad del material, la cual agrega mayor dificultad a la tarea de identificar los parámetros del modelo.

El modelo electromecánico de la película Emfit que se propone permite predecir el desplazamiento de la superficie radiante de la película (x_1) ante la aplicación de

un voltaje alterno aplicado en los electrodos del transductor. La figura 2.26 muestra esquemáticamente la sección transversal de un transductor de capa simple y su correspondiente modelo de 1 grado de libertad (GDL). La parte central de la película, compuesta por las cavidades polarizadas de aire, es modelada como un material viscoelástico utilizando un muelle y un amortiguador conectados en paralelo. La capa gris en la parte superior representa el aluminio vaporizado que constituye el electrodo superior del transductor. La cinta adhesiva conductora ECPT hace las veces de electrodo inferior. La cinta adhesiva conductora ECPT hace las veces de electrodo inferior.

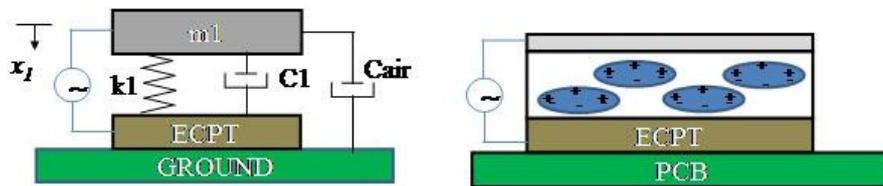


Figura 2.26: Representación esquemática de un transductor de capa simple y su modelo electromecánico de un grado de libertad.

Los parámetros del modelo de capa simple son los siguientes:

m_1 es la masa dinámica efectiva del transductor. Representa la suma de la masa del electrodo superior y una fracción de material poroso.

k_1 representa la constante dinámica de rigidez, debida a la parte sólida del material, así como también a los espacios interiores de aire.

C_1 es el coeficiente de amortiguamiento, el cual engloba las pérdidas viscosas dentro del material.

C_{air} incluye la impedancia mecánica del medio (aire en este caso).

V representa el voltaje de excitación aplicado al transductor.

x_0 es el espesor de la película Emfit ya polarizada, en equilibrio, tal como fue proporcionada por el fabricante. Nominalmente, $\sim 70 \mu\text{m}$ es considerado.

La película al estar polarizada presenta una precarga inicial debido a una fuerza electrostática F_0 la cual viene dada por $F_0 = k_1 \delta = \frac{q_0^2}{2\epsilon A}$, donde q_0 , ϵ y A son la

carga almacenada en equilibrio dentro del material, la permitividad dieléctrica y el área del transductor, respectivamente. δ es la variación inicial en el espesor del transductor debida a la fuerza de atracción electrostática F_0 . La capacidad de la película se considera que varía de acuerdo a: $\frac{\epsilon A}{x_0 - x_1}$. Usando una formulación de carga q_1 -deformación x_1 , la ecuación de Lagrange para las coordenadas generalizadas resulta en un sistema de ecuaciones acopladas de la forma:

$$m_1 \ddot{x}_1 + (C_1 + C_{air}) \dot{x}_1 + k_1(x_1 + \delta) - \frac{(q_0 + q)^2}{2\epsilon A} = F \quad (2.2)$$

$$\frac{x_0 - x_1}{\epsilon A} (q_0 + q) = V \quad (2.3)$$

Este par de ecuaciones representan la dinámica del sistema modelado, en el caso en que tanto una fuerza externa al transductor F sobre la superficie como un voltaje de excitación V sean aplicados. Se observa la dependencia cuadrática entre la fuerza y el voltaje, afectada por la dinámica del desplazamiento. Dado que en el modo actuador de operación no hay presencia de fuerza externa, sino de un voltaje de excitación, en la ecuación 2.2 el término F es igual a 0. En la obtención de estas ecuaciones se ha asumido que la dinámica del circuito eléctrico de excitación es mucho más rápida que la de la parte mecánica del sistema, por lo que no aparecen incluidos en el modelo.

En el caso en que ningún voltaje sea aplicado entre electrodos, es decir, en equilibrio, $\ddot{x}_1 = \dot{x}_1 = x_1 = 0 = q$, se observa en la ecuación 2.2 que la fuerza electrostática, ocasionada por la carga q_0 almacenada durante la polarización del material Emfit, está balanceada con la fuerza elástica inicial del material:

$$k_1 \delta = \frac{q_0^2}{2\epsilon A} \quad (2.4)$$

Igualmente, la diferencia de potencial entre electrodos en la posición de equilibrio, está dado por:

$$V_0 = \frac{x_0 q_0}{\epsilon A} \quad (2.5)$$

Si se asume que $q \ll q_0$, $x \ll x_0$ y que, como es nuestro caso de operación, que el voltaje V está formado por una componente dc (V_0 originada por la polarización permanente) y otra componente ac (V_{ac}), de modo que $V = V_0 + V_{ac}$, se obtiene la

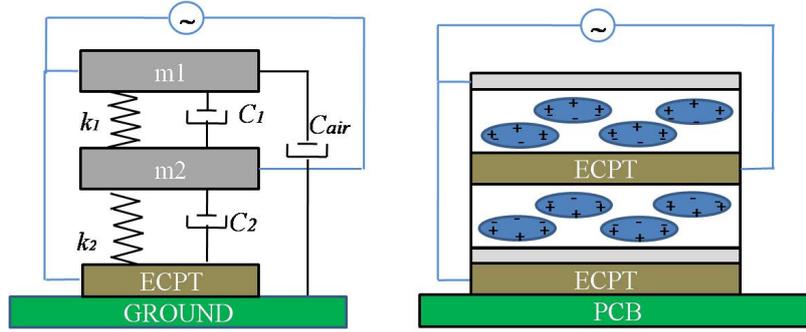


Figura 2.27: Representación esquemática de un transductor de dos capas y su modelo equivalente de dos GDL.

versión linealizada de las ecuaciones 2.2 y 2.3:

$$m_1 \ddot{x}_1 + (C_1 + C_{air}) \dot{x}_1 + (k_1 - T)x_1 = \frac{q_0}{x_0} V_{ac} \quad (2.6)$$

donde $T = q_0^2 / (\epsilon A x_0)$. Se observa, en el tercer término de la parte izquierda de la ecuación, que la rigidez del material está afectada por la polarización permanente del mismo representada por la carga atrapada q_0 . Esto constata la relación existente entre la densidad de carga y la sensibilidad del material.

La figura 2.27 muestra la representación esquemática de un transductor de capa doble conectado en configuración antiparalela. Siguiendo un proceso similar al descrito para un GDL y bajo las mismas asunciones, es posible escribir la ecuación matricial resultante descriptiva de la dinámica de un transductor de n capas:

$$[M] \{\ddot{x}\} + [C] \{\dot{x}\} + [K] \{x\} = \frac{q_0}{x_0} \{V_{ac}\} \quad (2.7)$$

donde $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$, $[M] = \text{diag}[m_1, m_2, \dots, m_n]$ y las matrices de amortiguamiento y rigidez son, respectivamente:

$$[C] = \begin{bmatrix} C_1 + C_{air} & -C_1 & \cdots & 0 \\ -C_1 & C_1 + C_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & -C_{n-1} \\ 0 & 0 & -C_{n-1} & C_{n-1} + C_n \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

y

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 - T & -k_1 + T & \cdots & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 - T & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & -k_{n-1} + T \\ 0 & 0 & -k_{n-1} & k_{n-1} + k_n - T \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Nótese que el mismo voltaje V_{ac} es aplicado en cada capa, las cuales están numeradas en orden descendente, es decir, que la enésima estará en contacto con el sustrato. Asimismo, las masas intermedias dentro del transductor apilado, estarán compuestas por el adhesivo utilizado, así como por una fracción del material base.

2.4.2. Identificación del Modelo Electromecánico para transductores Apilados.

El procedimiento de identificación paramétrica llevado a cabo se divide en dos pasos fundamentales: 1. la obtención de los parámetros que constituyen el modelo de un transductor de capa simple de 1 GDL, y 2. la determinación de los parámetros de un modelo de 2 GDL, a partir de los obtenidos en el paso anterior. El modelo resultante permite predecir la respuesta de cualquier transductor de n capas fabricado con Emfit y apilado con cinta ECPT.

La información de entrada al proceso de identificación se resume en la tabla 2.1, a continuación:

2.4.2.1. Paso 1: Estimación de la masa dinámica m_1

Determinar la masa dinámica resulta fundamental en el proceso de caracterización del transductor y del material. Como la estimación directa no es posible, una pequeña masa uniformemente distribuida de cinta (celo), de aproximadamente $\Delta m = 14.3$ mg, fue adherida sobre todo el electrodo superior de un prototipo plano fabricado con ECPT. Como consecuencia de la masa añadida, la frecuencia de resonancia se desplazó hasta aproximadamente los 165 kHz, como se muestra en la figura 2.28. Usando la relación expresada en la ecuación

$$\frac{m_1 + \Delta m}{m_1} = \left\{ \frac{[\omega_n]_{m_1}}{[\omega_n]_{m_1 + \Delta m}} \right\}^2, \quad (2.10)$$

Parámetros	Valor
Densidad medida del adhesivo utilizado: ρ_{ECPT}	11.874 mg/cm ²
Densidad medida de la película Emfit: ρ_{Emfit}	3.445 mg/cm ²
Permitividad del aire: ϵ	8.854×10^{-12} F/m
Densidad del aire: ρ	1.21 kg/m ³
Velocidad del sonido: c	343 m/s
Espesor nominal de la película Emfit: x_0	$\approx 70 \mu\text{m}$;
Espesor medido del electrodo Aluminio:	$\approx 150 \text{ nm}$;
Área del transductor: A	4 cm ²
Respuesta en frecuencia de la superficie radiante de transductores de capa simple y doble.	Chirp de 30 kHz - 400 kHz,

Tabla 2.1: Parámetros conocidos para el proceso de identificación paramétrica

fue posible determinar la masa dinámica efectiva m_1 de un transductor de capa simple, la cual es de $m_1 \approx 5,49$ mg. Este resultado indica que aproximadamente el 40 % de la masa total de película Emfit utilizada en la fabricación del dispositivo, calculada a partir de la densidad medida, vibra al ser excitada por un voltaje alterno. Además, ésta está compuesta fundamentalmente del material base de la película (polipropileno) ya que la capa de aluminio de apenas 150 nm, contribuye en menos del 4 % en el valor de la masa dinámica, para una densidad del aluminio de 2700 mg/cm³. Por tanto el efecto de la masa del electrodo superior sobre la respuesta dinámica del transductor no es significativo.

2.4.2.2. Paso 2: Obtención de k_1 , $C_t = C_1 + C_{air}$ y q_0

Para completar la identificación de los parámetros de un modelo de capa simple, se utilizó un esquema de optimización mediante mínimos cuadrados. Ajustando la respuesta del modelo a cada una de las 361 respuestas medidas sobre diferentes puntos de la superficie radiante del prototipo 1 de capa simple, se determinó la distribución estadística de los parámetros k_1 , $C_t = C_1 + C_{air}$, q_0 ; así como de la frecuencia de resonancia ω_r . Ver figura 2.29.

Nótese como los valores de k_1 y q_0 presentan una distribución aproximadamente normal, mientras que los valores C_t poseen una distribución más dispersa y sesgada hacia la izquierda. Asimismo, la frecuencia de resonancia medida varía entre aproxi-

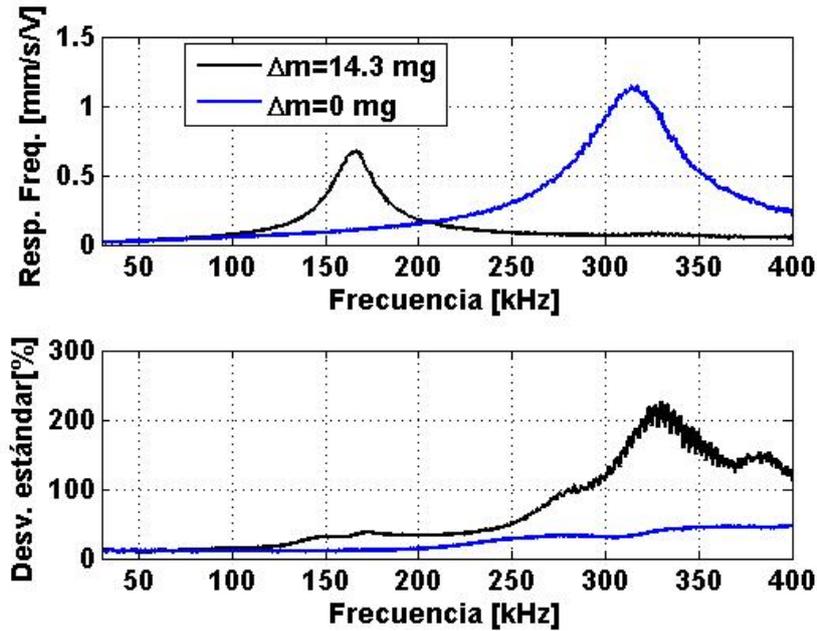


Figura 2.28: Respuesta en frecuencia promedio de un emisor plano con y sin masa añadida (Δm) en el electrodo superior; medida por interferometría y sin cambiar la película activa. Desviación estándar como porcentaje del promedio.

madamente 290 kHz y 320 kHz. La figura 2.30 presenta el ajuste entre la respuesta en frecuencia promedio medida y la estimada utilizando los valores promedio de los parámetros $k_1 = 2,124 \times 10^7 \text{N/m}$, $q_0 = 1,0875 \times 10^{-7} \text{C}$ y $C_t = 1,3146 \text{Ns/m}$. La calidad del ajuste es bastante buena, con errores de estimación inferiores al 20 %.

Cabe anotar que si bien los parámetros encontrados ajustan de manera adecuada la respuesta promedio del prototipo 1, las variaciones en la región que rodea la resonancia son bastante grandes en magnitud aunque el valor de la frecuencia de resonante se mantiene dentro del margen antes acotado. Ver figuras 2.30 y 2.31. Esto puede ser debido a la no homogeneidad de las características de la película Emfit, así como a efectos resultantes del proceso manual de adhesión de la película al sustrato. Por consiguiente, para estimar correctamente con el modelo propuesto las respuestas promedio de otros prototipos mostradas en la figura 2.31 sería necesario principalmente aumentar el valor del coeficiente de amortiguamiento C_t , ya que éste es el que domina el valor de la amplitud cerca de la resonancia. Ver figura 2.32. Nótese también cómo el ancho de banda de los prototipos 2, 3 y 4 es mayor que el del prototipo 1. No

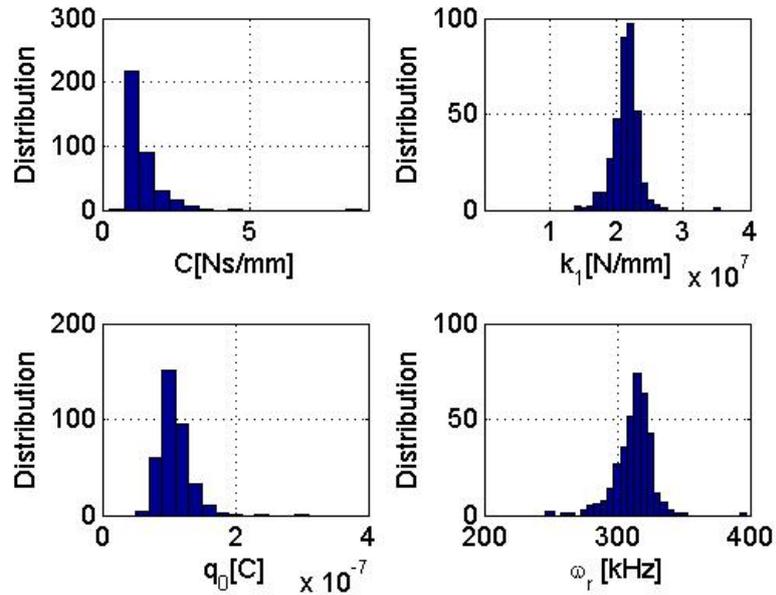


Figura 2.29: Distribución estadística de los parámetros constitutivos de un modelo dinámico para transductores de capa simple fabricados con Emfit.

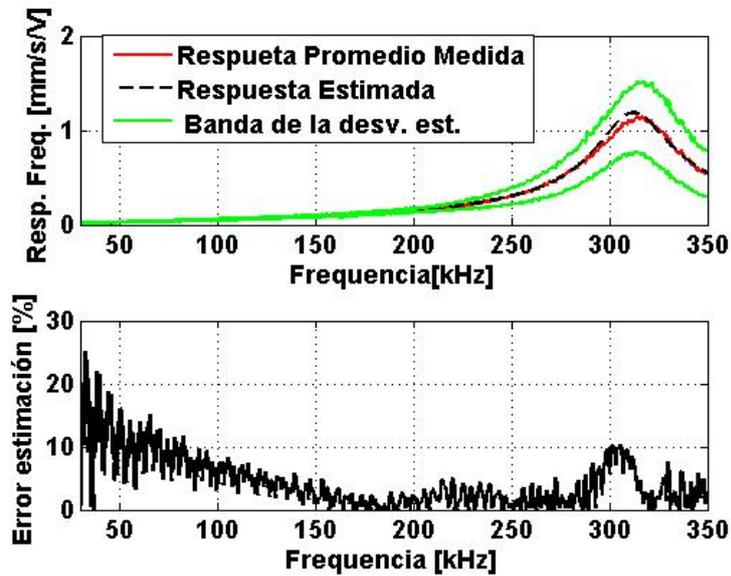


Figura 2.30: Resultados del proceso de optimización. Ajuste entre la respuesta promedio medida y su contraparte resultante del modelo identificado para un transductor de capa simple.

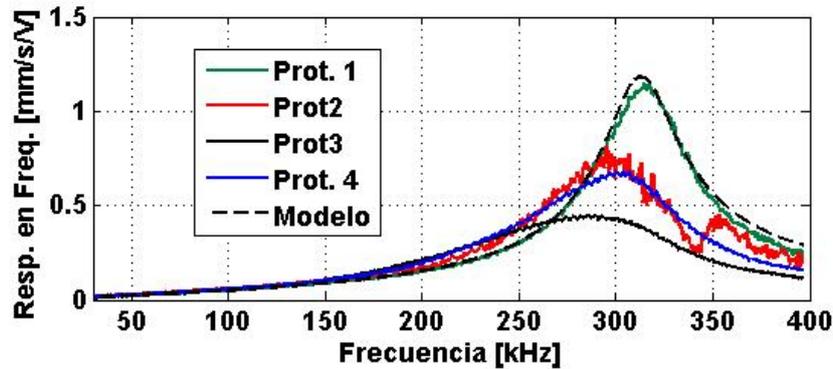


Figura 2.31: Respuesta en frecuencia promedio de 4 prototipos diferentes de capa simple y respuesta del modelo identificado.

obstante, todas la respuestas de los prototipos de capa simple construidas pueden ser modeladas manteniendo los parámetros dentro de los rangos obtenidos.

El módulo de elasticidad resultante, E , estimado a partir de la Ley de Hooke es aproximadamente 3.715 MPa. Este valor no concuerda con el dado por el fabricante de la película ($0.5 \pm 25\%$ MPa), como tampoco con los reportados por Kressmann [72] (2 MPa) y Paaajanen [96] (0.89 MPa). Esta diferencia se debe a que los valores reportados por ellos fueron calculados bajo condiciones cuasi-estáticas [96] o en suposiciones no basadas en resultados experimentales [72].

En conclusión, los parámetros descriptivos de la dinámica de los transductores Emfit no son deterministas para diferentes puntos de medida, aunque su rango de variación ha sido adecuadamente acotado. Los valores correspondientes a la masa dinámica, la constante de rigidez y la carga almacenada presentan una mayor estabilidad, en comparación con los obtenidos para el coeficiente de amortiguamiento. En este sentido, los valores correspondientes al factor de amortiguamiento ζ indican una respuesta subamortiguada. Esto a su vez representa una buena eficiencia de transmisión, así como un factor de calidad, $Q = 1/2\zeta$, máximo de 8.3 (en el caso del prototipo 1), el cual resulta similar al reportado por Toda [83] para transductores cilíndricos fabricados con PVDF para aplicaciones ultrasónicas en aire.

En consecuencia, el ancho de banda del un transductor de capa simple, cargado con una masa Δm adherida a su electrodo superior, podría estimarse según:

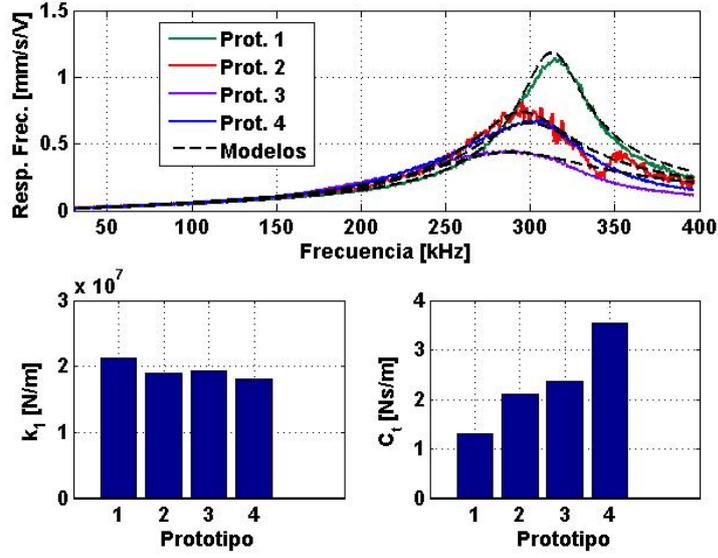


Figura 2.32: Arriba: Ajuste del modelo de 1GDL a la respuesta promedio de 4 transductores diferentes de capa simple. Abajo: Parámetros del modelo correspondientes al ajuste mostrado arriba. m_1 y q_0 constantes.

$$BW \approx 2\zeta\omega_{nom}\sqrt{\frac{0,4\rho_{Emfit}}{0,4\rho_{Emfit} + \rho_{\Delta m}}} \quad (2.11)$$

donde $\rho_{\Delta m}$ es la densidad del celo utilizado para desplazar la frecuencia de resonancia (0.0357 kg/m^2 en este trabajo). ω_{nom} es la frecuencia de resonancia nominal de la película en aire, que puede suponerse cercana a los 315 kHz.

Conocidos los valores de m_1 , C_t , ω_r y q_0 , es posible predecir el comportamiento vibratorio de los transductores ante cualquier excitación arbitraria en el dominio de frecuencias comprendido entre 20 y 400 kHz, teniendo como medio de propagación acústica el aire. Estos resultados resultan indispensables para diseñar transductores que trabajen tanto en modo resonante como ante excitaciones de banda ancha, así como para predecir aproximadamente la frecuencia de resonancia siempre que una masa pasiva sea adherida al electrodo superior. Finalmente, cabe recordar que la respuesta eléctrica en caso de una entrada mecánica (presión sonora, por ejemplo) también puede ser estimada a partir de las ecuaciones acopladas obtenidas del análisis realizado. Ver ecuaciones (2.2) y (2.3)

2.4.2.3. Paso 3: Obtención de m_2 , k_2 y C_2

La masa dinámica intermedia m_2 , ubicada entre las dos capas de Emfit está compuesta por la masa del adhesivo y un porcentaje del material base. Como estimación inicial, previa al proceso de optimización, se consideró que $m_2 = m_{ECP T} + 2(m_1 - m_{Al}) \approx 57,2$ mg, donde $m_{Al} \approx 0,2$ mg es la masa del electrodo de aluminio. C_{air} se estimó utilizando la impedancia acústica del aire, de la forma $C_{air} = \rho c A = 0.166$ Ns/m. Los parámetros k_2 y C_2 se suponen de magnitud igual al promedio de las obtenidas en el paso anterior para k_1 y C_1 , es decir: 1.9383 N/m y 2.336 Ns/m respectivamente.

La figura 2.33 muestra la estimación inicial del modelo de dos capas utilizando los parámetros anteriores estimados a partir de la identificación del modelo de 1 GDL. Se aprecia como la predicción de las frecuencias de resonancias es bastante buena, con una desviación de apenas el 10 % del valor medido. Este resultado implica que los valores obtenidos para las masas dinámicas, así como para las constantes de rigidez de los resortes, son correctos, puesto que son éstos quienes principalmente determinan la posición de las resonancias. Sin embargo, el modelo no es capaz de predecir la amplitud de la respuesta en el rango cercano a la primera resonancia, cuyo valor está estrechamente relacionado con el valor de C_2 .

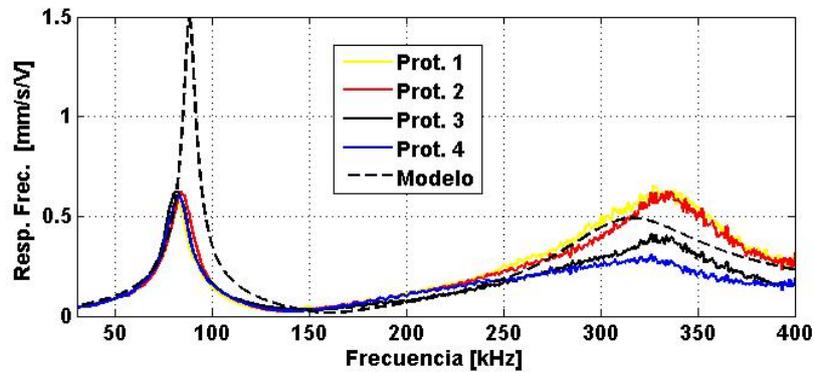


Figura 2.33: Predicción inicial de la respuesta en frecuencia, a partir de los resultados obtenidos de la identificación paramétrica del modelo de capa simple. $m_1 = 5,49$ mg, $m_2 = 57,2$ mg, $k_1 = k_2 = 1,93 \times 10^7$ N/m, $C_1 = C_2 = 2,17$ Ns/m, $C_{air} = 0.16$ Ns/m y $q_0 = 1,085 \times 10^{-7}$ C.

Tras realizar el proceso de optimización con restricciones, fue posible determinar los valores que mejor ajustan la respuesta medida de los transductores de doble ca-

pa. Ver figura 2.34. El ajuste es suficientemente bueno hasta la primera resonancia, donde la variación de la respuesta es pequeña. No obstante, a frecuencias cercanas a la segunda resonancia, el error de estimación se incrementa, aunque manteniéndose dentro de la banda de la desviación estándar de la respuesta medida. La figura 2.35 muestra los valores numéricos de los parámetros resultantes del proceso de optimización. Se observa como m_1 se mantuvo constante y como la predicción inicial de $m_2 = 57,2$ mm resulta acertada comparada con los resultados obtenidos de ≈ 62 mg. De igual manera, los valores de las constantes de rigidez $k_1 = 2,14 \times 10^7$ N/m y $k_2 = 1,83 \times 10^7$ N/m, si bien no son iguales en magnitud, están comprendidos dentro del rango de variación resultante de la identificación paramétrica del modelo de capa simple. En cuanto a los coeficientes de amortiguamiento, se observa como C_2 es más de dos veces C_1 , logrando así ajustar la amplitud de la respuesta alrededor de la primera resonancia.

Si bien, la naturaleza estadística de los datos obtenidos por interferometría no permite determinar la ubicación exacta de las frecuencias de resonancia, los resultados alcanzados permiten realizar una estimación útil de su valor aproximado. La discrepancia entre los coeficientes de amortiguamiento puede ser debida a posibles pérdidas por causa del adhesivo utilizado o a fenómenos eléctricos no incluidos en el modelo, tales como el acoplamiento del campo eléctrico de un par de electrodos en el otro, un contacto inadecuado en el electrodo que une las dos capas de Emfit, o una variación en la respuesta en frecuencia del amplificador de potencia al tener que excitar una carga capacitiva. Investigación adicional es necesaria para determinar con certeza este efecto, así como en la validación de los resultados obtenidos con prototipos de tres y más capas.

En conclusión, el modelo electromecánico predicho puede ser utilizado para estimar la respuesta dinámica de transductores multicapa. La estimación de las masas dinámicas y las constantes de resorte equivalente, permitirán la predicción aproximada de la ubicación de las frecuencias de resonancia de los transductores. Asimismo, el rango observado de variación de los coeficientes de amortiguamiento también permitirá realizar la estimación, aunque no tan precisa, de la amplitud resultante de dichas resonancias. Igualmente, el modelo propuesto puede ser implementado en recepción a partir de las ecuaciones acopladas (2.2) y (2.3).

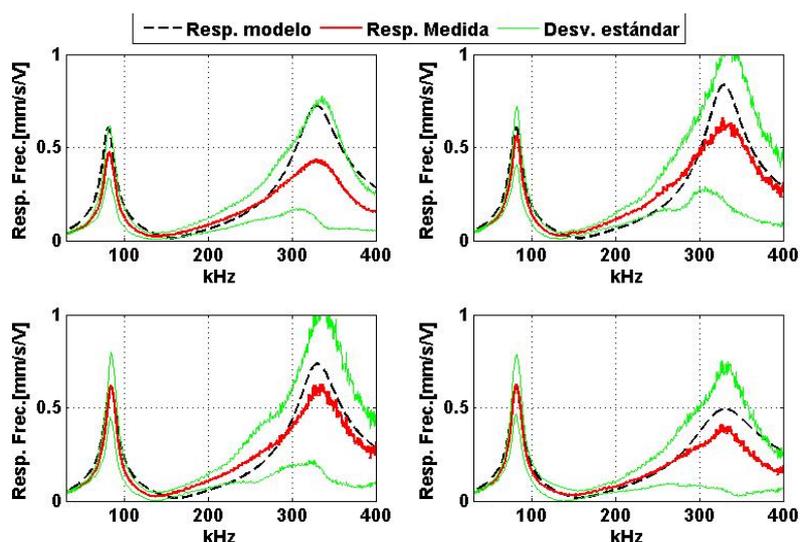


Figura 2.34: Ajuste del modelo electromecánico de 2 GDL a la respuesta medida de 4 prototipos de doble capa fabricados con Emfit y ECPT.

2.5. Trabajo Futuro

Dentro de las ideas a desarrollar como trabajo futuro se proponen las siguientes:

- Desarrollar transductores con otros ferroelectretos celulares de mayor sensibilidad y estabilidad térmica, como los basados en películas fluorocarbonadas y descritos en [142].
- En la construcción de transductores apilados, conviene explorar la fabricación de transductores sin la utilización de adhesivos o en su defecto, aplicando capas de adhesivo suficientemente livianas que permitan incrementar la sensibilidad sin desplazar significativamente la frecuencia de resonancia. Igualmente, resulta necesario investigar si las características electromecánicas del adhesivo intervienen en la discrepancia observada en la amplitud de la respuesta en frecuencia entre los resultados experimentales y los estimados con el modelo electromecánico desarrollado.
- Explorar el diseño de transductores tanto multicapa como de capa simple cuya superficie superior sea modificada con el fin de variar la respuesta en frecuencia,

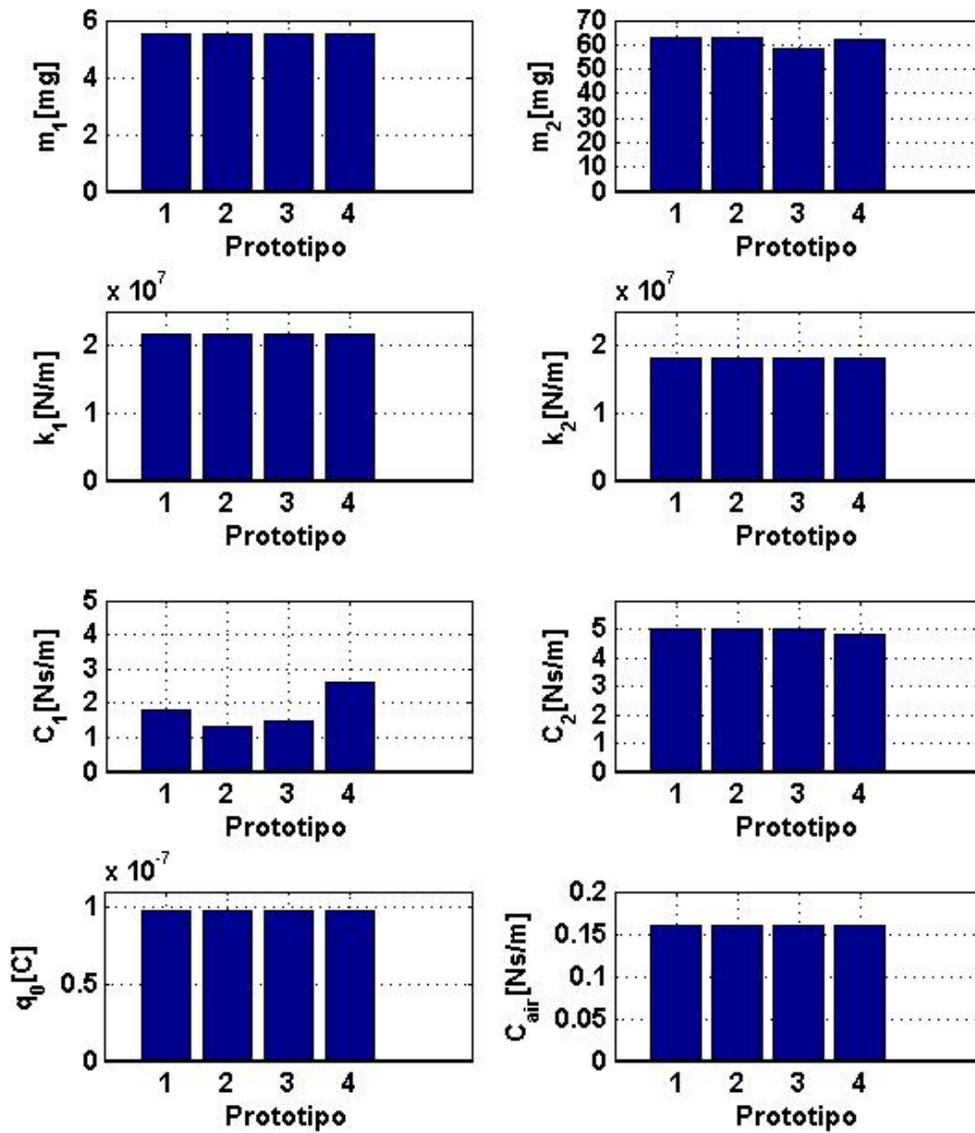


Figura 2.35: Parámetros obtenidos del proceso de identificación paramétrica utilizando la respuesta medida de 4 prototipos de doble capa diferentes.

por ejemplo aumentando el ancho de banda. Resultados preliminares obtenidos con transductores como el mostrado en la figura 2.36, donde la capa superior del transductor posee agujeros, sugieren que esto es posible.

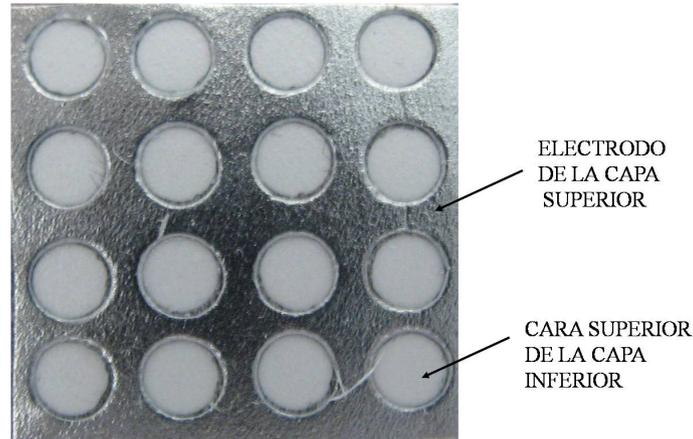


Figura 2.36: Transductor de doble capa, cuya capa superior ha sido modificada con agujeros.

- Todos los resultados presentados en este capítulo fueron obtenidos con transductores operando en modo actuador. Por consiguiente, resulta de interés modelar también el sistema completo emisor-receptor, incluyendo el efecto de la electrónica utilizada sobre la respuesta del transductor.

2.6. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado la caracterización electromecánica y acústica de transductores planos, tanto de capa simple como doble, fabricados con película Emfit. Los resultados tanto interferométricos como acústicos obtenidos con dispositivos de capa simple muestran que éstos exhiben un comportamiento vibratorio que emula a un pistón ideal a frecuencias menores a 150 kHz. Igualmente un valor de coeficiente piezoeléctrico d_{33} de aproximadamente 100 pC/N (o pm/V) fue obtenido, a frecuencias fuera de la resonancia. Además, el análisis de la respuesta en frecuencia de transductores utilizando diferentes adhesivos permitió concluir que utilizar cintas adhesivas de matriz acrílica con alta conductividad eléctrica, permiten la fabricación

de transductores de manera rápida y repetible. También, se demostró empíricamente que los transductores se comportan linealmente ante excitaciones con voltajes de hasta 200 Vp. En lo que concierne al rango de frecuencia cercano a la frecuencia de resonancia a 300 kHz, la variabilidad tanto del patrón vibratorio de la superficie radiante, así como de la respuesta en frecuencia, no permiten afirmar categóricamente un comportamiento tipo pistón. Sin embargo, en el capítulo 4 de este trabajo se demuestra que los transductores son igualmente útiles en dicho rango de frecuencia para la obtención de imágenes acústicas tanto en modo transmisión como en pulsoeco. También, se determinó que la masa dinámica de un transductor de capa simple es de aproximadamente el 40 % de la masa total de Emfit usada en la fabricación del transductor. Este resultado fue utilizado como punto de partida en la caracterización del modelo electromecánico propuesto para estimar la respuesta dinámica de un transductor de capa simple.

Con referencia a los transductores multicapa, fue realizado un análisis similar al llevado a cabo con los de capa simple. La sensibilidad de un transductor doble capa se duplica a frecuencias fuera de resonancia. Mientras, a la frecuencia de resonancia, el nivel de SPL llega a ser hasta 20 dB mayor que la de un transductor de capa simple a esa misma frecuencia. El modo de vibración observado de los prototipos de doble capa fabricados resultó suficientemente homogéneo hasta la primera resonancia (≈ 85 kHz), y bastante irregular a la segunda (≈ 330 kHz). Esto se debe principalmente a la gran variabilidad de la respuesta en frecuencia observada en los prototipos de capa simple, en ese mismo rango de frecuencias. Finalmente, la identificación del modelo electromecánico propuesto permitió establecer los rangos de variación de los parámetros que gobiernan la posición de las frecuencias de resonancia. No obstante, investigación adicional es requerida con el fin de predecir adecuadamente la amplitud de la respuesta a la primera resonancia.

Buena parte de los resultados descritos en este capítulo han sido ya publicados en artículos propios del autor y que se especifican en las referencias [36] [33]

TRANSDUCTORES DE SUPERFICIE DESARROLLABLE BASADOS EN FERROELECTRETOS CELULARES (FCel)

3.1. Introducción

Como se introdujo ya en el capítulo dos de este trabajo, una de las propiedades más importantes de los FCel, a la que no se le ha prestado suficiente atención en la literatura, es su flexibilidad mecánica, la cual, salvo en el caso de la película de fluoruro de polivinilideno (PVDF), no es común a las tecnologías utilizadas para la generación de ultrasonidos en aire; es decir, las cerámicas piezoeléctricas (PZTs), los dispositivos capacitivos (cMUTs y membranas) y piezocompuestos. Esto nos llevó a concebir transductores de superficie no-plana con FCel, adhiriendo la película Emfit sobre sustratos especiales, con la idea de llegar a generar campos acústicos de diversa índole y aplicación. Lo primero en verificar fue el eventual cambio de las propiedades electromecánicas del Emfit y de su patrón vibratorio después de ser fijada sobre sustratos con diferentes niveles de curvatura. Resultados positivos en este sentido redundaron en el diseño de transductores de gran rango de frecuencia de operación y campo acústico especificado.

En este capítulo se presentan diferentes ejemplos de transductores con características especiales en cuanto a geometría del sustrato, respuesta acústica producida y potencial utilidad posterior. En particular, transductores sobre superficies desarrollables (SD) han sido construidos y caracterizados. Asimismo, sus respectivas respuestas acústicas han sido estimadas teóricamente y comparadas con los valores experimentales obtenidos.

En la primera sección se presenta una introducción referente a los tipos de superficies desarrollables y las posibilidades que éstas ofrecen. La segunda incluye un breve marco teórico referente a los modelos de radiación acústica de fuentes finitas con éste tipo de superficie, específicamente los tipos cilíndrico, esférico y tangencial (helicoidal). Posteriormente, se muestra el diseño, la caracterización y la validación de diferentes prototipos fabricados con FCell. Finalmente se plantean varias ideas de trabajo futuro, así como las conclusiones del estudio.

3.1.1. Las Superficies Desarrollables.

Dadas las características físicas de una película FCell, semejante a una hoja de papel, la única restricción que debe satisfacer un sustrato para que la película pueda ser fácilmente adherida a él, es que éste posea una superficie desarrollable (SD).

Básicamente, una SD puede ser extendida o dispuesta sobre un plano sin distorsionarla, sin comprimirla o estirarla, o, lo que es lo mismo, es una superficie que puede ser obtenida a partir de la transformación de un plano tras doblarlo, flexionarlo, enrollarlo o cortarlo en partes para luego unirlos. Una definición más formal, indica que una SD es aquella que tiene curvatura gaussiana nula [135]. También, y desde un punto de vista geométrico, toda superficie, obtenida tras realizar un barrido espacial de la tangente a una curva cualquiera, es desarrollable [105]. Es decir, que cada plano tangente toca a la superficie a lo largo de una línea recta.

En un espacio tridimensional, las SD que se pueden concebir se muestran en la figura 3.1 y son las siguientes:

1. Cilindros generalizados, cuya sección transversal puede ser cualquier curva suave.
2. Superficies cónicas generalizadas.

