

**FOCALIZACIÓN DE VÓRTICES ULTRASÓNICOS EN AIRE A
PARTIR DE TRANSDUCTORES MONO Y MULTIELEMENTO**

FERNANDO AUGUSTO QUICENO BUITRAGO

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2014**

**FOCALIZACIÓN DE VÓRTICES ULTRASÓNICOS EN AIRE A
PARTIR DE TRANSDUCTORES MONO Y MULTIELEMENTO**

FERNANDO AUGUSTO QUICENO BUITRAGO

**Tesis de Maestría en Ingeniería
Énfasis en Ingeniería Mecánica**

**Director
Joao Luis Ealo Cuello
Ingeniero Mecánico, Ph. D.**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI
2014**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Santiago de Cali, 5 de Septiembre de 2014

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a toda mi familia. Todo aquel que considere que hace parte de ella, también está incluido.

Agradecimientos

Al profesor Joao Luis Ealo Cuello por la asesoría, los sabios consejos, la paciencia y la confianza.

Muchas gracias a mis amigos y compañeros del Laboratorio de Vibraciones y Acústica de la Universidad del Valle: Jhon, Rubén, David, Carlos, Alfonso, Alejandro, Diego y todos aquellos que de una u otra manera me acompañaron en este proceso.

Tabla de Contenido

Lista de figuras	13
Lista de tablas	18
Introducción.....	22
1 Formulación del problema y justificación.....	24
2 Objetivos.....	26
2.1 Objetivo general	26
2.2 Objetivos específicos.....	26
3 Marco teórico.....	28
3.1 Vórtices Acústicos.....	28
3.2 Los Ferroelectretos Celulares (FCel).....	31
3.3 Sistemas <i>Phased Array</i> (PA)	33
3.4 Simulación de campos acústicos mediante el DPSM.....	34
3.5 Transducción de ultrasonidos en aire	35
4 Materiales y métodos.....	38
4.1 Generadores de Vórtices Acústicos Focalizados (VAF)	38
4.1.1 Diseño y construcción de un transductor mono-elemento Generador de Vórtices Acústicos Focalizados (GVAF) en Aire	38
4.1.2 GVAF mediante sistemas <i>Phased Array</i>	42
4.2 Simulación computacional del campo de presión acústica	45
4.2.1 Simulación de transductores mono-elemento	45
4.2.2 Simulación del <i>array</i> hexagonal de 30 elementos	48
4.2.3 Planos de observación.....	49
4.3 Montaje experimental para la generación y caracterización de VAF en aire ..	50
5 Resultados.....	54
5.1 Resultados con el transductor mono-elemento	54
5.1.1 Evaluación de las superficies de focalización.....	54

5.1.2	Análisis de la afectación de la estructura del vórtice debido a la focalización	68
5.1.3	Caracterización del transductor mono-elemento	74
5.2	Resultados con el multitransductor de 30 elementos piezo-cerámicos	82
5.2.1	Caracterización del multitransductor de 30 elementos	82
5.2.2	Resultados de simulación del <i>array</i> hexagonal de 30 elementos	89
6	Conclusiones y trabajo futuro.....	98
7	Bibliografía.....	102

Lista de figuras

Figura 1. Superficies de fase constante de campos con frente de ondas helicoidal, carga topológica $m=1$ (izquierda) y $m=2$ (derecha). Vista isométrica (arriba) y vista lateral (abajo), fuente: (Quiceno Buitrago, et al., 2012).	28
Figura 2. Esquema de un haz de luz pasando a través de un axicon. Fuente: (Mallik 2005)	30
Figura 3. Fotografía de la sección transversal de la película electromecánica Emfit® y representación esquemática de la distribución de carga eléctrica (Ealo, 2009).	31
Figura 4. Esquema del cálculo de la presión en un punto con el DPSM (Placko & Kundu, 2007)	35
Figura 5. Esquema del transductor GVAF mono-elemento	41
Figura 6. Transductor GVAF construido.....	41
Figura 7. Multitransductor plano de 32 elementos piezo-cerámicos de 40 kHz.	43
Figura 8. Respuesta electro-acústica de un transductor piezo-cerámico del <i>array</i> hexagonal. Izquierda: Respuesta temporal ante dos pulsos cuadrados centrados en 40 kHz. Derecha: Respuesta en frecuencia. Fuente: (González Hernández, 2013)	43
Figura 9. Patrón de directividad de un transductor piezo-cerámico del <i>array</i> hexagonal. Fuente: (González Hernández, 2013)	44
Figura 10. Leyes de retardos para simular un Vórtice Cónico en un <i>array</i> hexagonal de 30 elementos.	45
Figura 11. Superficies para generar vórtices focalizados a partir del método de las fuentes puntuales.	46
Figura 12. Definición de parámetros de cono.....	47
Figura 13. Localización del foco para las superficies: esférica (izquierda) y parabólica (derecha)	47
Figura 14. Planos de observación del campo radiado	49
Figura 15. Esquema del montaje experimental utilizado	51
Figura 16. Planos azimutales de presión simulados para un vórtice cónico a 70 kHz y ángulos de focalización de 0° a 20°	55

Figura 17. Planos azimutales de presión simulados para un vórtice cónico a 70 kHz y ángulos de focalización de 25° a 45°	55
Figura 18. Amplitud de presión en planos transversales simulados de observación ubicados a la distancia de localización (Z_{obs}) de la presión máxima (A_{max}) para un vórtice con focalización cónica y ángulos de construcción de cono de 0 a 45 grados.	56
Figura 19. Coincidencia del núcleo de un Vórtice Cónico de 20 grados a 70 kHz con el plano azimutal y de elevación. Amplitud de presión en un plano transversal simulado a 37 mm (izquierda), patrón lateral horizontal del haz (centro) y patrón lateral vertical del haz (derecha).	57
Figura 20. Planos de elevación simulados para un vórtice cónico a 70 kHz, carga topológica unitaria y ángulos de focalización de 0° a 20°	58
Figura 21. Planos de elevación simulados para un vórtice cónico a 70 kHz, carga topológica unitaria y ángulos de focalización de 25° a 45°	58
Figura 22. Diferencia en las magnitudes de A_{max} (Amplitud máxima / fuentes radiantes) para Vórtices Cónicos a 70 kHz.	59
Figura 23. Distancia de localización del punto de amplitud máxima para un vórtice cónico a 70 kHz.....	59
Figura 24. Magnitud de A_{max} respecto al ángulo de construcción para vórtices cónicos y diferentes relaciones D/λ	60
Figura 25. Ajuste de una función sinusoidal para valores de A_{max} vs. Ángulo de cono para diferentes D/λ	61
Figura 26. Valor de Z_{pos} (ubicación del punto donde se encuentra A_{max}) respecto al ángulo de construcción para vórtices cónicos y diferentes relaciones D/λ	62
Figura 27. Ajuste de una función exponencial de dos término para valores de Z_{pos} vs. Ángulo de cono para diferentes relaciones D/λ	62
Figura 28. Planos de elevación simulados para un vórtice a 70 kHz, con focalización esférica y distancias focales de Inf, 115.2, 58.5, 40.0 y 31.1 mm.	64
Figura 29. Planos de elevación simulados para un vórtice a 70 kHz, con focalización esférica, y distancias focales de 26.1, 23.1, 21.3, 20.3, 20.0 mm.....	64

Figura 30. Planos transversales de observación ubicados a la distancia de localización (Z_{obs}) de la presión máxima (A_{max}) para un vórtice esférico y diferentes distancias focales.	65
Figura 31. Planos de elevación simulados para un vórtice a 70 kHz, con focalización parabólica y distancias focales de Inf, 57.2, 28.4, 18.7 y 13.7 mm.....	66
Figura 32. Planos de elevación simulados para un vórtice a 70 kHz, con focalización parabólica y distancias focales de 10.7, 8.7, 7.1, 6.0 y 5.0 mm	67
Figura 33. Planos transversales de observación ubicados a la distancia de localización (Z_{obs}) de la presión máxima (A_{max}) para un vórtice parabólico y diferentes distancias focales (dF).	67
Figura 34. Ancho del haz y del nulo de presión para un vórtice cónico de 10° a 70kHz	70
Figura 35. Ancho del haz a -3dB para vórtices: cónico, esférico y parabólico a 70 kHz	70
Figura 36. Ancho del núcleo a -3dB para los tres tipos de vórtices focalizados a 70 kHz	71
Figura 37. Determinación de la profundidad del haz de un vórtice cónico focalizado 10° a 70 kHz. Plano azimutal (arriba), curvas de máximos y presión sobre el eje principal (abajo).	72
Figura 38. Variación en la profundidad del haz debido a la focalización para un vórtice a 70 kHz.	73
Figura 39. Señal medida de un VAF ante una excitación tipo <i>chirp</i> de 20 a 180 kHz, sobre un punto de medición a 50 mm generado por el transductor mono-elemento. Respuesta temporal (izquierda) y en frecuencia (derecha).	74
Figura 40. Medición experimental y simulación computacional de los espectros de amplitud y fase para un VAF de 20° a 70 kHz sobre un plano azimutal.	75
Figura 41. Plano azimutal (izquierda) obtenido a partir de la medición de planos transversales (derecha), para un VAF de 20° a 70 kHz.....	76

Figura 42. Planos transversales de la respuesta temporal en cinco instantes de un periodo (τ) para un vórtice cónico de 20° a 70 kHz y 50 mm de distancia de observación generado con transductor mono-elemento.	77
Figura 43. Medición experimental y simulación computacional del campo de presión instantánea para un VAF a 70 kHz sobre planos transversales a 25 mm, 35 mm, 50 mm y 90 mm del transductor.	78
Figura 44. Medición experimental y simulación computacional de los espectros de presión y fase para un VAF de 20° a 70 kHz sobre planos transversales a 25 mm, 35 mm, 50 mm y 90 mm del transductor.	80
Figura 45. Patrones laterales de emisión de un VAF de 20°, a 70 kHz y a 44 mm (arriba) y 70 mm (abajo) de distancia del transductor. Espectros de amplitud (izquierda) y fase (derecha).	81
Figura 46. Superficie de fase constante de un vórtice cónico de 20° a 70 kHz, generado con un transductor mono-elemento, medidos instantáneamente en el plano (X, Y, 35 mm).	82
Figura 47. Señal temporal de un VAF sobre un punto de medición a 100 mm de un <i>array</i> de 30 elementos	83
Figura 48. Planos transversales de la respuesta temporal en cinco instantes diferentes de un vórtice cónico de 20° a 40 kHz y 55 mm de distancia de observación generado con multitransductor de 30 elementos.	84
Figura 49. Medición experimental y simulación computacional de VAF generados con un multitransductor de 30 elementos a 40 kHz con diferentes ángulos de focalización cónica.	85
Figura 50. Medición experimental y simulación computacional de VAF generados con un multitransductor de 30 elementos a 40 kHz sobre planos azimutales.	87
Figura 51. Evolución temporal de la presión a lo largo de 41 puntos de medida que atraviesan transversalmente un VAF cónico de 20° observado a 55 mm.	88
Figura 52. Superficie de fase constante de un vórtice cónico de 10° a 40 kHz generado con un <i>array</i> hexagonal, medidos instantáneamente en el plano (X, Y, 100 mm).	89

Figura 53. Planos azimutales de presión de un VA a 40 kHz, calculados con el simulador del <i>array</i> con paso de 13.6 mm y diferentes ángulos de focalización cónica.	90
Figura 54. Planos azimutales (ampliados hacia la izquierda) de presión de un VA a 40 kHz, simulados computacionalmente para un <i>array</i> de 30 elementos piezo-cerámicos con $d = 13.6$ mm y diferentes ángulos de focalización cónica.	91
Figura 55. Amplitud de presión en planos transversales a la distancia Z_{pos} para un vórtice a 40 kHz con focalización cónica y ángulos de construcción de cono de 0 a 20 grados.....	92
Figura 56. Amplitud de presión en planos transversales a la distancia Z_{pos} para un vórtice a 40 kHz con focalización cónica y ángulos de construcción de cono de 25 a 45 grados....	93
Figura 57. Planos azimutales de presión de un vórtice simulado no focalizado a 40 kHz para diferentes valores de distancia inter-elemento.....	93
Figura 58. Planos azimutales de presión de un vórtice cónico de 20° a 40 kHz realizados con el simulador de 30 elementos y para diferentes valores de paso.	94
Figura 59. Curvas de A_{max} vs. ángulo de focalización cónica para vórtices a 40 kHz, simulados con un <i>array</i> hexagonal de 30 elementos y para diferentes valores de distancia inter-elemento.	95
Figura 60. Curvas de Z_{pos} vs. ángulo de focalización cónica para vórtices a 40 kHz, simulados con un <i>array</i> hexagonal de 30 elementos y para diferentes valores de pitch.	96

Lista de tablas

Tabla 1. Impedancia acústica y coeficientes de transmisión (Ealo, 2009).....	36
Tabla 2. Coeficientes de la función de ajuste sinusoidal para las curvas de A_{max} vs. Ángulo de cono y diferentes relaciones de D/λ	61
Tabla 3. Coeficientes de la función de ajuste exponencial para las curvas de Z_{pos} vs. Ángulo de cono y diferentes relaciones de D/λ	63
Tabla 4. Incremento de amplitud de la presión debida a la focalización.....	69

Resumen

El presente trabajo describe los procesos de generación y caracterización de Vórtices Acústicos Focalizados (VAF) en Aire a partir de dos tecnologías (transductores mono y multi-elemento) y su contenido se encuentra dividido en tres partes principales: Inicia con el estado del arte de los Vórtices Acústicos (VA) mencionando sus propiedades y características más importantes; la descripción de la película de ferroelectreto celular empleada en la construcción de un transductor mono-elemento de superficie combinada cónico-helicoidal; los multitransductores y sistemas con arreglo en fase (*Phased Array*); y, el Método de las Fuentes Puntuales Distribuidas (DPSM) para la simulación computacional de campos acústicos. Posteriormente, se presenta cada una de las tecnologías empleadas, describiendo en detalle el diseño, construcción y caracterización de un transductor mono-elemento de superficie combinada cónico-helicoidal que usa ferroelectreto como material activo; el multitransductor hexagonal de 30 elementos piezo-cerámicos y la programación de leyes de retardos para generar VAF; la simulación computacional del campo de presión acústica por medio del DPSM; y, el montaje instrumental para la caracterización de los transductores. Finalmente, se presenta la evaluación de cada técnica de focalización de vórtices acústicos mostrando resultados experimentales y simulados sobre planos y líneas de observación, análisis de las variaciones en la distribución de presión de los vórtices producidos por focalizar, el empleo de otras superficies (esférica y parabólica) y la variación de parámetros como el ángulo de cono, la distancia focal, la relación diámetro – longitud de onda y, para el caso de multitransductores, la distancia inter-elemento. Por último, las conclusiones más relevantes y el trabajo futuro son presentados.

Palabras clave: Vórtices Acústicos, Vórtices Acústicos Focalizados, Transductores Ultrasónicos, multitransductores, sistemas *Phased Array*.

Introducción

Las ondas, en sus diferentes formas (planas, esféricas, helicoidales, espirales, etc.), o según sea su naturaleza (mecánica, electromagnética o gravitacional) son observables en ordenes de magnitud micro y macroscópicos, y poseen diversidad de aplicaciones prácticas en áreas como la óptica, la mecánica de fluidos y la acústica, entre otras. Los vórtices son un fenómeno físico que se puede observar naturalmente en la generación de huracanes en los mares o en la conformación de las galaxias en el espacio, así como, los remolinos que artificialmente se forman en un estanque sometido a desagüe o al agitar circularmente una taza de café con una cuchara. Los vórtices en acústica son ondas mecánicas vibratorias en las cuales, el campo acústico generado se caracteriza por poseer un frente de ondas helicoidal que se propaga a través de un medio sólido, líquido o gaseoso.

Las características de los vórtices acústicos que los hacen especialmente atractivos son:

- El campo acústico resultante posee un nulo de presión a lo largo del eje principal de propagación que podría ser utilizado para propósitos de alineación o para encausar partículas en el espacio.
- Poseen la capacidad de auto-reconstruirse en un medio heterogéneo o ante obstrucciones parciales.
- Transportan momento angular en su distribución espacial, por lo que podrían utilizarse para inducir la rotación angular controlada de objetos o partículas.
- Pueden ser utilizados para almacenar y transmitir información digitalizada, haciendo que la codificación ocurra en el espacio y no en el tiempo.