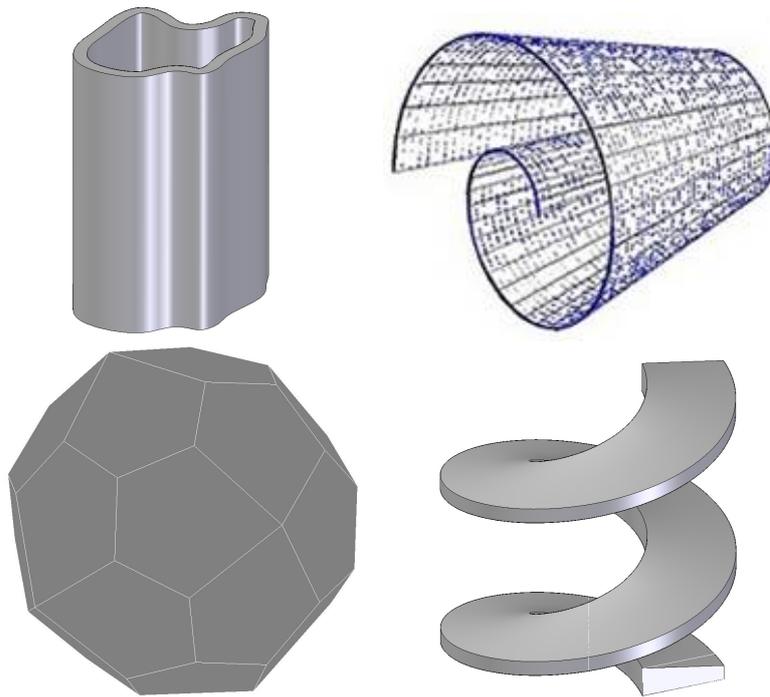


Figura 3.1: Diferentes tipos de superficies desarrollables. Arriba-Izq:Cilindro generalizado. Arriba-Der: Superficie cónica general. Abajo Izq: Icositetraedro pentagonal. Abajo-Der:Superficie de hélice circular

3. Superficies planas, las cuales pueden ser vistas como un cilindro cuya sección transversal es una línea.
4. Superficies tangentes, las cuales son construidas por medio del barrido de líneas tangentes a una curva espacial.

Las SD tienen gran aplicación en muchas áreas de la ingeniería y la manufactura, como por ejemplo en el modelado del casco de un barco [40], en la confección de ropa [120], en el diseño de componentes de automóvil [26], entre otras. También, en aplicaciones gráficas por computador, las superficies de los objetos son aproximadas utilizando SD.

En el ámbito de los transductores ultrasónicos monoelemento para aplicaciones en aire, no es usual encontrar transductores con geometrías complejas, salvo discos o transductores semi-planos, cilindros y esferas, principalmente fabricados con cerámicas piezoeléctricas. Sin embargo, gracias a la flexibilidad de los materiales y

las posibilidades que brinda el proceso de fabricación, transductores capacitivos de membrana así como cMUTs han sido fabricados sobre superficies cónicas, cilíndricas y esféricas. El caso del PVDF es especial ya que su flexibilidad es comparable a la de los FCell y por tanto es posible configurar geometrías complejas, sin embargo, el hecho de poseer una mejor sensibilidad en la dirección longitudinal, reduce la facilidad para construir transductores para aplicación en aire, ya que el montaje mecánico debe garantizar la extensión del área activa, como se muestra más adelante.

Las principales características de los FCell que han sido señaladas por los investigadores son su capacidad de almacenamiento de carga, facilidad de uso, bajo costo, elevado coeficiente piezoeléctrico d_{33} , baja impedancia acústica, entre otras. Sin embargo muy poca atención ha sido dada a su flexibilidad mecánica, la cual, junto con el modo de vibración tipo pistón, hacen a la película Emfit particularmente adecuada para fabricar transductores especiales sobre SD. En este capítulo se demuestra empíricamente que ni el modo de vibración tipo pistón, ni la respuesta en frecuencia electromecánica del material se ven afectados por causa de la curvatura de la superficie del sustrato. Además, se muestra que es posible lograr transductores que emulen el comportamiento de otros de superficie no desarrollable, como los de geometría esférica, así como la generación de vórtices acústicos de gran calidad. No obstante, trabajar con Emfit presenta el inconveniente de tener que diseñar transductores con tamaño y área suficiente para lograr niveles de presión sonora (SPL) adecuados en aplicaciones reales, con el consecuente impacto en el patrón de emisión/recepción.

3.1.2. Transductores Cilíndricos y Esféricos

Diversas aplicaciones ultrasónicas en aire, como los sistemas de posicionamiento local (US-LPS), sistemas de medida de rango y navegación autónoma, entre otras, requieren de transductores con un patrón de emisión/recepción suficientemente amplio para dispersar espacialmente la energía acústica y lograr una buena cobertura. En particular transductores con directividad omnidireccional tanto en dos (panorámica) como en tres dimensiones son preferidos con frecuencia ya que permiten maximizar el área a cubrir utilizando pocos transductores [102]. Si además de poseer dicha directividad, se cuenta con un ancho de banda considerable, el beneficio resulta aún mayor por la posibilidad de utilizar técnicas de espectro ensanchado. Sin embargo, son escasos

los trabajos reportados referentes a dispositivos ultrasónicos para aire que combinen estas dos características. Transductores cerámicos esféricos, han sido utilizados para generar una pauta omnidireccional pero con un comportamiento fundamentalmente resonante resultado de la dependencia del modo de vibración con relación al radio exterior de la esfera piezoeléctrica y su espesor de pared [67]. También se ha reportado, a pesar de la dificultad de fabricación, el uso de transductores esféricos de tipo capacitivo (micromecanizados) pero como radiadores esféricos y cilíndricos focalizados [114] [25] [106]. Por su parte, el PVDF, cuya flexibilidad es similar a la de los FCell, ha sido empleado en diversas aplicaciones gracias a la posibilidad que ofrecen para modificar el campo de emisión/recepción dependiendo del montaje mecánico de la película. Algunas aplicaciones típicas de estos transductores son la medida de rangos con transductores panorámicos [83], los US-LPS [55], transductores de directividad controlada [13], entre otros. En todos los casos para aire, segmentos de película son empotrados en sus extremos, de manera que al excitarlos se produzca un cambio en la longitud de los mismos y por tanto en el radio de la circunferencia que describen, generando así las ondas (Ver figura 3.2). Si bien de esta manera resulta expedito lograr patrones panorámicos, no ocurre lo mismo cuando se pretende la omnidireccionalidad tridimensional. Sin embargo, el interés por transductores ultrasónicos con una buena relación de compromiso entre el ancho de banda y la pauta de radiación acústica, sigue vigente actualmente.

En vista de lo anterior y considerando que una lámina de FCell se asemeja a una película elástica muy delgada, se plantea en este capítulo la fabricación de transductores ultrasónicos de buen ancho de banda y con patrones de emisión/recepción especificados. Para esto, se propone fijar la película Emfit sobre substratos cilíndricos y cónicos. Además, como un primer paso hacia patrones acústicos más complicados, se explora el potencial de los transductores FCell para obtener un campo acústico omnidireccional tridimensional. En este sentido, cabe mencionar que lograr un patrón omnidireccional puede hacerse: 1. fabricando transductores de tamaño pequeño con respecto a la longitud de onda acústica, o 2. desarrollando dispositivos de superficie radiante esférica que vibren en el primer modo radial. En el primer caso, una alta sensibilidad es requerida para obtener una respuesta acústica elevada. En el segundo, puede resultar complejo manufacturar transductores con superficie activa perfectamente esférica. Aunque, a priori ninguna de las dos opciones resulta viables usando

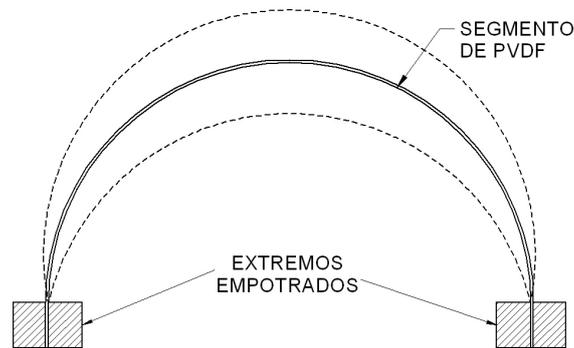


Figura 3.2: Principio de funcionamiento de un transductor fabricado con PVDF para aplicación en aire. Las líneas punteadas representan las posiciones extremas, deformadas, de la zona activa del transductor.

FCel, proponemos el diseño de transductores sobre una geometría cuasiesférica desarrollable, cuya generatriz es la aproximación lineal de un circunferencia, como se verá más adelante.

En la sección 3.4 de este capítulo se presentan mediciones experimentales, tanto acústicas como interferométricas, sobre prototipos cilíndricos, cónicos y cuasiesféricos. Los resultados obtenidos permiten afirmar que es posible emular pautas de emisión panorámicas e incluso omnidireccionales, manteniendo intacto el ancho de banda original de la película.

3.1.3. Generación de Vórtices Acústicos

Las singularidades o discontinuidades en la distribución de la fase constituyen una característica importante de un campo acústico dado, ya que, desde un punto de vista físico, se producen naturalmente en un frente de ondas y son resistentes a perturbaciones en el campo [88]. En general, las singularidades de fase pueden clasificarse de tres formas, dependiendo de la forma de la dislocación: tipo eje, tipo tornillo y mixta [89]. En particular, en este capítulo estamos interesados en el segundo tipo, en donde un plano transversal del frente de ondas (perpendicular al eje de propagación) posee una fase que crece linealmente desde 0 hasta $2\pi m$ sobre cualquier

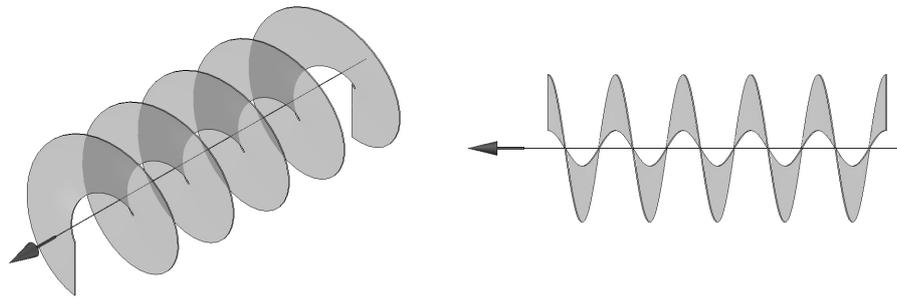


Figura 3.3: Planos de fase constante de un frente de onda con dislocación de tornillo (frente de onda helicoidal). La dirección de propagación se indica con la flecha, la cual está colineal con el eje del haz.

contorno circular que rodee el eje principal del haz. La variable m se conoce como la carga topológica del haz acústico. La figura 3.3 muestra una representación espacial de un haz con dislocación de tornillo en su centro, también conocido como onda helicoidal.

Si bien la existencia de un campo de ondas con dislocación de tornillo, así como sus propiedades, fueron identificadas inicialmente en el contexto acústico, la mayoría de la investigación subsecuente se ha realizado en el ámbito de la óptica [12]. La gran similitud entre la estructura de las dislocaciones de tornillo ópticas y los vórtices en un fluido llevó a que éste tipo de dislocaciones en un haz de luz se conociesen con el nombre de vórtices ópticos. De hecho, se ha demostrado que, en condiciones especiales, éstos vórtices pueden interactuar con otros, de manera muy parecida a los vórtices en fluidos [109]. También, se ha demostrado que una onda helicoidal posee momento angular en su distribución espacial [6], propiedad que han sido utilizadas para inducir la rotación de partículas absorbentes dentro de un “tweezer” [56]. Aplicaciones para atrapar átomos han sido propuestas igualmente [73].

En el contexto acústico, los vórtices ocurren tanto en régimen lineal como no-lineal [58] [122]. Las ecuaciones que describen el fenómeno son equivalentes, ya sea éste óptico, acústico o cuántico. Por consiguiente, la acústica puede ser utilizada para estudiar experimentalmente características especiales de estos campos de la física [78]. Recientemente, esta propiedad ha sido utilizada para producir y medir el par

ejercido por una onda acústica sobre un péndulo de torsión [129] [110]. Otra propiedad interesante de los vórtices es su capacidad para almacenar y transmitir información digitalizada, con la particularidad de que la codificación ocurre en el espacio y no en el tiempo. Además, el interés en esta aplicación es todavía mayor teniendo en cuenta la robustez y capacidad de “auto-reconstrucción” de las ondas helicoidales durante su propagación en un medio heterogéneo o ante obstrucciones parciales [47].

Hasta donde nos consta, son pocos los estudios en acústica en los cuales se exploten las propiedades de los vórtices. Cabe mencionar el trabajo de Hefner y Marston, en el cual muestran la generación de un vórtice de carga topológica unitaria ($m = 1$), propuesto para realizar tareas de alineamiento de estructuras bajo agua. Para esto, presentan el desarrollo de un transductor monoelemento de PVDF, así como un array de 4 elementos usando piezocompuestos [57] [58]. También en agua y más recientemente, Gspan *et al.* demostraron que éste tipo de campos puede ser producido optoacústicamente [51]. Por su parte, Marchiano [78] emplea un sistemas con arreglo en fase (Phased Arrays) para sintetizar el campo de presión en agua.

En este capítulo se proponen los FCell como material base para la generación campos acústicos helicoidales en aire y a frecuencias ultrasónicas, lo cual no ha sido reportado en la literatura. Para demostrar su potencial de uso, hemos fabricado un transductor FCell sobre un substrato de superficie desarrollable de tipo tangencial, como el que se muestra en la figura 3.1 Abajo-Derecha. El campo acústico generado, de carga topológica 1, fue caracterizado experimentalmente y comparado con resultados de simulación para constatar que los FCell son una excelente alternativa tecnológica para la generación de vórtices acústicos en aire, tanto con monoelementos como utilizando multitransductores con arreglo en fase (ver capítulo siguiente).

3.2. Materiales y Métodos

En este capítulo, al igual que en los demás de este trabajo, hemos utilizado la película electromecánica Emfit, tipo HS-03-20BRAL1 (Emfit Ltd., Vaajakoski, Finlandia) para fabricar los transductores. Su espesor es de aproximadamente $70 \mu\text{m}$ y está compuesta por una estructura celular interior de polipropileno, rodeada a lado y lado, por capas sólidas, también de polipropileno, de aproximadamente $10 \mu\text{m}$ de espesor. La película posee uno de sus lados cubierto con aluminio.

En relación con el proceso de fabricación de transductores con FCell, la película Emfit es cortada a medida y adherida sobre el sustrato seleccionado, el cual determina el patrón de radiación. El lado no metalizado de la película es unido a la superficie rígida del sustrato utilizando una cinta plástica conductora de electricidad en todas sus direcciones (ECPT), la cual garantiza un soporte suficiente rígido y homogéneo que no altera la respuesta electromecánica de la película.

3.2.1. Descripción de prototipos

Tres tipos diferentes de superficies desarrollables han sido contemplados en la fabricación de transductores con FCell, a saber, cilíndrico, cónico y tangencial. La figura 3.4-derecha, muestra un prototipo cilíndrico panorámico (360° de área activa) de 30 mm de diámetro y 20 mm de altura sobre un sustrato de aluminio. Igualmente la figura 3.4-izquierda, presenta un sustrato cónico también de aluminio (diámetro de base 15 mm y altura 40 mm), parcialmente cubierto con película Emfit. Estos dos prototipos fueron caracterizados utilizando interferometría con el fin de determinar, con el primero, el modo de vibración real de un transductor cilíndrico, y con el segundo, el efecto del radio de curvatura sobre la sensibilidad electromecánica. Importante mencionar que varios prototipos adicionales de geometría cilíndrica fueron construidos. Además, un transductor cilíndrico de 180° de área activa fue fabricado especialmente para validar los modelos de radiación de fuentes cilíndricas finitas.

Las figuras 3.5 y 3.6 presentan información acerca del diseño y montaje del sustrato de un transductor cuasiesférico, cuya superficie está circunscrita por una esfera de 30 mm de radio y su volumen está constituido por 11 secciones cónicas de igual generatriz ($s = 7,12$ mm) y distinta altura. El prototipo construido se observa en la figura 3.6 y está compuesto de 8 anillos activos distintos de Emfit adheridos al sustrato utilizando ECPT. Dicho sustrato fue fabricado en polímero ABS, empleando una máquina de prototipado rápido. A su vez y por cuestiones de diseño, cada anillo de FCell está subdividido en dos partes, completando 16 segmentos eléctricamente independientes. Como puede apreciarse, las tiras de material activo son dobladas hacia el centro de la cuasiesfera, donde los contactos son realizados por medio de placas de circuito impreso diseñadas a medida. Cabe anotar que precisamente éste paso del proceso de fabricación resultó el de mayor complejidad ya que al hacer el doblado de

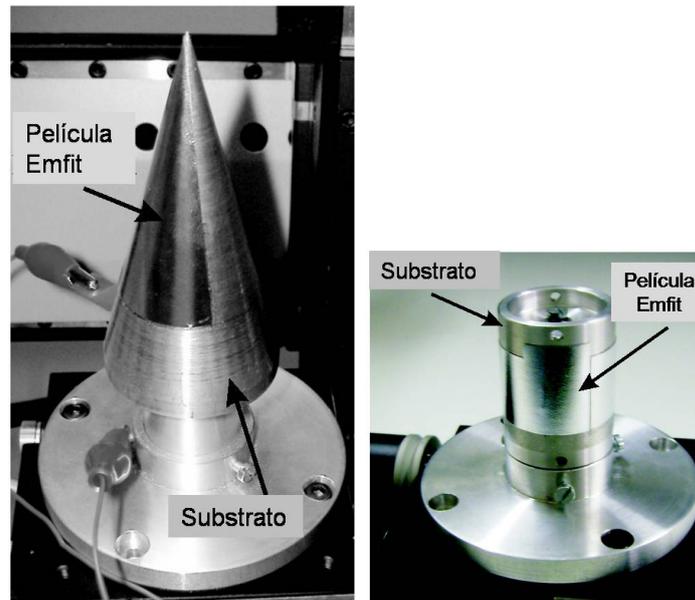


Figura 3.4: Transductores fabricados utilizando substratos de aluminio cónico y cilíndrico. Prototipos fabricados con ECPT.

la película, se puede generar una discontinuidad en la capa de aluminio. Los contactos de los electrodos superiores a los circuitos de la PCB se realizaron utilizando cinta de cobre adhesiva y pintura de plata para garantizar una baja resistividad.

El tercer tipo de transductor estudiado en este capítulo, es uno cuyo substrato está definido por una SD con dislocación helicoidal o de “tornillo” (Ver figura 3.7). La dislocación o paso de la hélice escogida para el prototipo es de $p = 3,45$ mm, que corresponde con una longitud de onda a 100 kHz en aire. Por tanto el frente de onda helicoidal poseerá carga topológica $m = \pm p/\lambda = 1$. Este valor se seleccionó teniendo en cuenta la homogeneidad, ya reportada anteriormente, del patrón vibratorio de la película Emfit a esta frecuencia. El substrato fue fabricado en ABS también con una máquina de prototipado rápido.

3.2.2. Instrumentación

La instrumentación utilizada para la obtención de los resultados de este capítulo es fundamentalmente la misma descrita en el capítulo 2. La única diferencia radica en la manera como se emplearon las unidades de rotación y desplazamiento en la

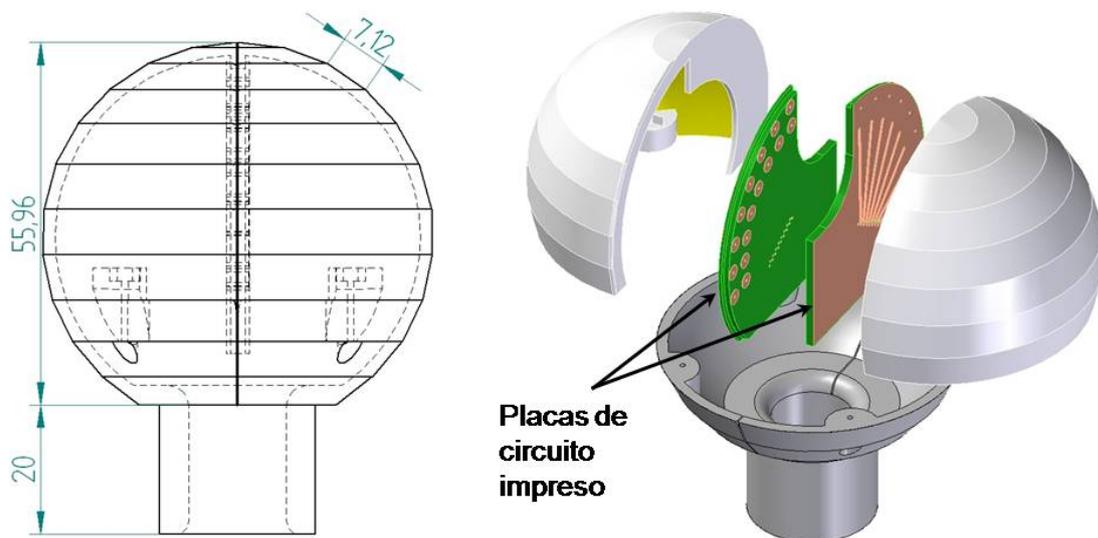


Figura 3.5: Diseño de montaje del sustrato del transductor cuasiesférico. Dimensiones en mm.

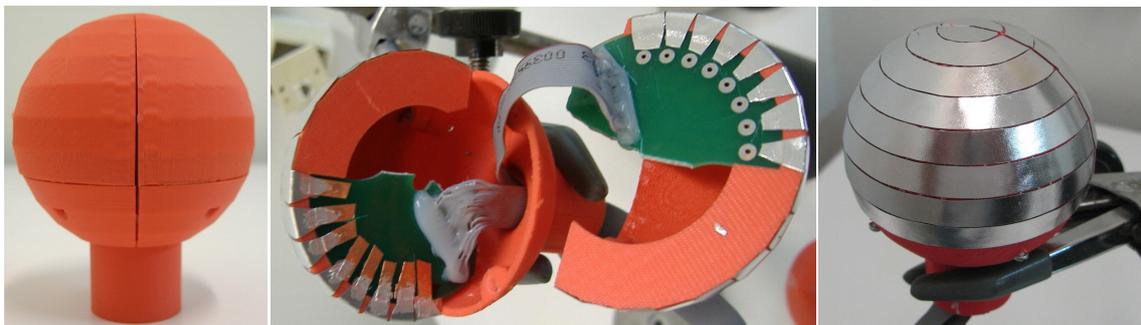


Figura 3.6: Transductor cuasi-esférico fabricado con FCell. Diámetro nominal 60 mm. Cada anillo cónico es eléctricamente independiente. Izq: Substrato. Centro: Conectado interior. Der: Prototipo final.

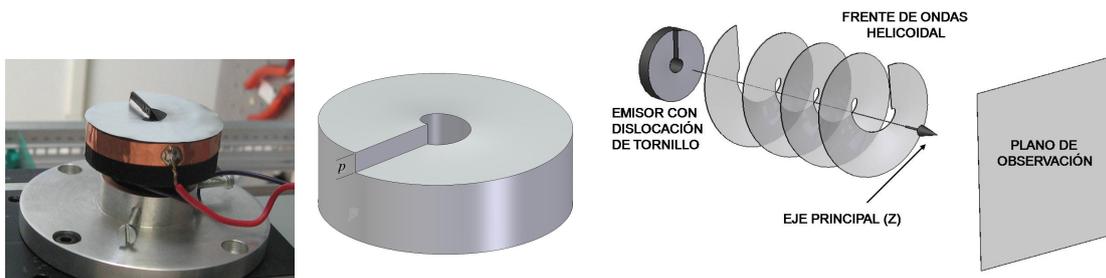


Figura 3.7: Izq: Prototipo fabricado con película Emfit y adherido al substrato con ECPT. Dislocación p de 1λ a 100 kHz en aire. Diámetro exterior: 40 mm. Centro: Representación del substrato helicoidal utilizado. Der: Representación de un frente de ondas helicoidal.

caracterización de los diferentes prototipos fabricados con FCell. Los prototipos de substrato con simetría axial fueron estudiados haciéndolos girar sobre sus respectivos ejes utilizando la unidad de rotación. Entretanto, la respuesta acústica en campo lejano fue medida utilizando un micrófono calibrado (1/8 in.-4138; Brüel & Kjaer, Naerum, Dinamarca). Para la medición del perfil de velocidad de la superficie activa de los transductores, se empleó un vibrómetro láser de efecto Doppler (Polytec GmbH, Waldronn, Alemania).

En la caracterización del transductor con dislocación de “tornillo”, el micrófono fue mantenido en reposo mientras el transductor fue movido controladamente con las unidades de desplazamiento en planos perpendiculares al eje principal del mismo. En particular, se midió el campo acústico a 100 mm y 200 mm del transductor, siguiendo barridos en forma de cuadrícula de 30 mm x 30 mm y 40 mm x 40 mm, respectivamente. Para lograr una buena resolución espacial del campo, el desplazamiento discreto de las unidades lineales se estableció en 1.6 mm, aproximadamente la mitad del diámetro del micrófono calibrado con el que se efectuaron las mediciones.

La excitación de los transductores se realizó con un generador de señal (Modelo 33120A; Agilent Technologies, Santa Clara, CA) en conjunto con un amplificador de potencia (Modelo 9400; Tabor Electronics, Tel hanan, Israel); el cual permite aplicar voltajes de hasta 400 Vpp a frecuencias entre 0 y 500 kHz. Dado que las mediciones no se realizaron en una cámara anecoica, se emplearon señales sinusoidales pulsadas para evitar la posible creación de un campo estacionario que afectara los resultados. También, señales tipo chirp se utilizaron para la obtención de la respuesta

en frecuencia de los prototipos en el rango 30 kHz–400 kHz.

3.3. Radiación Acústica de Emisores Finitos

Calcular el campo de presión producido por un radiador con geometría y perfil de velocidad arbitrarios no es una tarea sencilla. Las distintas alternativas para resolver la ecuación de onda incluyen esquemas tanto analíticos, semi-analíticos, numéricos o discretos como las diferencias finitas, los elementos finitos (FEM), los elementos de contorno (BEM) y formulaciones híbridas, al igual que el Análisis Estadístico de Energía (SEA) [38].

Las soluciones analíticas exactas existen solamente para fuentes ideales, en las cuales la geometría de la superficie radiante puede ser descrita por un sistema de coordenadas ortogonales, lo que permite luego obtener soluciones de la ecuación de onda en términos de variables separables. Entretanto, los esquemas numéricos son necesarios para resolver el problema en aplicaciones más generales, en las cuales el radiador posee características arbitrarias en cuanto a geometría, ancho de banda y condiciones de contorno.

Sin embargo, existen esquemas analíticos aproximados que permiten resolver eficientemente la Ecuación de Onda. En general, estos pueden ser utilizados cuando: a) la longitud de onda acústica es muy grande o muy pequeña con respecto a las dimensiones del cuerpo radiante; b) la superficie vibratoria difiere solo ligeramente de otra superficie donde una solución exacta es conocida; c) existen simetrías en el campo radiado o el receptor está suficientemente lejos de la fuente (campo lejano) [42].

En este trabajo, principalmente soluciones analíticas aproximadas son propuestas para obtener el modelo de radiación en campo lejano de los emisores acústicos fabricados con la película Emfit. Sin embargo, como trabajo futuro se plantea la evaluación e implementación de esquemas numéricos que permitan diseñar ágil y eficientemente emisores acústicos con geometría y patrón de radiación arbitrarios, lo cual sigue siendo un requerimiento frecuente en diversidad de aplicaciones. Las características del campo radiado por emisores finitos cilíndricos, cuasi-esféricos y helicoidales han sido estudiadas. A continuación se presenta de manera sucinta, el marco teórico relacionado con la estimación del campo acústico radiado por dichas fuentes.

3.3.1. Emisor Finito sobre un Substrato Cilíndrico

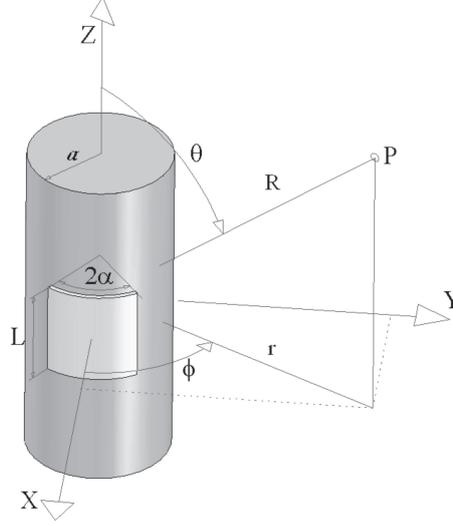


Figura 3.8: Representación de transductor finito sobre un substrato cilíndrico. Convenciones.

Encontrar una solución analítica que permita estimar la radiación hacia el exterior producida por una fuente cilíndrica real de longitud finita L , radio a y ángulo 2α (ver figura 3.8), implica calcular la ecuación:

$$p(r, \phi, z) = i\rho ck \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{in\phi} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \dot{W}_n(a, k_z) \frac{H_n(k_r r)}{k_r H'_n(k_r a)} e^{ik_z z} dk_z \quad (3.1)$$

con:

$$\dot{W}_n(a, k_z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\phi' \int_{-\infty}^{\infty} v_n(a, \phi', z') e^{-in\phi'} e^{-ik_z z'} dz = F_\phi F_z [v_n(a, \phi, z)], \quad (3.2)$$

donde v_n es la componente radial de la velocidad sobre la superficie definida por a . Asimismo, F_ϕ y F_z representan la Transformada de Fourier con respecto a ϕ y z respectivamente.

Esto no siempre resulta fácil por la dificultad que presenta la integración con respecto a k_z . No obstante, en el campo lejano, es decir, para valores grandes de r con respecto al tamaño de la fuente (ver figura 3.8), es posible utilizar la forma asintótica

de la función de Hankel y posteriormente aplicar un método también asintótico que permite resolver, o mejor, aproximar analíticamente, la integral resultante. El método utilizado en este caso se denomina **Método de la Fase Estacionaria**. Para mayor información sobre éste se recomienda remitirse a las referencias [4] [138].

La expresión asintótica de la función de Hankel para una onda divergente es:

$$H_n^{(1)}(x) \sim \sqrt{\frac{2}{\pi x}} e^{i(x - \frac{n\pi}{2} - \frac{\pi}{4})} \quad (3.3)$$

Cambiando a coordenadas esféricas, de acuerdo a la convención mostrada en la figura 3.8 se obtiene de 3.1:

$$p(R, \theta, \phi) \approx \frac{i\rho_0 c k}{2\pi} \sqrt{\frac{2\pi}{\pi R \sin \theta}} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n e^{in\phi} e^{i\pi/4} \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\dot{W}_n(a, k_z)}{k_r^{3/2} H'_n(k_r a)} e^{iR(k_r \sin \theta + k_z \cos \theta)} dk_z \quad (3.4)$$

Utilizando el Método de la Fase Estacionaria es posible aproximar la integral impropia del término de la derecha así:

$$I_n(R) \approx \frac{\dot{W}_n(a, k \cos \theta)}{k \sqrt{\sin \theta} H'_n(ka \sin \theta)} \quad (3.5)$$

Insertado este resultado en la ecuación 3.4 se obtiene:

$$p(R, \theta, \phi) \approx \frac{\rho_0 c}{\pi} \frac{e^{ikR}}{R} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-i)^n e^{in\phi} \frac{\dot{W}_n(a, k \cos \theta)}{\sin \theta H'_n(ka \sin \theta)} \quad (3.6)$$

Dado que la función de Hankel se hace prácticamente nula para $n > ka \sin \theta$ y, contrariamente, su derivada H'_n se hace muy grande, es posible restringir los límites a infinito de la sumatoria a $N \approx ka \sin \theta$.

En la figura 3.8 se observa un esquema representativo de lo que sería la película Emfit adherida sobre un substrato cilíndrico. Como se demuestra más adelante en este trabajo, el comportamiento de ésta, una vez adherida sobre un sustrato, puede aproximar a un perfil de velocidad normal constante, independientemente del radio de curvatura. Por tanto, el campo acústico generado será semejante por una fuente de

dimensiones finitas que vibra con un perfil de velocidad radial constante, $v(a, \phi, z) = v_n$.

Aplicando la ecuación 3.2, para un emisor de longitud $2L$, ancho 2α , radio a y centro en $\phi = 0$, se obtiene que:

$$\dot{W}_n(a, k_z) = \frac{v_n}{2\pi} \int_{-\alpha}^{\alpha} e^{-in\phi} d\phi \int_{-L}^L e^{-ik_z z} dz \quad (3.7)$$

Integrando,

$$\dot{W}_n(a, k_z) = \frac{4v_n\alpha L}{2\pi} \text{sinc}(n\alpha) \text{sinc}(k_z L) \quad (3.8)$$

Substituyendo en 3.6 y dado que $k_z = k \cos \theta$, la radiación de un emisor cilíndrico vibrando idealmente con un perfil de velocidad radial constante está dada por:

$$p(R, \theta, \phi) \approx \frac{\rho_o c}{2\pi^2} \frac{e^{ikR}}{R} \times \sum_{n=-ka \sin \theta}^{ka \sin \theta} (-i)^n e^{in\phi} \frac{4v_n\alpha L \text{sinc}(n\alpha) \text{sinc}(kL \cos \theta)}{\sin \theta H'_n(ka \sin \theta)} \quad (3.9)$$

Cabe anotar que las suposiciones realizadas implican que la velocidad es cero fuera de la superficie vibrante. Aunque estas condiciones no se cumplen estrictamente en nuestro caso, veremos más adelante que el acuerdo entre la teoría y la experimentación es muy bueno. Adicionalmente, la solución analítica requiere que el substrato sea considerado infinito en longitud. Esta expresión final, dada por la ecuación 3.9 puede ser reducida aún más para casos particulares, como aplicaciones a baja frecuencia ($ka \ll 1$) o alta frecuencia ($ka \gg 1$). No obstante, dado que en nuestro caso de interés $8 < ka < 30$, ninguna aproximación adicional fue realizada. En la siguiente sección, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos experimentales con la estimación teórica realizada con la ecuación 3.9. La figura 3.9 muestra la estimación teórica del campo acústico generado por una fuente semi-cilíndrica con relación de aspecto $L/a = 2/3$ y $2\alpha = 180^\circ$, igual a la del prototipo cilíndrico construido para validar el modelo de radiación descrito.

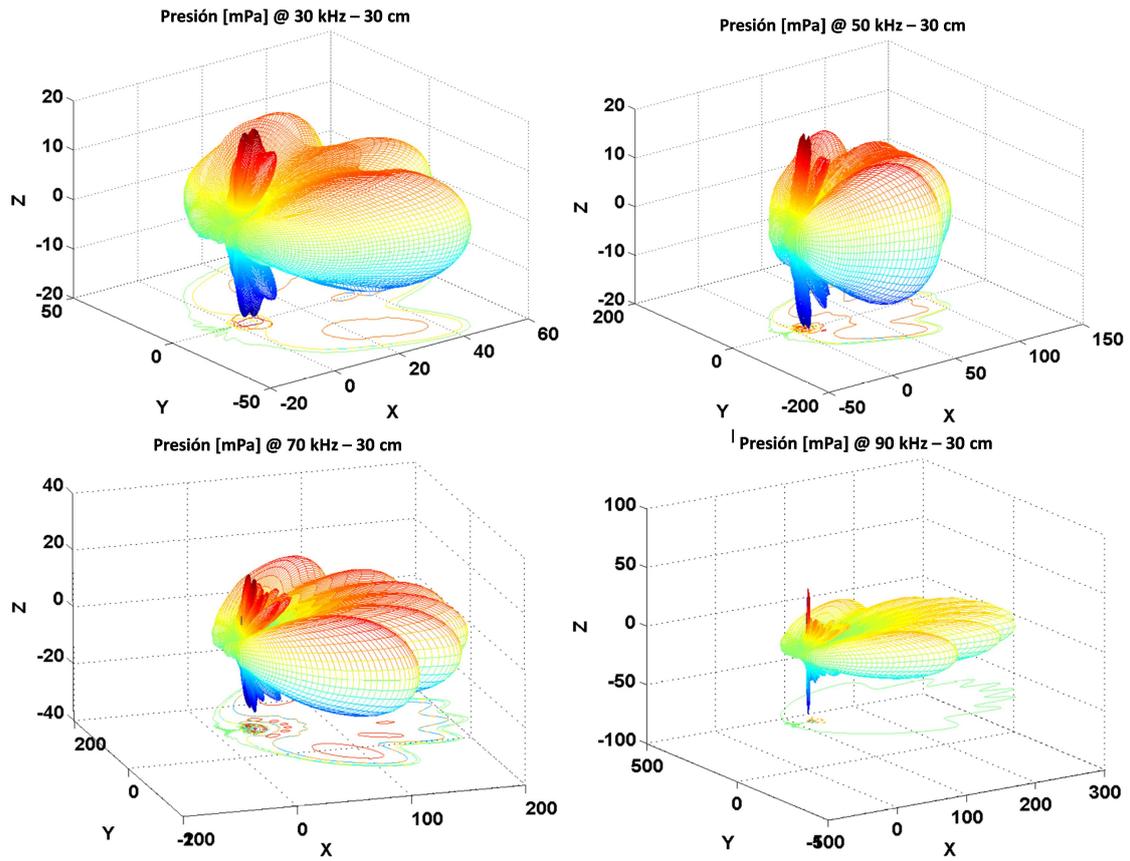


Figura 3.9: Campo lejano radiado por una fuente cilíndrica finita vibrando en modo espesor a diferentes frecuencias. ($v(a, \phi, z) = v_n$, $2\alpha = 180^\circ$, $L=10$ mm, $a = 15$ mm)

3.3.2. Radiación de un Emisor sobre un Substrato Esférico.

En este capítulo se propone el uso de los FCell sobre un substrato cuasiesférico con superficie desarrollable (SD) para aproximar la pauta de emisión en campo lejano de un transductor ultrasónico esférico u omnidireccional. Con el ánimo de realizar la respectiva comparación teórico-experimental, la formulación analítica del campo de presión generado por un transductor con perfil de velocidad constante (tipo pistón) sobre un substrato esférico se presenta a continuación [138], siguiendo las convenciones mostradas en la figura 3.10.

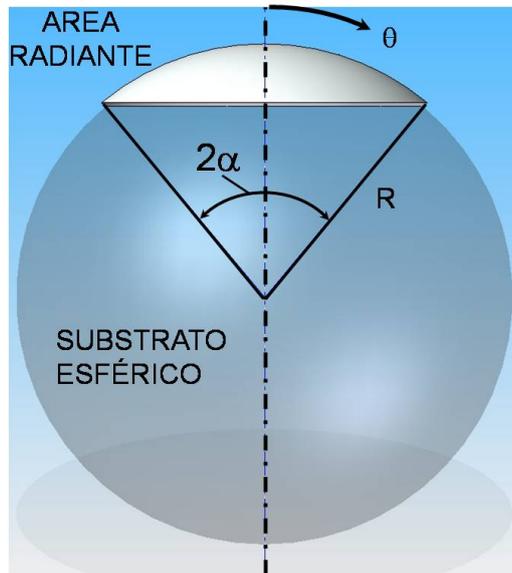


Figura 3.10: Representación de casquete esférico. Convenciones.

La velocidad normal del área activa v_n es constante para $-\alpha \leq \theta \leq \alpha$ y cero en el resto del substrato. La distribución del campo de presión emitido en coordenadas esféricas (r, θ) , con origen en el centro del substrato, está dada por

$$p(r, \theta) = i\rho_o c \sum_{n=0}^{\infty} \dot{W}_n \frac{h_n(kr)}{h'_n(kR)} P_n(\cos \theta) \quad (3.10)$$

donde R , ρ_o , c , h_n and P_n son, respectivamente, el radio del substrato, la densidad del medio, la velocidad del sonido, la función de Hankel de primera clase y orden n y los polinomios de Legendre de grado n . Los coeficientes \dot{W}_n son obtenidos usando:

$$\dot{W}_n = \frac{2n+1}{2} v_n \int_0^\alpha P_n(\cos \theta) \sin \theta d\theta \quad (3.11)$$

De la ecuación 3.10 y 3.11, la presión radiada por el pistón esférico es:

$$p(r, \theta) = \frac{i\rho_0 c v_n}{2} \times \sum_{n=0}^{\infty} [P_{n-1}(\cos \alpha) - P_{n+1}(\cos \alpha)] \frac{h_n(kr)}{h'_n(kR)} P_n(\cos \theta) \quad (3.12)$$

donde la diferencia entre los polinomios de Legendre es igual a $1 - \cos \alpha$ para $n = 0$.

3.3.3. Radiación de una Fuente con Dislocación Helicoidal

Para sintetizar vórtices acústicos, se pueden utilizar los haces de Gauss-Laguerre (GL) como patrones. Estos son conocidos por transportar dislocaciones de tornillo [99] y son soluciones de la forma paraxial de la ecuación de Helmholtz [44].

Si se considera un sistema en coordenadas cilíndricas (r, ϕ, z) , con origen O ubicado en el centro del transductor, z es la dirección de propagación perpendicular al emisor y (r, ϕ) las coordenadas cilíndricas en un plano transversal. La presión asociada con un haz GL en el punto (r, ϕ) en un plano cualquiera paralelo al transductor y localizado a una distancia z de éste puede ser expresado por [99]:

$$p(r, \phi, z, t) = p_{n,m}(r, \phi, z) \exp(i(kz - \omega t)) \quad (3.13)$$

El término $p_{n,m}(r, \phi, z)$ representa la distribución de presión un plano transversal a la dirección de propagación:

$$p_{n,m} = G(r, z) A_{n,m}(r, z) \Phi_m(\phi) \Psi_n(z). \quad (3.14)$$

Los diferentes términos en esta expresión describen respectivamente, la envolvente gaussiana del haz, la distribución de amplitudes cercanas al núcleo del vórtice, la estructura de la fase en el haz y la fase de Gouy.

La envolvente gaussiana del haz está dada por:

$$G(r, z) = \frac{D}{(1 + z^2/z_R^2)^{1/2}} \exp\left(\frac{-r^2}{w^2(z)}\right) \exp\left(-i\frac{kr^2z}{2(z^2+z_R^2)}\right) \quad (3.15)$$

donde D es una constante de normalización, $z_R = kw_0^2/2$ es la distancia de Rayleigh (w_0 es la mitad de la dimensión más grande del haz en $z = 0$ y k es el número de onda), y $w(z) = w_0[1 + (z/z_R)^2]^{1/2}$ describe la evolución del ancho del haz gaussiano durante la propagación. Ver figuras 3.11 y 3.12.