Además, las ecuaciones que describen el fenómeno son equivalentes, ya sea este óptico, acústico o cuántico; permitiendo el estudio de los vórtices en un contexto dado para comprender comportamientos en cualquier otro.

Este trabajo se encuentra dividido en tres partes principales, a saber: Inicia con el estado del arte de los Vórtices Acústicos (VA) mencionando sus propiedades y características más importantes; la descripción de la película de ferroelectreto celular empleada en la construcción de un transductor mono-elemento de superficie combinada cónico-helicoidal; los sistemas *Phased Array* y los multitransductores; y, el Método de las Fuentes Puntuales Distribuidas (DPSM, de las siglas en inglés) para la simulación computacional de campos acústicos. Posteriormente, la atención se centra en la metodología propuesta, describiendo en detalle los simuladores implementados, las tecnologías de generación de Vórtices Acústicos Focalizados (VAF) empleadas y el montaje instrumental para la caracterización de los transductores. Finalmente, se presentan los resultados experimentales y simulados de la evaluación de cada técnica para producir VAF, así como apartados especiales para determinar las variaciones en la distribución de presión de los vórtices debido a la focalización y el efecto de la discretización espacial de las fuentes radiantes de un *array* sobre la estructura de los vórtices.

1 Formulación del problema y justificación

Si bien los vórtices han sido bastante estudiados en óptica, su contraparte acústica ha sido poco investigada. La mayoría de trabajos se limitan a plantear sus características especiales. El estudio y cuantificación del potencial de los Vórtices Acústicos (VA) está aún por explorar, más aún, tratándose de VA en aire, donde las características propias del medio limitan su uso. Estas dificultades son: el desacople de impedancias entre el aire y otros medios, la alta atenuación por absorción, la baja velocidad de propagación¹ y a problemas de interferencia acústica². La escasa investigación reportada puede deberse, en parte, a que sólo hasta hace una década las tecnologías de transducción electroacústica y la electrónica de emisión-recepción han experimentado un desarrollo notorio, superando las dificultades propias de la propagación en aire.

El hecho de trabajar a una escala distinta a la usual en óptica plantea interrogantes de investigación que ameritan el estudio de los VA a profundidad, con miras a la generación de nuevas aplicaciones, principalmente en su interacción con oclusiones u obstáculos, así como los efectos de su propagación en medios heterogéneos. Estudios preliminares de VA en aire, desarrollados en el Laboratorio de Vibraciones y Acústica de la Universidad del Valle, han permitido constatar sus propiedades, no obstante, la magnitud de presión alcanzada hasta ahora es insuficiente para manipular partículas en aire. Este trabajo presenta la generación y caracterización de VAF en aire a partir de dos tecnologías diferentes, con las cuales se busca amplificar los valores de intensidad o de presión acústica usando la concentración de la energía del vórtice alrededor de un foco.

La primera tecnología es una innovación nuestra que consiste en un transductor mono-elemento constituido por un substrato de superficie desarrollable cónico-helicoidal y una película electro-mecánica especial, la cual genera un campo acústico que adopta la forma del

¹ Esta característica se convierte en limitación cuando se presentan aplicaciones donde una alta velocidad en la obtención de resultados de medición es requerida, p.e., sistemas de inspección en línea de defectos.

² Fenómeno producido por fuentes externas

substrato. El diseño y construcción de este transductor constituye un aporte original de este trabajo, y no se conoce un antecedente de esta idea en la literatura, constituyendo una oportunidad de registro de una patente de invención una vez que se explore una aplicación industrial del dispositivo. La segunda tecnología trata de la generación de VAF mediante un multitransductor de 32 elementos piezo-cerámicos distribuidos sobre un arreglo hexagonal plano, el cual es excitado mediante un sistema comercial *Phased Array* que, mediante algoritmos de control electrónico, permite la generación de campos acústicos especiales, entre ellos, los vórtices con o sin focalización y la deflexión del haz.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Focalizar vórtices acústicos en aire y a frecuencias ultrasónicas, empleando transductores mono y multielemento.

2.2 Objetivos específicos

- Diseñar y construir un transductor para la generación de vórtices focalizados a partir de la combinación de superficies desarrollables (cónico – helicoidal) y utilizando ferroelectretos celulares como material activo.
- Diseñar y evaluar leyes focales (de retardos) que permitan, empleando un sistema Phased Array, la focalización de VA a frecuencias ultrasónicas en aire.
- Caracterizar experimentalmente los VAF generados y comparar numéricamente los resultados con simulaciones computacionales.
- Establecer la relación existente entre la geometría del sustrato (o de la ley focal) y las variaciones en la distribución de presión del frente helicoidal generado.
- Cuantificar el efecto de la discretización espacial de las fuentes radiantes (al emplear multitransductores con arreglo en fase) sobre la estructura del vórtice generado.
- Determinar qué tanto es posible focalizar un VA sin afectar su estructura.

3 Marco teórico

3.1 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 (Nye, 1999). En general, las singularidades de fase se pueden clasificar de tres formas, dependiendo de la forma de la dislocación: tipo eje, tipo tornillo y mixta (Nye & Berry, 1974). En el segundo tipo, 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 contorno circular que rodee el eje principal del haz. La variable m se conoce como la carga topológica del haz acústico. La Figura 1 muestra una representación espacial de dos haces con dislocación de tornillo para cargas topológicas 1 y 2. Estos haces también son conocidos como ondas helicoidales.

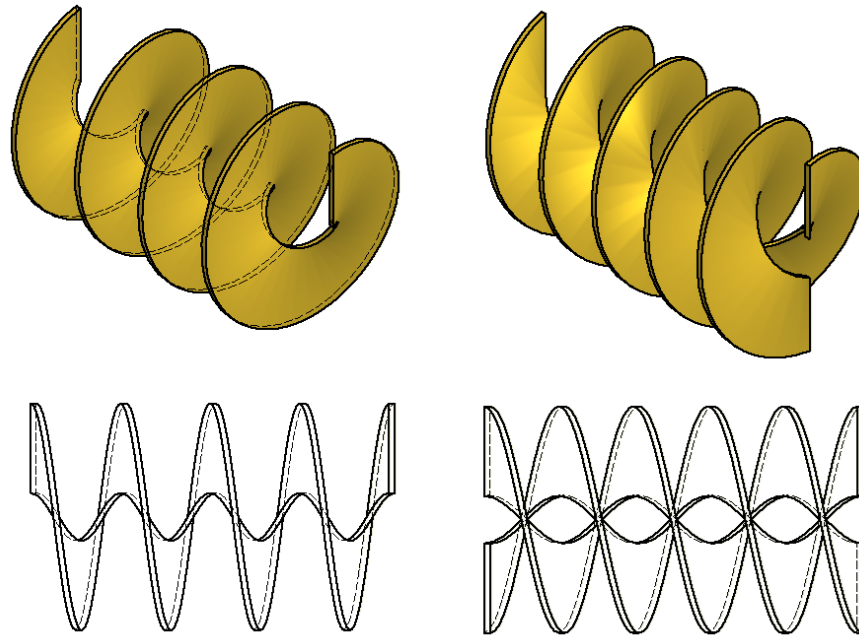


Figura 1. Superficies de fase constante de campos con frente de ondas helicoidal, carga topológica $m=1$ (izquierda) y $m=2$ (derecha). Vista isométrica (arriba) y vista lateral (abajo), fuente: (Quiceno Buitrago, et al., 2012).

Si bien la existencia de un campo de ondas con dislocación de tornillo, así como sus propiedades, fueron identificadas inicialmente en acústica, la mayoría de la investigación subsecuente se ha realizado en óptica, mostrando gran similitud entre la estructura de las dislocaciones de tornillo y los vórtices en un fluido. Esto 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, estos vórtices pueden interactuar con otros, de manera muy parecida a los vórtices en fluidos (Rozas, et al., 1997). También se ha demostrado que una onda helicoidal posee cantidad de momento angular en su distribución espacial (Allen, et al., 1992), propiedad que han sido utilizadas para inducir la rotación de partículas absorbentes dentro de un “*tweezer*”³ (He, et al., 1995) y aplicaciones para atrapar átomos han sido propuestas igualmente.

En el acústica, los vórtices ocurren tanto en régimen lineal como no lineal (Hefner & Marston, 1999) (Thomas & Marchiano, 2003). Las ecuaciones que describen el fenómeno son equivalentes, ya sea óptico, acústico o cuántico. Por consiguiente, la acústica puede ser utilizada para estudiar experimentalmente características especiales de estos campos de la física. Esta propiedad ha sido utilizada para generar y medir el par ejercido por una onda acústica sobre un péndulo de torsión (Santillan & Volke-Sepulveda, 2009). 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 (Gibson, et al., 2004).

Son pocos los estudios en acústica que explotan las propiedades de los vórtices. Cabe mencionar el trabajo de Hefner y Marston, donde 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 piezocomposites⁴ (Hefner & Marston,

³ Pinza, trampa de partículas.

⁴ Material compuesto que tiene propiedades piezoeléctricas.

1999). También en agua y más recientemente, Gspan et al demostraron que éste tipo de campos puede ser producido opto-acústicamente (Gspan, et al., 2004).

Respecto a los VA focalizados, a la fecha, los trabajos reportados en la última década son del campo de la óptica. Los principales desarrollos han estado centrados en la formulación de expresiones analíticas y modelos numéricos para simular el fenómeno (Li, et al., 2009) (Zhang, et al., 2008) (Ganic, et al., 2003).

En particular, la técnica experimental empleada para producir la focalización de un haz incidente ha sido mediante el uso de un accesorio llamado Axicon⁵ (Figura 2).

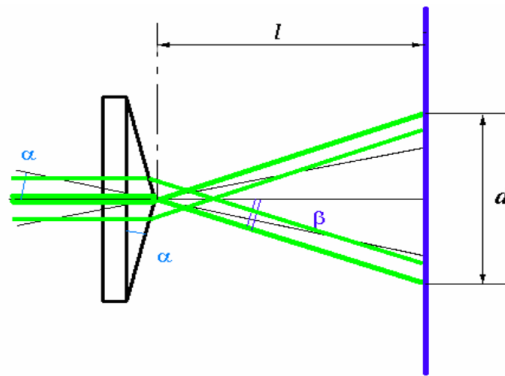


Figura 2. Esquema de un haz de luz pasando a través de un axicon. Fuente: (Mallik 2005)

Este elemento es un tipo de lente especializado que posee una superficie plana- cónica, cuya función principal es difractar un haz de luz incidente y generar un haz tipo anillo (ring, anular o *doughnut*), el cual posee intensidad baja o nula en el eje del haz.

Esta característica ha sido aprovechada en numerosas aplicaciones, tales como: herramientas de alineación de gran exactitud, generación de haces libres de difracción (Lei & Yao, 2004), cirugía de córnea (Ren & Birngruber, 1990), imágenes por tomografía de coherencia óptica (Ding, et al., 2002) y sistemas para atrapar átomos (Kim, et al., 1998). La utilización del axicon en acústica se reporta en trabajos con aplicaciones en ensayos no

⁵ Axicon: Término acuñado por John H. McLeod en 1954 como contracción de las palabras *Axis* (Eje) y *Cone* (Cono).

destructivos de materiales (Burckhardt, et al., 1973) (Nagai & Izuka, 1982), pero no en la focalización de vórtices.

3.2 Los Ferroelectretos Celulares (FCel)

La película electromecánica Emfit® es 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.

La Figura 3 muestra una fotografía de la sección transversal tomada con un microscopio electrónico de barrido, así como una representación esquemática de su espacio de carga. 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 de 200 nm.

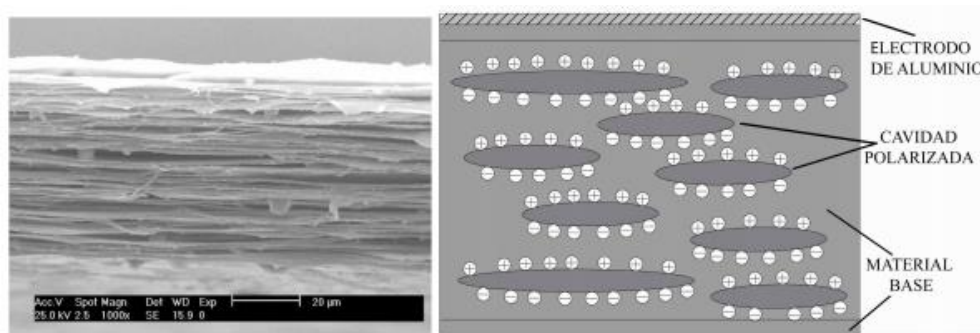


Figura 3. Fotografía de la sección transversal de la película electromecánica Emfit® y representación esquemática de la distribución de carga eléctrica (Ealo, 2009).

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. Y, 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 distintos al polipropileno para superar esta limitación. Transductores hechos con fluoropolímeros han demostrado ser estables hasta temperaturas cercanas a los 90°C (Zhang, et al., 2007). De otra parte, sus características dieléctricas son similares a las del material base, al igual que su resistencia y durabilidad.

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), comparable en orden de magnitud a la de los cerámicos piezoeléctricos – PZTs (100-600 pC/N) y la que exhiben los polímeros ferroeléctricos como el PVDF (≈ 33 pC/N) (Dansachmller, et al., 2005).
- Su inherente flexibilidad debida a la estructura celular interna y a su naturaleza polimérica. Esta característica hace posible de que la película pueda ser adherida sobre cualquier superficie desarrollable, permitiendo fabricar transductores con un patrón de emisión/recepción especificado, superando en este sentido a las tecnologías actuales (Ealo, 2009) (Ealo, et al., 2006) (Ealo, et al., 2008).
- 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 (Lerch, et al., 2007).
- 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) (Kressmann, 2001).
- Su facilidad de manipulación a la hora de fabricar los transductores.

3.3 Sistemas *Phased Array* (PA)

Un multitransductor o arreglo (*array*, en inglés) es un conjunto de transductores con más de un elemento, los cuales pueden ser controlados independientemente para producir un campo acústico cualquiera al sumar la contribución de todos los elementos. En general, los multitransductores suelen tener entre 32 y 128 elementos cuando el arreglo es lineal y entre 200 y varios miles para un arreglo 2D. Los multitransductores son controlados por sistemas llamados *phased array*, los cuales, son una tecnología que puede funcionar tanto en emisión como en recepción. Además, con ese sistema es posible direccionar y focalizar los campos acústicos generados. Cabe anotar que el término multitransductor (*array*) es empleado para identificar el arreglo de varios transductores, mientras que el “sistema PA” hace referencia al equipo que emplea un sistema electrónico que realiza el control sobre cada elemento del multitransductor para la generación de campos acústicos. Tal control es realizado aplicando un conjunto de N retardos temporales en la excitación de cada uno de los elementos para crear un patrón de radiación determinado.

La tecnología de los sistemas con arreglo en fase es ampliamente utilizada en aplicaciones ultrasónicas gracias a que brindan la posibilidad de enfocar y deflejar un haz ultrasónico de manera electrónica, a diferentes profundidades y ángulos, sin necesidad de mover mecánicamente los transductores o una muestra en inspección. 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 (Stephens & Et al, 2008) (Browne & Et al, 2003). 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 (McGarrity & Et al, 1990) (Wilcox & Et al, 2007). Algunas aplicaciones en aire han sido presentadas utilizando cerámicas piezoeléctricas, así como *arrays* capacitivos fabricados con membrana polimérica (Neild & Et al, 2004) (Song & Chimenti, 2006). 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. Entre los trabajos donde se emplean sistemas *PA* para generar Vórtices Acústicos cabe resaltar: la demostración experimental de la propiedad de transferir momento angular a la materia (Volke-Sepúlveda, et al., 2008); el trabajo realizado con un generador *PA* circular de seis elementos con el cual se estudia la selección apropiada de parámetros (número de fuentes, frecuencia de operación, entre otros) para la obtención de vórtices con distribución de fase circular lineal (Gao, et al., 2014); y, el empleo de un arreglo de 1000 transductores para inducir levitación y rotación de un disco de material absorbente acústico en agua (Demore, et al., 2011) (Demore, et al., 2012). También, sistemas *PA* se han usado para la manipulación de micropartículas empleando campos acústicos de ondas estacionarias (no vórtices) (Courtney, et al., 2013)

3.4 Simulación de campos acústicos mediante el DPSM

Para simular el campo de presión acústica radiada por un transductor, sea un mono-elemento o un multitransductor (Pazos Ospina, 2012), se empleó el Método de las Fuentes Puntuales Distribuidas (DPSM) (Placko & Kundu, 2007). Este método permite calcular el campo de presión acústica de un emisor de forma geométrica arbitraria. El DPSM propone que la superficie radiante de un transductor se puede discretizar en un número finito de puntos radiantes (fuentes puntuales), y que la presión acústica en un punto determinado del espacio es igual a la suma (superposición) de cada una de las ondas generadas por las fuentes puntuales (principio de Huyghens).