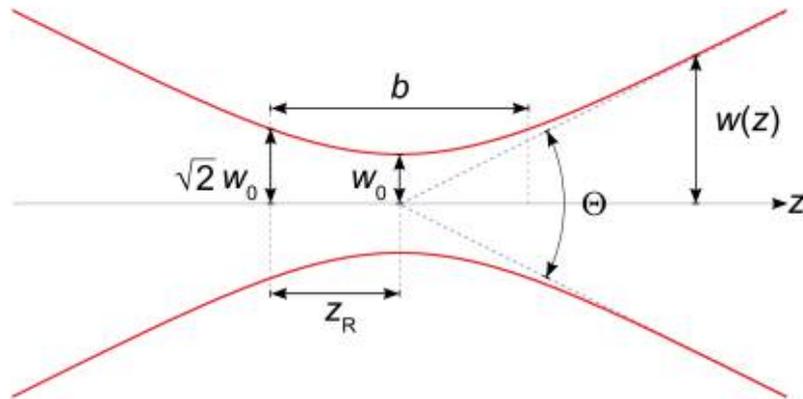


Figura 3.11: Ancho de un haz gaussiano $w(z)$ como función de la distancia axial z . w_0 Ancho en $z = 0$ (beam waist); b Profundidad del foco; z_R Distancia de Rayleigh; Θ Ángulo total de propagación

La distribución de la presión cerca del centro es:

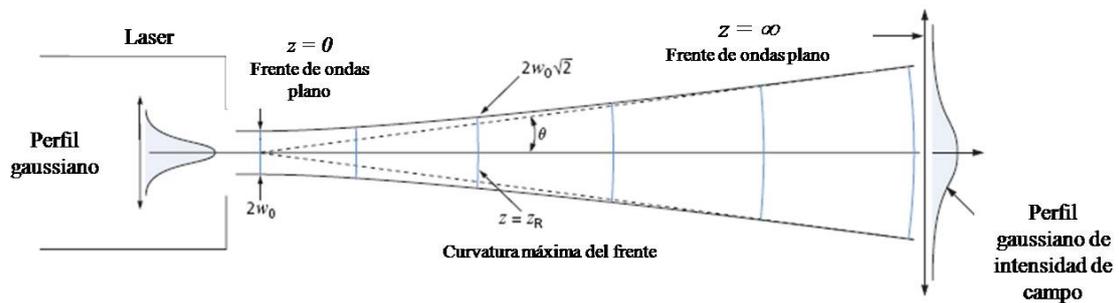


Figura 3.12: Representación teórica típica de un haz gaussiano generado con láser. Variación del radio del frente de ondas con la distancia de propagación z .

$$A_{n,m}(r, z) = \left(\frac{r\sqrt{2}}{w(z)} \right)^{|m|} L_{(n-|m|)/2}^{|m|} \left(\frac{2r^2}{w^2(z)} \right), \quad (3.16)$$

donde $L_{(n-|m|)/2}^{|m|}$ denota los polinomios de Laguerre generalizados [4] con índice radial $n = |m|, |m| + 2, |m| + 4, \dots$ y carga topológica m .

La estructura en forma de hélice de la fase del haz se debe al término

$$\Phi_m(\phi) = \exp(im\phi), \quad (3.17)$$

Un término de fase adicional es utilizado para incluir la fase de Gouy:

$$\Psi_n(z) = \exp[-i(n+1)\psi(z)], \quad (3.18)$$

donde $\psi(z) = \arctan(z/z_R)$.

En conclusión, la ecuación (3.13) permite sintetizar un GL correspondiente con una singularidad de fase en el frente de ondas y su evolución temporal en un plano paralelo al transductor. Este resultado, utilizado para modelar un haz óptico, se utilizará en la siguiente sección como referencia para constatar la viabilidad de generar frentes de ondas helicoidales acústicos utilizando FCell. Las figuras 3.13 y 3.14 muestran la simulación de un campo de presión instantáneo y su respectiva distribución de fase, para cargas topológicas $m = -1$ y $m = -3$. Nótese cómo siguiendo una trayectoria circular que rodee el centro del campo, la fase varía entre $-\pi$ rad y π rad, encontrando una y tres discontinuidades respectivamente.

La figura 3.15 muestra el campo azimutal de un haz helicoidal gaussiano. Se observa cómo la formulación antes descrita no es útil para modelar la respuesta acústica en campo cercano de un transductor emitiendo un haz helicoidal. En consecuencia, hemos empleado, además, el conocido Método de las Fuentes Puntuales [100] para la predicción de campo acústico y así estimar la respuesta del prototipo helicoidal fabricado. Ver figura 3.16. En ésta se muestra la predicción del campo azimutal de un transductor de las dimensiones del prototipo fabricado, con y sin dislocación en la fase en el perfil vibratorio de su superficie radiante.

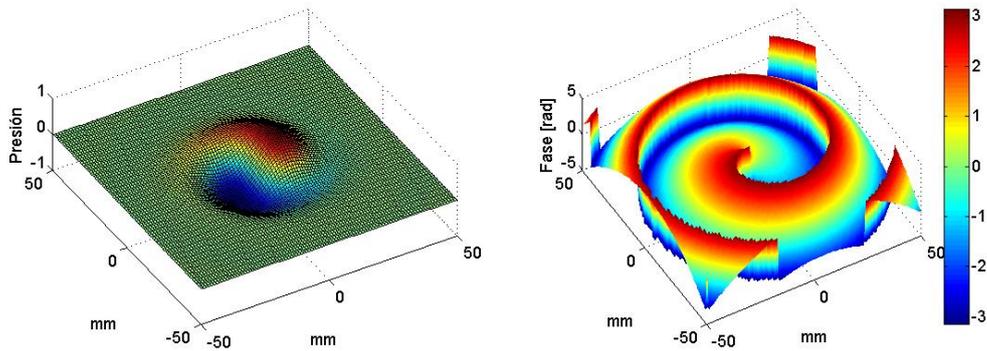


Figura 3.13: Campo instantáneo helicoidal gaussiano, simulado, con carga topológica unitaria $m = -1$. Izquierda: Presión. Derecha: Fase

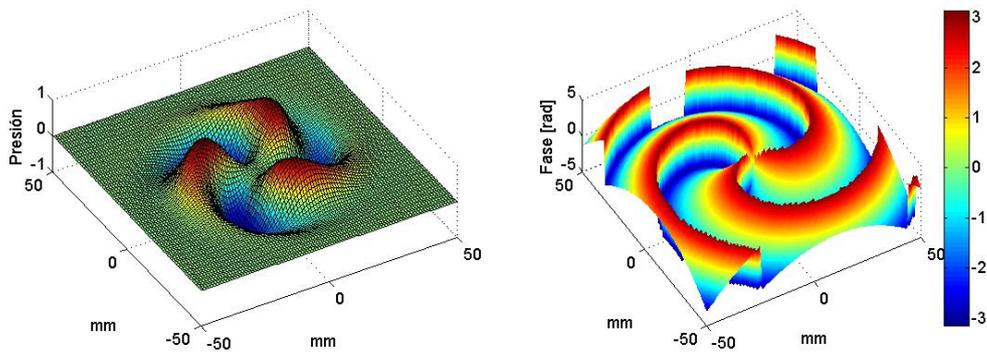


Figura 3.14: Campo instantáneo helicoidal gaussiano, simulado, con carga topológica tres $m = -3$. Izquierda: Presión. Derecha: Fase

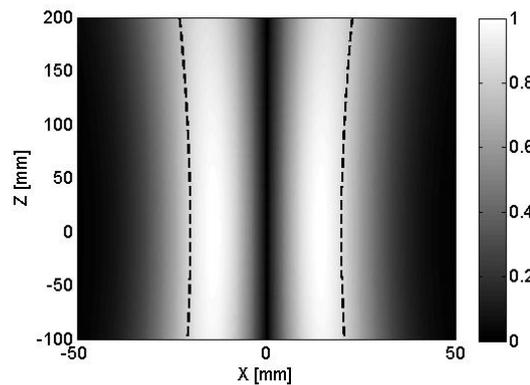


Figura 3.15: Magnitud del campo de presión azimutal de un haz helicoidal gaussiano. $w_0 = 20$ mm, frecuencia 100 kHz, $m = -1$.

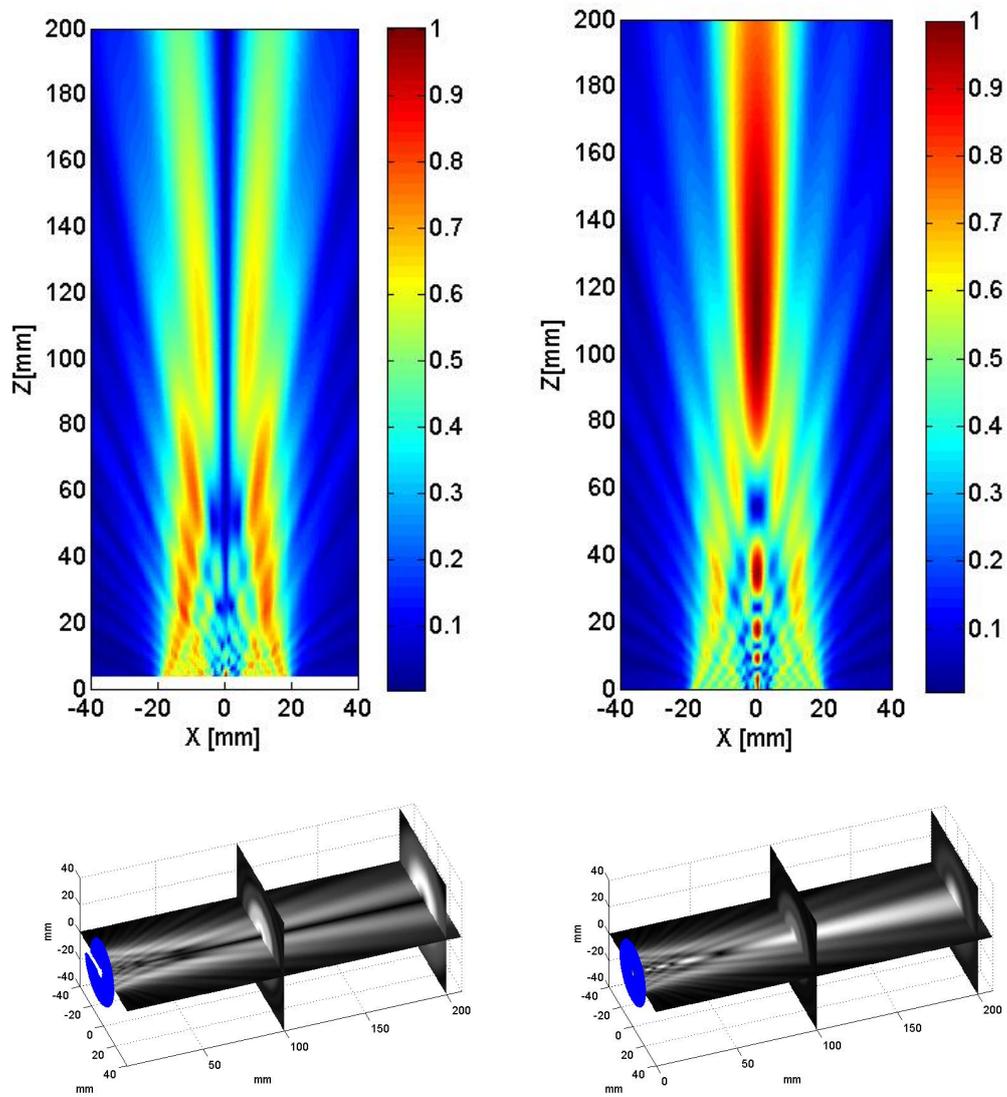


Figura 3.16: Estimación de la magnitud campo azimutal radiado por un transductor con las dimensiones del prototipo fabricado, con (izquierda) y sin (derecha) dislocación helicoidal en la fase. Predicción realizada utilizando el Método de las Fuentes Puntuales. $m = -1$, frecuencia 100 kHz.

3.4. Resultados

A continuación se intenta demostrar el potencial de utilizar FCell sobre SD para generar campos acústicos especiales. La sección se divide fundamentalmente en dos partes, una primera en la que empíricamente se demuestra que adherir la película de FCell sobre un sustrato curvado no representa efecto alguno sobre su respuesta electromecánica y vibratoria; ya observadas en el capítulo 2 tras caracterizar transductores de sustrato plano. Para esto, se presentan resultados de caracterización, tanto acústicos como interferométricos, de un transductor cónico y varios cilíndricos. En la segunda parte, se plantea el uso de los FCell sobre SD para el diseño de transductores con una pauta de emisión específica y/o especial en aire, a saber, panorámica, omnidireccional y helicoidal. Se presentan también resultados experimentales de la respuesta acústica de los dispositivos fabricados y su comparación con los valores que se obtienen de la estimación teórica.

3.4.1. Efecto de la Curvatura del Sustrato

Para estudiar el efecto del radio de curvatura del sustrato sobre la respuesta del transductor, se ha utilizado el prototipo cónico antes descrito. Realizando medidas interferométricas sobre la superficie activa del cono en sentido longitudinal, se obtiene la respuesta en frecuencia a diferentes radios, sin tener que fabricar prototipos de diferente diámetro. Los resultados obtenidos se observan en la figura 3.17, donde la magnitud de la respuesta en frecuencia no cambia significativamente conforme el radio de curvatura disminuye, manteniendo valores similares a los obtenidos sobre un sustrato plano (Ver figura 2.10, capítulo 2). Las variaciones de la respuesta en frecuencia resultaron menores a la desviación estándar experimental medida. Este decisivo y fundamental resultado se atribuye a que el tamaño nominal de las cavidades interiores de los FCell es, en casi dos órdenes de magnitud, menor que el mínimo radio de curvatura medido sobre el cono. Cabe recordar además, que las cavidades interiores de aire del material poseen dimensiones laterales de entre $10\ \mu\text{m}$ y $100\ \mu\text{m}$ y vertical de unos $3\ \mu\text{m}$. En consecuencia, los esfuerzos inducidos durante la flexión de la película no afectan la respuesta electromecánica de la misma y por consiguiente, pequeños radios de curvatura son posibles en el diseño de la superficie del sustrato

siempre que se garantice una buena adhesión.

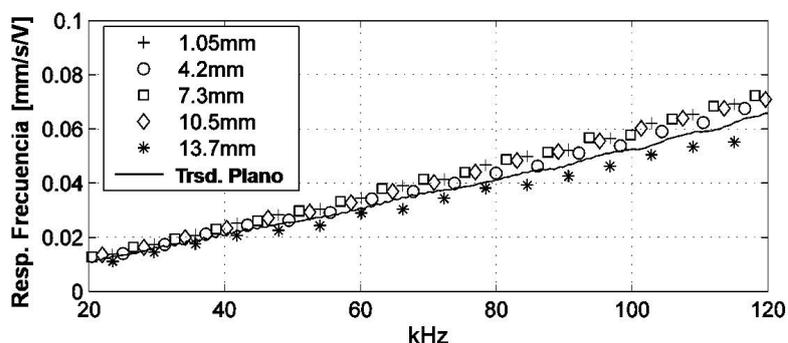


Figura 3.17: Respuesta en frecuencia medida a diferentes radios de curvatura sobre un transductor cónico, usando interferometría. Comparación con la obtenida con un transductor plano.

La figura 3.18 muestra el perfil instantáneo de la velocidad de 4 transductores cilíndricos de diferente diámetro (5 mm, 7.5 mm, 10 mm y 15 mm) ante la misma señal de excitación. Las medidas mostradas coinciden con el instante de máxima amplitud de la velocidad durante un ciclo de oscilación, a 70 kHz. Se aprecia fácilmente que algunos puntos sobre el perímetro permanecen estáticos y otros exhiben una velocidad mucho más alta que el promedio. Sin embargo, y más importante, es el hecho de que la respuesta vibratoria de los prototipos se asemeja a la de un modo radial ideal. Además, la amplitud de la velocidad, de aproximadamente 5 mm/s, es similar también en los 4 prototipos, confirmando los resultados obtenidos con el sustrato cónico. En la figura 3.19 se muestra el perfil de velocidad de un transductor cilíndrico en cuatro instantes distintos dentro de un período de oscilación, el cual coincide con el modo de vibración radial dominante antes mencionado.

Hasta este punto del trabajo, se observa que los transductores de capa simple vibran siempre en modo espesor (también llamado pistón), el cual, junto con su respectiva sensibilidad, no se ven influidos por la curvatura del sustrato (por lo menos para curvaturas de hasta 1 mm de radio). Esta característica de los FCell los hace especialmente adecuados para fabricar transductores de superficie arbitraria, con la condición de que ésta sea desarrollable; dando la posibilidad de configurar la pauta en emisión/recepción del campo acústico.

Cabe resaltar, que en la fabricación de los prototipos, la película de FCell es adhe-

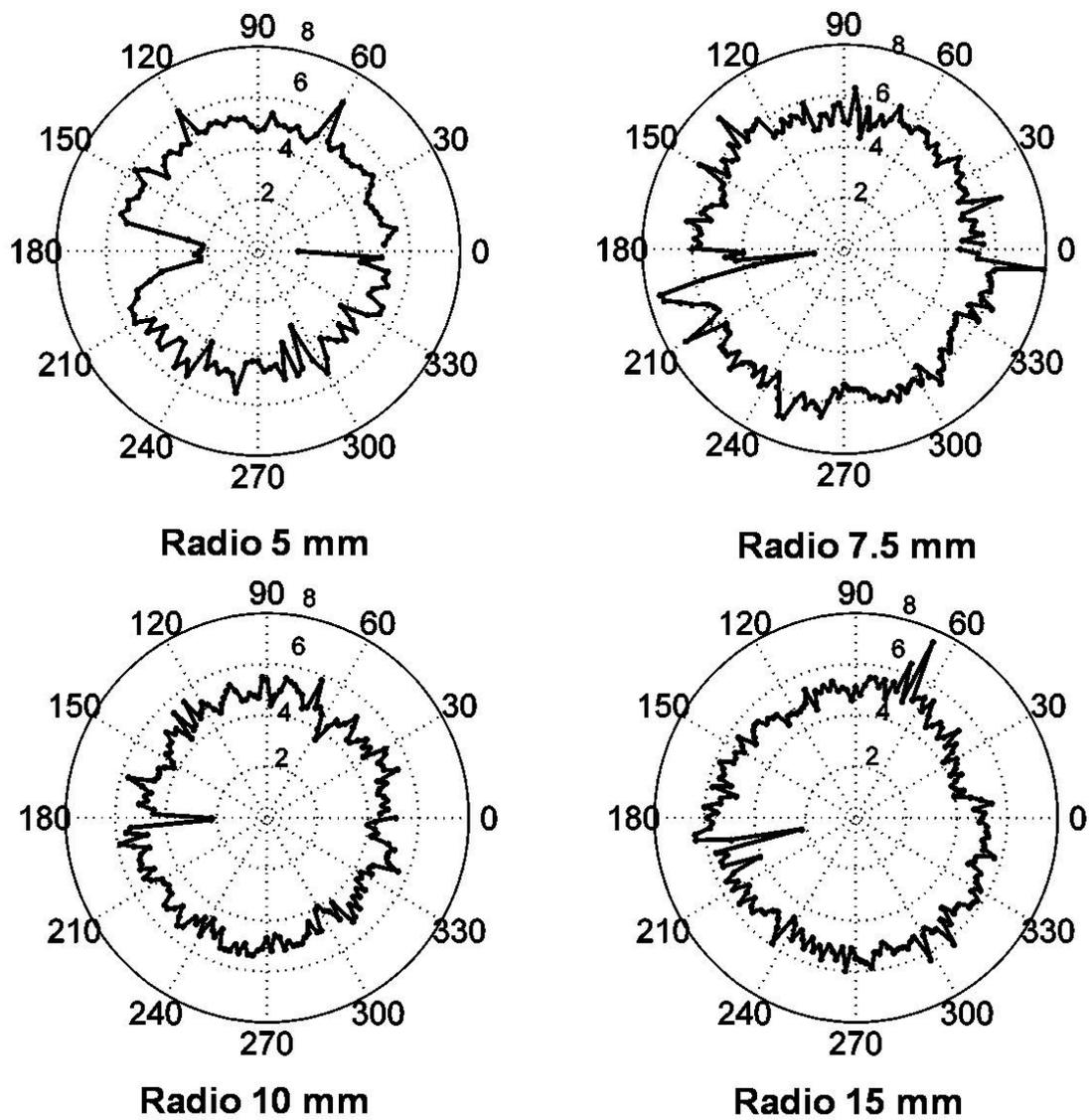


Figura 3.18: Perfil de la velocidad instantánea [mm/s] de cuatro transductores cilíndricos con diferentes radios de curvatura. Medidas realizadas con interferometría, a 70 kHz y máxima amplitud de la velocidad en el ciclo de oscilación.

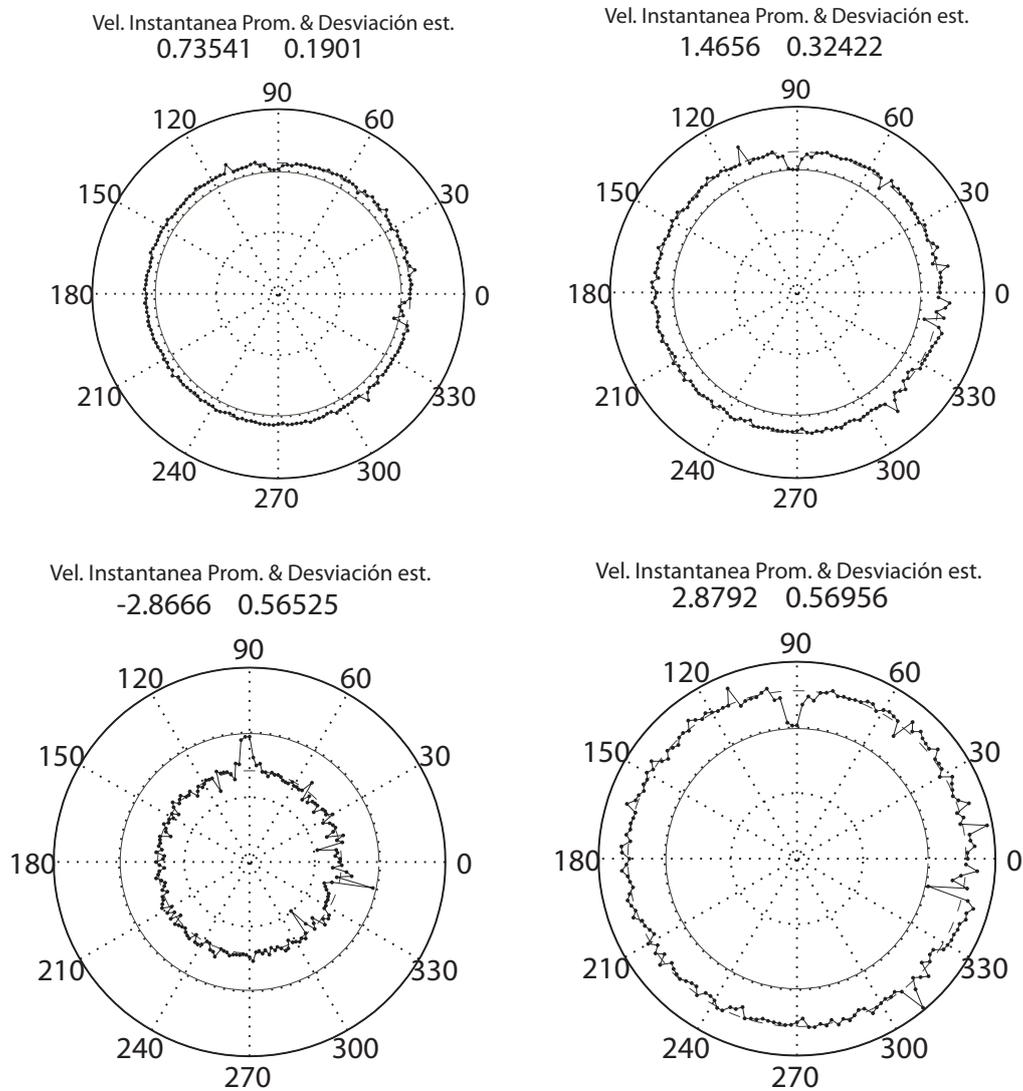


Figura 3.19: Perfil de velocidad instantáneo de un transductor cilíndrico fabricado con FCell; en cuatro instantes distintos de un ciclo de oscilación a 70 kHz. Arr.-Izq.:Cerca de velocidad nula. Arr.-Der. y Abj.-Der.: a valores positivos de velocidad. Abj.-Izq.: a velocidad mínima negativa. El círculo continuo denota la referencia de velocidad nula.

rida sobre un substrato de superficie ya curvada, sin embargo, también podría fijarse sobre un substrato plano flexible y posteriormente configurar una geometría particular flexionándolo. Experimentalmente se observó que esta opción de construcción altera notablemente la respuesta electromecánica. No obstante, investigación adicional es requerida con el fin de cuantificar la relación entre los cambios en la respuesta y los esfuerzos inducidos.

3.4.2. Medidas Acústicas y Validación

El comportamiento vibratorio de la película EMFi es semejante a un “pistón” ideal, independientemente del radio de curvatura del substrato, siempre que la frecuencia de operación sea inferior a aproximadamente 150 kHz, frecuencia a partir de la cual los resultados interferométricos muestran un incremento progresivo en la irregularidad de la respuesta. No obstante, ningún resultado medido de la correspondiente respuesta acústica ha sido mostrado hasta ahora. La respuesta acústica en campo lejano, tanto horizontal como vertical, de un emisor semi-cilíndrico (área activa de $2\alpha = 180^\circ$) de diámetro 30 mm y altura 20 mm en el rango de frecuencia de 30 a 100 kHz se muestra en las figuras 3.20 y 3.21.

En éstas, el eje principal (X en la figura 3.8) coincide con 0° en el patrón de radiación horizontal y 90° en el vertical, ambos medidos a una distancia de 300 mm de la fuente. Se aprecia que el ajuste entre los resultados estimados y los medidos es excelente, tanto en la forma del patrón de radiación como en amplitud. En relación con el patrón azimutal de radiación, el error de estimación máximo no fue mayor del 18 %, lo cual representa menos de 3 dB en el nivel de presión sonora (SPL). La variabilidad medida del perfil de velocidad para frecuencias menores a 100 kHz, no tiene un efecto significativo sobre el campo acústico generado, el cual para todos los propósitos, emula a la respuesta acústica ideal obtenida teóricamente. También se observa que el modelo acústico predice el patrón de interferencia experimental del transductor, incluso para el campo difractado hacia atrás. Errores de estimación similares fueron obtenidos para el patrón vertical de radiación. Es importante mencionar que la restricción presente en el modelo teórico, en cuanto a que el substrato es idealmente infinito (el prototipo se construyó a ras con uno de los extremos del substrato cilíndrico), reduce el rango de validez angular del patrón vertical a aproximadamente

$2 \arctan(L/a) = 34^\circ$, considerando que la relación de aspecto del emisor ultrasónico es de $\frac{L}{a} = \frac{2}{3}$. No obstante, puesto que el patrón vertical de radiación se hace progresivamente muy directivo, el modelo teórico desarrollado es capaz de estimar de manera adecuada incluso los primeros lóbulos laterales del campo lejano. Ver figura 3.21. Conforme la frecuencia se incrementa, el error de estimación de la amplitud, a 100 kHz, llega a ser de 30 % para algunos transductores. Esto puede ser debido, entre otros factores a: 1. atenuación en el aire por la absorción (no consideradas en el modelo acústico), 2. errores en la orientación en el micrófono al realizar las mediciones y 3. efectos cancelatorios provenientes de la no uniformidad del patrón de vibración del transductor. No obstante, para efectos prácticos la estimación teórica arroja resultados de gran utilidad.

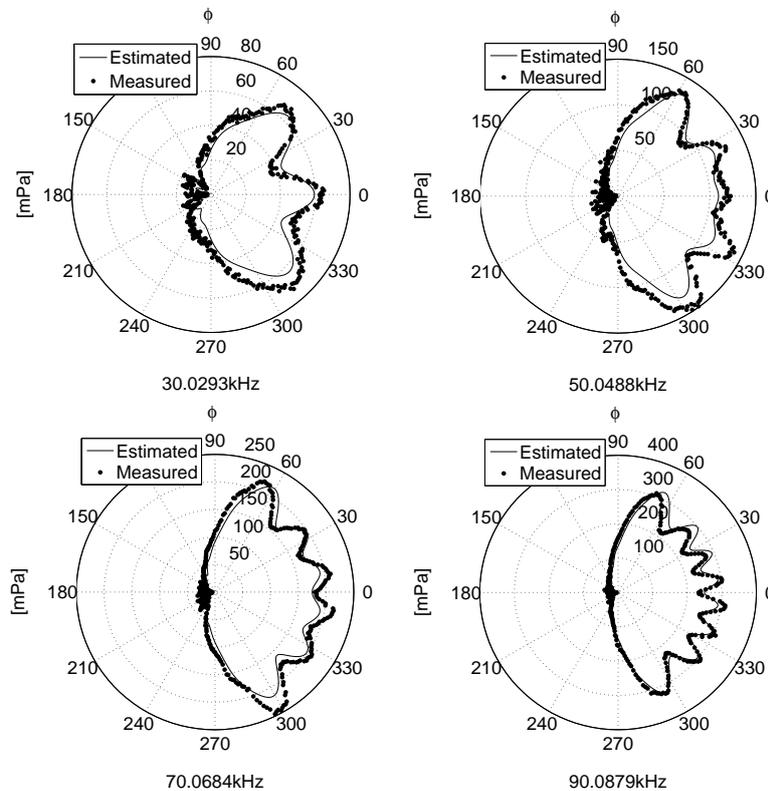


Figura 3.20: Patrón de radiación del campo lejano horizontal producido por un emisor EMFi semi-cilíndrico (180° de área activa) con relación de aspecto $\frac{L}{a} = \frac{2}{3}$. ($L = 20$ mm, $\alpha = 90^\circ$, $a = 15$ mm). Estimación vs Medidas.

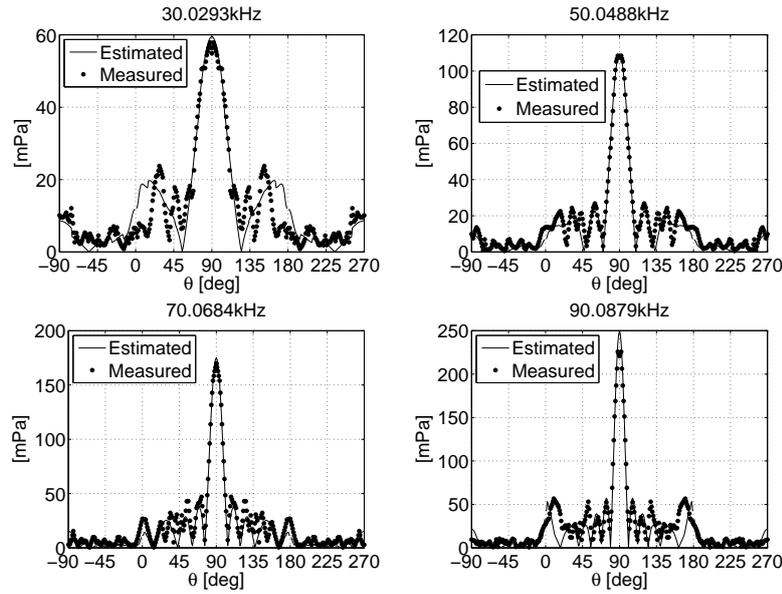


Figura 3.21: Patrón de radiación del campo lejano vertical producido por un emisor EMFi semi-cilíndrico (180° de área activa) con relación de aspecto $\frac{L}{a} = \frac{2}{3}$. ($L = 20$ mm, $\alpha = 90^\circ$, $a = 15$ mm). Estimación vs Medidas.

A manera de conclusión, es posible afirmar que se cuenta con un material que, a pesar de la no uniformidad de sus propiedades electromecánicas intrínsecas, vibra y radia como un pistón ideal y por tanto su campo puede calcularse con los modelos teóricos estudiados.

3.4.3. Pauta de Emisión Panorámica

En los últimos años, nuevos diseños de transductores ultrasónicos para medidas de rango han sido propuestos. Los más relevantes son fabricados con tiras de PVDF especialmente empotradas únicamente en sus extremos para aprovechar su buena sensibilidad longitudinal [41]. Buenos resultados con respecto a ancho de banda y sensibilidad han sido obtenidos en aplicaciones como los sistemas de posicionamiento local, reportándose variaciones de menos de 10 dB en la respuesta acústica para frecuencias entre 35 kHz y 100 kHz y ángulos menores a 60 grados [55]. También con PVDF, se han obtenido pautas acústicas panorámicas a frecuencias alrededor de los 40 kHz por medio del montaje de la película en forma cilíndrica [83]. No obstante, una respuesta panorámica a todas las frecuencias comprendidas entre 30

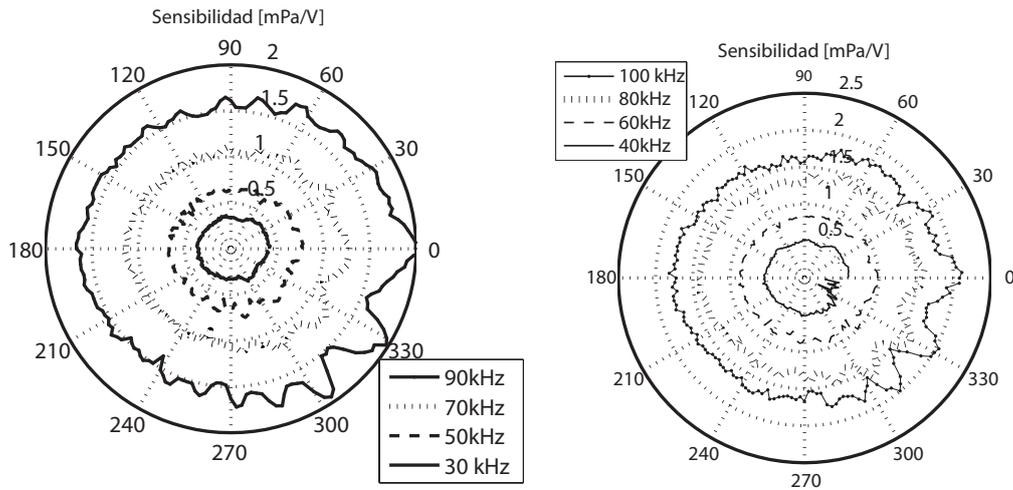


Figura 3.22: Sensibilidad en transmisión de un transductor cilíndrico fabricado con FCell a diferentes frecuencias. Diámetro 30 mm, Altura: 20 mm

y 150 kHz no ha sido reportada y mucho menos utilizando los FCell. Igual ocurre con la omnidireccionalidad en 3D. Los resultados experimentales mostrados en la figura 3.22 corroboran que patrones de emisión/recepción panorámicos son posibles utilizando FCell adherido sobre sustratos cilíndricos, manteniendo la sensibilidad original de la película sobre un sustrato plano. La figura muestra la sensibilidad en transmisión de un prototipo cilíndrico fabricado con FCell. Las variaciones en el patrón no son mayores del 40% en todo el rango de frecuencias analizado. La aparición de ondulaciones en el patrón de radiación conforme se incrementa la frecuencia, se debe a la discontinuidad en la superficie activa del transductor resultante del proceso de fabricación, ubicada a 0° en la figura.

De otra parte, valores de SPL entre 66 dB y 79 dB han sido observados utilizando transductores cilíndricos, como el mostrado en la figura 3.4-derecha, página 84 (20 mm de altura y 30 mm de diámetro), a frecuencias de 30 y 100 kHz respectivamente, 30 cm de distancia sobre el eje principal y un voltaje de excitación de 100 Vp. Con base en los modelos desarrollados, es posible incrementar el SPL hasta 81 dB y 91 dB con un voltaje de 300 Vp. Voltajes de hasta 500 Vp son posibles sin riesgo de daño por ruptura eléctrica del material. Adicionalmente, esta respuesta acústica puede ser modificada de acuerdo a especificaciones, por medio del apilamiento de varias capas de película Emfit y la adición de carga sobre el electrodo superior (tal como se

demostró en el capítulo 2), diseñando adecuadamente el área activa del transductor o utilizando una película ferroelectreto de mayor sensibilidad.

3.4.3.1. Comparación con un transductor de PVDF

Con el ánimo de cuantificar la homogeneidad de la directividad horizontal, el patrón acústico de un prototipo cilíndrico fabricado con Emfit, excitado con señales pulsadas de frecuencias entre 30 y 100 kHz se comparó con el obtenido con un transductor cilíndrico de PVDF (MSI, Hampton, VA). Como parámetro de comparación se utilizó el cociente entre las presiones máxima y mínima obtenidas de la directividad medida a cada frecuencia. Los resultados se muestran en la figura 3.23. Se observa cómo el patrón del transductor de PVDF presenta variaciones de hasta el 90 % a frecuencias comprendidas entre 40 kHz y 70 kHz, las cuales corresponden respectivamente a sus dos primeros modos de vibración, de los cuales el únicamente el de menor frecuencia es puro y emula un monopolo. Entretanto, las variaciones del transductor cilíndrico fabricado con FCell no excedieron el 40 % en todo el rango de frecuencia observado. Esta homogeneidad en el perfil es de esperarse siempre que se fabriquen transductores de capa simple y se opere a frecuencias por debajo de su primera resonancia (300 kHz).

En conclusión, la uniformidad de la directividad horizontal de un transductor fabricado con FCell es superior a la obtenida con un transductor de PVDF a frecuencias mayores a 40 kHz, donde el modo de vibración de éste cambia, alterando su patrón de radiación. Es importante también mencionar que es posible lograr con PVDF un patrón panorámico a frecuencias mayores a 40 kHz, desplazando el primer modo hacia frecuencias más altas. Sin embargo, incrementar la frecuencia de resonancia implica una disminución proporcional en el radio del transductor, con su consecuente dificultad de montaje y disminución de la sensibilidad [83]. Finalmente, la comparación no resulta justa sin recalcar que la sensibilidad de los transductores con FCell es inferior a la del PVDF. Sin embargo, aquella puede ser incrementada aumentando las dimensiones del área activa, así como apilando película Emfit para modificar la respuesta en frecuencia.

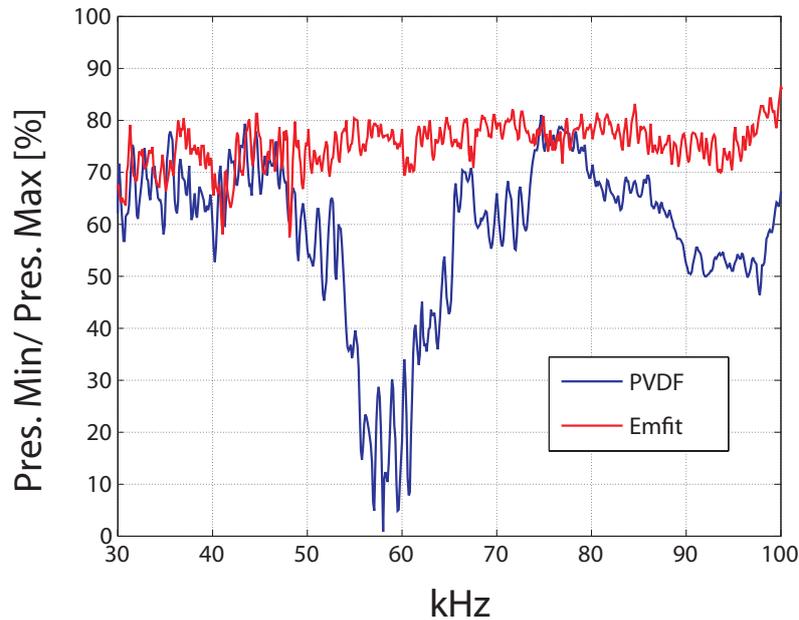


Figura 3.23: Medida de la homogeneidad del patrón panorámico emitido a diferentes frecuencias

3.4.4. Configuración de un Campo Acústico Omnidireccional

Como paso previo a la configuración de patrones acústicos de mayor complejidad, a continuación se muestra que es posible aproximar la respuesta acústica de un transductor vibrando con velocidad normal constante sobre un substrato esférico, y por tanto “no desarrollable”, aprovechando la flexibilidad y modo de vibración de los FCell.

La diferencia entre los patrones de emisión de un transductor esférico y otro cuasi esférico viene dada por cuán diferentes son sus respectivos substratos. Como se observa en la figuras 3.5 y 3.6 (página 85) nuestro prototipo cuasi esférico fue fabricado utilizando una generatriz cuasi-circular de tramos rectos de igual longitud (s). En la medida en que s disminuye su tamaño, en comparación con la longitud de onda acústica, la pauta de emisión tiende a la correspondiente de un substrato esférico. Por esta razón, y como paso anterior a la construcción física del prototipo cuasiesférico, se realizó una implementación, usando el Método de los Elementos Finitos (MEF) para determinar una relación s/λ adecuada y que además resultara

en substrato de suficiente tamaño como para cubrirlo manualmente con Emfit sin demasiada dificultad. Además, se estableció también como requisito el poder lograr un nivel de presión sonora (SPL) de por lo menos 65 dB a 30 kHz y 1 m de distancia.

Utilizando el modelo analítico descrito en la sección 3.3.2 (página 92), se determinó como necesario utilizar un radio mínimo de $R = 30$ mm y un voltaje de excitación de 200 Vp para lograr los requerimientos de diseño. Posteriormente, un modelo con simetría axial del campo armónico, estacionario, radiado por un transductor cuasiesférico de tamaño similar fue implementado utilizando COMSOL MultiphysicsTM. La figura 3.24 muestra una representación esquemática del dominio de la implementación. La relación entre s y R está dada por:

$$s = 2R \sin\left(\frac{\pi}{N}\right), \quad (3.19)$$

siendo N el número de segmentos rectos de la generatriz. De la ecuación se observa que es posible aproximar una esfera aumentando N y manteniendo el radio constante o viceversa. Por facilidad en el proceso de manufactura, un número N correspondiente a $s = 7,12$ mm fue seleccionado. Una condición de aceleración normal constante fue impuesta sobre la superficie activa del transductor, siguiendo los requerimientos de la aplicación software utilizada. Asimismo, una sección del dominio fue implementada para absorber toda la radiación incidente proveniente del transductor sin generar flexiones y satisfacer la condición de radiación de Sommerfeld¹ [14].

La figura 3.25 muestra la pauta de emisión en campo lejano obtenida para diferentes ratios s/λ y correspondiente a las soluciones analítica y numérica con MEF. Se aprecia que el ajuste es bastante bueno, sin embargo, conforme la relación s/λ se aproxima a la unidad, las diferencias incrementan tal como se constata en la figura 3.26, la cual muestra la diferencia entre las estimaciones a diferentes ángulos θ .

La diferencia en la pauta de emisión de estos dos tipos de fuente se incrementa con la relación s/λ , tal como se esperaba. De hecho, para una relación de s/λ de 0.01, sus respectivas directividades son casi idénticas. Sin embargo, conforme ésta relación se aproxima a 1, los patrones de radiación comienzan a divergir, alcanzando valores de separación de hasta un 15%. Por tanto, para un radio nominal de transductor especificado(R), es recomendable respetar la condición $s/\lambda < 1$ siempre que se quiera

¹Esto se conoce en la literatura como “perfectly matched layer” (PML)

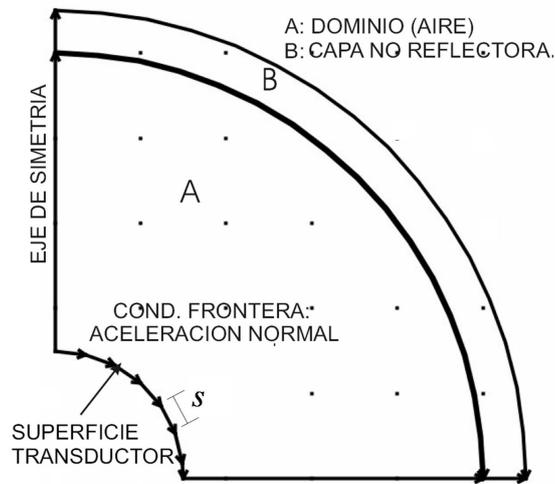


Figura 3.24: Representación del dominio acústico usado para estimar usando elementos finitos, el campo radiado por un emisor cuasiesférico

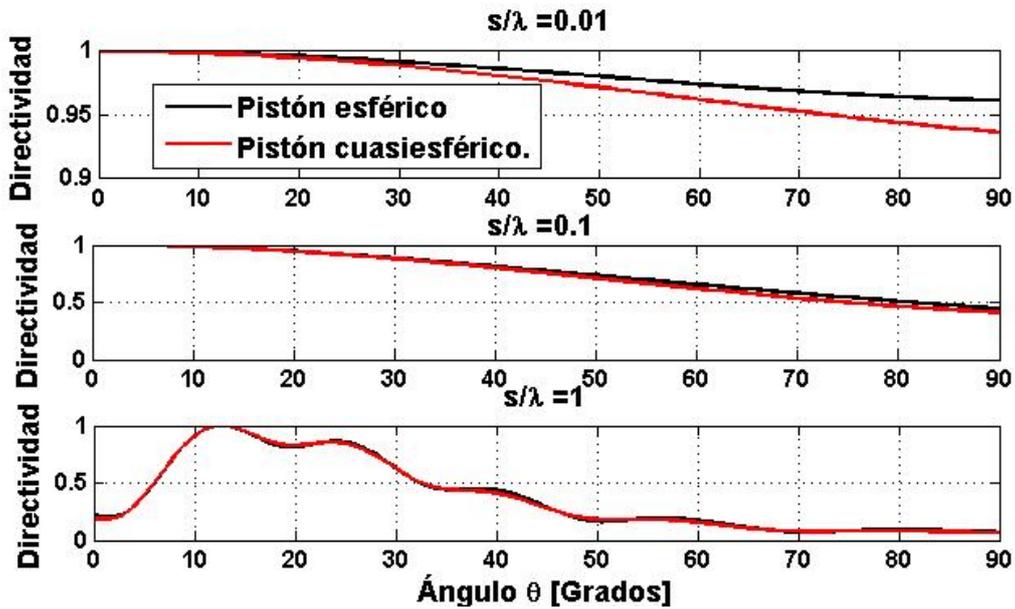


Figura 3.25: Pauta direccional normalizada de un pistón esférico y otro cuasiesférico, a diferentes ratios s/λ . $s = 7,12$ mm, $R = 30$ mm, $\alpha = 41^\circ$

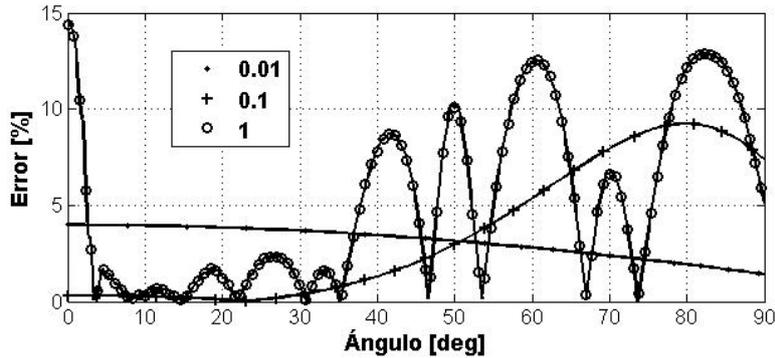


Figura 3.26: Diferencias entre el campo radiado por un pistón esférico y otro cuasiesférico, a diferentes ratios s/λ . $s = 7,12$ mm, $R = 30$ mm.

emular la patrón de radiación de un transductor esférico. Cabe anotar que en las figuras, la relación $s/\lambda = 1$ corresponde con una frecuencia aproximada de 47 kHz.

Con el fin de corroborar estos resultados teóricos, se procedió a medir el campo acústico radiado por el prototipo cuasiesférico fabricado con Emfit. Los primeros seis anillos del prototipo, correspondientes a un ángulo $2\alpha = 81,82^\circ$, fueron excitados en fase y a diferentes frecuencias. La figura 3.27 muestra el patrón vertical de radiación, comparado con su contraparte obtenida de la solución analítica para un pistón esférico. Se observa que el patrón medido sigue adecuadamente el comportamiento predicho teóricamente. Sin embargo, el ajuste deja de ser aceptable conforme s/λ se hace mayor que 1. También se observa, como era de esperarse, que el patrón medido es simétrico, aunque con irregularidades que se atribuyen a defectos de fabricación e inhomogeneidades en la distribución de la sensibilidad de la película activa.

A manera de conclusión, es posible configurar un patrón de emisión omnidireccional utilizando transductores basados en FCell sobre un substrato cuasiesférico desarrollable. Esto permitirá lograr pautas de emisión de gran cobertura, de gran utilidad en sistemas de posicionamiento y navegación autónoma con ultrasonidos. Además, el diseño de transductor concebido permite su utilización como emisor, como receptor o como un array de transductores. Funcionalidad que está por evaluarse para determinar la posición y/o dirección de fuentes acústicas cercanas, así como para manipular la forma y dirección del campo por medio del empleo de técnicas de apodización o de arreglo en fase (phased array).

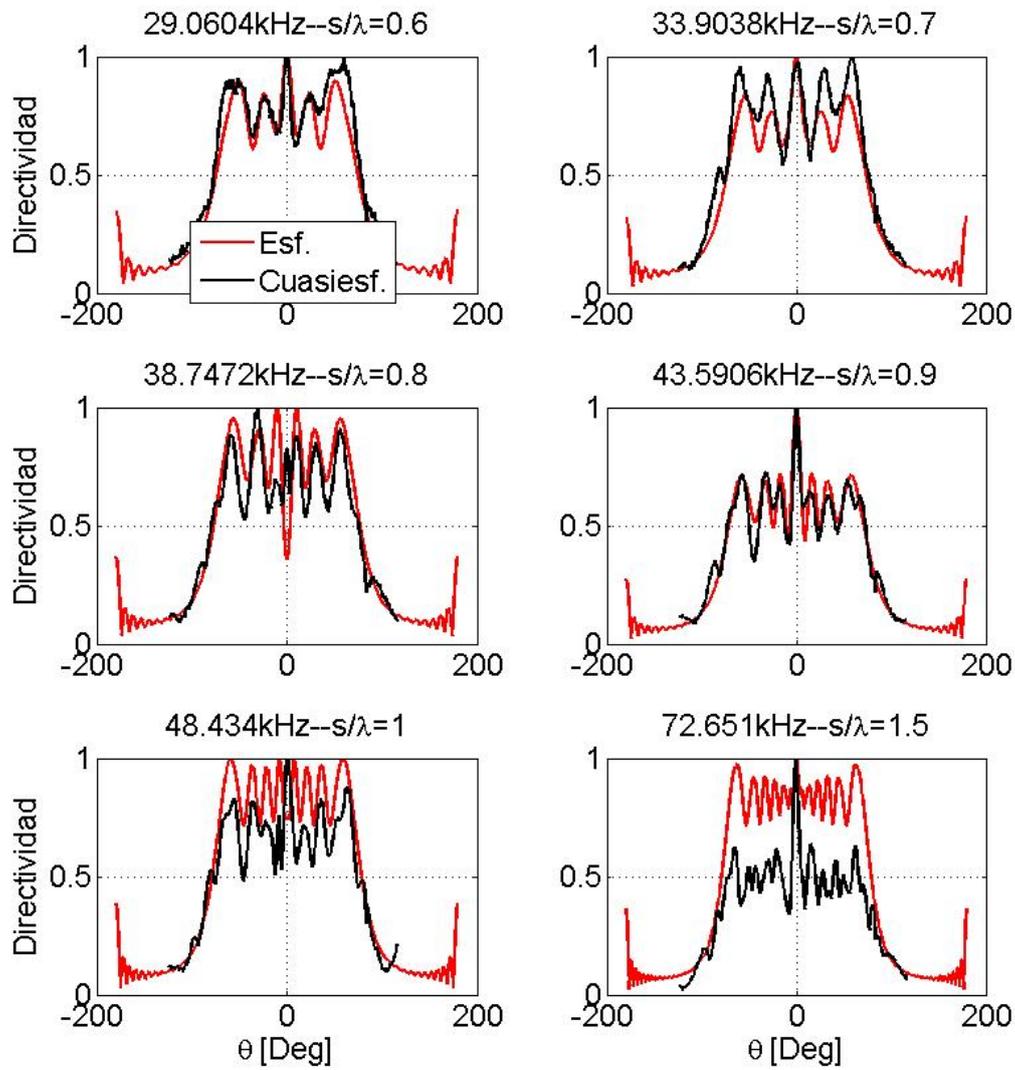


Figura 3.27: Directividad estimada y medida en campo lejano de un transductor esférico y otro cuasiesférico ($2\alpha = 81,82^\circ$, $R = 60$ mm)

En relación con el procedimiento de construcción del transductor, la principal dificultad se presenta a la hora de garantizar un buen contacto entre el electrodo superior y las pistas del circuito de conexión en el interior del sustrato, ya que la capa de aluminio que recubre la película puede fácilmente resquebrajarse y perder homogeneidad en sus características eléctricas. No obstante, fue posible resolver estos inconvenientes utilizando pintura de plata. La adhesión de la película al sustrato, utilizando ECPT resulta sencilla una vez se tiene cortadas a medida las diferentes piezas que cubren el sustrato. Especial cuidado es necesario para evitar pliegues, así como la creación de cortos eléctricos entre electrodos.

3.4.5. Generación de un Frente de Onda Helicoidal o Vórtice Acústico

La caracterización del campo acústico emitido por el transductor de sustrato helicoidal se realizó en dos planos perpendiculares al eje principal, a 100 mm y 200 mm de distancia del transductor. La excitación utilizada fue una señal pulsada de 10 ciclos, a 100 kHz y con una tasa de repetición baja para evitar la creación de un campo estacionario. Cabe recordar que el sustrato helicoidal fue fabricado con un paso p igual a la longitud de onda a la frecuencia de excitación λ , con el fin de generar un frente de onda helicoidal de carga topológica unitaria.

La magnitud de la presión y su fase, así como la distribución de presión en 4 instantes diferentes de un ciclo de oscilación, fueron comparadas con las respectivas características de un vórtice acústico ideal sintetizado con el modelo teórico descrito en la sección 3.3.3, página 93, referente a los haces de GL. Las figuras 3.28 y 3.29 muestran la distribución de presión en cuatro instantes diferentes de un ciclo de oscilación, a 100 mm y 200 mm de distancia del transductor. La semejanza entre los patrones medido y simulado resulta excelente, confirmando la utilidad de los transductores basados en FCell para la generación de vórtices acústicos y su diversidad de aplicaciones descritas en la sección 3.31.

Las figuras 3.30 y 3.31 muestran, respectivamente, el valor absoluto de la presión y su fase en estado estacionario, tanto medidos como simulados, utilizando el Método de las Fuentes Puntuales. El límite teórico del campo cercano del transductor construido está en 116.61 mm. Se observa claramente la singularidad en la distribución de la fase

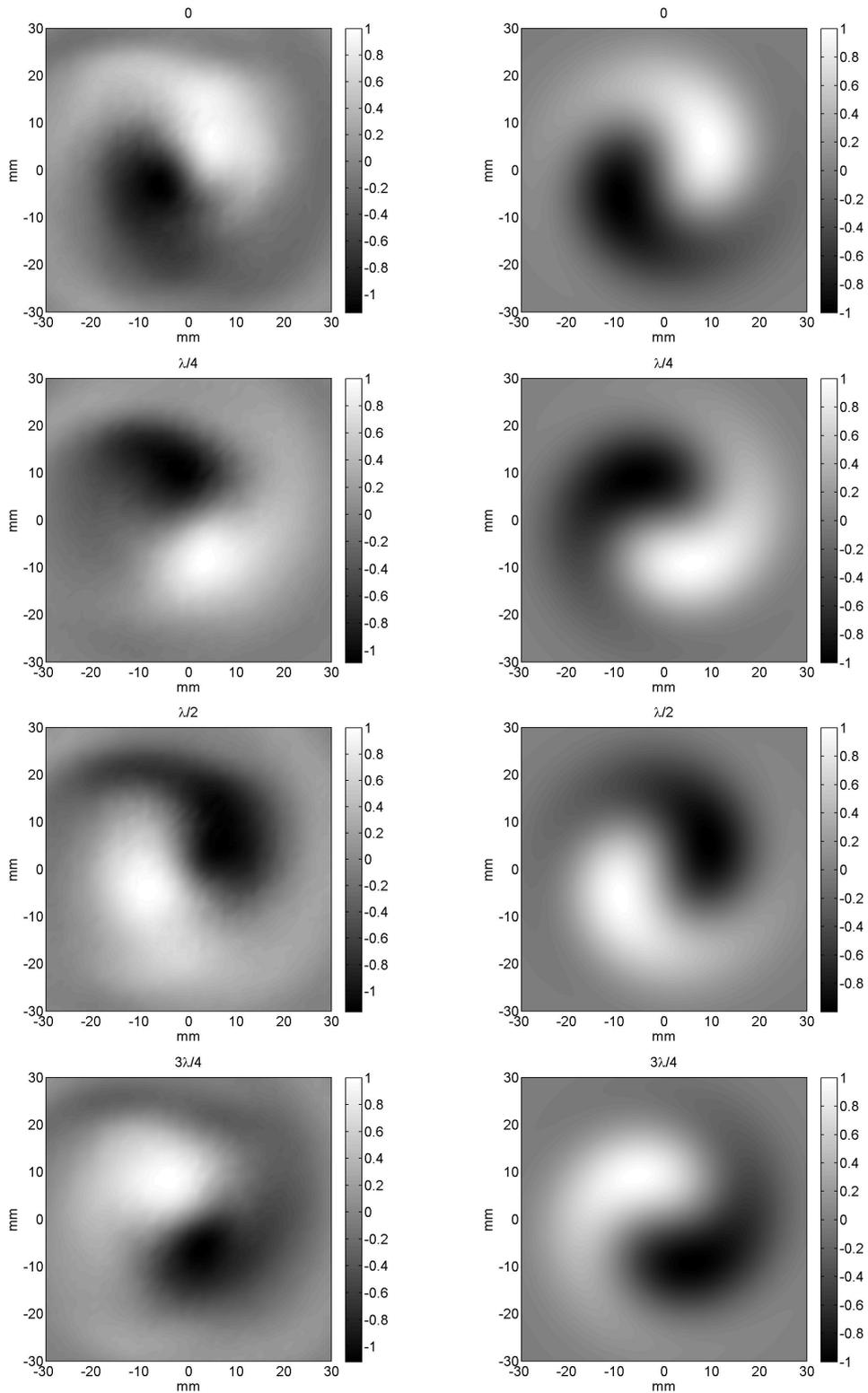


Figura 3.28: Amplitud instantánea (normalizada) de la presión en un plano ubicado a 100 mm del transductor, en cuatro instantes distintos de un período de oscilación τ [$0; \tau/4; \tau/2; 3\tau/4$]. Carga topológica $m = -1$. Izquierda: Medida. Derecha: Simulada.

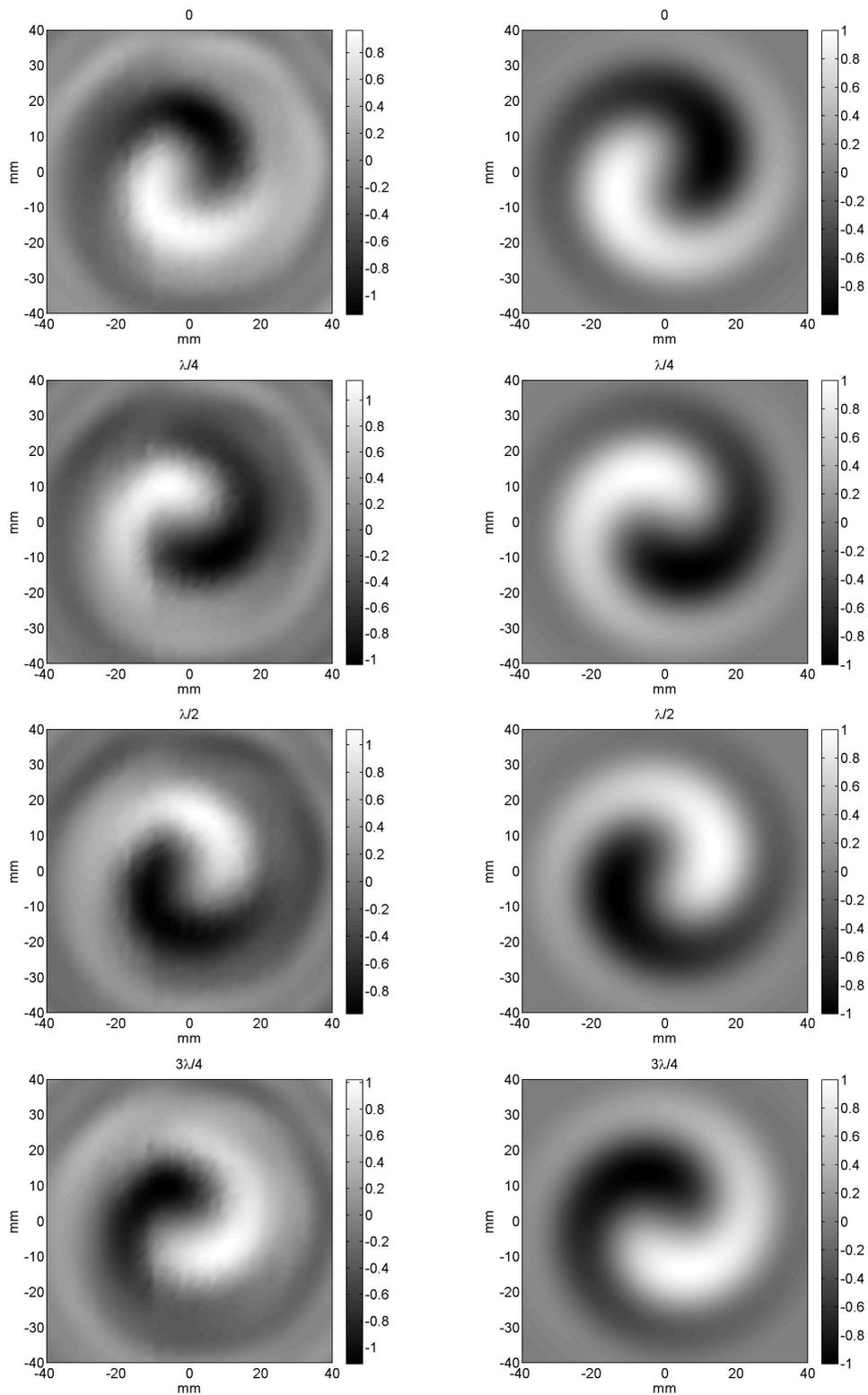


Figura 3.29: Amplitud instantánea (normalizada) de la presión en un plano ubicado a 200 mm del transductor, en cuatro instantes distintos de un período de oscilación τ [$0; \tau/4; \tau/2; 3\tau/4$]. Carga topológica $m = -1$. Izquierda: Medida. Derecha: Simulada.

en el plano de observación, representada por el salto desde $-\pi$ radianes a π radianes presente a lo largo de la espiral del frente de fase. Dicho de otra manera, la fase incrementa linealmente desde $-\pi$ a π conforme se rodea circularmente el centro del haz en sentido antihorario. Esto coincide con la descripción de una dislocación de tornillo y carga topológica unitaria. También, como es característico de los vórtices acústicos, los campos de presión, medido y sintetizado, se asemejan a una rosca o rosquilla, con presión nula y fase indeterminada en el centro de la misma, incluso en campo cercano. Gracias a esta similitud en su geometría suelen denominarse como patrones de tipo “donut”.

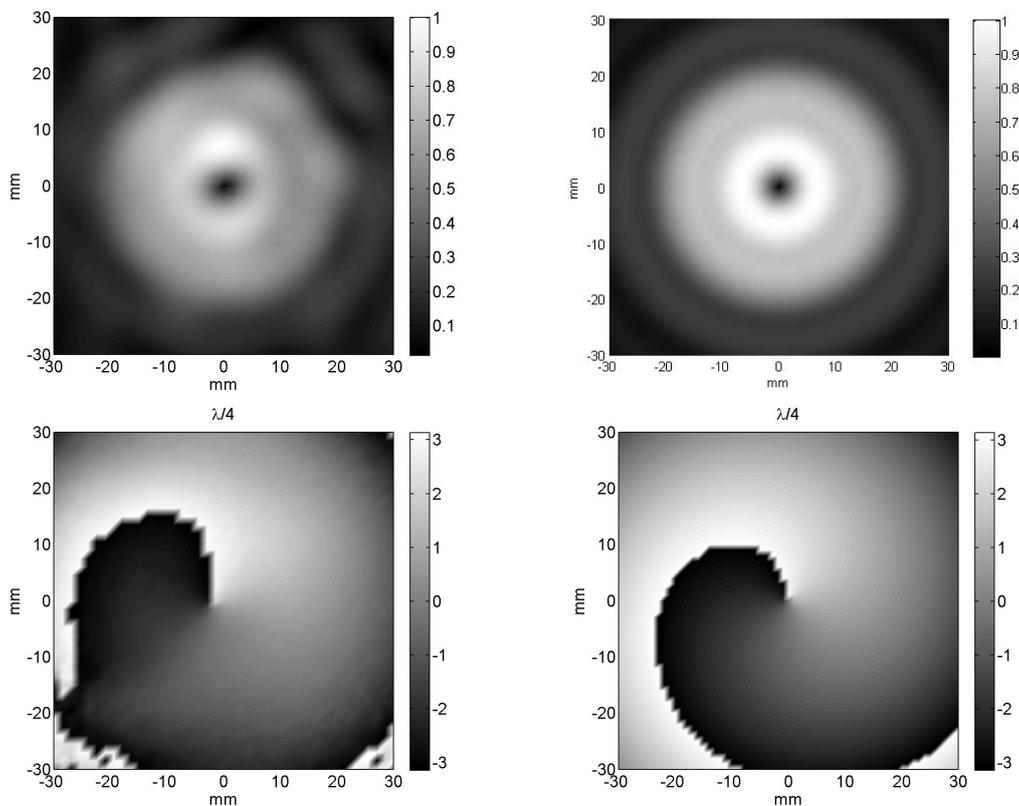


Figura 3.30: Magnitud (arriba) y fase (abajo) de un frente de ondas helicoidal en un plano perpendicular al eje principal en campo cercano, a 100 mm del transductor. Carga topológica -1. Izquierda: Valores medidos. Derecha: Valores simulados.

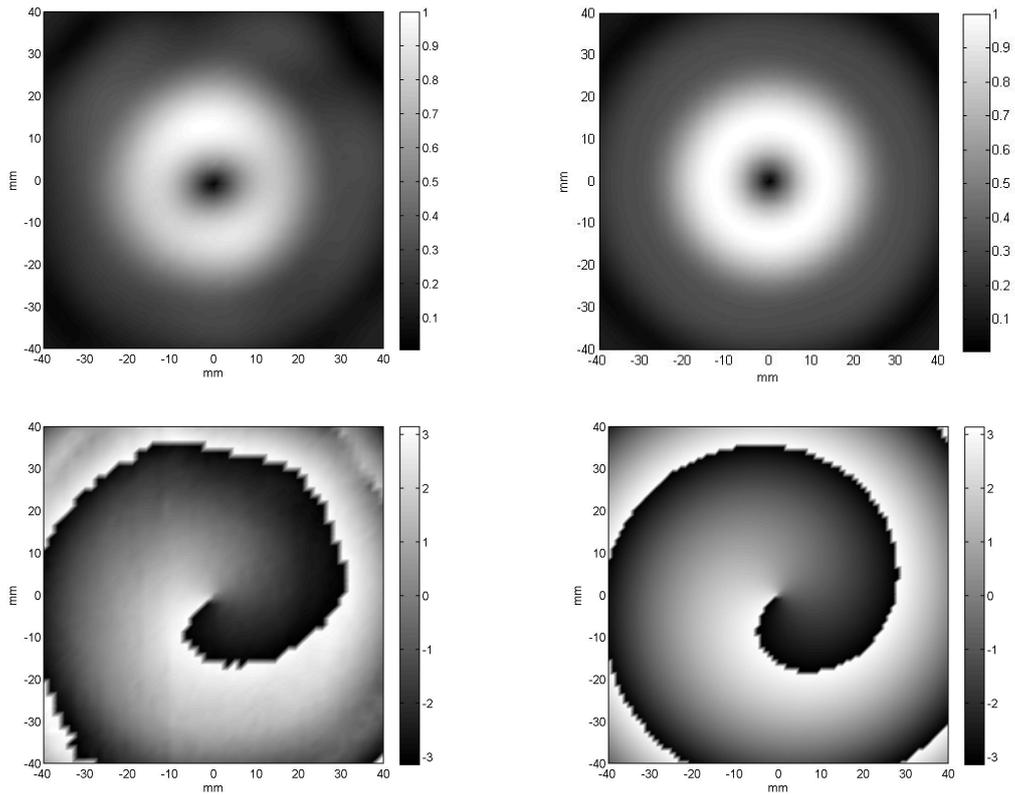


Figura 3.31: Magnitud (Arriba) y fase (Abajo) de un frente de ondas helicoidal en un plano perpendicular al eje principal en campo lejano, a 200 mm del transductor. Carga topológica 1. Izquierda: Valores medidos. Derecha: Valores simulados.

Finalmente, y con el fin de reiterar la calidad del haz helicoidal generado, la figura 3.32 muestra la variación temporal de la presión medida en 51 puntos equidistantes distribuidos sobre una línea, contenida en el plano $(X,Y,20\text{ cm})$, y que atraviesa transversalmente el haz helicoidal, cruzando por el centro del mismo. Claramente se observa la depresión interior del frente de ondas, así como las diferencias en la fase de los puntos a la derecha e izquierda del centro de haz. Asimismo, la figura 3.33 muestra la distribución de los puntos de fase constante a todos los instantes de tiempo en los que el haz atraviesa el plano de observación $(X,Y,20\text{ cm})$. La estructura helicoidal que conforman dichos puntos se logra a apreciar con claridad, emulando en gran medida ésta característica propia de los vórtices acústicos.

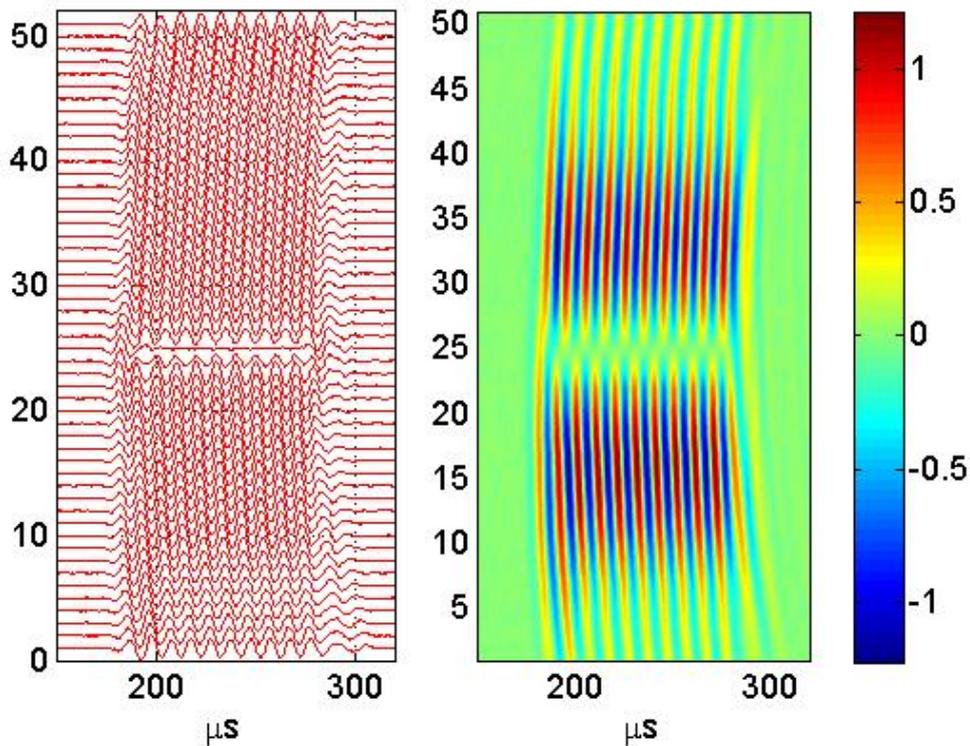


Figura 3.32: Evolución temporal de la presión a lo largo de 51 puntos de medida que atraviesan transversalmente el haz helicoidal observado a 200 mm.

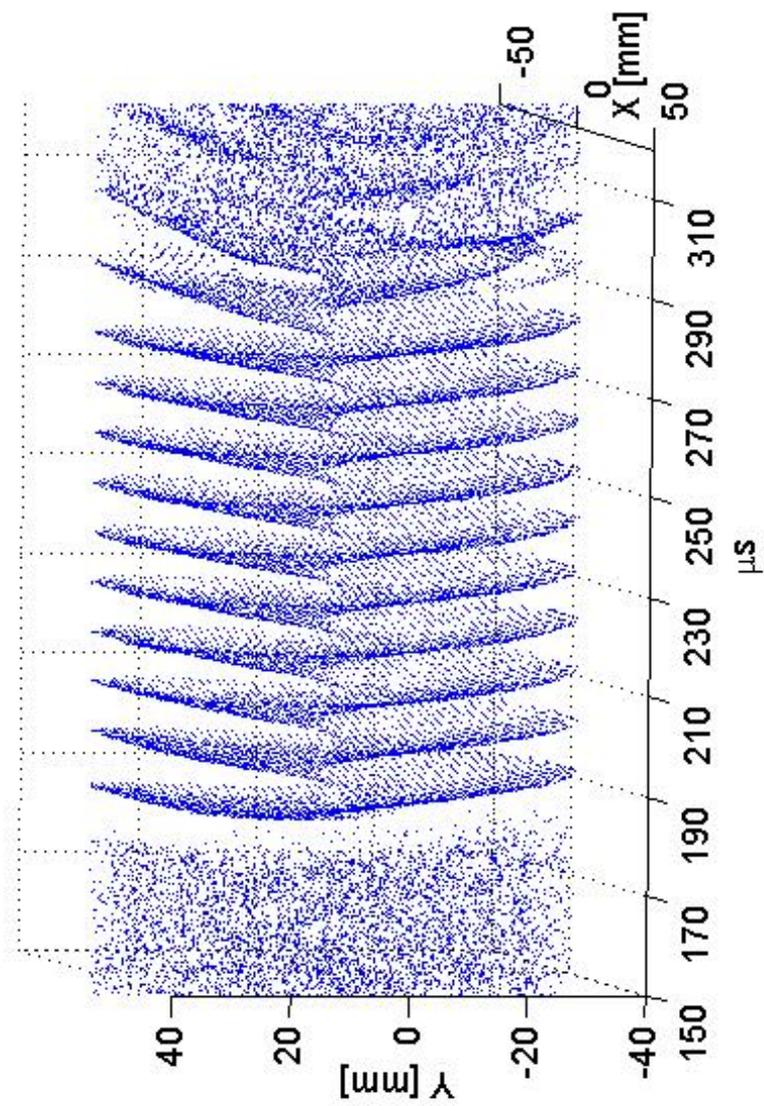


Figura 3.33: Planos de fase constante de un vórtice ultrasónico generado con un transductor Emfit, medidos instantáneamente en el plano (X,Y,200 mm) .

En conclusión, los resultados experimentales mostrados reflejan una gran semejanza con la teoría concerniente a los vórtices acústicos. Por tanto podemos afirmar que utilizando ferroelectretos celulares es posible generar frentes de onda helicoidales de gran calidad, en aire y en el rango ultrasónico, lo que hasta donde nos consta no ha sido reportado aún en la literatura. Esto abre la posibilidad de utilizar este tipo de campo acústico en aplicaciones diversas como las mencionadas en la introducción de este capítulo. Cabe anotar que los haces helicoidales no solo pueden ser generados usando un transductor monoelemento cuyo substrato contenga una SD de tipo tangencial, sino excitando un array plano de transductores con un arreglo en fase adecuado (tecnología phased arrays). El capítulo siguiente trata el tema de fabricación de arrays con FCell con detalle. También, el hecho de contar con un rango de frecuencia utilizable amplio, hace que sea posible generar haces de diferente carga topológica y sin cambiar de transductor.

3.5. Trabajo Futuro

A continuación se describen brevemente líneas de trabajo futuro, algunas de las cuales se plantean como continuación inmediata y específica al trabajo presentado en este capítulo. Otras, por el contrario, se proponen para ser asumidas a largo plazo.

- **Problema inverso de radiación.** Demostrada la versatilidad de los FCell para fabricar transductores de geometrías complejas y considerando su bajo coste y facilidad de manipulación, queda abierta la posibilidad de generar campos acústicos a medida o especificados. Abordar este asunto implica la solución del problema inverso de radiación (ver figura 3.34), para condiciones de velocidad normal constante pero con restricciones de tipo geométrico, acordes con las posibilidades de los FCell, lo cual no resulta un problema trivial e implica la utilización de esquemas numéricos y/o analíticos.
- **Discriminadores de Posición Angular por Amplitud y Fase.** El diseño general del discriminador angular se muestra en la figura 3.35. El discriminador está formado por un substrato cilíndrico, un par de electrodos de geometría variable angularmente y la película Emfit metalizada en la parte exterior. Los

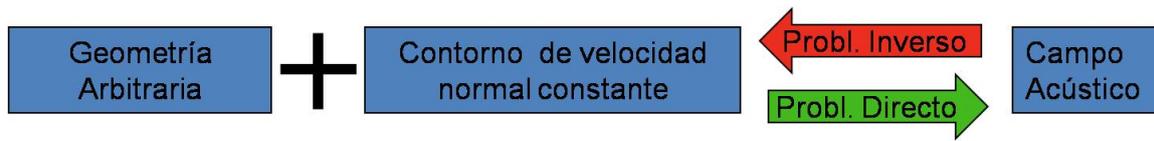


Figura 3.34: Representación del problema de radiación acústico, tanto inverso como directo.

electrodos serían realizados utilizando cinta adhesiva y conductora a la vez. La parte metalizada del material activo se utiliza como electrodo común.

El objetivo del transductor es determinar la posición angular de una fuente acústica emitiendo un frente de ondas plano. La forma de los electrodos interiores garantiza que la amplitud de la señal recibida en cada uno de ellos cambia de manera opuesta para cada posición angular. Por ejemplo, para los electrodos interiores mostrados en la figura 3.35, cuando la señal en el electrodo superior es máxima, en el inferior será mínima y viceversa. Por tanto, al efectuar la resta de la energía de las respectivas señales, es posible discriminar con cierta precisión la posición angular de la fuente acústica. La figura 3.36 muestra resultados preliminares utilizando un prototipo de discriminador. El potencial real, así como su implementación en un sistema de posicionamiento está aún por investigarse.

Siguiendo una idea similar, es posible utilizar la fase de la señal acústica emitida, en lugar de la amplitud, para determinar la posición angular de un receptor móvil en un plano. Para esto, se propone utilizar un substrato con dislocación de tornillo pero en la dirección radial, no en la axial, tal como se muestra en la figura 3.37. De esta manera, la distribución de la fase a un radio constante será diferente permitiendo su utilización para la discriminación de la posición. También es posible una configuración híbrida que utilice tanto la fase como la amplitud. En la actualidad está en curso la solicitud de un patente de invención de discriminadores angulares de posición para aplicaciones en aire usando FCell.

- Transductor Omnidireccional.** En este capítulo se demostró que es posible emular el patrón de emisión de un transductor esférico y, por tanto, es posible lograr una pauta omnidireccional. Por consiguiente se propone como trabajo futuro optimizar el diseño y fabricación del transductor, así como su utilización como un sistema phased array de transductores tanto en recepción, para de-

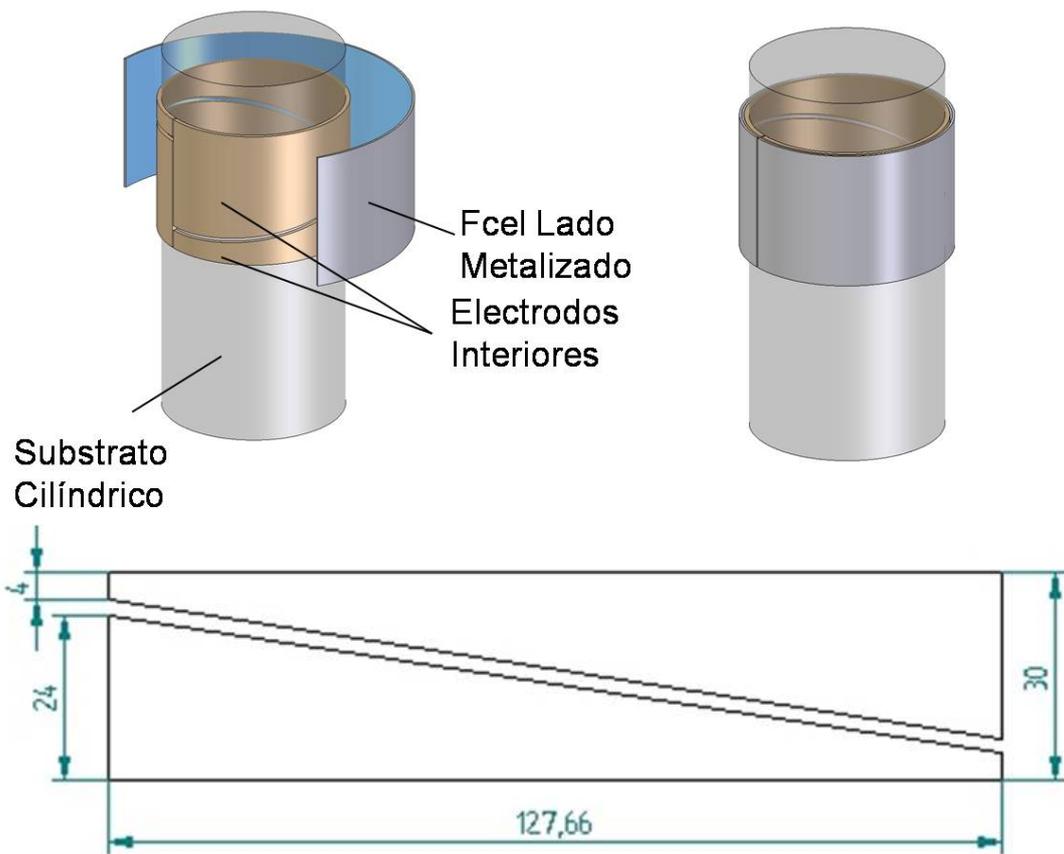


Figura 3.35: Arriba: Representación de un discriminador angular de posición utilizando FCell. Abajo: Forma y dimensiones de los electrodos interiores del primer prototipo ya construido.

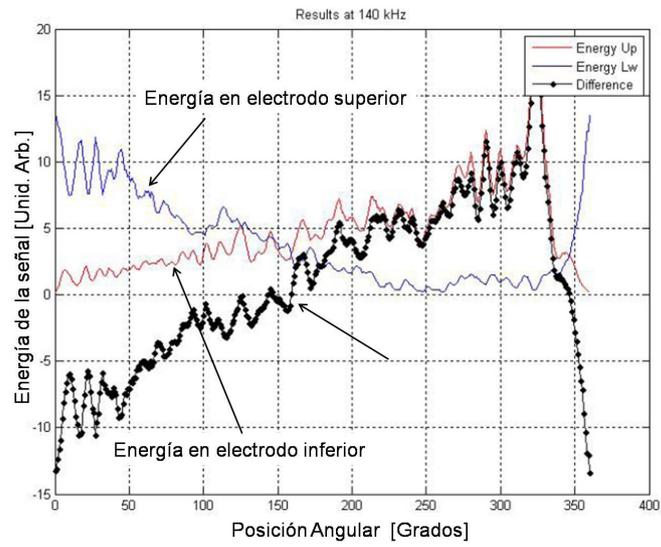


Figura 3.36: Resultados preliminares obtenidos con un discriminador angular de diámetro $\Phi = 40$ mm, a 140 kHz

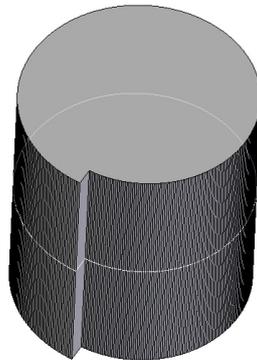


Figura 3.37: Substrato con dislocación de tornillo en la dirección radial para generar un campo con una singularidad en la fase.

terminar la posición de una fuente o reflector cercano, como en emisión, para modificar la directividad. Igualmente su implementación y potencial impacto en un sistema de posicionamiento local con ultrasonidos está por investigarse.

- **Transductores Focalizados.** Principalmente en el ámbito de los ensayos no destructivos e imagen acústica, resulta muy beneficioso focalizar la energía tanto en emisión como en recepción para lograr niveles de relación señal-ruido adecuadas, así como una buena resolución espacial. Por consiguiente, se propone como trabajo futuro la implementación de transductores monoelemento sobre substratos de superficies desarrollables como conos, semicilindros, etc.
- **Transductores Poliédricos.** Si bien un plano es una superficie desarrollable trivial, en este capítulo no se presentó ningún desarrollo que utilizase este tipo de superficie. Por consiguiente, resulta interesante explorar a futuro el diseño de transductores que aproximen superficies no desarrollables a partir de planos. Por ejemplo, la implementación de prototipos sobre substratos poliédricos puede redundar en transductores útiles para aplicaciones en aire.