La siguiente ecuación muestra la forma general del cálculo de presión en un punto cualquiera del espacio usando el DPSM:

$$p(\mathbf{X}) = \sum_{m=1}^N p_m(r_m) \quad (1)$$

Donde p_m es la presión generada sobre la fuente puntual de observación $\mathbf{X}$ por un punto m a una distancia r_m . La Figura 4 muestra un diagrama espacial que emplea el DPSM para estimar campos acústicos.

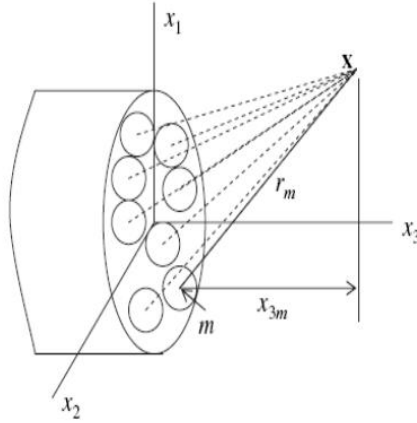


Figura 4. Esquema del cálculo de la presión en un punto con el DPSM (Placko & Kundu, 2007)

$$p_m(r_m) = \frac{e^{ikr_m}}{r_m} \quad (2)$$

La ecuación (2) representa una onda continua a frecuencia única, sin embargo modificando la expresión (1) es posible remplazar $p_m(r_m)$ por una forma de onda arbitraria $p_m(t)$, haciendo posible calcular la presión en un punto radiada por un transductor bajo un tipo de excitación diferente a la onda continua.

$$p(\mathbf{X}) = \sum_{m=1}^N \frac{p_m\left(t - \frac{r_m}{c}\right)}{r_m} \quad (3)$$

Donde c , es la velocidad de propagación de la onda acústica en el medio.

3.5 Transducción de ultrasonidos en aire

La selección del material, tecnología y tipo de transductor de acuerdo a la aplicación es un factor determinante en los ultrasonidos en aire, ya que el utilizar el aire como medio tiene las siguientes limitaciones: el desacople de impedancias entre el aire y el material del transductor, la atenuación, la estabilidad del canal de propagación y la interferencia acústica (Ealo, 2009).

La diferencia de impedancia entre dos medios determina la cantidad de energía que atraviesa de un medio a otro. Si una onda plana acústica incide normalmente desde un medio

de impedancia Z_1 sobre otro de impedancia Z_2 , solo una fracción de la energía acústica logrará superar la interfaz que divide los medios. Dicha fracción se conoce como el coeficiente de transmisión (T) en intensidad y se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

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

La Tabla 1 muestra los valores del coeficiente de transmisión entre varios medios. Para tener una idea del problema del desacople de las impedancias en el aire, se puede tomar como ejemplo los valores mostrados para la transmisión entre agua y aluminio, en el cual solo el 30% de la energía se transmite mientras que el 70% es reflejado. Ahora, si se analiza la transmisión entre aire-aluminio se nota que solo una diezmilésima parte de la energía es transmitida.

Tabla 1. Impedancia acústica y coeficientes de transmisión (Ealo, 2009)

Medio 1	Medio 2	T^6
Agua	Aluminio	0.3
Aire	Aluminio	0.0001
Agua	Acero	0.13
Aire	Acero	0.000037

Otra limitación es la atenuación por absorción, que a frecuencias alrededor de 1MHz es considerable. La distancia a la cual la amplitud de una señal es reducida en $1/e$, llamada distancia de extinción, 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, 0.26 m y 0.034 m, respectivamente. La estabilidad del canal de propagación también es crítica, debido a que los cambios en temperatura y humedad pueden inducir ruido en los dispositivos alterando la calidad de las señales. La velocidad de propagación del medio es importante porque el tiempo necesario para obtener una medida nunca podrá ser inferior al

⁶ Coeficiente de transmisión calculado con los siguientes valores de impedancia acústica: Aire, 420 Rayl; agua, 1.5 MRayl; aluminio, 17 MRayl; y acero, 45 MRayl.

empleado en la propagación de la onda desde su emisión hasta su recepción. Esta limitación tiene mayor relevancia en aplicaciones de control de posición y de inspección en línea de defectos.

Por último, el fenómeno de interferencia acústica puede ser ocasionado por ruido ultrasónico producido por elementos circundantes como: ventiladores, aires acondicionados, alarmas antirrobo, máquinas de cocina, lámparas fluorescentes, etc.

.

4 Materiales y métodos

Para producir VA's, en este trabajo se han planteado dos de cuatro técnicas conocidas⁷, la de generación a partir de un único transductor de superficie con forma cónico – helicoidal y la que emplea un *array* de 30 transductores piezo-cerámicos con una distribución hexagonal. Para estimar y estudiar diversas alternativas de generación de VAF a partir de las dos técnicas propuestas, se ha utilizado el Método de las Fuentes Puntuales Distribuidas (DPSM) para simular computacionalmente el campo acústico radiado dentro de unas coordenadas de observación de interés.

4.1 Generadores de Vórtices Acústicos Focalizados (VAF)

Los Generadores de VAF son los dispositivos (transductores) empleados en este trabajo para desarrollar la investigación. Se utilizaron dos tecnologías, entre las cuales, la primera consiste en el desarrollo de un transductor de geometría especial que permite generar VAF con focalización cónica. La segunda es la utilización de un multitransductor plano de 30 elementos para la focalización cónica, esférica o parabólica de vórtices.

4.1.1 Diseño y construcción de un transductor mono-elemento Generador de Vórtices Acústicos Focalizados (GVAF) en Aire

La tecnología de ferroelectretos celulares permite la fabricación de transductores de “superficie desarrollable”⁸ para la generación de campos ultrasónicos especiales. Gracias a la alta flexibilidad mecánica (similar a la de una hoja de papel) que esta película posee, es posible adherirla sobre un modelo sólido (sustrato) con la forma de la superficie desarrollable deseada. La conformación de un campo acústico con frente de ondas helicoidal o vórtice se hace posible debido a que un fragmento de Emfit® (denominación comercial de la película empleada) al ser excitado eléctricamente, vibra en dirección normal a la superficie helicoidal sobre el cual fue solidariamente adherido. De acuerdo con esto, se puede construir un

⁷ Las otras dos técnicas para la generación de vórtices son: la de conversión de modo (Santillan & Volke-Sepulveda, 2009) (Volke-Sepúlveda, et al., 2008) y la técnica opto-acústica (Gspan, et al., 2004).

⁸ Las superficies desarrollables son aquellas que pueden ser extendidas o dispuestas sobre un plano sin distorsionarlas, comprimirlas o estirarlas.

transductor generador de vórtices en aire a la medida según sean escogidos los parámetros que lo definen, tales como: diámetro del transductor, frecuencia de trabajo y carga topológica. Cabe resaltar que la superficie sobre la cual se desea adherir la película ha de ser desarrollable, de manera que pueda ser perfectamente solidaria al sustrato (sin arrugas), de lo contrario, el material Emfit® se deteriora y no funciona adecuadamente (Ealo, 2009). Esta característica hace que de las tres técnicas de focalización exploradas en este trabajo (cónica, esférica y parabólica), únicamente la focalización a partir de la combinación de las superficies de un helicoides y un cono es desarrollable, ya que es la única que puede ser descompuesta en un segmento plano sin arrugarse. Este criterio de “desarrollabilidad” de la superficie primó por encima del basado en los resultados de simulación (ganancia de presión, profundidad del haz, entre otros) en el momento de diseñar el transductor mono-elemento.