3.6. Conclusiones.

Gracias a sus características físicas, los FCel poseen una versatilidad sin precedentes en el diseño de transductores. En este capítulo se han descrito, caracterizado y validado tres ejemplos de transductores ultrasónicos de superficie desarrollable que permiten hacerse una idea del potencial que posee los FCel. Los resultados experimentales presentados concuerdan en gran medida con los modelos teóricos implementados, corroborando el beneficio que brindan los FCel al combinar un modo de vibración tipo pistón inalterado por la curvatura del substrato, con una flexibilidad mecánica inherente y un amplio rango de frecuencia utilizable desde 30 kHz hasta 300 kHz. Además, los resultados del capítulo 1 referentes a transductores apilados, son directamente aplicables en el diseño de transductores sobre SD, haciendo posible modificar la respuesta en frecuencia dependiendo de la aplicación.

Hasta donde nos consta, los prototipos desarrollados con FCel y su potencial de uso, así como las ideas de trabajo futuro propuestas, no han sido reportados en la literatura (salvo en los artículos presentados por el autor de esta tesis [35] [37]

[36]), por lo que constituyen resultados pioneros en la utilización de los FCell para aplicaciones ultrasónicas en aire.

SISTEMAS PHASED ARRAYS BASADOS EN FERROELECTRETOS CELULARES (FCel)

4.1. Introducción

La tecnología de los sistemas con arreglo en fase o “phased arrays” (PA) es ampliamente utilizada en aplicaciones ultrasónicas gracias a que brindan la posibilidad de enfocar y deflectar un haz ultrasónico de manera electrónica, a diferentes profundidades y ángulos, sin necesidad de mover mecánicamente los transductores o una muestra en inspección. En general, los materiales utilizados en la fabricación de un array o multitransductor, son cerámicos, polímeros piezoeléctricos, piezocompuestos y dispositivos capacitivos. Asimismo, la mayoría de las aplicaciones de los sistemas PA ocurren en el campo de la medicina, como por ejemplo para obtener imágenes acústicas del cuerpo humano o para guiar instrumentos quirúrgicos, como agujas para cerrar heridas [21] [116].

En cuanto a aplicaciones para ensayos no destructivos (END), la tecnología de los PA ha sido reportada en numerosos trabajos, principalmente en aplicaciones por inmersión [79] [137]. Algunas aplicaciones en aire han sido presentadas utilizando cerámicas piezoeléctricas, así como arrays capacitivos fabricados con membrana polimérica [85] [114] [77]. Sin embargo, los ultrasonidos acoplados en aire (US-A) no

han tenido un uso tan difundido, en comparación con las técnicas por inmersión y contacto, debido principalmente a la escasa adaptación de impedancias entre el aire y la mayoría de los materiales utilizados en la fabricación de los transductores, así como también a la baja velocidad de propagación de la ondas y la alta atenuación por absorción.

El gran uso de las cerámicas piezoeléctricas en la fabricación de los arrays, ha llevado a importantes avances para lograr una buena adaptación con el aire, por medio de la utilización de capas de adaptación de un cuarto de longitud de onda. También y más recientemente, como resultado de los avances en los procesos de microfabricación, transductores ultrasónicos capacitivos (cMUTs) han sido desarrollados para competir con los transductores tradicionales. Estos, al igual que los transductores fabricados con membranas poliméricas, exhiben un mejor ancho de banda, lo que combinado con su también mejor adaptación con el aire, les hace buenos candidatos en US-A [91] [53] [107]. Además, polímeros piezoeléctricos como el fluoruro de polivinilideno (PVDF) han sido empleados en aplicaciones diversas en aire, como la reconstrucción de objetos tridimensionales [24], medidas de rango [123] y sistemas de posicionamiento local [55].

A pesar de la amplia gama de tecnologías de transductores, la investigación realizada en US-A para mejorar las limitaciones propias de utilizar transductores mono-elemento en lugar de sistemas PA, sigue siendo insuficiente. Esto puede ser atribuido, además de las dificultades antes mencionadas, al alto coste de los sistemas de excitación y de la fabricación de los transductores ultrasónicos, lo cual les hace inviables en muchas aplicaciones.

Por su parte, los FCell constituyen una alternativa para la actual demanda de transductores ultrasónicos que satisfagan el compromiso entre directividad, ancho de banda, sensibilidad y costo. Recientemente, arrays de transductores fabricados con ferroelectretos han sido reportados. Metzger et al. han propuesto el uso de estos materiales para monitorizar el inventario en estantería por medio de la medida del peso de los productos [82]. Ya en el campo de los sistemas PA, Degel et al. [30] presentan resultados preliminares obtenidos con un array lineal de 32 elementos y 0.5 mm de paso, el cual representa el único trabajo reportado referente al uso de FCell para US-A.

Por nuestra parte, en este capítulo se introduce un novedoso proceso de fabricación

para los arrays hechos a partir de material FCell. El método propuesto presenta 3 diferencias principales con relación a los trabajos reportados previamente relacionados con la fabricación de arrays con ferroelectretos y además reduce considerablemente la instrumentación requerida para la conformación del multitransductor. Específicamente, 1) la película Emfit no es discretizada en elementos, contrario a lo propuesto en [82]; 2) la totalidad del material activo utilizado está polarizado permanentemente; y 3) ningún patrón de electrodos es estructurado sobre la película. Además, se propone el uso de una cinta adhesiva especial que conduce eléctricamente solo a través de su espesor, la cual juega un doble papel dentro del proceso de fabricación: 1) la fijación de la película Emfit al sustrato y 2) la discretización en elementos activos de la apertura del array, la cual es definida por celdas (“pads”) de cobre en una placa de circuito impreso (PCB).

En este capítulo, se reportan las contribuciones obtenidas de la investigación realizada con la película Emfit, FCell disponible comercialmente, para fabricar arrays para aplicaciones en aire. El nuevo procedimiento, basado en una película previamente polarizada, resulta fácil, barato y confiable. Si bien los resultados que se presentan fueron obtenidos utilizando una apertura lineal y plana, éstos pueden ser extendidos a multitransductores no uniformes y multidimensionales dispuestos sobre sustratos de superficie desarrollable. Del mismo modo, información relevante concerniente al proceso de diseño y fabricación de los transductores y resultados experimentales referentes a la caracterización de los prototipos desarrollados, son presentados. Específicamente, los siguientes aspectos son tratados:

- Descripción de la instrumentación utilizada y de los prototipos fabricados.
- Descripción detallada del nuevo procedimiento para fabricar arrays usando FCell.
- Caracterización de los prototipos realizados: nivel de acoplamiento (“cross-talk”) entre elementos, sensibilidad, respuesta acústica, etc.
- Modelado y validación del haz conformado.
- Evaluación de la respuesta de los multitransductores en modo pulso-eco para imagen acústica.

- Aplicación y viabilidad de los ferroelectretos para inspección de textiles en transparencia.
- Conclusiones y trabajo futuro.

4.2. Materiales y Métodos.

4.2.1. Instrumentación.

La figura 4.1 muestra un diagrama de bloques del instrumental que hemos utilizado en la obtención de los resultados del presente capítulo. Básicamente, éste está compuesto por tres subsistemas, a saber, el sistema de excitación de los transductores, las unidades de control de posición y los dispositivos de medida. Para la conformación del haz, hemos empleado un equipo comercial para sistemas PA (SITAU 32-128, Dasel SL, Madrid, España), el cual posibilita controlar arrays de hasta 128 elementos con un número máximo de 32 canales activos. El SITAU permite utilizar señales de excitación cuadradas de 100 Vp en pulsos de longitud programable y en un rango de frecuencias entre 30 kHz y 20 MHz. En recepción dispone del mismo ancho de banda, con una ganancia configurable de hasta 60 dB. Adicionalmente, el sistema posibilita la adquisición y almacenamiento de los ecos recibidos por cada uno de los elementos del multitransductor.

En relación con las medidas de campo acústico, unidades de rotación y desplazamiento de gran precisión ya empleadas en el capítulo 2, siendo posible medir el haz ultrasónico en puntos arbitrarios en el plano X-Z. Ver figura 4.2. Durante la caracterización, los prototipos son rotados respecto al eje de simetría vertical (Y) mientras que el micrófono calibrado es movido a lo largo del eje principal (Z) utilizando las unidades de desplazamiento. Los puntos de medida están dispuestos sobre el plano X-Z en un barrido angular de 140° ($\pm 70^\circ$ a incrementos de medio grado) y discretizado radialmente desde una distancia de 100 mm con respecto al array, con incrementos de 10 mm hasta alcanzar una distancia máxima de 300 mm. Las medidas de campo acústico son realizadas utilizando un micrófono de 1/8 de pulgada (1/8 in.-4138; Brüel & Kjaer, Naerum, Dinamarca), el cual puede ser utilizado a frecuencias comprendidas entre 6 Hz y 140 kHz y se orienta perpendicular al frente de onda. Esto resulta muy

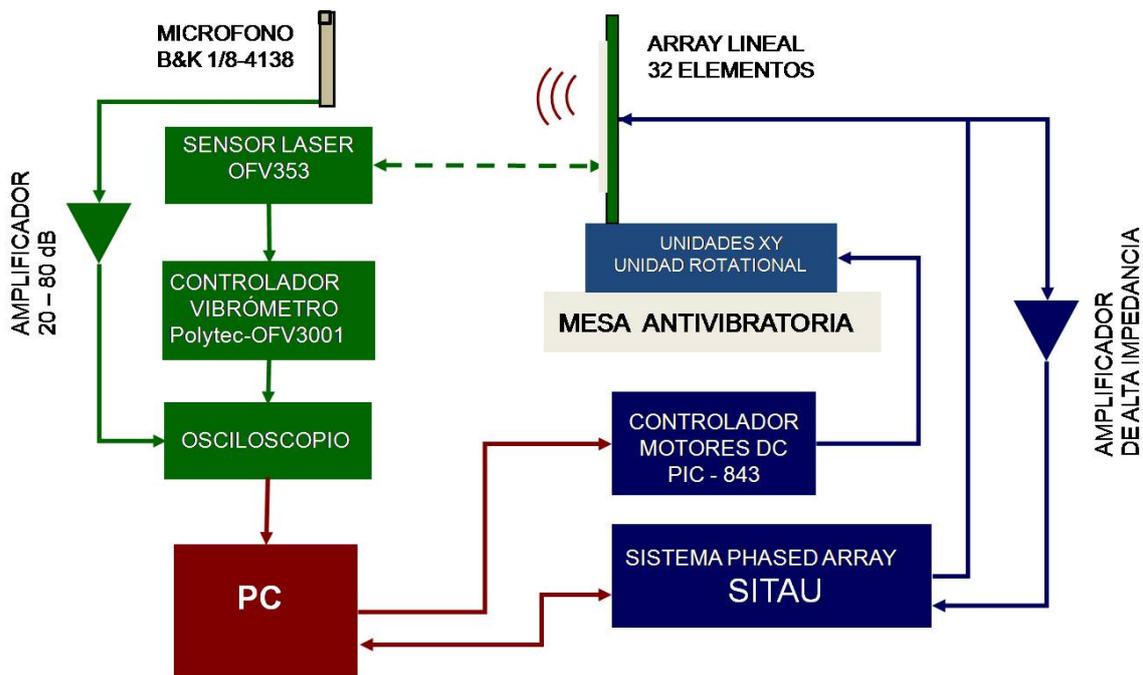


Figura 4.1: Diagrama de la instrumentación utilizada.

conveniente ya que se minimizan los efectos de la directividad propia del micrófono sobre la medida de presión. Las correcciones de campo libre también fueron tenidas en cuenta.

Utilizando el sistema SITAU, el haz es enfocado en cualquier punto del plano de observación, y deflectado a diferentes ángulos. Para esto, los elementos del array son excitados de acuerdo a la correspondiente ley focal de retardos. Asimismo, el sistema proporciona una señal de disparo al osciloscopio, con el cual se captura la forma de onda completa en cada punto de observación, para luego transferirla, vía GPIB, a un ordenador. Una vez la información es almacenada, las unidades de control de posición se mueven de manera adecuada para medir el haz nuevamente en una posición distinta.

Para la obtención de la imagen acústica en pulso-eco, el haz es deflectado electrónicamente a pequeños incrementos angulares. La imagen está compuesta por un reflector cilíndrico de 10 mm de diámetro ubicado a una distancia de 150 mm del centro del array y alineado de forma paralela al eje Y. En este caso, el elemento número 16 del array es utilizado para recibir los ecos, los cuales son pre-amplificados y almacenados

utilizando el sistema SITAU.

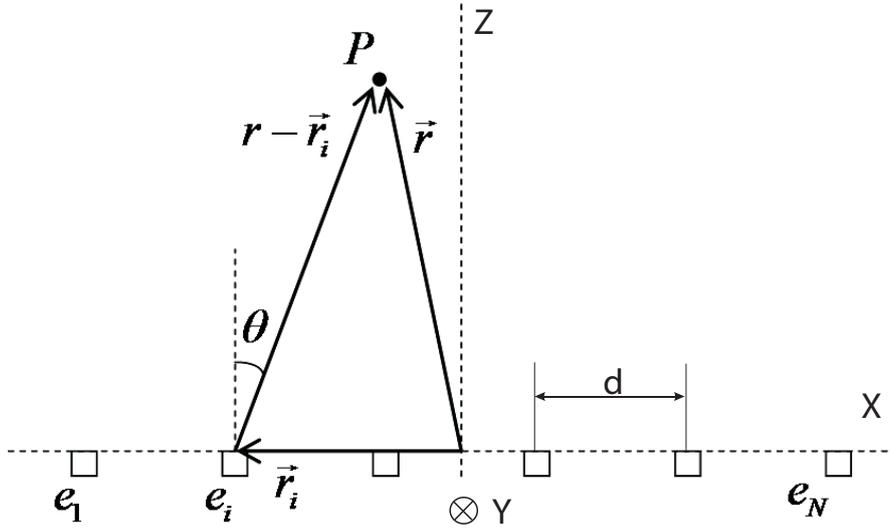


Figura 4.2: Sistema de coordenadas para la estimación del campo de presión de un array unidimensional.

El perfil de velocidad de la superficie activa de los transductores es medido utilizando un vibrómetro láser de efecto Doppler (Polytec GmbH, Waldronn, Alemania), el cual está dispuesto sobre una mesa antivibratoria y posee una resolución máxima de $0.5 \mu\text{m/s}$.

Considerando el rango de frecuencia utilizable de la película Emfit, hemos empleado señales de excitación de diferentes frecuencias. Utilizando el sistema SITAU, señales cortas de 3 pulsos y de frecuencia central de 100, 150 y 300 kHz fueron empleadas en la caracterización de la respuesta acústica de los prototipos de array, con una tasa de repetición (PRF) baja y un ciclo útil del 50%. Considerando que la experimentación no fue realizada en una cámara anecoica, especial cuidado fue tenido en cuenta para evitar los efectos de cualquier reflector cercano. También, los multitransductores fueron ubicados a suficiente altura y así evitar los ecos provenientes de la mesa antivibratoria.

Para la evaluación del acople electromecánico entre elementos, un generador de ondas (Modelo 33120A; Agilent Technologies, Santa Clara, CA) en conjunto con un amplificador de potencia (Modelo 9400; Tabor Electronics, Tel hanan, Israel) fueron

utilizados; permitiendo aplicar voltajes de hasta 400 Vpp a frecuencias entre DC y 500 kHz.

4.2.2. Fijación de la Película

El uso de cintas plásticas adhesivas para pegar la película Emfit sobre un sustrato dado garantiza en buena parte la fabricación ágil y confiable de transductores basados en ferroelectretos [36]. En el capítulo 2 demostramos que las cintas plásticas con adhesivo acrílico funcionan como un sustrato rígido para la película activa. Por tanto, la respuesta vibratoria de ésta no se ve afectada por la cinta, siempre que se garantice una buena adhesión y se evite la formación de pliegues e irregularidades en el proceso de pegado.

Para la fabricación de los arrays siguiendo el método que se propone en este capítulo, hemos utilizado una cinta especial cuya estructura está constituida por una matriz acrílica con inserciones de partículas metálicas (3M, St. Paul, MN). Ésta tiene la importante característica de ser conductora de electricidad únicamente a través de su espesor y aislante en sentido transversal, es decir, en el plano de la cinta. En la tabla 4.1 se listan las propiedades físicas más importantes de esta cinta, a la cual se hace referencia en este capítulo con el acrónimo ZCPT.

Tabla 4.1: Propiedades Físicas de la ZCPT.

Propiedad Física	Valor
Resistencia de aislamiento ¹	$3.4 \times 10^{14} \Omega / \square$
Tipo de adhesivo	Acrílico
Espesor	50 μm
Espacio mínimo entre conductores ²	0.4 mm
Área mínima de traslape entre sustratos ³	3.2 mm ²
Resistencia de interconexión ³	0.2 to 5 Ω

¹ Basada en ASTM D-257.

² Espacio recomendado para garantizar aislamiento eléctrico. Distancias menores pueden ser posibles en ciertas aplicaciones.

³ Los valores dependen de la aplicación y de los sustratos a ser conectados.

4.2.3. Descripción de Prototipos

Hemos fabricado dos prototipos de array de $N = 32$ elementos cada uno. El paso (d) de ambos es de 3.43 mm, correspondiente a una longitud de onda a 100 kHz en aire. Por tanto, en el rango de operación de la película Emfit, el ratio d/λ puede variar entre $1/3$ y 3 , para frecuencias entre 30 kHz y 300 kHz respectivamente. Ambos prototipos poseen una apertura completa $W = (N - 1)d + w$ de 108.8 mm de ancho y $10 \times d$ de alto, donde w es el ancho de elemento. La única diferencia entre los prototipos radica en el ancho de los elementos y por consiguiente, en la distancia de separación entre elementos adyacentes (g). Valores de g de 1 mm y 1.524 mm fueron seleccionados para garantizar el aislamiento eléctrico entre elementos, de acuerdo a las características dadas por el fabricante descritas en la tabla 4.1. Por consiguiente, el ancho de elemento correspondiente a cada prototipo es 2.43 mm y 1.9 mm respectivamente. Si los elementos llegasen a ser muy pequeños, la no uniformidad tanto de la película Emfit como de la ZCPT puede conducir a una distribución irregular de la sensibilidad de los multitransductores e incluso a la obtención de elementos defectuosos. Por esta razón, y teniendo en cuenta que la distancia lateral nominal de las cavidades de aire de la película Emfit puede llegar a ser de $100 \mu\text{m}$, hemos considerado un ancho de elemento de por lo menos 5 veces esa cifra. En consecuencia, el paso ($w + g$) sería siempre mayor a 1 mm.

4.3. Conformación del Haz Ultrasónico con Phased Arrays: Teoría

Los sistemas PA ultrasónicos permiten excitar electrónicamente, de forma controlada y precisa (en amplitud y fase), los elementos individuales de un array de transductores o multitransductor. Utilizando una aplicación por ordenador, es posible modificar los parámetros del haz ultrasónico, a saber, el ángulo de deflexión, la distancia focal y la geometría del foco. A este proceso se le conoce como conformación del haz o “beamforming” y básicamente busca lograr un haz ultrasónico colimado con suficiente longitud de foco en emisión y focalizar dinámicamente en recepción con buena resolución temporal. Este tipo de sistemas permite obtener imágenes de reflec-

tores, ubicados dentro del alcance del array, sin necesidad de movimientos mecánicos, a una velocidad alta de adquisición y con una mayor resolución espacial. Ver figura 4.3.

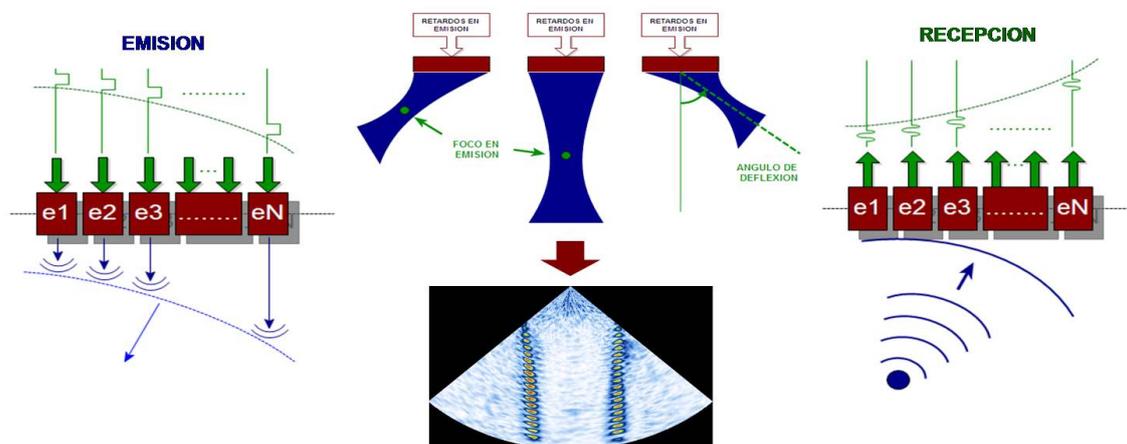


Figura 4.3: Representación del funcionamiento de un sistema phased array.

La geometría del array determina las propiedades del haz. El ancho del lóbulo principal está directamente relacionado con el tamaño de la apertura, mientras que los lóbulos de rejilla son causados por el submuestreo espacial de la apertura del array. Para operación en banda estrecha la formulación analítica que relaciona las características del haz con la geometría del array puede ser revisada en la referencia [68]. Sin embargo, para operación en banda ancha, utilizando señales de alto contenido en frecuencia, es necesario emplear esquemas numéricos de predicción de campo acústico, con el consecuente compromiso entre el tiempo de cálculo y la precisión de la estimación [130].

En este trabajo, hemos simulado el patrón del haz utilizando el método del Modelo de la Fuente Puntual (Point Source Model) [130], con algunas modificaciones para incrementar su exactitud. Puesto que los arrays analizados son unidimensionales, las simulaciones están restringidas al plano perpendicular que contiene los centroides de todos los elementos rectangulares del array, es decir, al plano X-Z (Ver figura 4.2).

Un array lineal de N elementos considerandos como fuentes puntuales omnidireccionales, produce una presión en un punto (\vec{r}, t) arbitrario, cuya forma de onda puede ser calculada por:

$$p(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^N \frac{A_i p_o \left(t - \frac{|\vec{r} - \vec{r}_i|}{c} - \tau_i \right)}{|\vec{r} - \vec{r}_i|} \quad (4.1)$$

donde el subíndice i denota el número del elemento, A_i es la amplitud de emisión, $p_o(t)$ es la forma de onda emitida y se presupone igual para todos los elementos, \vec{r} es el vector desde el centro del array hasta un punto de medida dado P , \vec{r}_i indica la posición de un elemento dado del array, c es la velocidad del sonido en el medio y τ_i es el instante de emisión del i -ésimo elemento para la ley focal aplicada. Ver figura 4.2

Considerar cada elemento como una fuente puntual desprecia el efecto del tamaño del elemento, introduciendo importantes imprecisiones que cobran especial relevancia en el campo cercano y para ángulos de deflexión grandes. Por consiguiente, el patrón azimutal de cada elemento es incluido en el cálculo teórico del campo radiado. Asumiendo que la condición de campo lejano para un elemento individual es satisfecha, dicha pauta directiva puede ser aproximada, para una fuente acústica rectangular, como:

$$A(\theta_i) = \text{sinc} \left[\frac{w}{\lambda} \sin(\theta_i) \right] \quad (4.2)$$

donde w es el ancho de elemento y θ_i es el ángulo de visión desde el elemento i hasta el punto de medida de campo P . Substituyendo en la ecuación 4.1 y usando la función delta de Dirac, se obtiene que:

$$p(\vec{r}, t) = p_o(t) * \sum_{i=1}^N \frac{A_i A(\theta_i) \delta \left(t - \frac{|\vec{r} - \vec{r}_i|}{c} - \tau_i \right)}{2\pi |\vec{r} - \vec{r}_i|} \quad (4.3)$$

donde el $*$ es el operador convolución en el dominio temporal.

El tipo de excitación, junto con la función de transferencia de los elementos del array, determina las características de la forma de onda emitida $p_o(t)$. Comúnmente, una senoide con envolvente gaussiana es utilizada, sin embargo un modelo más ajustado a la realidad puede ser descrito por [98]:

$$p_o(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A_o t^m \exp^{-t^2/B} \sin(2\pi f_s t) & t \geq 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

donde A_o es la amplitud de referencia y f_s la frecuencia central del array. Los parámetros m y B están relacionados con el tiempo de subida de la envolvente de la señal y el ancho de banda, respectivamente.

Las imágenes acústicas simuladas y presentadas en este capítulo fueron obtenidas de manera similar a la antes descrita. Si un reflector Q es considerado como un punto, la forma de onda de la presión en su posición puede ser calculado por 4.3. Para modelar la señal reflejada, es asumido que el mismo punto radia toda la forma de onda recibida, de manera que el eco recibido en cada elemento del array puede ser calculado por:

$$s_\tau(t) = p\left(\vec{r}_Q, t - \frac{\vec{r}_Q}{c}\right) \quad (4.5)$$

donde \vec{r}_Q es el vector desde un elemento dado del array hasta el reflector. El subíndice τ indica que una señal (o A-SCAN) es obtenida para cada ley focal aplicada $\{\tau_1 \dots \tau_N\}$; lo cual, en caso de un B-SCAN sectorial, corresponde a un solo ángulo de deflexión dado.

4.4. Nuevo Método de Fabricación de Arrays con Ferroelectretos

Recientemente, multitransductores basados en FCell han sido propuestos por Metzger *et al.* [82] y por Degel *et al.* [30]. El primero muestra cómo es posible monitorizar la cantidad de productos en una estantería midiendo la presión que ejercen los productos sobre un array de 96 transductores cuadrados distribuidos regularmente en 12 columnas y 8 filas, en un área de $30 \times 20 \text{ cm}^2$. Degel, por su parte, reporta resultados preliminares en la caracterización de un array ultrasónico de 32 elementos para aplicaciones en aire. El método propuesto en este caso comprende dos fases: 1) estructurar los electrodos superior e inferior en ambas caras de una película celular no polarizada utilizando “sputtering” y revelado (“etching”) y 2) posteriormente cargar eléctricamente las zonas comprendidas entre electrodos por medio de una descarga corona o cualquier otro método de polarización. Este procedimiento resulta elaborado y requiere instrumentación especializada y costosa y a pesar de los

alentadores resultados, se reportan dificultades en relación con la homogeneidad de la distribución de sensibilidad de los elementos del array, así como elementos defectuosos y acople electromecánico.

En vista de lo anterior, hemos propuesto un enfoque distinto para fabricar arrays de transductores utilizando película de ferroelectreto celular ya polarizada y disponible comercialmente (película Emfit). Como se mencionó en capítulos anteriores, la película es adquirida con una de sus caras ya metalizada. El proceso de construcción propuesto se resume en los siguientes pasos:

1. Se corta la película Emfit, tal como la entrega el fabricante, siguiendo la forma y tamaño de la apertura deseada del array.
2. Los electrodos inferiores de los elementos se estructuran sobre una placa de circuito impreso.
3. La cara no metalizada de la película Emfit es adherida sobre la distribución de electrodos inferiores de la PCB, utilizando ZCPT. Ver figuras 4.4 y 4.6.

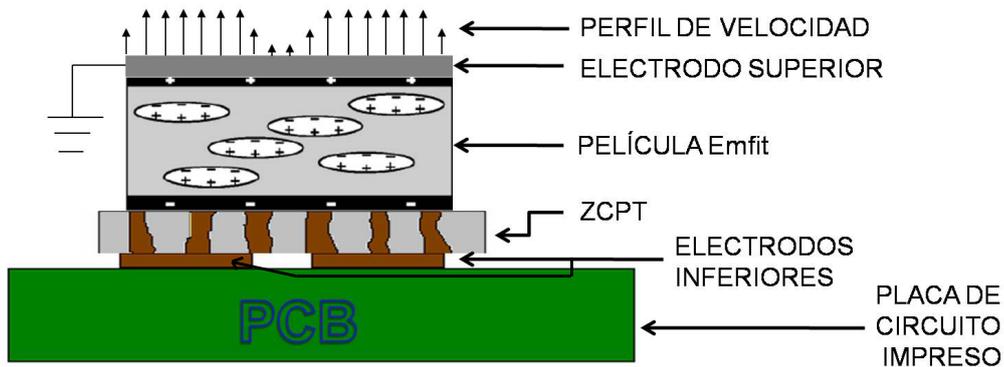


Figura 4.4: Representación de la sección transversal de un array fabricado con el procedimiento propuesto

4. El lado metalizado de la película es utilizado como electrodo común y es conectado a tierra a lo largo de toda su longitud usando un pad de cobre adicional.

La figura 4.5 muestra las partes que constituyen en array fabricado con FCell, así como una fotografía de uno de los prototipos fabricados siguiendo el procedimiento propuesto. También la figura 4.6 muestra una fotografía de la cinta ZCPT adherida

sobre la placa de circuito impreso, paso previo a la sujeción de la película. La mayor ventaja de este procedimiento de fabricación radica en la manera como la apertura completa es obtenida, ya que la discretización en elementos activos y su posterior fijación mecánica es llevada a cabo en un mismo paso gracias a la ZCPT. Además, el usuario final no requiere cortar los elementos individuales que conformarán la apertura como tampoco estructurar electrodos sobre una película no polarizada permanentemente, como se requiere en los otros métodos.

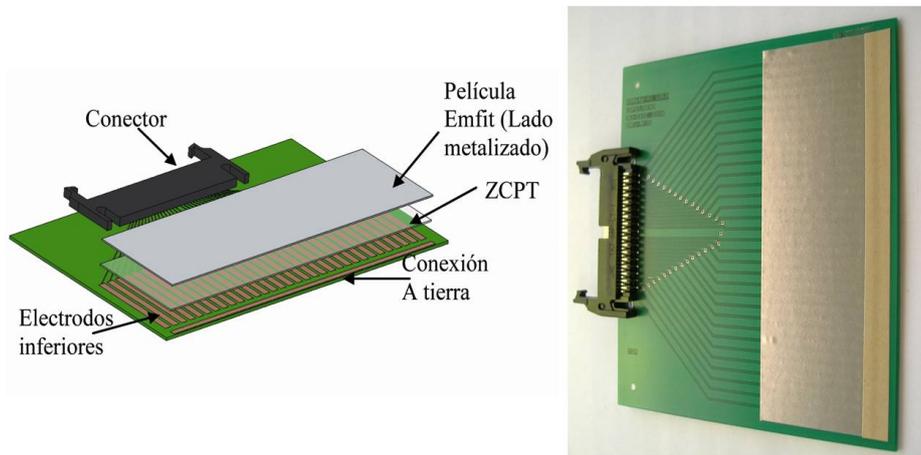


Figura 4.5: Partes del montaje de un array lineal unidimensional usando ferroelectretos celulares (izquierda) y fotografía de uno de los prototipos fabricados (derecha).

Gracias a la propiedad conductora del adhesivo en la dirección vertical, y la baja deformación lateral de los FCEl, es posible obtener un nivel de desacople electromecánico alto entre elementos. Además, el método propuesto permite el control preciso de la forma de los electrodos inferiores del array de manera económica y fácil. Esto a su vez da cabida a la fabricación de arrays no-uniformes y por consiguiente a la validación de sus métodos de diseño, lo cual es de actual interés científico. Finalmente, el proceso puede ser utilizado para fabricar multitransductores sobre cualquier superficie desarrollable, en este caso, empleando placas flexibles de circuito impreso.

La tabla 4.2 presenta un resumen de las diferentes métodos de fabricación de arrays de transductores utilizando ferroelectretos celulares.

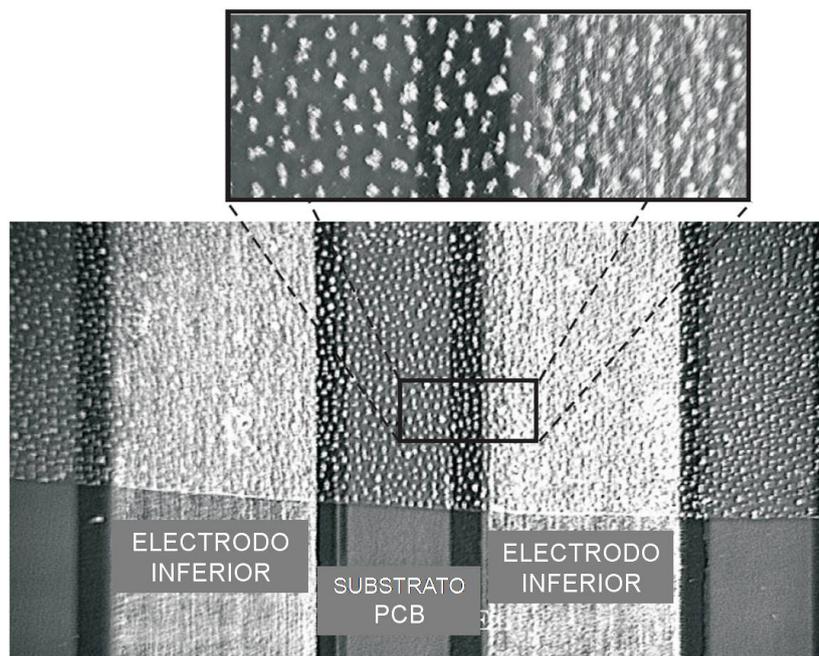


Figura 4.6: Fotografía de la cinta ZCPT pegada sobre los electrodos inferiores de la PCB. Encima se adhiere la cara no metalizada de la película Emfit.

Tabla 4.2: Distintas posibilidades de fabricación de arrays con ferroelectretos celulares

Método	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5
1 Metzger <i>et al.</i> [82]	Polarizar la película	Metalizar ambos lados de la película	Cortar a medida los elementos individualmente	Pegar los elementos al PCB	Conectar los elementos eléctricamente
2	Polarización de la película	Creación de los electrodos superior e inferior con “sputtering” y “etching”	Pegar en PCB	Conexión eléctrica de los elementos	
3 Degel <i>et al.</i> [30]	Crear los electrodos superior e inferior	Cargar únicamente el área activa de la apertura	Pegar en PCB	Conectar eléctricamente los elementos	
4 Ealo <i>et al.</i>	Polarizar la película	Metalizar únicamente uno de las caras ¹	Pegado en PCB y Conexión eléctrica de los elementos de manera simultánea usando ZCPT		

¹ Los electrodos inferiores se estructuran sobre la placa de circuito impreso (PCB). La cara metalizada es usada como tierra de todos elementos del array.

4.5. Caracterización Experimental y Validación

En esta sección se pretende evaluar cuantitativamente el proceso de fabricación propuesto. En primer lugar, el efecto de la ZCPT sobre la respuesta acústica de un transductor monoelemento fabricado con FCell es investigado. Posteriormente, presentamos la evaluación de la respuesta de un prototipo de array de 32 elementos en cuanto a distribución de sensibilidad y acoplamiento (crosstalk) entre elementos. Asimismo, mediciones del patrón de emisión con y sin deflexión son presentadas y comparadas con resultados de simulación. Finalmente, imágenes acústicas correspondientes a un reflector cilíndrico ubicado en frente del array y a defectos en textiles son obtenidas para demostrar el potencial de los sistemas PA basados en FCell en aplicaciones en aire tanto en modo pulso-eco como en transmisión.

4.5.1. Análisis de la Respuesta de un monoelemento fabricado con ZCPT

Además de los prototipos de arrays fabricados y descritos anteriormente, un monoelemento plano de $10 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ fue también construido usando ZCPT para adherir la película activa al sustrato. Esto con el fin de cuantificar cualquier posible efecto de cinta ZCPT sobre la respuesta en frecuencia y el modo de vibración del transductor.

La figura 4.7 muestra la respuesta en frecuencia del transductor plano fabricado con ZCPT, medida por interferometría sobre el electrodo superior. Como se observa en la figura 4.7(c), la desviación estándar parece estar un poco por encima, a frecuencias por debajo de los 150 kHz, en comparación con la respuesta obtenida con un transductor fabricado con ECPT (Cinta isotrópicamente conductora de electricidad). Sin embargo, la sensibilidad promedio no parece alterarse por el tipo de adhesivo utilizado sino hasta prácticamente la frecuencia de resonancia.

Del análisis de las medidas por interferometría del capítulo 2, se concluyó que el patrón vibratorio a frecuencias superiores a 150 kHz resulta irregular y aleatorio. Sin embargo, para frecuencias más bajas, el perfil de velocidad es similar al de un pistón. Teniendo en cuenta que la forma del campo acústico de un emisor está directamente relacionada con el perfil de velocidad de su superficie activa, el patrón de radiación

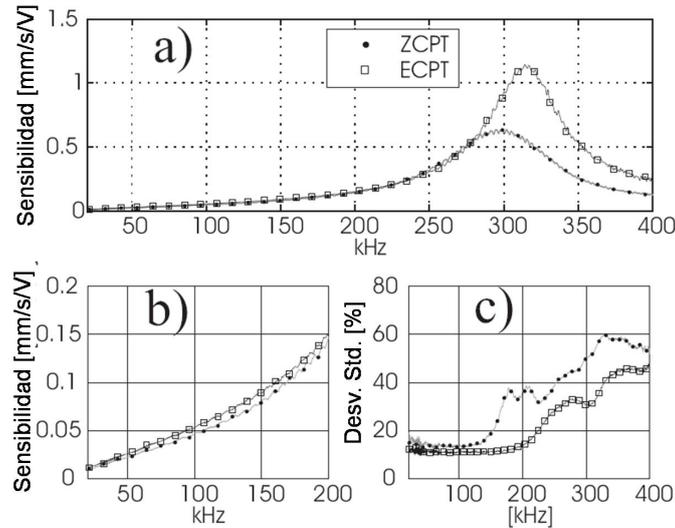


Figura 4.7: Respuesta en frecuencia de un transductor monoelemento fabricado utilizando ZCPT y ECPT. La desviación estándar se presenta como un porcentaje respecto al promedio. Obtenida mediante interferometría.

azimutal del monoelemento fabricado con ZCPT fue medido a una frecuencia dada, en este caso a 90 kHz para constatar su correspondencia. La figura 4.8 muestra el patrón de emisión horizontal, en campo lejano y a 90 kHz, del prototipo fabricado con cinta ZCPT. El ajuste con el patrón teórico es bastante bueno, lo que indica que la ZCPT no afecta significativamente la respuesta acústica de la película Emfit, por lo menos hasta los 140 kHz aproximadamente (este es límite del micrófono calibrado utilizado). De lo anterior se concluye que a pesar del hecho de que las partículas metálicas embebidas en la ZCPT no están distribuidas de manera uniforme, la densidad de partículas parece ser suficientemente alta como para garantizar una respuesta homogénea tipo pistón y sin decremento de la sensibilidad.

Hasta este punto, se puede concluir que la película Emfit posee una respuesta vibratoria en modo espesor suficientemente homogénea hasta los 140 kHz. Se espera que las variaciones probables del campo acústico a frecuencias más altas sean suavizadas por el efecto integrador de la conformación del campo. Desafortunadamente, este efecto no puede ser medido precisamente ya que no existe un micrófono calibrado disponible comercialmente para frecuencias mayores a 140 kHz en aire. Teniendo en cuenta lo anterior, las imágenes acústicas que se presentan más adelante se obtuvie-

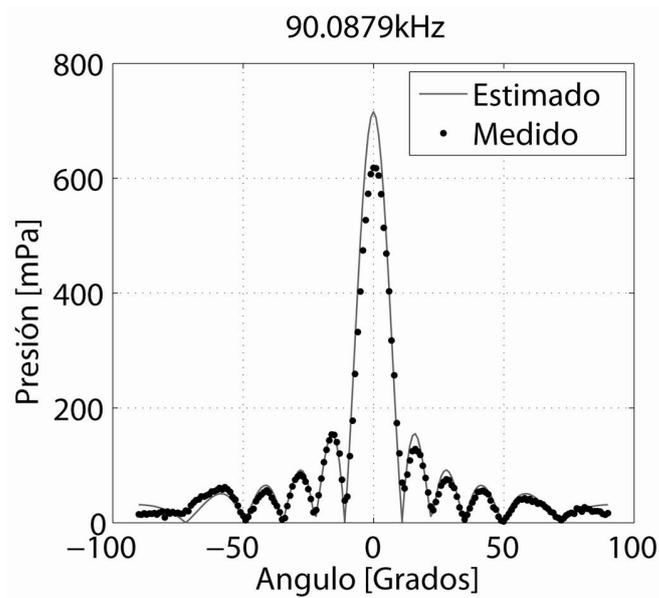


Figura 4.8: Patrón de emisión horizontal, en campo lejano y a 90 kHz, de un emisor plano (10 mm x 20 mm) fabricado con ZCPT.

ron utilizando señales de banda ancha centradas a frecuencias más allá de este límite, es decir, a 150 kHz, 300 kHz y 330 kHz, utilizando el propio material Emfit como receptor.

4.5.2. Distribución de Sensibilidad de los Elementos

La figura 4.9 muestra la desviación de la amplitud acústica obtenida con cada uno de los elementos de los dos prototipos de array fabricados. Para ello, un único pulso de banda ancha fue aplicado individualmente sobre cada elemento y las respectivas respuestas acústicas fueron medidas utilizando un micrófono calibrado. Las diferencias que se observan son atribuidas principalmente a la no homogeneidad en forma, tamaño y cantidad de carga almacenada de las cavidades interiores de la película Emfit, como también a las variaciones en la cinta ZCPT. Sin embargo, la distribución de sensibilidad es bastante uniforme, mostrando una desviación máxima de ± 1.8 dB. Además, ningún elemento de los dos prototipos resultó defectuoso. Esta distribución de sensibilidad fue utilizada en las simulaciones para predecir el haz focalizado de los prototipos.

Es de esperarse que utilizar elementos de espesor cada vez menor incremente la posibilidad de obtener uno o varios de ellos defectuosos. Por tanto, investigación adicional debe ser realizada para determinar el ancho mínimo de los elementos; así como el menor tamaño posible de espacio entre éstos, así como la dependencia entre la respuesta del array y el tamaño de las cavidades interiores de la película Emfit.