4.1.1.1 Diseño y selección de parámetros del GVAF mono-elemento

Se empleó *software* CAD⁹ para el diseño del sustrato cónico- helicoidal para un GVAF con los siguientes parámetros:

- Frecuencia de trabajo: 70 kHz
- Diámetro exterior: 40 mm
- Diámetro agujero central: 6 mm
- Carga topológica: 1
- Ángulo de construcción del cono: 20 grados

Para la selección de los parámetros se tuvo en cuenta lo siguiente:

Frecuencia de trabajo

Es la frecuencia a la cual se desea operar y generar un vórtice. Pese a que la película electromecánica Emfit® tiene un amplio rango de frecuencias utilizable (de 50 a 350 kHz aprox.) (Ealo, 2009), en este trabajo quedó definida por el rango de sensibilidad del instrumento de medida: un micrófono de presión de 1/8” (modelo 40DP, GRAS, Dinamarca). Este micrófono responde eficientemente en un rango de frecuencias de 6.5 Hz a 140 kHz con

⁹ CAD: *Computer-Aided Design*

una desviación de ± 2 dB. Por lo tanto, se optó por dimensionar una superficie helicoidal con paso¹⁰ calculado para una frecuencia de 70 kHz, la cual está dentro del rango de sensibilidad del micrófono disponible, y, a la vez, permite generar y medir vórtices de carga topológica 2 al excitar el transductor a 140 kHz.

Diámetro exterior y agujero de la sección circular

La elección del diámetro exterior de 40 mm y del agujero central de 6 mm se hizo con el fin de que coincidiera con las dimensiones de un transductor generador de vórtices no focalizado existente, para permitir la comparación. La existencia de un agujero central se requiere en la etapa de construcción del transductor para facilitar el pegado de la película Emfit® sobre el sustrato. Las simulaciones computacionales mostraron que la existencia de ese agujero no afecta significativamente los resultados cuando este agujero no excede, aproximadamente, el 20 % del diámetro exterior del transductor.

Carga topológica

La carga topológica de un vórtice es la relación entre el paso del helicoide y la longitud de onda acústica. Se optó por el diseño de un GVAF de carga topológica unitaria (paso = longitud de onda) con el objeto de facilitar la construcción (helicoide de una sola espira)¹¹, además, es posible la generación de vórtices de carga topológica 2 al excitar el transductor al doble de la frecuencia de operación seleccionada, esto es 140 kHz.

Ángulo de construcción del cono

Resultados preliminares de simulación numérica empleando DPSM permitieron seleccionar un ángulo de construcción de cono de 20° (140° de apertura).

4.1.1.2 Construcción del transductor mono-elemento

Para este trabajo se maquinó un sustrato en aluminio (Figura 5), el cual tiene la doble función de dar la forma cónico-helicoidal a la película Emfit® y servir como electrodo

¹⁰ Paso: espacio existente entre dos hilos de un tornillo. La topología de un vórtice usualmente se compara por analogía a los tornillos.

¹¹ Es posible diseñar GVAF con sustratos que posean dos o más espiras.

inferior del transductor. Para fijar el Emfit® al sustrato se empleó una cinta adhesiva especial de cobre que permite continuidad eléctrica desde el electrodo hasta la cara inferior de la película. La cara superior (cara metalizada) de la película constituye el electrodo superior del transductor, el cual es sujetado sobre el sustrato mediante cuatro tornillos (ver Figura 6). En este trabajo se empleó el procedimiento de fabricación del transductor basado en ferroelectretos descrito por Ealo (Ealo, 2009).

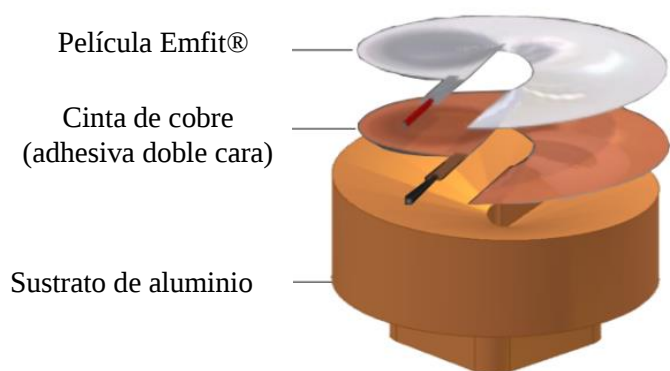


Figura 5. Esquema del transductor GVAF mono-elemento

En la Figura 6 se muestra una imagen del transductor construido. Se puede ver el terminal eléctrico del electrodo superior y un tornillo saliente en una cara lateral del transductor que se emplea como elemento de sujeción a un soporte.

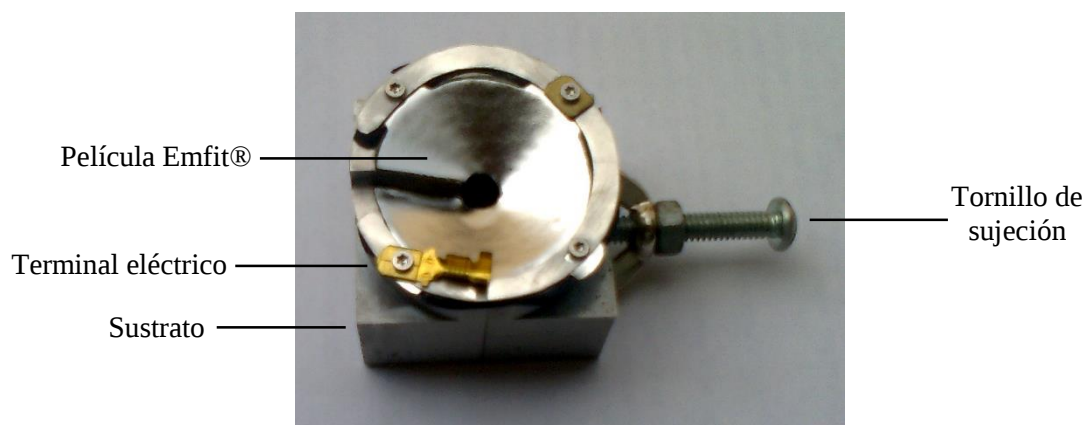


Figura 6. Transductor GVAF construido

El segundo electrodo del transductor puede ser tomado directamente del sustrato de aluminio debido a la característica conductiva del material. Un aspecto importante a considerar (no visible en la fotografía) es la adecuación de bases de resina roscadas y cinta aisladora debajo de los tornillos del electrodo superior. Esta es una condición necesaria para impedir corto circuito en el transductor.

Relacionado con la fabricación del transductor, se deben mencionar algunas dificultades o consideraciones especiales:

- El maquinado del sustrato de una superficie combinada cónico-helicoidal demandó la utilización de un centro de mecanizado de control numérico (CNC) y la programación simulada del proceso en herramientas CAM¹², debido a su complejidad. Este proceso requirió aproximadamente de 10 horas de trabajo, distribuidas en la simulación y modelado CAM, preparación y alistamiento de la máquina, y, el proceso de maquinado. El acabado final de la superficie se logró mediante pulido manual empleando papel de lija de grano fino.
- El proceso de adherir la película Emfit® al sustrato requirió que previamente se ganara destreza manual realizando varias pruebas con papel adhesivo. Este material se fractura con facilidad, las arrugas tampoco son permisibles y una vez pegado sobre la cinta adhesiva de cobre no hay vuelta atrás, debe desprenderse y recortar y pegar una nueva película. Además, el costo y la difícil consecución del Emfit® (no disponible en el mercado nacional) demandaban no cometer errores.

4.1.2 GVAF mediante sistemas *Phased Array*

Para la generación de VAF con sistemas *Phased Array*, en este trabajo se empleó un multitransductor existente (González Hernández, 2013). Este multitransductor está compuesto por 32 transductores piezo-cerámicos de 40 kHz (sólo 30 activos) dispuestos a una distancia inter-elemento de 13.6 mm y con una apertura nominal de 80 mm aproximadamente. El multitransductor tiene forma hexagonal, siguiendo una distribución

¹² Manufactura asistida por computador

triangular de manera que la distancia entre centros de elementos adyacentes es la misma, como se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Multitransductor plano de 32 elementos piezo-cerámicos de 40 kHz.