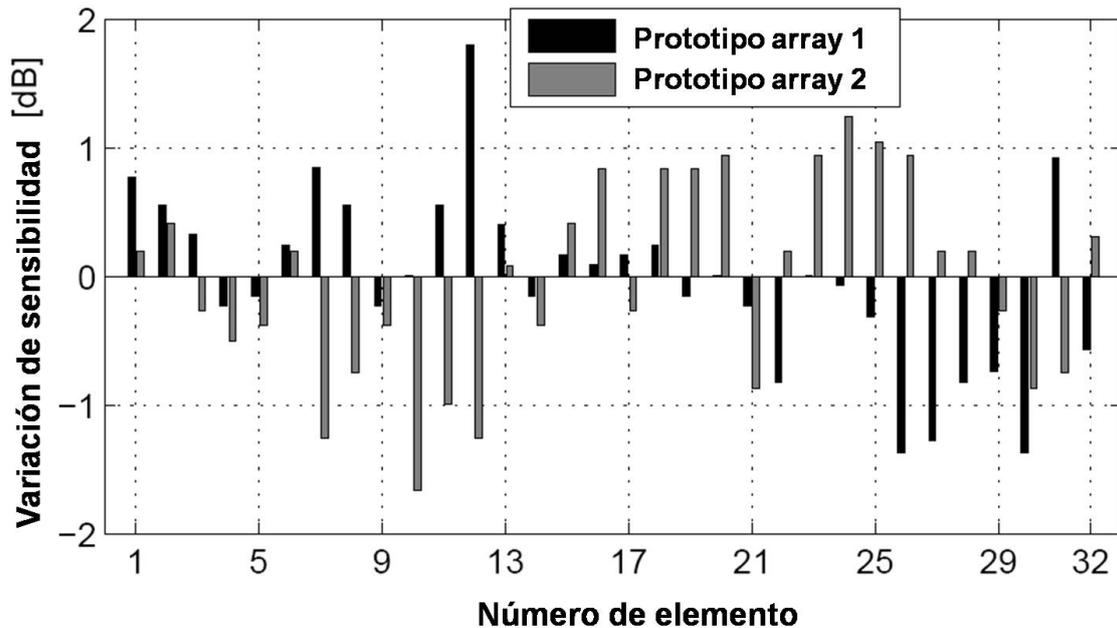


Figura 4.9: Desviación de la sensibilidad acústica de los elementos, medida en los 2 prototipos de array y calculada en decibelios relativos a sus respectivas respuestas promedio.

4.5.3. Medición del Nivel de Acople Electromecánico (cross-talk) entre Elementos

En general, la naturaleza del acople puede ser ya sea eléctrica o mecánica, dependiendo del mecanismo que lo genere. En el primer caso, la señal eléctrica aplicada a un elemento produce una señal en los elementos adyacentes. Para minimizarlo, los circuitos de emisión y recepción deben ser cuidadosamente aislados del ruido. En el segundo, el acople resulta de la propagación de una onda mecánica entre los elementos del array y su efecto no es instantáneo, pues depende de la velocidad a la cual se

propaguen las ondas [145].

Con el fin de cuantificar el nivel de acople interelemento, dos experimentos fueron realizados utilizando interferometría. En el primero, señales de 20 pulsos sinusoidales a frecuencias entre 30 kHz y 50 kHz fueron aplicadas exclusivamente al elemento número 16 del array. Posteriormente, la velocidad de éste y la del elemento inactivo adyacente (17) fueron obtenidas, con los terminales de éste último en cortocircuito. El experimento fue realizado a incrementos de frecuencia de 10 kHz y las respectivas velocidades fueron tomadas en 10 puntos diferentes a lo largo de la longitud completa de cada elemento. La amplitud de la excitación fue de 400 Vpp, aplicado utilizando un generador de señal seguido del amplificador de potencia descrito en la sección 4.2.1. De esta manera se eliminó cualquier influencia del sistema SITAU sobre la respuesta de los elementos. Considerando que la respuesta en frecuencia de dos puntos distintos sobre la superficie de un elemento dado no son exactamente iguales, el nivel de acoplamiento fue estimado a cada frecuencia de excitación ω_e usando la ecuación (4.6), donde F_m^I y F_n^A son las magnitudes de la transformada de Fourier de las respuestas medidas sobre el elemento inactivo (I) y el activo (A) respectivamente. Los subíndices m y n indican los puntos de medida sobre cada uno de los elementos. Por tanto, el acoplamiento promedio y su desviación estándar son obtenidos de un conjunto resultante de $m \times n$ valores a cada frecuencia de excitación.

$$\text{CRSS}(\omega_e) = \left| \frac{F_m^I(\omega_e)}{F_n^A(\omega_e)} \right| \quad (4.6)$$

En el segundo experimento, la amplitud de la velocidad sobre el espacio entre elementos fue medido. Los elementos 15 y 16 fueron simultáneamente excitados con un único pulso cuadrado de banda ancha, aplicado utilizando el sistema SITAU.

La figura 4.10 muestra los resultados obtenidos del primer experimento. El acoplamiento medido resultó menor de -40 dB para frecuencias por debajo de 250 kHz, lo cual es comparable al nivel reportado para otras tecnologías, tales como los piezocompuestos [101]. Por encima de esta frecuencia, el nivel de acople crece hasta -20 dB en ambos prototipos. También, la desviación estándar se incrementa con la frecuencia, lo cual está directamente relacionado con la inhomogeneidad del perfil de velocidad a frecuencias cercanas a la resonancia (ver figura 4.7).

La dependencia observada entre el acoplamiento y la frecuencia corresponde con

un efecto de tipo capacitivo, el cual puede ser atribuido a capacitancias parásitas originadas por la proximidad entre las pistas del PCB y los electrodos inferiores. En principio, el acoplamiento no tiene origen mecánico, ya que de otra forma, se habría observado un desfase temporal apreciable entre las respuestas de los dos elementos debido a la baja velocidad de propagación del sonido en el polipropileno, material base de la película Emfit [101]. No obstante, investigación adicional se sugiere para medir y modelar la propagación de ondas en polímeros celulares cargados eléctricamente, tal como el utilizado en este trabajo.

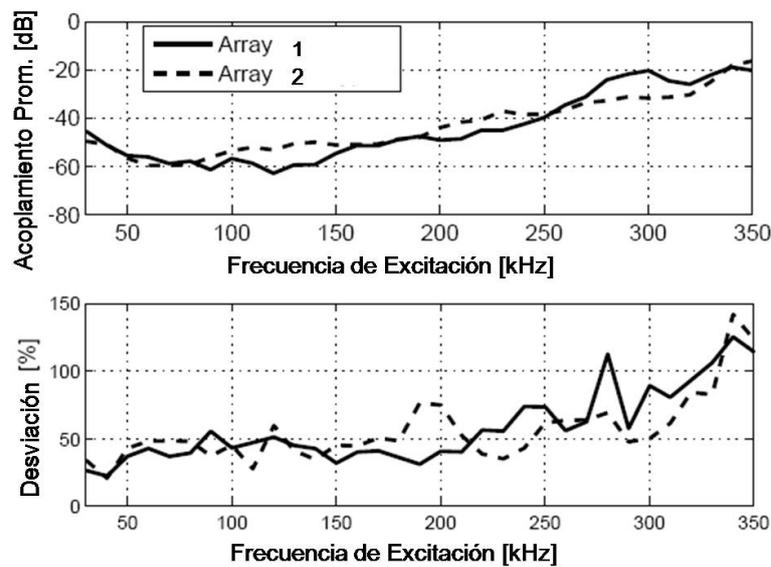


Figura 4.10: Arriba: Nivel de acoplamiento promedio medido entre los elementos 16 y 17. Abajo: Desviación estándar como porcentaje respecto al promedio.

El segundo experimento fue realizado para cuantificar la amplitud de la velocidad en el espacio interelemento. Usando el segundo array puesto que posee una separación ligeramente mayor que el ancho del spot del vibrómetro láser, se tomaron medidas a incrementos de 0.1 mm a lo largo de una línea horizontal desde el elemento 15 hasta el 16. En la figura 4.11 se muestra la amplitud pico a pico de la velocidad de los puntos medidos. Los puntos cercanos al centro del espacio interelemento presentan una amplitud de aproximadamente 16 veces (24 dB) menos que el valor máximo observado en cualquiera de los elementos adyacentes. Este resultado corrobora el bajo nivel de acoplamiento medido en el experimento inicial. La transición suave que

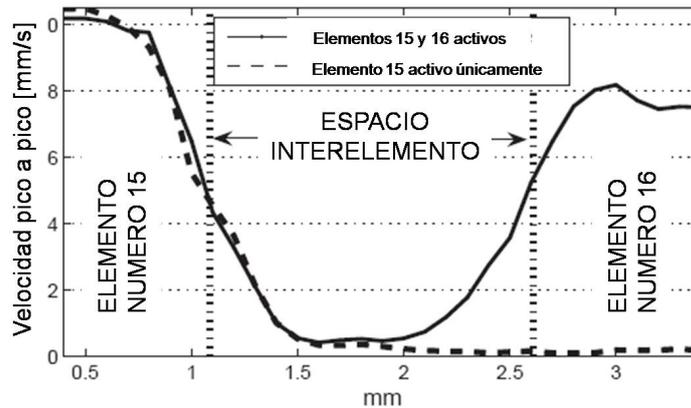


Figura 4.11: Amplitud de la velocidad superficial en puntos diferentes entre los elementos 15 y 16; ambos activados con un único pulso de banda ancha utilizando el sistema SITAU

se aprecia en la caída de la amplitud de la velocidad es debida a la resolución lateral del vibrómetro láser, cuyo diámetro real de spot es de aproximadamente 1 mm.

4.5.4. Conformación del Haz Ultrasónico (“Beamforming”).

A continuación, se evalúa la capacidad de los arrays fabricados con FCel para conformar un haz ultrasónico. Para ello, el campo conformado se compara con los resultados teóricos obtenidos por simulación con el Método de las Fuentes Puntuales. Cada elemento fue excitado con un señal cuadrada de 3 pulsos, centrada en 100 kHz. Los instantes de emisión de cada elemento se calcularon para enfocar el haz a 200 mm de profundidad y a dos ángulos diferentes, a saber, 0° y 30° .

La señal acústica generada por un elemento individual fue adquirida para ajustar los parámetros del modelo de simulación. Ver figura 4.12. Minimizando la raíz cuadrada del error cuadrático entre la señal real y la estimada, descrita por el modelo de la ecuación (4.4), se obtuvo un valor para B de $650 \mu s^2$ y para m de 2.4.

El patrón del haz fue obtenido a partir de la máxima presión acústica pico a pico en cada punto de observación y los datos fueron normalizados con respecto al valor más alto del conjunto de valores. Los resultados se muestran en las figuras 4.13 y 4.14. Los datos experimentales se ajustan de manera excelente con las simulaciones

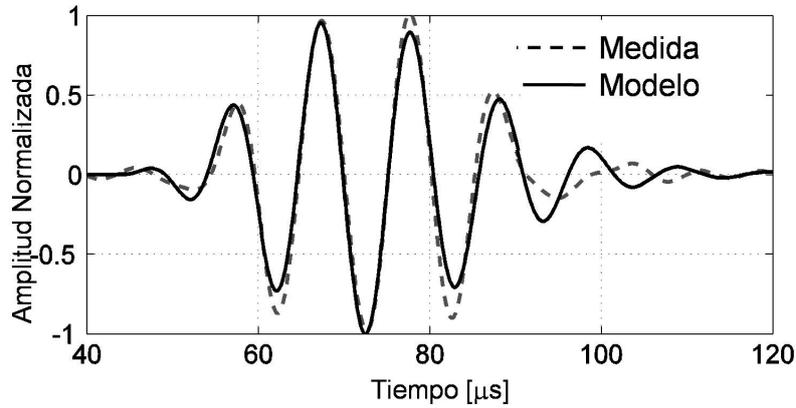


Figura 4.12: Comparación entre la señal real (punteada) y la sintética (continua), correspondientes a un elemento del array excitado con 3 pulsos cuadrados a 100 kHz.

a todas las profundidades y ángulos. El ancho del lóbulo principal, el nivel de los lóbulos laterales y la profundidad del foco están en concordancia con los cálculos teóricos. El nivel de presión sonora en el foco aproximadamente 109 dB.

La posición angular y amplitud de los lóbulos de rejilla también coinciden con la predicción teórica, sin embargo se aprecia una ligera diferencia en la forma de éstos. Esto podría ser explicado teniendo en cuenta que el ajuste entre la forma de onda real y la del modelo no es suficientemente bueno al final de los tres pulsos. En la figura 4.12 se aprecia que el modelo no sigue el comportamiento de baja frecuencia que aparece a partir de los 90 μ s.

4.5.5. Imagen Acústica en pulso-eco

Hasta este punto, los resultados experimentales mostrados indican que la respuesta acústica de los prototipos se aproxima a la de un array ideal constituido por elementos rectangulares vibrando en modo espesor, por lo menos hasta los 140 kHz. Si la frecuencia de operación excede este límite, se espera que el perfil de velocidad de los elementos se deteriore, afectando consecuentemente el campo acústico emitido. Sin embargo, hasta ahora las consecuencias de esto no han sido cuantificadas.

En vista de lo anterior, los propósitos principales de los experimentos de esta sección fueron investigar la factibilidad de usar los arrays basados en FCell en modo pulso-eco y evaluar el comportamiento de los mismos a frecuencias más altas, es-

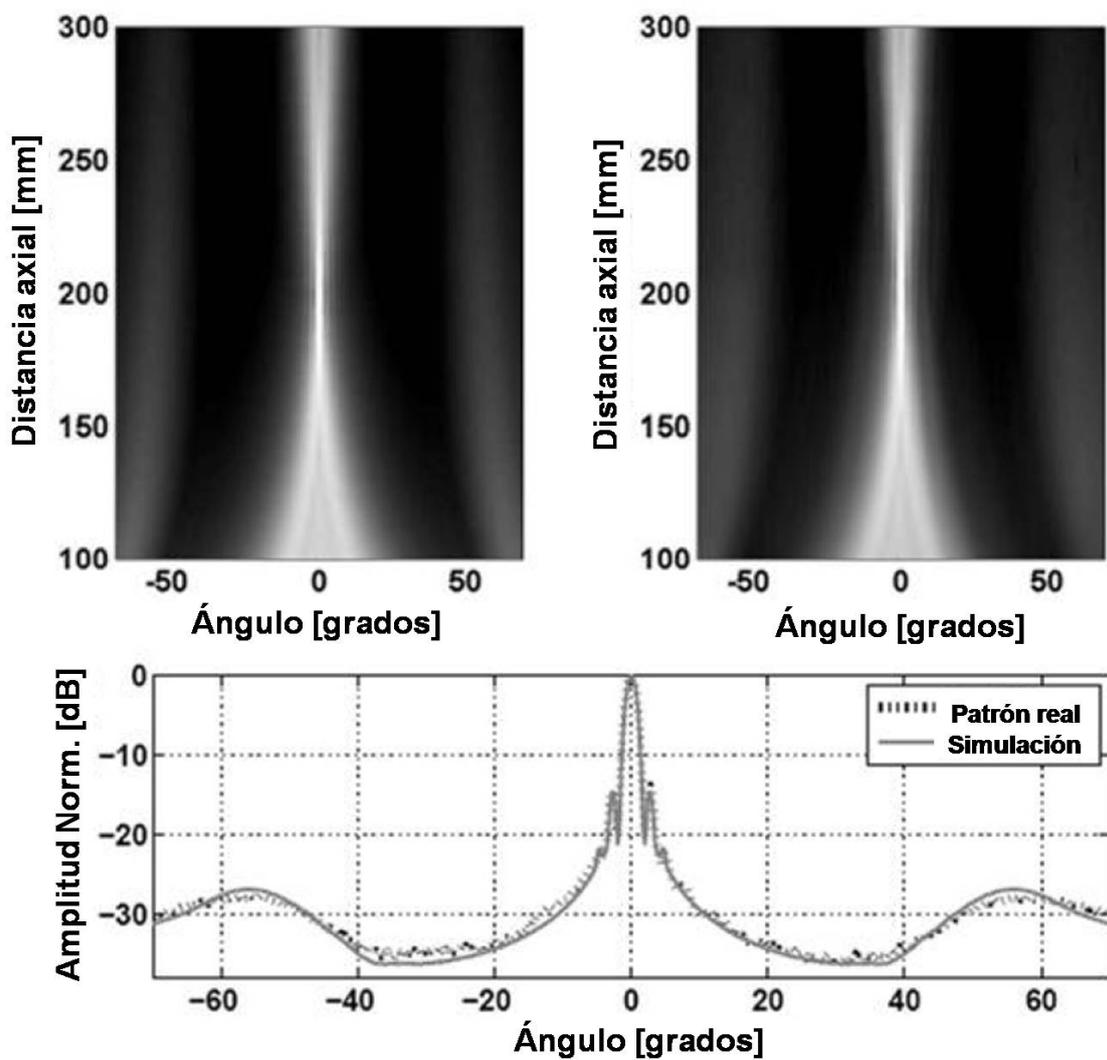


Figura 4.13: Haz ultrasónico enfocando a 200 mm y sin deflexión. Arriba-Izquierda: Resultados de Simulación. Arriba-Derecha: Resultados experimentales. Rango dinámico de la imagen 35 dB. Abajo: Patrón lateral de haz en el foco. Frecuencia 100 kHz.

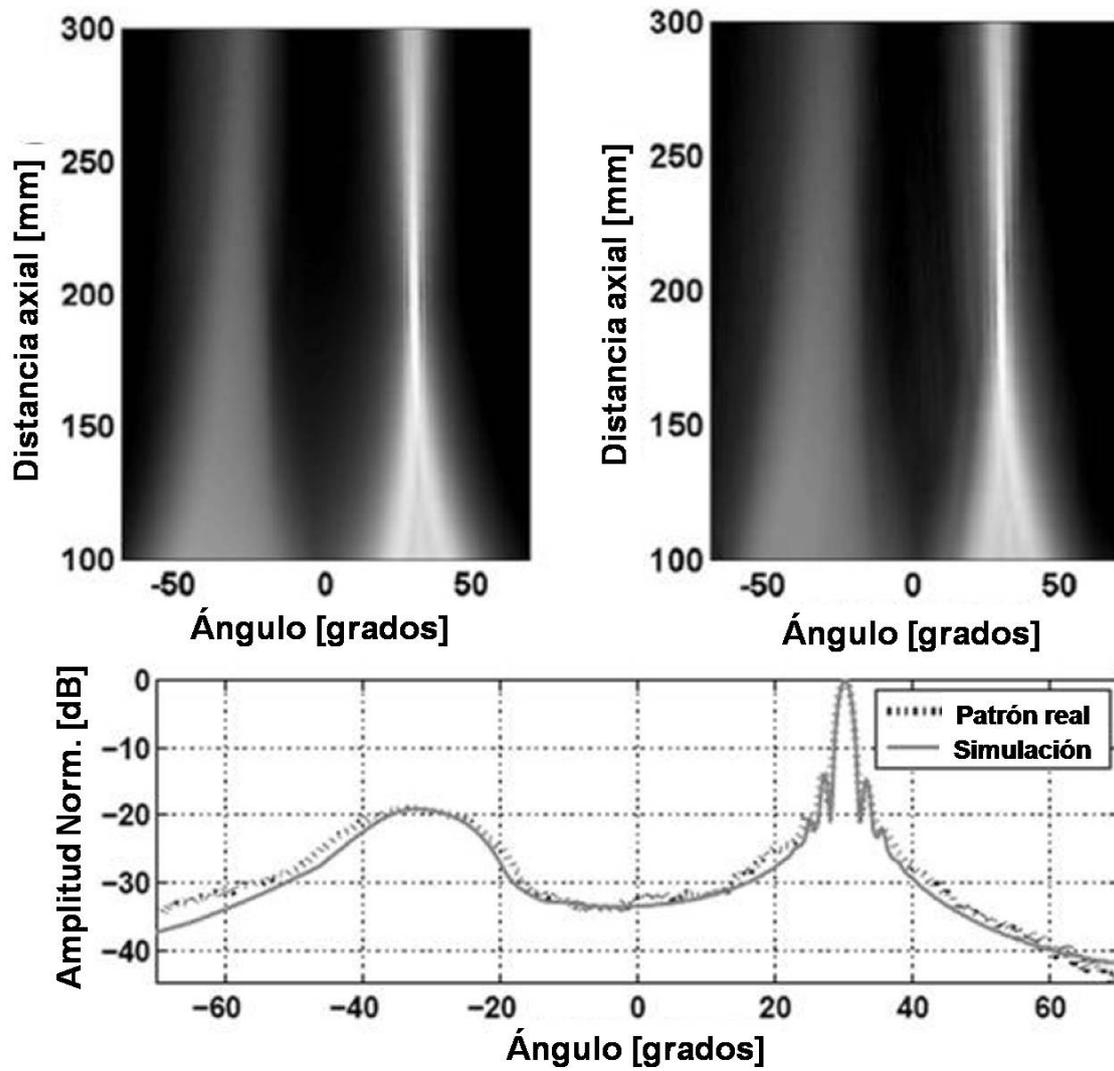


Figura 4.14: Haz ultrasónico enfocando a 200 mm y deflectado 30 grados. Arriba-Izquierda: Resultados de Simulación. Arriba-Derecha: Resultados experimentales. Rango dinámico de la imagen 35 dB. Abajo: Patrón lateral de haz en el foco. Frecuencia 100 kHz.

pecíficamente a 150 kHz y 300 kHz. Como un primer paso hacia la implementación de una apertura completa en recepción, solo un elemento del array fue utilizado para capturar los ecos generados por un reflector simple ubicado en frente del array.

Utilizar la película Emfit para recibir señales ultrasónicas posee dos importantes desventajas con respecto a otras tecnologías de transductores: una sensibilidad entre moderada y baja y una alta impedancia eléctrica. La combinación de estos dos efectos complica la obtención de una buena relación señal-ruido (SNR), siendo necesario utilizar un circuito de pre-amplificación con bajo ruido y alta impedancia de entrada, conectado tan cerca como sea posible de los elementos. Afortunadamente, el método de fabricación propuesto permite ubicar fácilmente la electrónica del pre-amplificador en la misma PCB que contiene los electrodos inferiores, minimizando la longitud de las pistas y por ende las capacitancias parásitas y el ruido.

El circuito del pre-amplificador diseñado se muestra en la figura 4.15 y está basado en un amplificador operacional OPA357 (Texas Instruments, Dallas, TX). Posee un ruido de entrada de $6.5 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ y una capacitancia de entrada de 2 pF. Una configuración con retroalimentación no invertida fue escogida y los componentes fueron seleccionados para obtener un ancho de banda, a -3 dB, entre 35 kHz y 320 kHz. Un circuito de protección activa [23] fue utilizado para evitar que los pulsos de alto voltaje puedan llegar a dañar el pre-amplificador. La ganancia medida fue de aproximadamente 30 dB, la cual llega a ser de 90 dB al conectarse a la entrada del sistema SITAU.

Un B-Scan fue obtenido emitiendo con apertura completa (enfocando y deflexionando el haz) y la recepción se realizó con el elemento 16, al cual fue conectado el pre-amplificador. El foco de emisión fue ubicado a 150 mm y el ángulo de deflexión se varió entre -45 y 45 grados, a incrementos de 0.5 grados. Un reflector cilíndrico fue ubicado a 150 mm del array.

La señal acústica generada por un único elemento fue adquirida previamente para ajustar los parámetros m y B del modelo de simulación de la señal (Ecuación (4.4)). Los valores obtenidos para las frecuencias de 150 kHz y 300 kHz fueron, respectivamente, $[B=261 \mu\text{s}^2, m=1.3]$ y $[B=289 \mu\text{s}^2, m=2.4]$.

Aunque la señal de excitación estuvo formada por tres pulsos en ambos casos, a 300 kHz el eco recibido posee más ciclos que a 150 kHz debido a la mayor cercanía a la frecuencia de resonancia (Ver figura 4.7(a)). Sin embargo, la resolución axial en

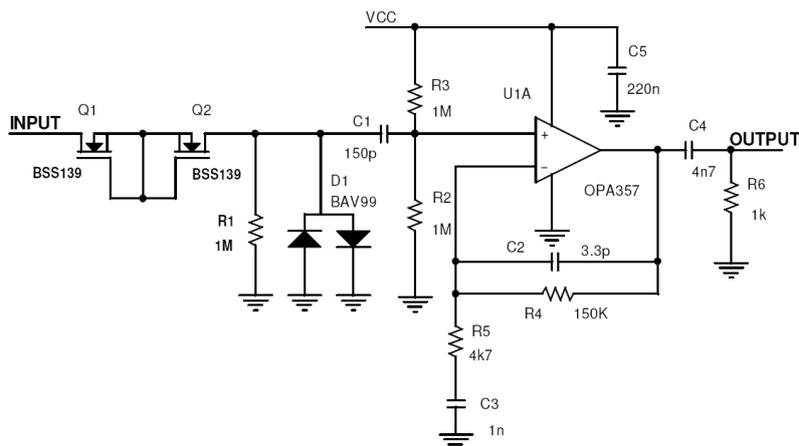


Figura 4.15: Circuito del pre-amplificador de alta impedancia de entrada para transductores basados en FCell.

ambos casos es similar debido a la diferencia en las respectivas longitudes de onda, aunque la sensibilidad es cerca de 20 dB más alta a 300 kHz.

Nuevamente, una muy buena correspondencia entre las respuestas real y simulada fue obtenida para ambas frecuencias de excitación (Ver figuras 4.16 y 4.17). Este resultado parece indicar que a frecuencias mayores a 140 kHz, el impacto de la irregularidad del perfil de velocidad sobre el campo acústico no es significativo. Las diferencias entre los valores medidos y los simulados son mayores a 300 kHz y pueden ser atribuidos a posibles errores de simulación, ya que el eco recibido en cada elemento del array es calculado suponiendo que la superficie reflectora es una fuente puntual ubicada en la superficie del cilindro; a la mínima distancia entre éste y el centroide del elemento. Por tanto, a menor longitud de onda, menor es la exactitud de la estimación. También, el acoplamiento entre elementos observado a altas frecuencias puede contribuir a degradar el patrón lateral del haz. Los lóbulos de rejilla aparecen tanto a 150 kHz como a 300 kHz ya que el paso del array es mayor a $\lambda/2$ y sus amplitudes y posiciones en la imagen concuerdan con los resultados simulados. En las imágenes se alcanza a notar también un ligero desalineamiento entre la posición lateral del reflector y el centro del array.

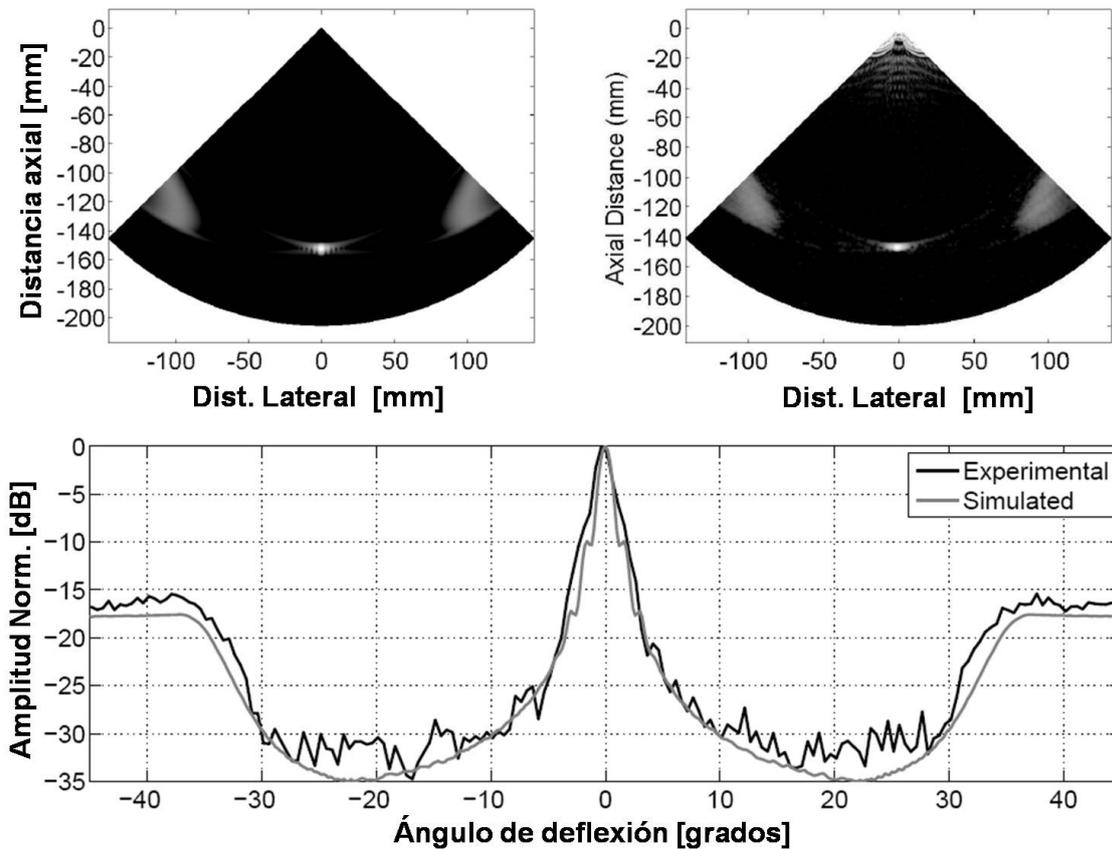


Figura 4.16: Imagen en pulso eco de un reflector ubicado a 150 mm del array. Frecuencia de excitación de 150 kHz. Arriba-izq.: Imagen simulada. Arriba-Der.: Imagen obtenida de los datos reales. Rango dinámico de las imágenes 35 dB. Abajo: Comparación entre los valores de la imagen real y simulada, a radio constante, pasando por la ubicación del reflector (“Point Spread Function”)

4.6. Evaluación sin Contacto de Textiles con Ferroelectretos

Los ultrasonidos han sido ampliamente utilizados en la detección de defectos en diversidad de procesos de manufactura. Debido a la gran diferencia entre las impedancias del aire, del material del transductor y del propio de la muestra, la gran mayoría de aplicaciones utilizan agua o gel como acoplantes, en lugar de aire. Sin embargo, algunos procesos no permiten el contacto del acoplante con la muestra, dando lugar

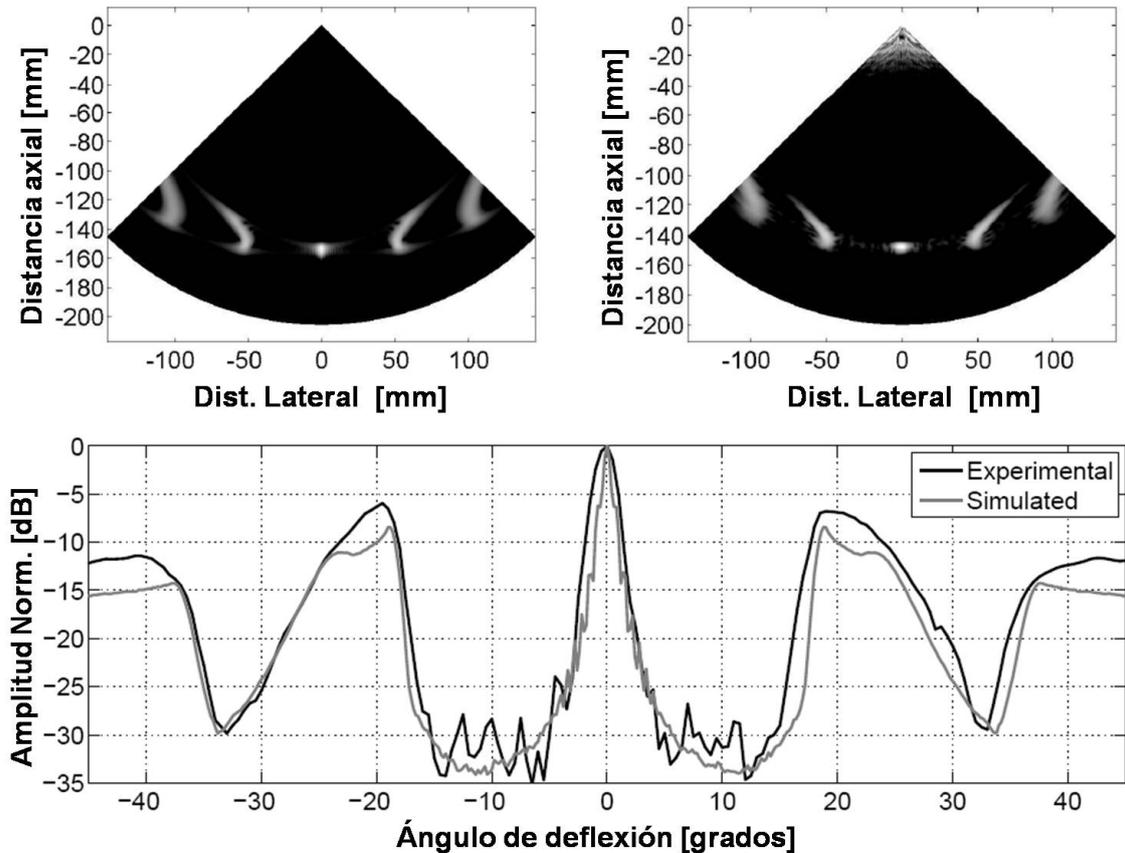


Figura 4.17: Imagen en pulso eco de un reflector ubicado a 150 mm del array. Frecuencia de excitación de 300 kHz. Arriba-izq.: Imagen simulada. Arriba-Der.: Imagen obtenida de los datos reales. Rango dinámico de las imágenes 35 dB. Abajo: Comparación entre los valores de la imagen real y simulada, a radio constante, pasando por la ubicación del reflector (“Point Spread Function”)

a una categoría particular de aplicaciones, usualmente denominada: ultrasonidos sin contacto o acoplados en aire. La inspección de textiles cae dentro de ésta categoría, ya que un acoplamiento líquido o viscoso podría degradar el tejido y/o hacer inviable el proceso de manufactura.

Blomme *et al.* [17] [15] [16] demostró la viabilidad de utilizar ultrasonidos en aire para detectar defectos en materiales textiles usando transductores focalizados fabricados con PZT y disponibles comercialmente. Mediciones de gran resolución espacial son logradas a frecuencias de hasta 2 MHz, inspeccionando en modo transmisión: el transductor emisor genera un haz ultrasónico que atraviesa la muestra de textil,

ubicada a la distancia focal, mientras que un segundo transductor enfrentado con la muestra recibe la señal acústica. Debido a que la atenuación de la onda ultrasónica depende de las propiedades del material, este tipo de inspección permite detectar zonas con posibles defectos. No obstante, al utilizar un único par de transductores, resulta indispensable el movimiento mecánico de la muestra en las dos direcciones de inspección.

Chien *etal.* [27] presenta el desarrollo de un sistema de inspección de textiles en tiempo real, montado sobre el propio telar. Para ello, utiliza dos arrays de cuatro transductores cada uno, también en modo transmisión. Usando una tasa de repetición de pulsos de 2 kHz, los emisores son simultáneamente excitados y 4 valores de atenuación son obtenidos utilizando el array de receptores en cada posición. Dado que la longitud del array no cubre el ancho total de la tela inspeccionada, el movimiento mecánico de los transductores es necesario tanto en la dirección de la trama como de la urdimbre.

El principal inconveniente de los ultrasonidos sin contacto de textiles es la desadaptación de impedancias entre el material del transductor (PZTs, PVDF, etc) y el aire. En los últimos años, importantes avances han sido logrados para lograr una mejor adaptación con el aire, utilizando capas de adaptación de un cuarto de longitud de onda. También, la aparición de nuevos polímeros piezoeléctricos ha dado paso a nuevas posibilidades en el desarrollo de transductores y aplicaciones. Este es el caso de los nuevos materiales ferroelectreto, los cuales constituyen una alternativa ante la actual demanda de transductores que con una buena relación de compromiso entre directividad, ancho de banda, sensibilidad y costo.

Hasta donde nos consta, el uso de phased arrays basados en ferroelectretos no ha sido propuesto anteriormente para la inspección de materiales textiles. Entre las ventajas más importantes de este enfoque están que la resolución lateral puede ser incrementada en gran medida focalizando electrónicamente el haz tanto en emisión como en recepción. También, la distancia focal puede ser cambiada electrónicamente dependiendo de la distancia entre los transductores y la muestra. Además, si la apertura del array es suficientemente grande, lo cual es fácil de lograr y barato con ferroelectretos, el movimiento mecánico a lo largo de la trama puede ser substituido por el escaneo electrónico utilizando sub-aperturas activas, lo cual puede ser realizado a gran velocidad y con buena resolución espacial.

En este apartado se demuestra la factibilidad de utilizar transductores basados en FCell, fabricados en el nuevo método propuesto en este capítulo, para la inspección de tejidos en modo transmisión. Para ello, el aparato experimental antes descrito fue ligeramente modificado, de manera que el tejido a inspeccionar se ubica entre un array emisor de los descritos anteriormente y un monoelemento cuadrado de 20 mm de lado fabricado con FCell. Ver figura 4.18. La muestra utilizada en la experimentación es un tejido plano de densidad 175 g/m^2 , en el que las fibras verticales se entrelazan unas con otras. Entre los defectos más comunes en la manufactura de textiles se encuentran los errores de tejido (fibras faltantes), manchas de aceite y/o grasa, así como variaciones en la homogeneidad de las propiedades de los materiales. La figura 4.19 muestra los diferentes tipos de defectos que se incluyeron en la muestra de textil.

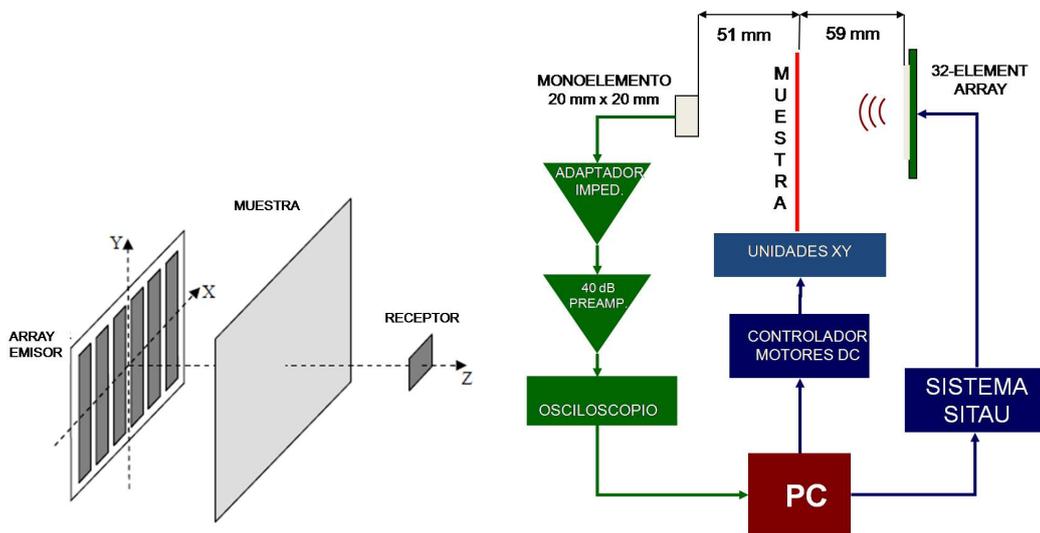


Figura 4.18: Aparato experimental utilizado para inspeccionar textil en modo transmisión.

Para realizar la inspección, se emplearon señales de excitación de 6 pulsos a 300 kHz, es decir, a la frecuencia de resonancia de la película Emfit. La señal de sincronía del SITAUI fue conectada a la entrada de disparo del osciloscopio. En cada punto inspeccionado, 4 señales fueron adquiridas y promediadas, utilizando una frecuencia de muestreo de 2.5 MS/s. Considerando el amplio rango de frecuencia de operación de la película Emfit, se implementó un filtro pasa-banda alrededor de la frecuencia de operación para incrementar la relación señal-ruido. A su vez, las unidades de

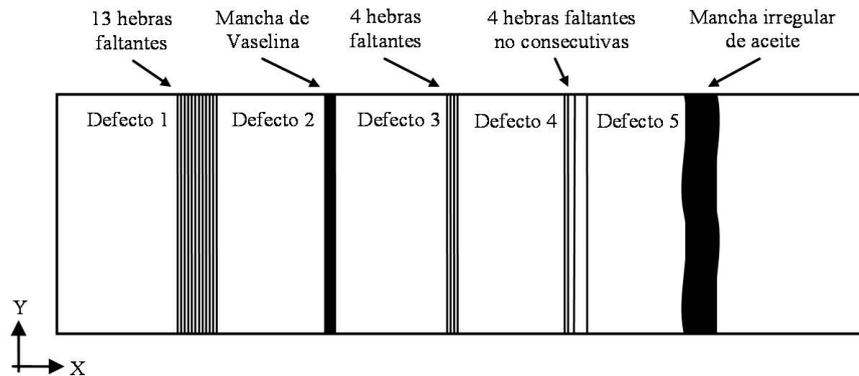


Figura 4.19: Esquema con los diferentes defectos incluidos en la muestra de textil.

desplazamiento mueven la muestra controladamente, a incrementos de 0.25 mm, en el plano XY a 59 mm del emisor. Finalmente, los valores pico a pico de las señales almacenadas son utilizadas para obtener un C-Scan del área examinada.

4.6.1. Simulación del Haz Ultrasónico

Para obtener la mejor resolución lateral posible, el foco en emisión se ubicó en la posición de la muestra sobre el eje Z. Las simulaciones del campo acústico nos permitieron determinar las características del haz y así cuantificar la resolución lateral disponible con el array de ferroelectreto utilizado.

La figura 4.20 muestra la estimación del campo emitido por el array en el plano que contiene la muestra a inspeccionar. Se observa un haz de foco alargado de aproximadamente 32 mm de altura debido a la dimensión vertical del array, pero que a su vez es bastante estrecho, con un ancho, a -6 dB, de aproximadamente 1 mm, permitiendo una resolución horizontal de tamaño similar. Dado que la resolución vertical es mucho menor que la horizontal, se crearon defectos verticales que pudieran ser evaluados con el sistema de inspección. No obstante, esta limitación puede ser suprimida utilizando un array cóncavo cuyo foco natural coincida con el logrado electrónicamente con el sistema PA. Como se vio en el capítulo anterior, la flexibilidad de los ferroelectretos permite la fabricación de arrays de transductores sobre cualquier substrato de superficie desarrollable. La profundidad del foco estimada es de apenas unos 4 mm, lo cual es congruente teniendo en cuenta el gran tamaño de la apertura (114 mm) y la escasa

distancia focal (51 mm). Por consiguiente, el posicionamiento de la muestra juega un papel determinante en el proceso de inspección del tejido. Dado que la distancia interelemento (pitch) del prototipo de array utilizado es de 3.56 mm, mayor que la mitad de la longitud de onda a la frecuencia de operación, el haz ultrasónico presenta lóbulos de rejilla, lo cuales se aprecian con claridad en la figura 4.20.

La amplitud de la señal recibida depende de la directividad acústica del receptor. La figura 4.21 muestra el campo acústico combinado (emisión/recepción) en el plano XY que contiene la muestra. Los lóbulos de rejilla son reducidos hasta -25 dB debido a la baja sensibilidad del receptor utilizado en la dirección de éstos. En consecuencia, las resoluciones laterales resultantes son 0.9 mm y 19.4 mm en las direcciones X e Y respectivamente.

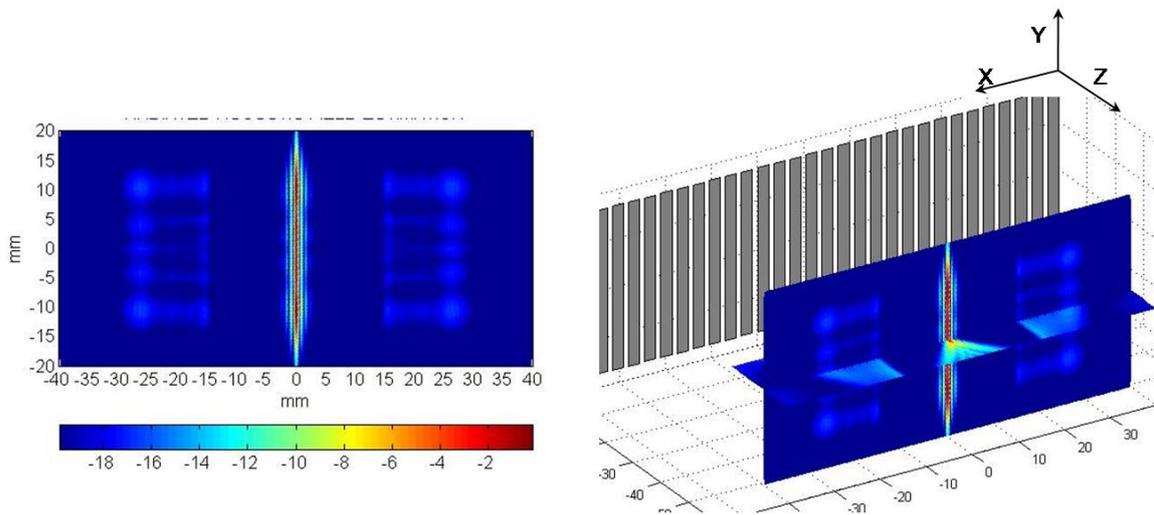


Figura 4.20: Izquierda: Estimación del campo emitido por el array en el plano de muestra, paralelo al array, a una distancia de 51 mm. Frecuencia 300 kHz. Derecha: Representación tridimensional que incluye el array y el campo de la izquierda.

4.6.2. Resultados Experimentales

En las figura 4.22 se observa una fotografía con dos tipos de defectos distintos, a saber, la ausencia de serie de fibras verticales y una mancha vertical de grasa (vaselina) de aproximadamente 1.5 mm de espesor. Se observa cómo el primer defecto origina un incremento, como era de esperarse, en el nivel de la señal recibida de

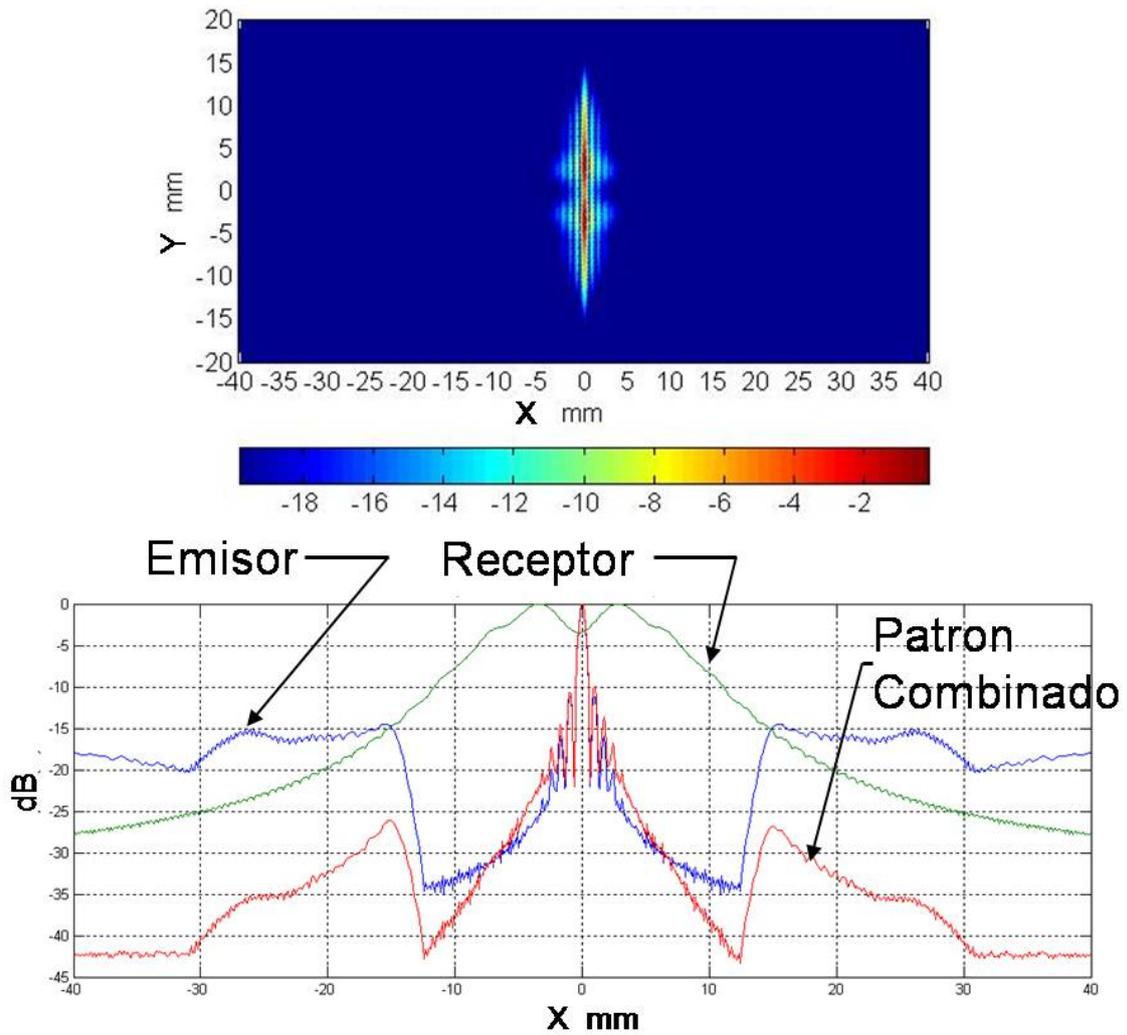


Figura 4.21: Estimación del campo acústico resultante de la combinación de los patrones del emisor y del receptor en el plano de la muestra (arriba) y sobre la línea de inspección ($X, Y=0, Z=51\text{mm}$).

aproximadamente 6 dB mientras que la vaselina atenúa la señal en aproximadamente la misma proporción. La figura 4.23 muestra también dos defectos adicionales de ausencia de fibras. A pesar de tener un ancho de foco de aproximadamente 2 mm, resultó viable la inspección de defectos de hasta 1 mm (Ver figura 4.23-derecha), correspondiente a una única fibra vertical ausente. Sin embargo, se aprecia también el efecto de una baja resolución lateral, ya que no resulta posible la identificación clara de dos defectos suficientemente cercanos uno del otro.

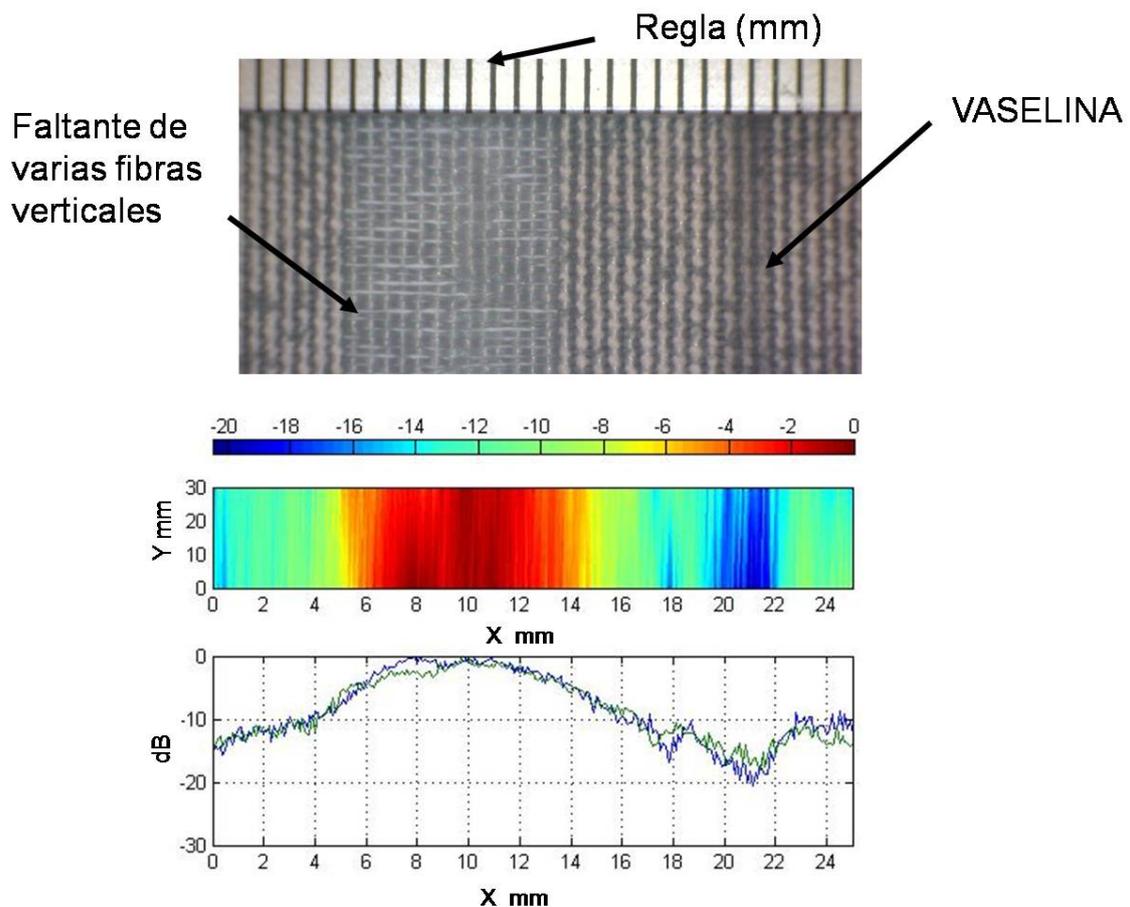


Figura 4.22: Detección de fibras faltantes (Defecto 1) y mancha de vaselina (Defecto 2) utilizando un sistema de inspección ultrasónica basado en transductores FCell. Arriba: Fotografía del defecto. Mitad: Imagen acústica correspondiente (C-Scan). Abajo: Nivel de relación señal ruido obtenido en la zona inspeccionada

Finalmente, la figura 4.24 muestra la imagen acústica correspondiente a la ins-

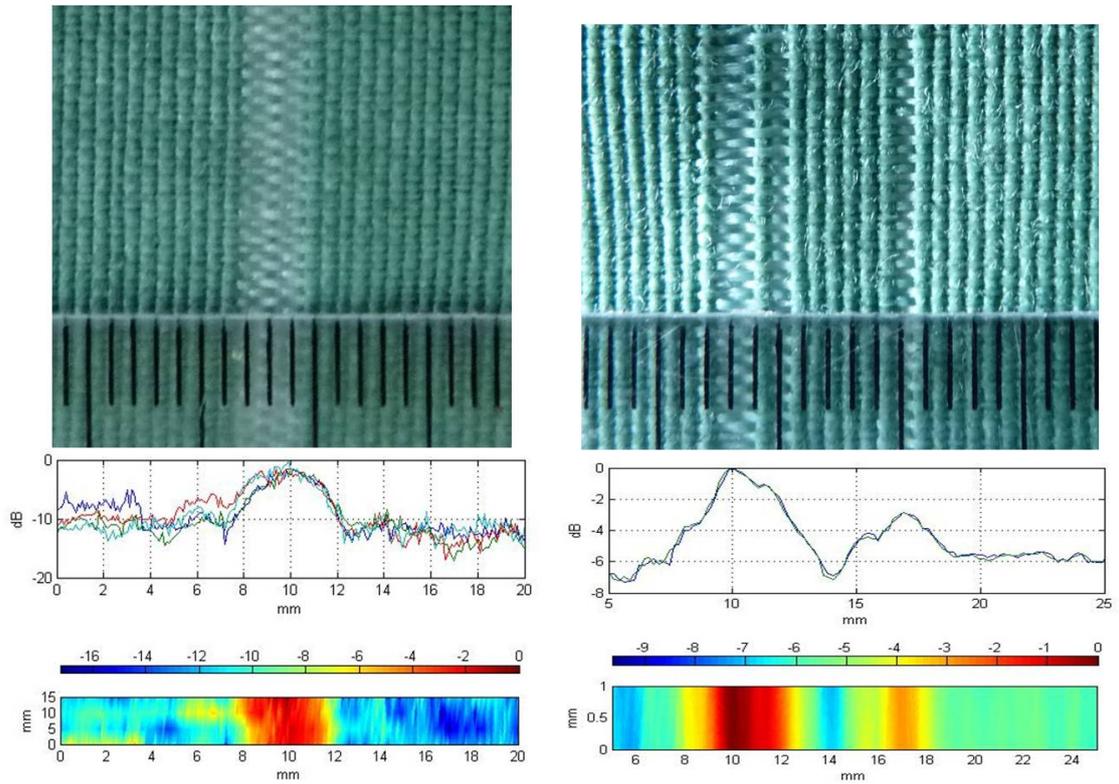


Figura 4.23: Detección ultrasónica de 4 fibras faltantes (Defectos 3 y 4) en un tejido plano. Arriba: fotografía del defecto. Mitad: Nivel de relación señal ruido obtenido en la zona inspeccionada. Abajo: C-Scan.

pección de una mancha de aceite de máquina. Mientras el aceite está fresco, su efecto sobre la señal ultrasónica es atenuador. Sin embargo, éste puede cambiar conforme se va secando y esparciendo por el tejido. En la figura se aprecia que el nivel de señal en la zona con aceite se incrementa, lo cual indica una alteración en las propiedades del tejido. Cabe anotar que el aceite fue dejado reposar sobre la tela durante 24 horas antes de realizar las mediciones. En particular, las manchas de aceite, así como las alteraciones interiores del tejido, no suelen ser fáciles de detectar a simple vista utilizando imágenes de vídeo debido a su bajo contraste (óptico). Posiblemente sea en este tipo de defectos en los que la inspección de textiles por ultrasonidos encuentre su mayor ventaja.

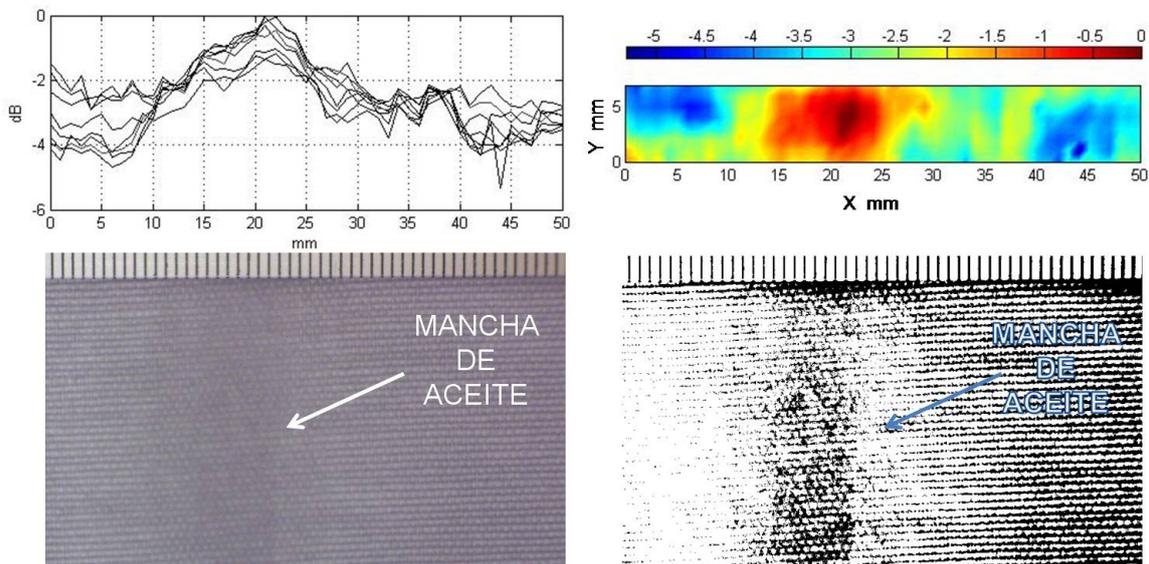


Figura 4.24: Inspección de una mancha de aceite (Defecto 5) con ultrasonidos generados con transductores FCell.

Los resultados cuantitativos obtenidos se resumen en la tabla 4.3. Aunque en el peor de los casos variación en la amplitud de la señal recibida fue de 3 dB, la resolución lateral obtenida parece ser menor que la estimada por simulación. Esto puede ser atribuido a una falta de paralelismo entre la muestra y los transductores, así como entre el defecto y el haz en el foco. También, dado que la inspección es realizada con número F de 0.4, pequeñas desviaciones de la muestra con respecto al foco reducen drásticamente la resolución lateral.

Defecto	Variación de la amplitud
13 hebras faltantes	+10 dB
4 hebras faltantes	+8 dB
2 hebras faltantes	+6 dB
1 hebra faltante	+3 dB
Mancha de vaselina	-8 dB
Mancha de aceite	+3 dB

Tabla 4.3: Variación de la amplitud medida para todos los defectos examinados

En conclusión, los resultados anteriores muestran la viabilidad de la inspección de textiles utilizando la tecnología de los FCell. El aparato experimental descrito combina la facilidad de uso y manipulación de los ferroelectretos con las potencialidades de un sistema phased array. Como resultado, defectos de hasta 1 mm de tamaño han sido detectados sobre una muestra de densidad 175 g/m². Con este mismo equipamiento, hemos podido atravesar tejidos de hasta 400g/m² con suficiente relación señal-ruido. Sin embargo, la posibilidad de inspeccionar diferentes tejidos y materiales de mayor impedancia acústica (papel, películas delgadas, plásticos, etc.) y espesor dependerá de la intensidad de la señal acústica incidente y la calidad del sistema de recepción. En nuestro caso, el margen de mejora vendría dado por aplicar voltajes más altos de hasta 1000 Vpp y utilizar transductores de mayor tamaño y/o geometría especial y que redunden en una solución económicamente viable.

4.7. Trabajo Futuro

4.7.1. Límites dimensionales del método propuesto.

Como se mencionó parcialmente en el apartado de las conclusiones, los límites inferiores en las dimensiones tanto del paso como de la distancia entre elementos no han sido establecidos. En la medida en que éstos se asemejen cada vez más al tamaño lateral nominal de las burbujas (0.1 mm) o superen la distancia mínima permisible entre partículas metálicas de la cinta ZCPT, el comportamiento de los arrays debe empezar a deteriorarse. Sin embargo, las pruebas iniciales con un array de paso 1.2 mm y espacio entre elementos de 0.4 mm muestran que el método de fabricación resulta válido para estas dimensiones del array. La figura 4.25 muestra el patrón

lateral del haz a la distancia focal (78 mm), tanto medido como simulado, de un array de 32 elementos fabricado con el método propuesto, excitado con una señal pulsada de 100 kHz. El ajuste entre teoría y experimentación es realmente bueno, aunque las medidas de acoplamiento inter-elemento no han sido realizadas aún. Por consiguiente, investigación adicional es necesaria para determinar las dimensiones mínimas posibles de un multitransductor fabricado siguiendo la metodología de construcción propuesta. Es importante también tener en cuenta que seguir disminuyendo las dimensiones del array resulta importante siempre que se quiera trabajar a mayores frecuencias y sin lóbulos de rejilla. No obstante, esto redundaría en una relación de compromiso entre el tamaño de apertura, el número de elementos activos y la relación señal-ruido.

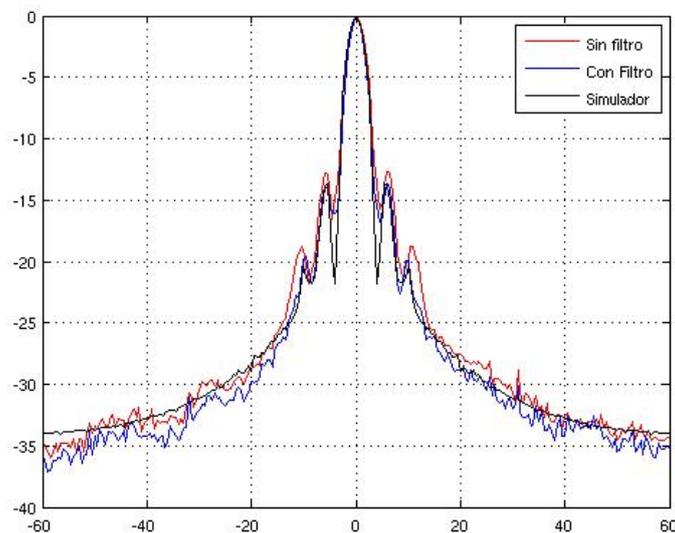


Figura 4.25: Comparación teórico-experimental del patrón lateral emitido por un array de 32 elementos, paso 1.6 mm y distancia inter-elemento de 0.4 mm. Distancia focal 78 mm. Señal de excitación 100 kHz.

4.7.2. Arrays de FCell sobre Superficies Desarrollables

Después de observar el potencial de uso de la tecnología FCell para la inspección de textiles, se estableció la necesidad de lograr inspeccionar materiales de mayor densidad y/o impedancia acústica. A su vez, la sección transversal del foco utilizada en

la fase experimental hizo posible la identificación de defectos verticales únicamente, con los consecuentes problemas de alineación que esto trajo. En vista de lo anterior, se ha concebido un diseño de array sobre una superficie cóncava que nos permitirá enfocar el haz, de manera natural, en la dirección vertical, mientras que en la dirección horizontal se hace lo propio con un sistema phased array. De esta manera será posible contar con un tamaño de foco homogéneo, casi circular.

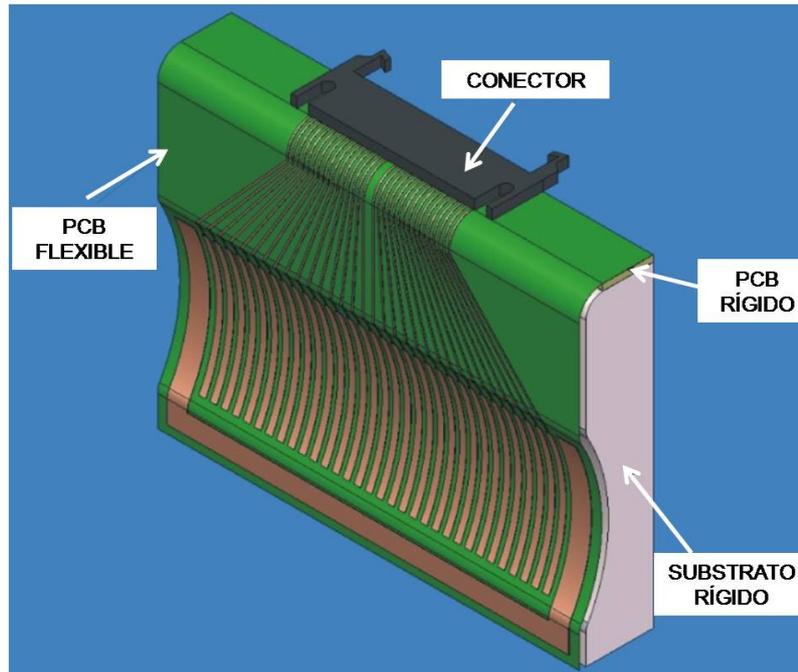


Figura 4.26: Diseño de un array cóncavo sobre PCB flexible.

Para evitar el movimiento mecánico del tejido en la dirección horizontal, se pretende construir el array con una longitud de apertura del ancho de la muestra y un número suficiente de elementos, de manera que, desplazando una subapertura activa de tamaño adecuado, sea posible realizar la inspección.

De otra parte, resulta imperativo realizar un estudio de los problemas que la industria textil requiere resolver y cuáles de ellos podrían ser afrontados utilizando ultrasonidos. También, interesa determinar si la tecnología FCell para generación ultrasonidos en aire puede encontrar aplicación en la inspección de otros materiales, como por ejemplo, papel, plásticos, etc.

Finalmente, por lo que nos consta, la utilización de arrays de FCell en inspecciones

industriales sin contacto no ha sido reportada hasta ahora en la literatura. Así pues, el trabajo descrito en este capítulo puede considerarse pionero en el área. Por tanto, es indispensable continuar trabajando con esta tecnología para determinar su verdadero impacto y lugar en el campo de los US-A.

4.7.3. Validación de arrays no uniformes o dispersos

Es de interés actual el empleo de transductores bidimensionales para realizar inspecciones e imágenes acústicas sin tener que realizar desplazamientos, ya sea de la muestra, o de los transductores utilizados. De igual manera, resulta fundamental, por cuestiones económicas, mantener un número no muy alto de elementos y aún así contar con arrays que permitan realizar imágenes de calidad. Para ello, se está realizando investigación para determinar la manera óptima de distribuir un número de elementos determinado y lograr un haz suficientemente estrecho, con bajos niveles de lóbulos laterales y de rejilla a diferentes profundidades y ángulos [128]. Un ejemplo se muestra en las figuras 4.27 y 4.28, las cuales presentan resultados de simulación del campo emitido por un array de 30 elementos uniformemente distribuidos y otro, del mismo número de elementos, pero con distribución optimizada utilizando algoritmos genéticos. Se observa cómo es posible lograr niveles de lóbulos laterales de casi 10 dB menos de amplitud.

En la actualidad se está trabajando en nuestro Instituto en el desarrollo y caracterización de este prototipo utilizando FCell y el método de fabricación de arrays propuesto en este trabajo. La apertura del dispositivo de 70 mm x 70 mm, la distancia mínima inter-elemento del array optimizado es de 0.4 mm y los elementos son rectangulares de 3 mm de ancho por 5 mm de altura.

Finalmente, cabe resaltar que el hecho de poder fabricar prototipos de arrays de manera ágil y económica, como es el caso al usar los FCell, ofrece la posibilidad de validar los resultados obtenidos con los métodos de optimización de arrays dispersos, lo cual es una dificultad frecuente que afrontan los investigadores en ésta área.

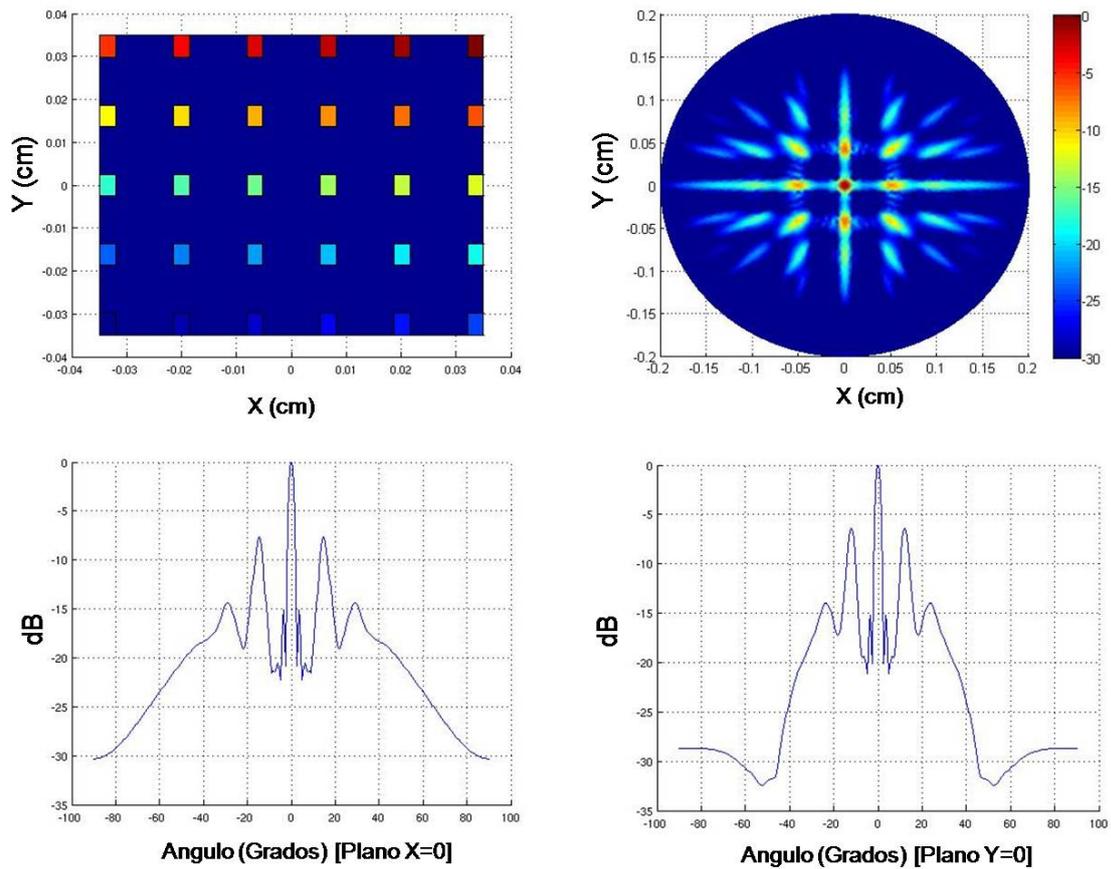


Figura 4.27: Arriba-Izq: Array 2D uniforme de 30 elementos de 3 mm x 5 mm. Arriba-Der.: Campo acústico enfocando a 200 mm, a 100 kHz. Abajo: Patrones laterales sobre los planos $X=0$ e $Y=0$.

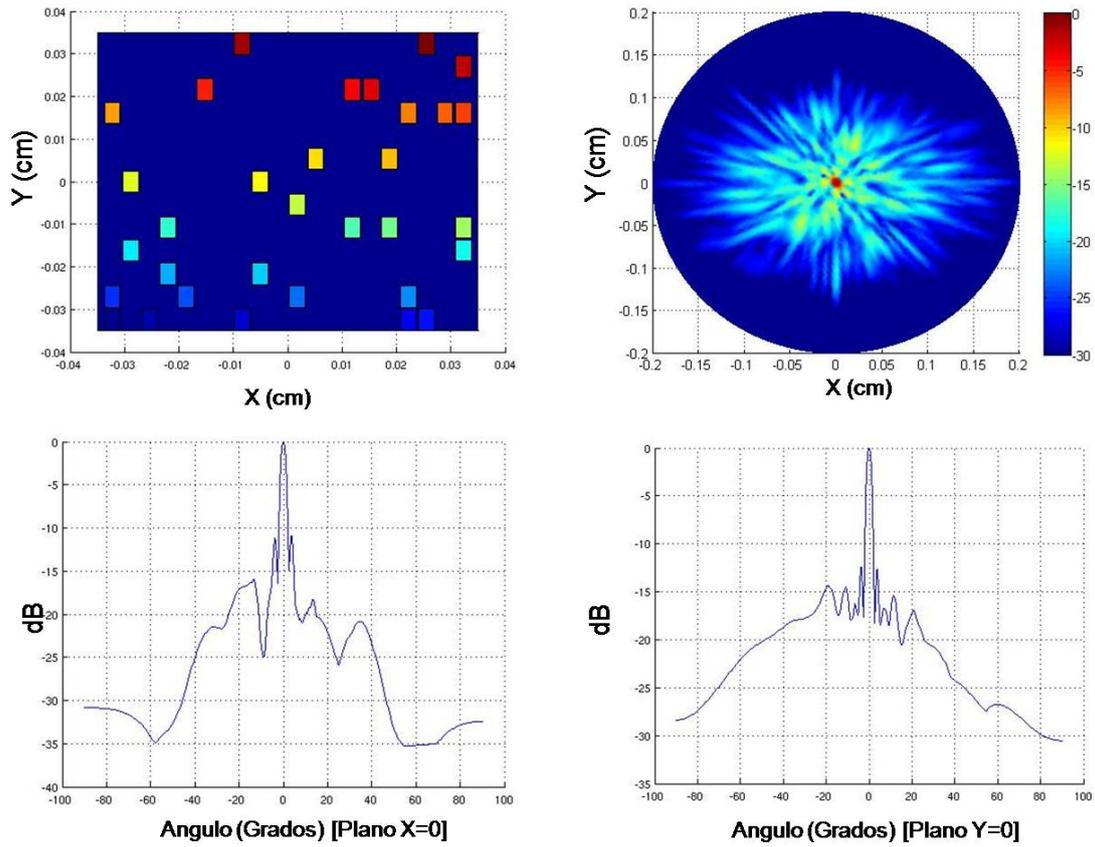


Figura 4.28: Arriba-Izq: Array 2D disperso de 30 elementos de 3 mm x 5 mm. Arriba-Der.: Campo acústico enfocando a 200 mm, a 100 kHz. Abajo: Patrones laterales sobre los planos $X=0$ e $Y=0$.

4.8. Conclusiones

En este capítulo, el potencial del nuevo método de fabricación de arrays ultrasónicos basados en FCell ha sido demostrado. El bajo nivel de acoplamiento entre elementos y la homogeneidad de la distribución de sensibilidad de éstos hizo posible obtener una respuesta acústica muy cercana a la ideal. El tamaño de las cavidades interiores del material, comparado con el espacio inter-elemento, nos permitió también fabricar prototipos con un paso de 3.43 mm, los cuales han mostrado el comportamiento predicho por las simulaciones. Además, el potencial de uso de los arrays fabricados fue probado realizando imágenes acústicas tanto en pulso-eco como en transmisión.

Con el fin de evitar la presencia de lóbulos de rejilla, lo cual puede resultar crítico en aplicaciones de imagen acústica con sistemas PA, es necesario mantener el paso del multitransductor por debajo de media longitud de onda. Los prototipos fabricados en este trabajo satisfacen esta condición para frecuencias por debajo de los 50 kHz en aire. Es por esto que actualmente estamos investigando con miras a determinar el mínimo paso permisible y su dependencia con: 1) el tamaño nominal de las cavidades interiores de los FCell y 2) la distribución de partículas metálicas de la cinta ZCPT. A la fecha, los resultados parciales de nuestra investigación muestran que siguiendo el mismo procedimiento de fabricación, es posible obtener resultados similares a los presentados utilizando elementos de 1.2 mm de ancho y una distancia entre ellos de 0.4 mm, el cual es el límite nominal especificado por el fabricante en la tabla 4.1. Prototipos de 32 elementos, con paso de menos 1 mm (media longitud de onda a 150 kHz en aire) han sido fabricados, pero los niveles de acoplamiento, así como la distribución de sensibilidad de los elementos no ha sido evaluada. Estos prototipos incluyen 32 pre-amplificadores en la misma PCB del array, lo cual hará posible la obtención de imágenes acústicas con apertura completa tanto en emisión como en recepción.

En conclusión, el nuevo método de fabricación propuesto resulta simple, económico y confiable, dando la posibilidad de fabricar arrays multidimensionales para aplicaciones en aire que hagan provecho de las características de los FCell. Arrays de dos dimensiones pueden ser fácilmente implementados y configuraciones espaciales pueden ser logradas siempre que el sustrato de los elementos sea una superficie desarrollable. El tamaño y forma reales de los elementos individuales puede ser fácil-

mente modificado ya sea en una placa de circuito impreso estándar o una flexible. Este hecho resulta de gran importancia en la validación experimental de los métodos de diseño de multitransductores no uniformes o dispersos, lo cual es de creciente interés actual.

Gran parte de los resultados descritos en este capítulo han sido ya publicados en artículos propios del autor así como en los que se participa como coautor, y que se especifican en las referencias [34] [31] [32] [127].

CONCLUSIONES Y CONTRIBUCIONES ORIGINALES

Los objetivos fundamentales que se plantearon inicialmente para este trabajo de tesis son:

- Caracterizar y modelar el comportamiento vibroacústico de la película electromecánica Emfit.
- Diseñar transductores que permitan evaluar y/o cuantificar el potencial de la película Emfit en aplicaciones ultrasónicas en aire.

Con éstos como marco, se ha conformado un documento que puede ser dividido en dos partes fundamentales. La primera describe el estado del arte de las tecnologías actuales utilizadas en aplicaciones ultrasónicas en aire, así como la caracterización electromecánica y acústica de transductores planos fabricados con la película Emfit; ferroelectreto celular disponible comercialmente. La segunda parte del documento, contiene resultados experimentales de caracterización de nuevos diseños de transductores, contrastados con simulaciones teóricas, que confirman el potencial de los ferroelectretos celulares para diseñar dispositivos especiales sobre cualquier sustrato de superficie desarrollable. También incluye la descripción de un nuevo método de fabricación de arrays de transductores (multitransductores).

A continuación, se presenta un resumen, capítulo por capítulo, de los resultados más relevantes obtenidos, haciendo énfasis en las aportaciones originales realizadas.

En el **capítulo 1** se realiza una introducción a la tecnología de ultrasonidos en aire (US-A). En ésta, se hace un repaso de las características del aire como medio de propagación, así como de las limitaciones físicas asociadas. También se presenta una descripción detallada de las tecnologías actualmente utilizadas en US-A, proporcionando información suficiente referente a la tecnología de los ferroelectretos, incluyendo sus ventajas, limitaciones y potencial de uso.

La aportación principal de este capítulo radica en la presentación del panorama actual de las tecnologías actuales empleadas en US-A, con especial énfasis en el estado del arte de los ferroelectretos celulares como material base para el diseño a medida de transductores ultrasónicos. Gran atención es dada a su principio de funcionamiento y método de fabricación, sus características elásticas y piezoeléctricas, así como a su potencial de uso diferentes aplicaciones, incluyendo los US-A. Finalmente, una comparación cualitativa de todas las tecnologías analizadas es mostrada, con base en criterios como ancho de banda, sensibilidad, madurez industrial, robustez, coste, facilidad de uso, adaptación acústica con el aire y flexibilidad mecánica.

Considerando que el material de trabajo fue la película EmfitTM, en el **capítulo 2** se incluye la caracterización electromecánica y acústica de transductores de capa simple, así como de doble capa, fabricados con dicho material. Para ello, se realizaron medidas interferométricas de velocidad con un vibrómetro láser de efecto Doppler, así como mediciones de presión acústica, empleando micrófonos calibrados. Los resultados de la caracterización de los transductores, incluyen: impedancia eléctrica, respuesta en frecuencia y efecto del adhesivo utilizado sobre ésta, comprobación de la linealidad de la respuesta electromecánica, modo de vibración de los transductores, sensibilidad acústica en transmisión y directividad del patrón de radiación. Además, la parte final del capítulo está dedicada a la obtención de un modelo electromecánico, acoplado y de parámetros concentrados que puede ser utilizado para estimar la respuesta dinámica de los transductores Emfit de n capas. Los parámetros del modelo desarrollado fueron adecuadamente identificados tanto para transductores de capa simple, así como también para los de capa doble, empleando un proceso de optimización multivariable y con restricciones.

Las contribuciones originales del capítulo son las siguientes:

1. Se propuso la utilización de cintas adhesivas de matriz acrílica y conductoras

de electricidad, para fabricar transductores de manera rápida y repetible. Hasta ahora, lo más común era utilizar epóxicos conductores de electricidad. Sin embargo, con ellos no resulta fácil garantizar manualmente una aplicación uniforme, ni evitar la creación de espacios de aire entre el epóxico y la película Emfit, entre otros inconvenientes. Con la cinta adhesiva ECPT propuesta, ha sido posible emular los resultados obtenidos con adhesivos epóxicos, pero con un incremento enorme en la facilidad para fabricar los prototipos, incluso en caso de transductores de múltiples capas, así como prototipos de substrato no plano.

2. Se cuantificó experimentalmente, por interferometría, la homogeneidad del modo de vibración de la película Emfit a frecuencias inferiores a 150 kHz, el cual emula la respuesta ideal de un transductor plano vibrando en modo espesor con un perfil de velocidad constante. Dicho resultado fue corroborado tras comparar la pauta acústica medida de los prototipos con lo esperado según la teoría.
3. Se demostró que, a pesar de la no homogeneidad de la película Emfit y de su patrón vibratorio, la respuesta de dispositivos de capa múltiple puede ser estimada utilizando un modelo electromecánico acoplado y de parámetros concentrados; el cual fue identificado utilizando la respuesta de transductores previamente caracterizados. El modelo se deduce de una formulación carga-deformación utilizando la Ecuación de Lagrange, resultando en un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales y acopladas. La bondad del modelo radica en que permite incluir el efecto del adhesivo utilizado en la fabricación de los transductores multicapa, así como la adición de una carga sobre la superficie radiante. Esto permitirá la sintonización ágil de la frecuencia de resonancia, útil en aplicaciones tanto de banda ancha como estrecha.
4. La identificación paramétrica del modelo propuesto permitió determinar la masa dinámica de un transductor de capa simple, la cual constituye aproximadamente el 40 % de la película utilizada. De igual manera, se estimó el módulo de elasticidad de la película ($c_{33} = 3.715$ MPa). Este valor no concuerda exactamente con el dado con el fabricante de la película (0.5 ± 50 % MPa), como tampoco con los reportados por otros autores (2 MPa y 0.89 MPa). La diferencia se debe a que

los valores reportados por ellos fueron calculados bajo condiciones cuasi-estáticas o en suposiciones no basadas en resultados experimentales. No obstante el resultado obtenido coincide en orden de magnitud con los reportados para diferentes películas ferroelectreto.

El *capítulo tres* de este trabajo introduce un nuevo concepto en el desarrollo de transductores para US-A. La posibilidad de adherir la película ferroelectreto sobre sustratos de geometrías complejas dio lugar a concebir una nueva gama de transductores cuya característica común radica en las propiedades geométricas del sustrato utilizado.