La Figura 8 presenta la caracterización electro-acústica de un elemento piezo-cerámico del *array*, mostrando la respuesta acústica temporal y en el dominio de la frecuencia ante una señal de dos pulsos cuadrados centrados en 40 kHz, con una duración de 1.5 ms, a una distancia de 30 cm. El diagrama polar del patrón de directividad se ve en la Figura 9

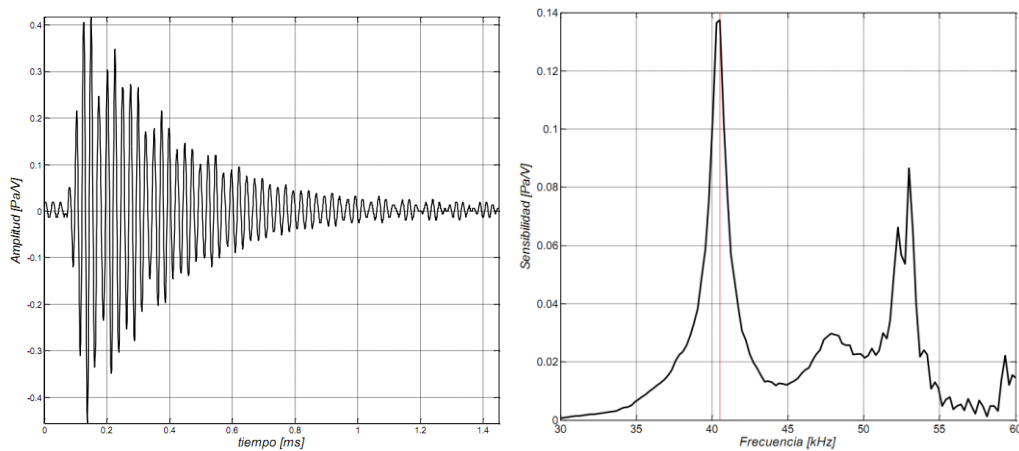


Figura 8. Respuesta electro-acústica de un transductor piezo-cerámico del *array* hexagonal. Izquierda: Respuesta temporal ante dos pulsos cuadrados centrados en 40 kHz. Derecha: Respuesta en frecuencia. Fuente: (González Hernández, 2013)

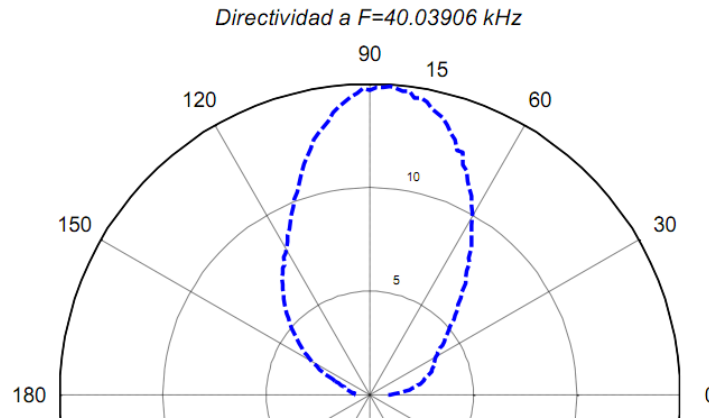


Figura 9. Patrón de directividad de un transductor piezo-cerámico del *array* hexagonal. Fuente: (González Hernández, 2013)

De las figuras se puede ver que cada transductor, entre 30 kHz y 45 kHz responde como un sistema resonante de segundo orden a una frecuencia aproximada de 40 kHz y que a -3 dB poseen una directividad de 40° aproximadamente.

Ley de retardos temporales

La idea básica para generar vórtices acústicos mediante multitransductores es programar el sistema *Phased Array* asignando una ley de retardos de forma que al excitar los transductores se conforme un frente de ondas helicoidal como resultado del aporte producido por cada elemento del *array*. Visto de otra forma, se puede decir que a cada elemento del *array* se le asigna un retardo temporal que, multiplicado por la velocidad del sonido en el medio, corresponde a una altura determinada dentro de una superficie helicoidal. Así, la ley de retardos genera una superficie de fase constante de geometría helicoidal. Esta ley de retardos temporales es completamente análoga a las leyes focales empleadas en las simulaciones computacionales. Por lo tanto, la generación de VAF por medio de superficies cónica, esférica y parabólica, puede hacerse por la superposición de dos o más leyes de retardos que generen el campo deseado. Por ejemplo, la Figura 10 muestra una representación espacial virtual de los retardos temporales que deben aplicarse en la excitación de cada uno de los transductores de un *array* hexagonal plano de 30 elementos para la generación de VAF con focalización cónica.

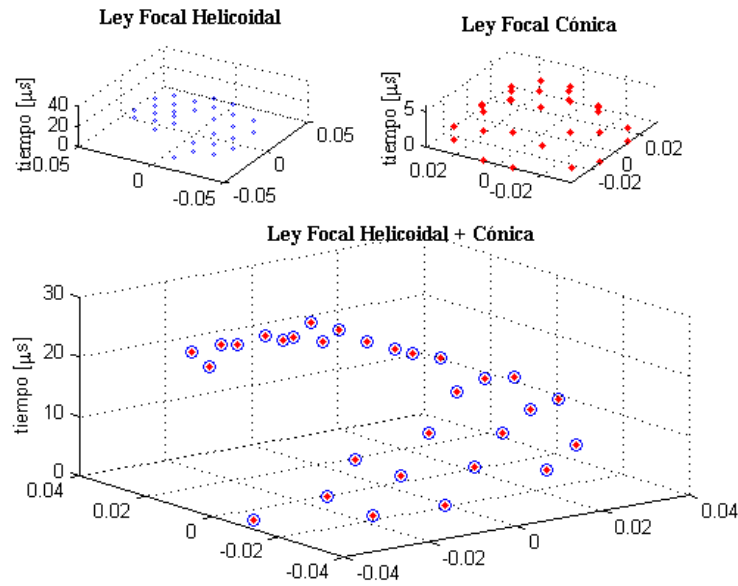


Figura 10. Leyes de retardos para simular un Vórtice Cónico en un *array* hexagonal de 30 elementos.

La utilización de una ley de retardos adicional que genere deflexión angular del haz (no planteado en este trabajo) es completamente posible empleando el mismo principio. El estudio de vórtices acústicos deflectados ha sido reportado por Ealo et al (Ealo, et al., 2012).

4.2 Simulación computacional del campo de presión acústica

Se implementaron algoritmos de programación que difieren en algunos aspectos de acuerdo a cada técnica de generación de VAF. Aunque se emplea el mismo método numérico, se debe tener en cuenta que la técnica de generación es diferente, así pues, mientras que con el transductor mono-elemento se pretende emular a una superficie que vibra en fase, con el multi-transductor se emula el patrón de radiación de cada elemento y se evalúa el campo compuesto por la suma de todos los elementos.

4.2.1 Simulación de transductores mono-elemento

El simulador de transductores mono-elemento es un algoritmo computacional escrito en el lenguaje Matlab® y se ha empleado en este trabajo para evaluar la capacidad de focalización de los Vórtices usando diferentes geometrías. De este modo, las superficies

cónica, esférica y parabólica se usan para producir el efecto de focalización sobre un vórtice. Para ello, se construye una superficie compuesta por un helicoides y una de las tres que focalizan (cónica, esférica o parabólica). La Figura 11 presenta gráficamente el resultado de dicha superposición para los tres casos.