Teniendo en cuenta que la película Emfit se asemeja en aspecto y flexibilidad a una hoja de papel, las superficies desarrollables (SD) enmarcan el conjunto de geometrías de sustrato viables, sin deteriorar el material. En consecuencia, el contenido de este capítulo del trabajo incluye el diseño y caracterización de transductores contruidos sobre superficies desarrollables de distinto tipo, tales como cónicas, cilíndricas y tangenciales.

El capítulo inicialmente presenta una introducción a las SD que incluye la definición formal y los distintos tipos realizables en un espacio de tres dimensiones. Así mismo se muestra un estado del arte de los transductores de geometría cilíndrica y esférica utilizados en la generación de patrones omnidireccionales en aire. Finalmente, se incluye el estado actual en la generación de vórtices acústicos y los transductores utilizados para ello.

El núcleo del capítulo está formado por la descripción, fabricación, caracterización y validación teórico-experimental de prototipos de superficie desarrollable, como se explica brevemente a continuación:

- *Prototipo de superficie cónica.* Con este transductor se cuantificó el efecto de la curvatura del sustrato sobre la respuesta electromecánica y vibratoria de la película Emfit. Para ello se realizaron mediciones interferométricas.
- *Prototipos de superficie cilíndrica.* Utilizados para constatar los resultados obtenidos con el prototipo cónico, así como para lograr una pauta de emisión polar (o panorámica) en un rango amplio de frecuencias. Se presentan resultados de

caracterización tanto del modo de vibración, como del campo acústico generado, al igual que una comparación con transductores cilíndricos fabricados con fluoruro de polivinilideno (PVDF).

- *Prototipo de superficie cuasi-esférica.* El objetivo de este transductor es generar un campo acústico omnidireccional. Su proceso de fabricación es descrito y su respuesta acústica es comparada con la pauta direccional de un transductor finito de superficie perfectamente esférica. El proceso de diseño contempló la utilización del método de los elementos finitos para predecir la dependencia entre la geometría cuasiesférica y el campo acústico generado.
- *Prototipo de superficie helicoidal.* Este tipo de dispositivo fue concebido para generar un frente de ondas helicoidal, también denominado vórtice acústico. La validación teórico experimental del dispositivo conllevó la medida del campo de presión en planos transversales al haz (paralelos a la orientación del transductor), utilizando un micrófono calibrado. Asimismo, el campo medido fue comparado con vórtices acústicos teóricos sintetizados utilizando los haces de Gauss-Laguerre, así como con resultados de simulación obtenidos mediante el Método de las Fuentes Puntuales para predicción de campo acústico.

En todos los casos anteriores, los resultados acústicos medidos mostraron una correspondencia excelente con la predicción teórica de los mismos, confirmando que los ferroelectretos celulares poseen una versatilidad sin precedentes en el diseño de los transductores de geometría no plana y por tanto del campo acústico.

Las contribuciones originales del capítulo son las siguientes:

1. Si bien transductores de superficie cilíndrica y cónica han sido utilizados en la aplicaciones ultrasónicas en aire, los transductores de superficie desarrollable para US-A, como concepto, no han sido propuestos aún en la literatura. Esto puede atribuirse a que las tecnologías más utilizadas en US-A no permiten realmente la construcción de transductores de geometría arbitraria. Sin embargo, los ferroelectretos combinan la flexibilidad mecánica, solo comparable con la del PVDF, con una sensibilidad en la dirección d_{33} y un modo de vibración inalterables con la curvatura del sustrato. Esto les da una versatilidad sin precedentes en el diseño de transductores de geometría compleja, manteniendo el

amplio rango de frecuencia utilizable (30 kHz - 300 kHz) y con características especiales en su patrón de radiación.

2. La caracterización del prototipo cónico construido permitió establecer que ni la sensibilidad ni el patrón vibratorio se ven afectados significativamente conforme el radio de curvatura disminuye hasta casi 1 mm. Este resultado constituye la piedra angular que soporta la posibilidad de diseñar transductores de superficies desarrollables y por tanto de campo acústico configurable. Este tipo de transductores presenta un gran potencial tanto en sistemas basados en medida de rango (robótica, posicionamiento, localización, imagen acústica, etc.) como en aplicaciones de caracterización del canal de propagación.
3. Utilizando substratos cilíndricos se demostró la viabilidad de generar pautas de emisión panorámicas (omnidireccionalidad en el plano) en el rango de frecuencia 20 kHz - 150 kHz, donde el comportamiento observado emula un pistón ideal. Esto constituye una ventaja comparativa frente a los transductores, para US-A, fabricados con PVDF o piezocerámicos, en los cuales, por su principio de funcionamiento, el patrón panorámico está ligado al primer modo de vibración radial y por tanto la omnidireccionalidad no es posible fuera de resonancia.
4. Se ha propuesto un prototipo que permite la obtención de una pauta de emisión omnidireccional, a partir de la utilización de un substrato desarrollable cuasi-esférico obtenido a partir de la revolución de un semicírculo aproximado por tramos rectos de longitud s . Con éste, es posible lograr una gran cobertura de radiación, manteniendo intactas las características electromecánicas de la película Emfit. En el proceso de diseño y dimensionamiento del transductor, se determinó que la relación $s/\lambda < 1$ debe satisfacerse para que el patrón de radiación emule con suficiencia la pauta de emisión de un transductor idealmente esférico.
5. Se demostró por primera vez que es posible generar frentes de onda helicoidales de gran calidad, de diferente carga topológica, en aire y en el rango ultrasónico; utilizando película Emfit como material base y sin emplear arrays de transductores. Aunque se han reportado trabajos en los que se crean frentes helicoidales

en agua, utilizando métodos diversos, en el aire, consideramos que no hay reportes similares en el rango ultrasónico.

6. Hasta donde nos consta, ninguno de los transductores basados en ferroelectretos desarrollados y caracterizados en este capítulo y su potencial de uso, así como los prototipos propuestos como trabajo futuro, han sido reportados anteriormente en la literatura; salvo en los artículos que se listan a continuación. Por consiguiente, los resultados presentados son pioneros en la utilización de los ferroelectretos celulares en aplicaciones ultrasónicas en aire.

Actualmente se encuentran en fase de preparación dos artículos, los cuales serán enviados respectivamente a las revistas Applied Physics Letters y Journal of the American Society of Acoustics:

- Airborne Ultrasonic Helical Beam Generation using Broadband Cellular Ferroelectrets.
- Developable Surface Transducers for Airborne Ultrasound.

De otra parte, se está trabajando también en el registro de una patente que incluye el principio de funcionamiento del discriminador angular propuesto como trabajo futuro en este capítulo.

Finalmente, el *cuarto capítulo* contiene en esencia la descripción del potencial de los ferroelectretos celulares en aplicaciones que requieran la utilización de multitransductores, en particular sistemas Phased Array (PA) para ultrasonidos en aire.

Inicialmente se presenta una introducción acerca de la utilización de los sistemas PA, su principio de funcionamiento, ventajas e inconvenientes, así como las dificultades propias de utilizar aire como medio de propagación y/o acoplamiento. Posteriormente se introduce con detalle un nuevo método de fabricación de arrays con ferroelectretos, precedido por un estado del arte en la temática. La parte restante del capítulo contiene los resultados de caracterización de los prototipos de arrays fabricados siguiendo el método de fabricación propuesto. Esto incluye el análisis de la respuesta de un elemento individual del array, la distribución de la sensibilidad del array completo, la medición del nivel de acoplamiento electromecánico (crosstalk) entre elementos, la comprobación teórico experimental del haz conformado (con y sin

deflexión) y la generación de imágenes acústicas, en pulso eco, a diferentes frecuencias (150 kHz y 300 kHz).

La parte final de capítulo muestra el potencial de los ferroelectretos en la evaluación sin contacto de textiles con ultrasonidos en aire. Para ello, se emplearon los prototipos fabricados con el nuevo método de fabricación propuesto en conjunto con un sistema PA. Un estado del arte en la utilización de ultrasonidos para inspeccionar textiles es presentado, así como una descripción detallada del instrumental empleado, de la muestra inspeccionada y de los resultados obtenidos en la detección de errores de tejido (hebras faltantes), manchas de grasa y aceite. Éstos últimos confirman la viabilidad de la inspección de textiles y materiales de impedancia acústica similar, utilizando la tecnología de los ferroelectretos celulares. El montaje experimental empleado combina las capacidades de los sistemas PA para enfocar el haz ultrasónico, y por ende aumentar el nivel de la señal acústica, con las ventajas propias de los multitransductores fabricados con ferroelectretos celulares: bajo coste, facilidad de construcción, posibilidad de realizar aperturas de gran tamaño, buena adaptación con el aire y gran flexibilidad mecánica.

Las contribuciones originales del capítulo son las siguientes:

1. Se concibió un nuevo procedimiento para fabricar arrays con ferroelectretos. El método propuesto resulta simple, económico, fiable y no requiere instrumentación especializada, en comparación con otras alternativas de fabricación propuestas en la literatura. Asimismo, el tamaño y forma de los elementos del array puede ser fácilmente modificado ya sea en una placa de circuito impreso estándar o una flexible. Configuraciones especiales no planas pueden ser fácilmente logradas, siempre que el sustrato de los elementos posea una superficie desarrollable. Si bien la forma constructiva propuesta ha sido concebida para aplicaciones US-A, ésta puede ser extendida a cualquier aplicación que requiera un multitransductor que opere a frecuencias desde DC hasta 300 kHz.
2. Se propone y se evalúa la utilización de transductores basados en ferroelectretos para la inspección de defectos en materiales textiles. El bajo coste del material y la facilidad para lograr transductores de gran superficie, en conjunto con la utilización de un sistema phased array hacen factible la inspección y/o caracterización en línea de tejidos por medio de la utilización de subaperturas activas;

eliminando el movimiento mecánico en el sentido de la trama.

3. Se plantean ideas originales de trabajo futuro que están en la actualidad siendo adelantadas. Estas incluyen el desarrollo de multitransductores sobre superficies curvadas, el diseño de arrays dispersos o no uniformes (sparse arrays), así como la determinación de los límites de fabricación del nuevo método propuesto.

En conclusión, el presente documento de tesis presenta información original concerniente al desarrollo de transductores ultrasónicos basados en ferroelectretos celulares para aplicaciones en aire y su contenido enmarca los dos objetivos fundamentales planteados al inicio de los estudios doctorales.

Los principales resultados y aportaciones de éste trabajo están contenidos en los siguientes artículos:

1. **Joao L. Ealo**, Jorge Camacho, Carlos Fritsch. *Airborne Ultrasonic Phased Arrays using Ferroelectrets: A new Fabrication Approach*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. Vol 56. No. 4. p., 848-858, 2009.
2. **Joao L. Ealo**, F. Seco, A. R. Jiménez. *Broadband EMFi-Based Transducers for Ultrasonic Air Applications*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. Vol 55. No. 4. p., 919-929, April 2008.
3. **Joao L. Ealo**, Camacho, J. and Seco, F. and Fritsch, C. *Ultrasonic air-coupled inspection of textile materials using Ferroelectret-based phased arrays*. Proceedings of AIP. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Kingston, RI. Jul. 2009.
4. **Joao L. Ealo**, Carlos Prieto, Fernando Seco. *Dynamic Response Estimation of Multilayer Ferroelectret-based Transducers using Lumped-Element Electro-mechanical Models*. Proceedings of the 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium. Roma, Italia. Sept. 20-29.
5. F.Seco, **J. Ealo**, A.R. Jiménez. *Modulation and Codification of Ultrasonic Signals with EMFi Transducers*. 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium, Roma, Italia. Sept. 20-29.

6. **Joao L. Ealo**, F. Seco, J. Muñoz. *Los Ferroelectretos celulares y su potencial de aplicación en ultrasonidos en aire*. IX Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. 17-20 Noviembre. Las Palmas de Gran Canaria. Islas Canarias. España.
7. **Joao L. Ealo**, J. Camacho, C. Fritsch, F. Seco and J. Roa. *A Fabrication Procedure for Airborne Ultrasonic Phased Arrays based on Cellular Electromechanical Film*. Proceedings of the 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium. Nov. 2008. Beijing, China.
8. **Joao L. Ealo**, F. Seco, C. Prieto, A. Jiménez, J. Roa, A. Koutsou and J. Guevara. *Customizable Field Ultrasonic Transducers based on electromechanical Film*. Proceedings of the 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium. Nov. 2008. Beijing, China.
9. **Joao L. Ealo**, A. R. Jiménez, F. Seco, C. Prieto, J. Roa, F. Ramos, J. Guevara. *Broadband Omnidirectional Ultrasonic Transducer for airborne ultrasound based on EMFi*. Proceedings of the 2006 IEEE International Ultrasonics Symposium. Oct. 2006. Vancouver, Canada.
10. Villazón, J., Ibáñez, A., Camacho, J., **Ealo, J.** *Evolutionary algorithms for optimal ferroelectret arrays design* Proceedings of the 2009 IEEE International Ultrasonics Symposium. Sept. 2009. Roma, Italia.

Bibliografía

- [1] www.b-band.com.
- [2] www.emfit.com.
- [3] *IEEE Standard Piezoelectricity, 176*. ANSI/IEEE, 1987.
- [4] M. Abramovitz and A. Stegun. *Handbook of Mathematical Functions*. Dover, 9th edition, 1970.
- [5] J. Alametsa and et al. Automatic detection of spiking events in EMFi sheet during sleep. *Med. Eng. Phys.*, 28(3):267–275, 2006.
- [6] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, and J. P. Woerdman. Orbital angular momentum of light and the transformation of laguerre-gaussian laser modes. *Phys. Rev. A*, 45(11):8185–8189, Jun 1992.
- [7] R.A.C. Altafim, H.C. Basso, R.A.P. Altafim, L. Lima, C. V. de Aquino, L. Gonzalez Neto, and R. Gerhard-Multhaupt. Piezoelectrets from thermo-formed bubble structures of fluoropolymer-electret films. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 13(5):979–985, 2006.
- [8] F. Alvarez, J. Ureña, A. Hernández, M. Mazo, J.J. García, and A. Jiménez. Influence of atmospheric refraction on the performance of an outdoor ultrasonic pulse compression system. *Applied Acoustics*, 69:994–1002, 2008.

- [9] Michael J. Anderson, James A. Hill, Christopher M. Fortunko, Numan S. Dogan, and Russell D. Moore. Broadband electrostatic transducers: Modeling and experiments. *J. Acoust. Soc. Am.*, 97(1):262–272, 1995.
- [10] Jenni Anttonen. Using the emfi chair to measure the user’s emotion-related heart rate responses. Master’s thesis, Department of Computer Sciences. Interactive Technology. Univerity of Tampere, May 2005.
- [11] H. E. Bass. Ultrasonic background noise in industrial environments. *J. Acoust. Soc. Am*, 78:2013–2016, 1985.
- [12] V. Y. Bazhenov, M. S. Soskin, and M. V. Vasnetsov. Screw dislocations in light wavefronts. *J. Mod. Opt.*, 39(5):985–990, 1992.
- [13] M. Bedard and A. Berry. Development of a directivity-controlled piezoelectric transducer for sound reproduction. *Journal of Sound and Vibration*, 311(3-5):1271 – 1285, 2008.
- [14] J. Berenger. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves. *Journal of Computational Physics*, 114(2):185–200, 1994.
- [15] E. Blomme, D. Bulcaen, and F. Declercq. Air-coupled ultrasonic nde: experiments in the frequency range 750 kHz - 2 MHz. *NDT and E International*, 35:417–726, 2002.
- [16] E. Blomme, D. Bulcaen, F. Declercq, and P. Lust. Air-coupled ultrasonic evaluation of coated textiles. *IEEE International Ultrasonics Symposium*, pages 757–760, 2002.
- [17] E. Blomme, D. Bulcaen, F. Declercq, and P. Lust. Air-coupled ultrasonic detection of errors in textile products. *World Congress in Ultrasound 2003*, pages 1395–1398, 2003.
- [18] Leonard J. Bond, Chih-Hung Chiang, and Christopher M. Fortunko. Absorption of ultrasonic waves in air at high frequencies (10–20 MHz). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 92(4):2006–2015, 1992.

- [19] V. Bovtun, J. Doring, J. Bartusch, J. Bartusch, A. Erhard, and Y. Yakymenko. Emfit ferroelectret film transducers for non-contact ultrasonic testing. *9^a Conferencia Europea sobre Ensayos No-Destructivos ECNDT*, 2006.
- [20] V. Bovtun, J. Doring, J. Bartusch, J. Bartusch, A. Erhard, and Y. Yakymenko. Ferroelectret non-contact ultrasonic transducers. *Applied Physics A*, 88:737–743, September 2007.
- [21] R.F.J. Browne, M. Jeffers, T. McDermott, R. Grainger, D. Mulving, R.G. Gibney, and W.C. Torreggiani. Intra-operative ultrasound-guided needle localization for impalpable testicular lesions. *Clinical Radiology*, 58:566–569, 2003.
- [22] Marta Buigas, Francisco Montero de Espinosa, Georg Schmitz, Iñaki Ameijeiras, Pedro Masegosa, and Manuel Domínguez. Electro-acoustical characterization procedure for cmuts. *Ultrasonics*, 43(5):383 – 390, 2005.
- [23] J. Camacho and C. Fritsch. Protection circuits for ultrasound applications. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 55(5):1160–1164, 2008.
- [24] L. Capineri, L. Masotti, and S. Rocchi. A 3D airborne ultrasound scanner. *Meas. Sci. Technol.*, 9:967–975, 1998.
- [25] D. Cathignol, O. A. Sapozhnikov, and Y. Theillere. Comparison of acoustic fields radiated from piezoceramic and piezocomposite focused radiators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 105(5):2612–2617, 1999.
- [26] J.S. Chalfant and T. Maekawa. Design for manufacturing using b-spline developable surfaces. *Journal of Ship Research*, 42(3):207–215, 1998.
- [27] H.T. Chien, S.H. Sheen, W.P. Lawrance, K. Razazian, and A.C. Raptis. On-loom, real-time, noncontact detection of fabric defects by ultrasonic imaging. In *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Snowbird, UT*, 1998.
- [28] M. Dansachmüller, I. Minev, P. Bartu, I. Graz, N. Arnold, and S. Bauer. Generation and detection of broadband airborne ultrasound with cellular ferroelectrets. *Applied Physics Letters*, 91:222906, 2007.

- [29] M. Dansachmller, Schwödiauer, S. Bauer-Gogonea, S. Bauer, M. PaaJanen, and J. Raukola. Eleastic and electromechanical properties of polypropylene foam ferroelectrets. *Applied Physics Letters*, 86:031910, 2005.
- [30] C. Degel, H. Schuck, T. Knoll, F. Bauerfeld, M. Heinz, W. Haberer, H. Fonfara, R. Lemor, B. Elling, and R. Danz. Ultrasound phased array for airborne applications based on cellular polymer. *IEEE International Ultrasonics Symposium*, pages 727–732, 2007.
- [31] J. Ealo, J. Camacho, C. Fritsch, F. Seco, and J. Roa. A fabrication procedure for airborne ultrasonic phased arrays based on cellular electromechanical film. In *Proceedings of the 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium.*, pages 891–894, Nov. 2008.
- [32] J. Ealo, J. Camacho, F. Seco, and C. Fritsch. Ultrasonic air-coupled inspection of textile materials using ferroelectret-based phased arrays. In *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Kingston, RI*, volume to be published, July 2009.
- [33] J. Ealo, J.C. Prieto, and F. Seco. Dynamic response estimation of multi-layer ferroelectret-based transducers using lumped-element electromechanical models. *IEEE International Ultrasonics Symposium*, 2009.
- [34] J.L. Ealo, J.J. Camacho, and C. Fritsch. Airborne ultrasonic phased arrays using ferroelectrets: A new fabrication approach. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 56(4):848–858, 2009.
- [35] J.L. Ealo, A.R. Jimenez, F. Seco, C. Prieto, J. Roa, F. Ramos, and G. Guevara. 5h-5 broadband omnidirectional ultrasonic transducer for air ultrasound based on emfi. In *Ultrasonics Symposium, 2006. IEEE*, pages 812–815, Oct. 2006.
- [36] J.L. Ealo, F. Seco, and A. R. Jiménez. Broadband EMFi-Based transducers for ultrasonic air applications. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 55(4):919–929, 2008.
- [37] J.L. Ealo, F. Seco, C. Prieto, A.R. Jimenez, J. Roa, A. Koutsou, and J. Guevara. Customizable field airborne ultrasonic transducers based on electromechanical

- film. In *Ultrasonics Symposium, 2008. IUS 2008. IEEE*, pages 879–882, Nov. 2008.
- [38] O. Estorff. Numerical methods in acoustics: Facts, fears, future. *Revista de Acústica*, 38(3 y 4):83–101, 2007.
- [39] G. Evreinov and R. Raisamo. One-directional position-sensitive force transducer based on EMFi. *Sens. Actuator A-Phys.*, 123-124:204–209, 2005.
- [40] L.W. Ferris. A standard series of developable surfaces. *Mar Technol*, 5(1):53–62, 1968.
- [41] A. Fiorillo. Design and characterization of a PVDF ultrasonic range sensor. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 39(6):688–692, 1992.
- [42] K.R. Fyfe and F. Ismail. An investigation of the acoustic properties of vibrating finite cylinders. *Journal of Sound and Vibration*, 128(3):361–375, 1989.
- [43] A. Gachagan, G. Hayward, S.P. Kelly, and W. Galbraith. Characterisation of air-coupled transducers. *IEEE. Trans. Ultras. Ferr. Freq. Contr.*, 43(4):678–689, 1996.
- [44] E. Galvez. Gaussian beams in the optics course. *American Journal of Physics*, 74(4):355–361, 2006.
- [45] T. H. Gan, D.A. Hutchins, D.R. Billson, and D. W. Schindel. Preliminary studies of a novel air-coupled ultrasonic inspection system for food containers. *J. Food Engineering*, 53:315–323, 2002.
- [46] R. Gerhard-Multhaupt. Less can be more: Voids in polymers lead to a new paradigm of piezoelectricity and to useful electret transducers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 9(5):850–859, 2002.
- [47] Graham Gibson, Johannes Courtial, Miles Padgett, Mikhail Vasnetsov, Valeriy Pas’ko, Stephen Barnett, and Sonja Franke-Arnold. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum. *Opt. Express*, 12(22):5448–5456, 2004.

- [48] T. Gómez and F. Montero de Espinosa. Materiales y técnicas para el acoplamiento mecánico óptimo de piezocerámicas en aire. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 41(1):16–21, 2002.
- [49] W. A. Grandia and C. M. Fortunko. NDE applications of air-coupled ultrasonic transducers. *Proc. IEEE Symp. on Ultrasonics*, pages 697–709, 1995.
- [50] Ingrid Graz, Martin Kaltenbrunner, Christoph Keplinger, Reinhard Schwodiauer, Siegfried Bauer, Stephanie P. Lacour, and Sigurd Wagner. Flexible ferroelectret field-effect transistor for large-area sensor skins and microphones. *Applied Physics Letters*, 89(7):073501, 2006.
- [51] Stefan Gspan, Alex Meyer, Stefan Bernet, and Monika Ritsch-Marte. Optoacoustic generation of a helicoidal ultrasonic beam. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(3):1142–1146, 2004.
- [52] M Haberman and Y. Berthelot. A differential effective medium model for piezoelectret foams. *Journal of Applied Physics*, 102:124903, 2007.
- [53] M. Haller and B. Khuri-Yakub. A surface micromachined electrostatic ultrasonic air transducer. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 43(1):1–6, 1996.
- [54] A. Hayward and A. Gachagan. An evaluation of 1-3 connectivity composite transducers for air-coupled ultrasonic applications. *J. Acoust. Soc. Am.*, 99(4):2148–2157, 1996.
- [55] Mike Hazas and Andy Hopper. Broadband ultrasonic location systems for improved indoor positioning. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 5(5):536–547, 2006.
- [56] H. He, N.R. Heckenberg, and H. Rubinsztein-Dunlop. Optical particle trapping with higher-order doughnut beams produced using high efficiency computer generated holograms. *J. Mod. Opt.*, 42:217 – 223, 1995.
- [57] B. Hefner and P. Marston. Acoustical helicoidal waves and laguerre–gaussian beams: Applications to scattering and to angular momentum transport. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103(5):2971–2971, 1998.

- [58] B. T. Hefner and P.L. Marston. An acoustical helicoidal wave transducer with applications for the alignment of ultrasonic and underwater systems. *J. Acoust. Soc. Am.*, 106(6):3313–3116, 1999.
- [59] A. Hernández, J. Ureña, J.C. García, M. Mazo, D. Hernanz, J.P. Déruvin, and J. Sérot. Ultrasonic ranging sensor using simultaneous emissions from different transducers. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 51(12):1660–1670, 2007.
- [60] Robert Hickling and Samuel P. Marin. The use of ultrasonics for gauging and proximity sensing in air. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 79(4):1151–1160, 1986.
- [61] J. Hillenbrand and G. M. Sessler. DC-biased ferroelectrets with large piezoelectric d33-coefficients. *Journal of Applied Physics*, 103(7):074103, 2008.
- [62] J. Hillenbrand and G.M. Sessler. Piezoelectricity in cellular electret films. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 7(4):537–542, 2002.
- [63] J. Hillenbrand and G.M. Sessler. High-sensitivity piezoelectric microphones based on stacked cellular polymer films (1). *J. Acoust. Soc. Amer.*, 116(6):3267–3270, 2004.
- [64] D. Hutchins, T. Gan, P. Pallav, and D. Schindel. Industrial applications of air-coupled ultrasound. *19th International Congress on Acoustics*, Madrid, September 2007.
- [65] S. Junnila, A. Akhbardeh, A. Varri, and T. Koivistoinen. An emfi-film sensor based ballistocardiographic chair: Performance and cycle extraction method. *IEEE Workshop on Signal Processing Systems Design and Implementation*, pages 373–377, Nov. 2005.
- [66] R. Kacprzyk, A. Dobrucki, and Gajewski. Double-layer electret transducer. *Journal of electrostatics*, 39:33–40, 1997.
- [67] Jin O. Kim, Jung Gu Lee, and Han Yong Chun. Radial vibration characteristics of spherical piezoelectric transducers. *Ultrasonics*, 43(7):531 – 537, 2005.

- [68] G. Kino. Acoustic waves: Devices, imaging and analog signal processing. *Prentice Hall*, ISBN-10: 0130030473, 1987.
- [69] K. Kirjavainen. Electromechanical film and procedure for manufacturing the same. *US Patent No.4654 546*, 1987.
- [70] H. Kodama, Y. Yasuno, M. Date, and E. Fukada. A study of time stability of piezoelectricity in porous polypropylene electrets. In *Ultrasonics Symposium, 2009. IUS 2009. IEEE*, pages 879–882, Sept. 2009.
- [71] R. Kressmann. Linear and nonlinear piezoelectric response of charged cellular polypropylene. *Journal of Applied Physics*, 90(7):3489–3496, 2001.
- [72] R. Kressmann. New piezoelectric polymer for air-borne and water-borne sound transducers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 109(4):1412–1416, 2001.
- [73] T. Kuga, Y. Torii, N. Shiokawa, T. Hirano, Y. Shimizu, and H. Sasada. Novel optical trap of atoms with a doughnut beam. *Phys. Rev. Lett*, 78:4713, 1999.
- [74] R. Lerch, A. Streicher, and A. Sutor. Broadband ultrasonic transducer. *19th International Congress on Acoustics*, Madrid, September 2007.
- [75] M. Lindner, H. Hoislbauer, R. Schwodiauer, S. Bauer-Gogonea, and S. Bauer. Charged cellular polymers with ferroelectric behaviour. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 11(2):255–263, 2004.
- [76] Jessica Liu, Clyde Oakley, and Robin Shandas. Capacitive micromachined ultrasonic transducers using commercial multi-user mumps process: Capability and limitations. *Ultrasonics*, In Press, Corrected Proof:–, 2009.
- [77] W. Manthey, N. Kroemer, and V. Magori. Ultrasonic transducers and transducer arrays for applications in air. *Meas. Sci. and Technol.*, 3(3):249–261, 1992.
- [78] Regis Marchiano and Jean-Louis Thomas. Doing arithmetic with nonlinear acoustic vortices. *Physical Review Letters*, 101(6):064301, 2008.

- [79] J.P. McGarrity, G. Hayward, and D.J. Powell. A facet ensemble approach for evaluation of array performance in ultrasonic NDE. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 41(1):19–25, Jan 1994.
- [80] J.S. McIntosh, D.A. Hutchins, D.R. Billson, T.J. Roberson, R.A. Noble, and A.D.R. Jones. The characterization of capacitive micromachined ultrasonic transducers in air. *Ultrasonics*, 40:477–483, 2002.
- [81] A. Mellinger. Dielectric resonance spectroscopy: a versatile tool in the quest for better piezoelectric polymers. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 10(5):842–861, 2003.
- [82] C. Metzger, E. Fleisch, J. Meyer, M. Dansachmüller, I. Graz, M. Kaltenbrunner, C. Keplinger, R. Schwödianer, and S. Bauer. Flexible-foam-based capacitive sensor arrays for object detection at low cost. *Applied Physics Letters*, 92(013506), 2008.
- [83] M.Toda. Cylindrical PVDF film transmitters and receivers for air ultrasound. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 49(5):626–634, 2002.
- [84] H.S. Nalwa. *Ferroelectric Polymers*. Marcel Dekker Inc., 1995.
- [85] A. Neild, D.A. Hutchins, and D.R. Billson. Imaging using air-coupled polymer-membrane capacitive ultrasonic arrays. *Ultrasonics*, 42:859–864, 2004.
- [86] G. Neugschwandtner, R. Schwodiauer, S. Bauer-Gogonea, and S. Bauer. Piezo- and pyroelectricity of a polymer-foam space-charge electret. *Journal of Applied Physics*, 89(8):4503–4511, 2001.
- [87] G. S. Neugschwandtner, R. Schwodiauer, M. Vieytes, S. Bauer-Gogonea, S. Bauer, J. Hillenbrand, R. Kressmann, G. M. Sessler, M. Paaajanen, and J. Lekkala. Large and broadband piezoelectricity in smart polymer-foam space-charge electrets. *Applied Physics Letters*, 77(23):3827–3829, 2000.
- [88] J. F. Nye. Natural focusing and fine structure of light. *Institute of Physics Publishing*, 1999.

- [89] J.F. Nye and M.V. Berry. Dislocations in wave trains. *Proc. R. Soc. London*, 336(165), 1974.
- [90] A. Octavio, C.J. Martin, O. Martinez, J. Hernando, L. Gomez-Ullate, and F. Montero de Espinosa. P4m-2 a linear cmut air-coupled array for NDE based on mumps. In *Ultrasonics Symposium, 2007. IEEE*, pages 2127–2130, Oct. 2007.
- [91] S. Olcum, A. Atalar, H. Hoymen, and M. Senlik. Stagger tuned cmut array for wideband airborne applications. *IEEE International Ultrasonics Symposium*, pages 2377–2380, 2006.
- [92] O. Oralkan, A. Ergun, J.A. Johnson, M. Karaman, U. Demirci, K. Kaviani, T.H. Lee, and B.T. Khuri-Yakub. Capacitive micromachined ultrasonic transducers: Next-generation arrays for acoustic imaging? *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr.*, 55(4):919–929, 2008.
- [93] M. Paajanen, J. Lekkala, and K. Kirjavainen. Electromechanical film (EMFi) - a new multipurpose electret material. *Sens. Actuator A-Phys.*, 84:95–102, 2000.
- [94] M. Paajanen, J. Lekkala, and H. Valimaki. Electromechanical modeling and properties of the electret film EMFi. *IEEE Transactions of Dielectrics and Electrical Insulation*, 8(4):629, 2001.
- [95] M. Paajanen, H. Valimaki, and J. Lekkala. Modelling the electromechanical film EMFi. *Journal of Electrostatics*, 48(193):204, 1999.
- [96] M. Paajanen, H. Valimiiki, and J. Lekkala. Modelling the sensor and actuator operations of the electromechanical film EMFi. *Proc. IEEE 10th Symp. on Electrets*, pages 735–738, Sept. 1999.
- [97] M Paajanen, M Wegener, and R Gerhard-Multhaupt. Understanding the role of the gas in the voids during corona charging of cellular electret films - a way to enhance their piezoelectricity. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34(16):2482–2488, 2001.

- [98] M. Parrilla, J.J. Anaya, and C. Fritsch. Digital signal processing techniques for high accuracy ultrasonic range measurements. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 40(4):759–764, 1991.
- [99] R. Piestun, Y. Y. Schechner, and J. Shamir. Propagation-invariant wave fields with finite energy. *J. Opt. Soc. Am. A*, 17(2):294–303, 2000.
- [100] D Placko and T. Kundu. *DPSM for Modeling Engineering Problems*. Wiley-Interscience, 2007.
- [101] J. Poguet, P. Dumas, and G. Fleury. Piezocomposite technology : An innovative approach to the improvement of N.D.T. performance using ultrasounds. *8th European Conference on Non Destructive Testing*, 7(15), 2002.
- [102] J. C. Prieto, A. R. Jiménez, J. Guevara, J. L. Ealo, F. A. Seco, J. O. Roa, and F. X. Ramos. Subcentimeter-accuracy localization through broadband acoustic transducers. *IEEE International Workshop on Intelligent Signal Processing*, Oct. 2007. Madrid - Spain.
- [103] J.C. Prieto, A.R. Jimenez, J. Guevara, J.L. Ealo, F. Seco, J.O. Roa, and F. Ramos. Performance evaluation of 3d-locus advanced acoustic lps. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 58(8):2385–2395, Aug. 2009.
- [104] N.A.H.K. Rao and M. Aubry. Evaluation of a pulse coding technique for spatial structure characterisation. *IEEE Trans. ultras. Ferr. Freq. Contr.*, 41(5):660–663, 1994.
- [105] P. Redont. Representation and deformation of developable surfaces. *Computer-Aided Design*, 21(1):13–20, 1989.
- [106] T J Robertson, D A Hutchins, and D R Billson. Capacitive air-coupled cylindrical transducers for ultrasonic imaging applications. *Measurement Science and Technology*, 13(5):758–769, 2002.
- [107] T.J. Robertson, D.A. Hutchins, D.R. Billson, and J.H. Rakels. surface metrology using reflected ultrasonic signals in air. *Ultrasonics*, 39:479–486, 2002.

- [108] D. royer and E. Dieulesaint. *Elastic Waves in Solids*,, volume I and II. Springer, 2000.
- [109] D. Rozas, C. T. Law, and G. A. Swartzlander. Experimental observation of fluidlike motion of optical vortices. *Phys. Rev. Lett.*, 79:3399 – 3402, 1997.
- [110] A. O. Santillan and K. Volke-Sepulveda. A demonstration of rotating sound waves in free space and the transfer of their angular momentum to matter. *American Journal of Physics*, 77(3):209–215, 2009.
- [111] D. Savio and T. Ludwig. Smart carpet: A footstep tracking interface. In *Advanced Information Networking and Applications Workshops, 2007, AINAW '07. 21st International Conference on*, volume 2, pages 754–760, May 2007.
- [112] G. M. Sessler. *Physical principles of Electrets*, volume 2. Laplacian Press, Morgan Hill, 3 edition, 1999.
- [113] G.M. Sessler and J. Hillenbrand. Electromechanical response of cellular electret films. *Appl. Phys. Lett.*, 75(4):3405–3407, 1999.
- [114] Junho Song and D. E. Chimenti. Design, fabrication and characterization of a spherically focused capacitive air-coupled ultrasonic transducer. *Int. J. Appl. Sci. Eng*, 4(1):1–19, 2006.
- [115] H. Sorvoja, V. Kokko, R. Myllyla, and J. Miettinen. Use of EMFi as a blood pressure pulse transducer. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 54:2505–2510, 2005.
- [116] D.N. Stephens, J. Cannata, Ruibin Liu, Jian Zhong Zhao, K.K. Shung, Hien Nguyen, R. Chia, A. Dentinger, D. Wildes, K.E. Thomenius, A. Mahajan, K. Shivkumar, Kang Kim, M. O'Donnell, and D. Sahn. The acoustic lens design and in vivo use of a multifunctional catheter combining intracardiac ultrasound imaging and electrophysiology sensing. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 55(3):602–618, March 2008.
- [117] A. Streicher, M. Kaltenbacher, R. Lerch, and H. Peremans. Broadband EMFi ultrasonic transducer for bat research. *Proc. 2005 IEEE Symp. on Ultrasonics*, 3:1629–1632, Sept. 2005.

- [118] A. Streicher, R. Muller, H. Peremans, and R. Lerch. Broadband ultrasonic transducer for a artificial bat head. *Proc. IEEE Symp. on Ultrasonics*, 2:1364–1367, Oct. 2003.
- [119] Sadayuki Takahashi and Hiroji Ohigashi. Ultrasonic imaging using air-coupled p(vdf/trfe) transducers at 2 MHz. *Ultrasonics*, 49(4-5):495 – 498, 2009.
- [120] K. Tang and C. Wang. Modeling developable folds on a strip. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 5(1):35–47, 2005. cited By (since 1996) 6.
- [121] D. R. Billson T.H. Gan, D. A. Hutchins and D.W. Schindel. The use of broadband acoustic transducers and pulse-compression techniques for air-coupled ultrasonic imaging. *Ultrasonics*, 39:181–194, 2000.
- [122] J.L. Thomas and R. Marchiano. Pseudo angular momentum and topological charge conservation for nonlinear acoustical vortices. *Phys. Rev. Lett*, 91:244302, 2003.
- [123] M. Toda and J. Dahl. Pvdv corrugated transducer for ultrasonic ranging sensor. *Sens. Actuator A-Phys.*, 134(2):427–435, 2007.
- [124] Enis Tuncer and Michael Wegener. Elastic properties of cellular polypropylene films: Finite element simulations and their comparison with experiments, 2004.
- [125] J. Ureña, A. Hernández, A. Jiménez, J.M. Villadagos, M. Mazo, J.C. García, F.J. Alvarez, C. De Marziani, M.C. Perez, A.R. Jiménez, and F. Seco. Advanced sensorial system for an acoustic LPS. *Microprocessors and Microsystems*, 31:393–401, 2007.
- [126] José M. Villadagos, J. Ureña, M. Mazo, A. Hernández, M Matín, and C. De Marziani. Posicionamiento absoluto de robots móviles con balizas ultrasónicas codificadas. *TELEC04 Int. Conference. Telecommunications, Electronics and Control*, 2004.
- [127] J. Villazón, A. Ibáñez, J. Camacho, and J. Ealo. Evolutionary algorithms for optimal ferroelectret arrays design. In *Proceedings of the 2008 IEEE International Ultrasonics Symposium.*, volume to be published, September 2009.

- [128] J. Villazón, A. Ibáñez, M. Parrilla, and P. Nevado. Design method for large 2-D ultrasonic arrays with controlled grating lobes levels. *IEEE International Ultrasonics Symposium*, pages 1520–1523, 2008.
- [129] Karen Volke-Sepulveda, Arturo O. Santillan, and Ricardo R. Boullosa. Transfer of angular momentum to matter from acoustical vortices in free space. *Physical Review Letters*, 100(2):024302, 2008.
- [130] Q. Wang, N. Guo, H. Du, and W. Huang. Beam pattern calculation for optimization of broadband array transducers. *J. Acoust. Soc. Am.*, 120(2), 2006.
- [131] M. Wegener and S. Bauer. Microstorms in cellular polymers: A route to soft piezoelectric transducer materials with engineered macroscopic dipoles. *ChemPhysChem*, 6:1015–1025, 2005.
- [132] M. Wegener, S. Bergweiler, W. Wirges, A. Pucher, E. Tuncer, and R. Gerhard-Multhaupt. Piezoelectric two-layer stacks of cellular polypropylene ferroelectrets: transducer response at audio and ultrasound frequencies. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 52(9):1601–1607, Sept. 2005.
- [133] M. Wegener, E. Tuncer, R. Gerhard-Multhaupt, and S. Bauer. Elastic properties and electromechanical coupling factor of inflated polypropylene ferroelectrets. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pages 752–755, 2006.
- [134] M. Wegener, W. Wirges, R. Gerhard-Multhaupt, M. Dansachmuller, R. Schwodiauer, S. Bauer-Gogonea, S. Bauer, M. Paaajanen, H. Minkkinen, and J. Raukola. Controlled inflation of voids in cellular polymer ferroelectrets: Optimizing electromechanical transducer properties. *Applied Physics Letters*, 84(3):392–394, 2004.
- [135] E. Weisstein. Gaussian curvature. From MathWorld—A Wolfram Web Resource. <http://mathworld.wolfram.com/GaussianCurvature.html>.
- [136] Lorne A. Whitehead and Brent J. Bolleman. Microstructured elastomeric electromechanical film transducer. *J. Acoust. Soc. Am.*, 103(1):389–395, 1998.

- [137] P.D. Wilcox, C. Holmes, and B.W. Drinkwater. Advanced reflector characterization with ultrasonic phased arrays in nde applications. *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, 54(8):1541–1550, August 2007.
- [138] E.G. Williams. *Fourier Acoustics. Sound Radiation and Nearfield Acoustic Holography*. Cambridge, UK:Academic Press, 1999. ch. 4, pp. 133–146.
- [139] Wilson S. et al. New materials for micro-scale sensors and actuators – an engineering review. *Materials Science and Engineering R*, 56:1–129, 2007.
- [140] W. Wirges, M. Wegener, O. Voronina, L. Zirkel, and R. Gerhard-Multhaupt. Optimized preparation of elastically soft, highly piezoelectric, cellular ferroelectrets from nonvoided poly(ethylene terephthalate) films. *Advanced Functional Materials*, 17:324–329, 2007.
- [141] C-J Wu and C-C Tsai. Localization of an autonomous mobile robot based on ultrasonic sensory information. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 30:267–277, 2001.
- [142] X. Zhang, J. Hillenbrand, and G. M. Sessler. Ferroelectrets with improved thermal stability made from fused fluorocarbon layers. *Journal of Applied Physics*, 101(054114), 2007.
- [143] X. Zhang, J. Hillenbrand, and G.M. Sessler. Improvement of piezoelectric activity of cellular polymers using a double-expansion process. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 37:2146–2150, 2004.
- [144] X. Zhang, J Hillenbrand, and G.M. Sessler. Piezoelectric d33 coefficient of cellular polypropylene subjected to expansion by pressure treatment. *Applied Physics Letters*, 85(7):1226–1228, 2004.
- [145] S. Zhou, Wojcik G., and J. Hossack. An approach for reducing adjacent element crosstalk in ultrasound arrays. *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Freq. Contr.*, 50:1752–1761, 2003.