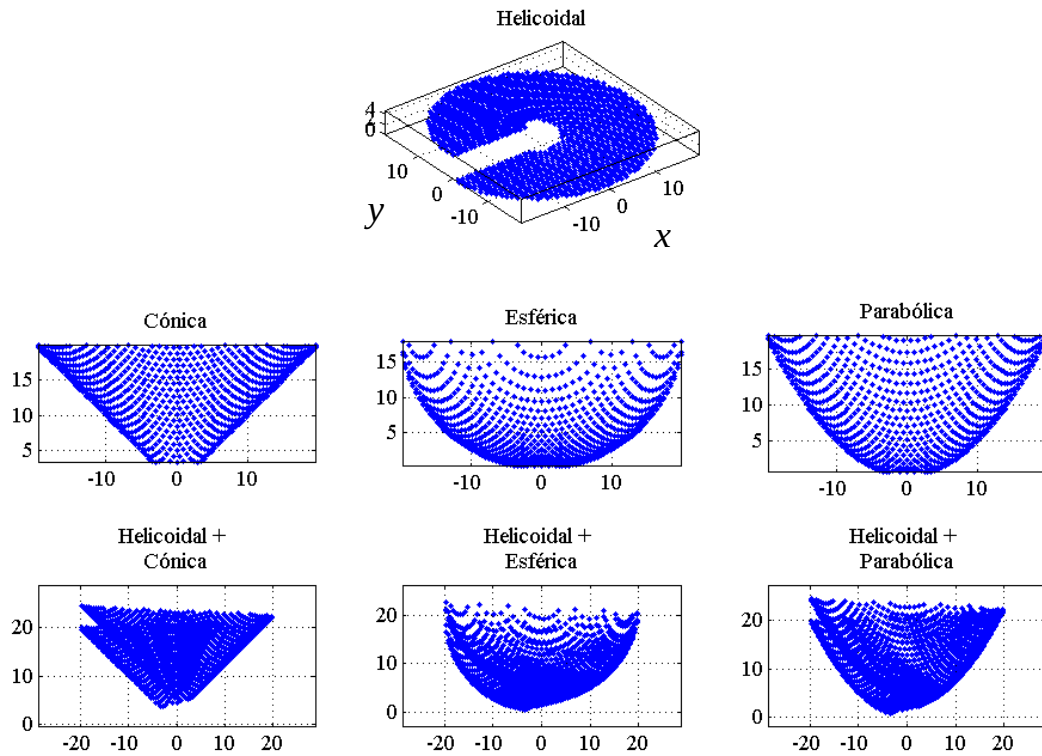


Figura 11. Superficies para generar vórtices focalizados a partir del método de las fuentes puntuales.

Parametrización de las superficies de focalización

Cada una de las superficies empleadas para focalizar se parametrizó de acuerdo a su geometría. Para el caso de la superficie cónica, se definió el “ángulo de construcción del cono” como el ángulo entre el plano horizontal inferior y la superficie cónica (ver Figura 12). Cabe anotar que se definió el ángulo de construcción por facilidad de interpretación intuitiva, de esta manera, un ángulo de construcción de 0° describe un vórtice sin focalización. Además, se debe tener en cuenta que regularmente en la literatura los conos o superficies cónicas están definidos por su ángulo de apertura y no el de construcción como se hizo en este trabajo.

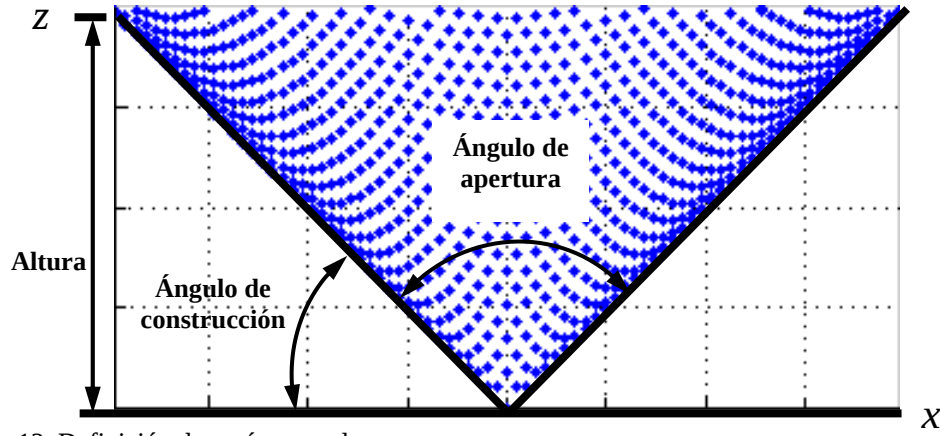


Figura 12. Definición de parámetros de cono

Para el caso de las superficies esférica y parabólica, se empleó la distancia focal (distancia desde el plano inferior al punto de localización del foco) como parámetro de generación de cada una de ellas (Figura 13).

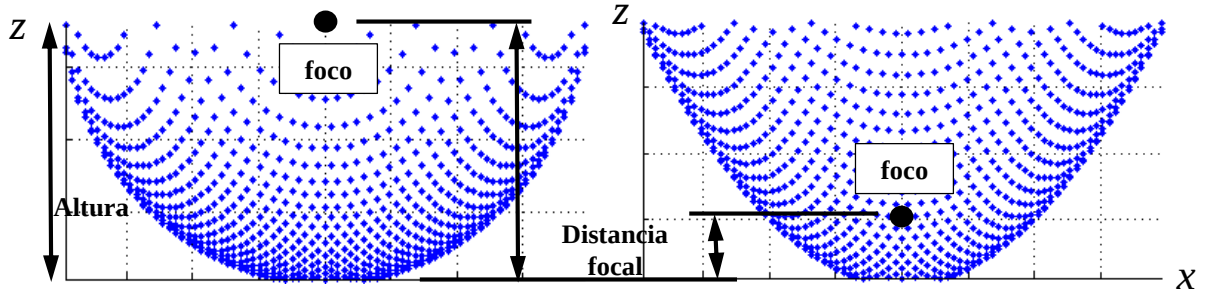


Figura 13. Localización del foco para las superficies: esférica (izquierda) y parabólica (derecha)

Se emplearon las expresiones (5) y (6) para calcular la altura, z , necesaria para producir superficies de focalización esférica y parabólica, respectivamente.

$$z = DF - \sqrt{DF^2 - (x^2 + y^2)} \quad (5)$$

$$z = \frac{1}{4DF} (x^2 + y^2) \quad (6)$$

Donde, x , y son las coordenadas en el plano $z = 0$ de cada punto de la superficie helicoidal generadora (ver Figura 11) y DF representa la distancia de localización del foco de la superficie de focalización respecto a dicho plano.

De acuerdo a lo visto anteriormente, cada superficie producirá efectos de focalización al vórtice según se modifique o varíe su parámetro generatriz (ángulo de construcción o distancia focal, según sea el caso). Los parámetros de altura, diámetro y número de fuentes puntuales se mantendrán constantes para todos los casos a evaluar. El hecho de que estos parámetros se conserven constantes suponen la dificultad de que el número de fuentes por longitud de onda – el cual es un parámetro de entrada en el algoritmo de cálculo – se verá afectado cuando se focaliza de alguna forma, debido al desplazamiento en altura, z , que se aplica a cada fuente generadora. Consideraciones especiales fueron tenidas en cuenta para impedir afectación significativa en los resultados.

4.2.2 Simulación del *array* hexagonal de 30 elementos

El simulador computacional del multitransductor (implementado en Matlab®) es un código que emula el campo de emisión de un *array* de 30 transductores piezo-cerámicos comerciales dispuestos sobre un arreglo hexagonal (sección 4.1.2). A diferencia del simulador mono-elemento que posee n fuentes puntuales por longitud de onda que construyen la superficie de generación, este simulador del *array* está compuesto por 30 fuentes puntuales generadoras que poseen la misma ubicación espacial de cada elemento del multitransductor real. El simulador es entonces, un generador de vórtices que se forman con la composición del campo de tan solo 30 fuentes que emiten con un patrón de directividad determinado, que puede ser omnidireccional o el patrón de radiación real de un transductor. Luego, la generación de VAF puede hacerse por la superposición de la ley de retardos helicoidal con una que produzca focalización cónica, esférica o parabólica. La estimación del campo acústico radiado por el *array* se hace mediante el DPSM ajustando la ecuación (3) con la adición de dos términos que incluyan el efecto de las leyes de retardos, quedando así:

$$p(\mathbf{X}) = \sum_{m=1}^N \frac{p_m\left(t - \frac{r_m}{c} - \tau_1 - \tau_2\right)}{r_m} \quad (7)$$

Donde τ_1 y τ_2 representan los tiempos calculados por las leyes de retardos helicoidal y de focalización, respectivamente. Una ley de retardos adicional que produzca deflexión angular del vórtice es completamente posible y solo bastaría adicionar un nuevo término que

incluya los tiempos necesarios para generar la deflexión del haz. De igual forma a como se mostró en el apartado del multitransductor de 30 elementos (Figura 10), la representación espacial virtual de los retardos temporales aplica en el caso de las fuentes generadoras del simulador del arreglo hexagonal de 30 elementos, para generar el vórtice y focalizarlo cónicamente.

4.2.3 Planos de observación

El Método de las Fuentes Puntuales plantea la discretización en un número finito de fuentes, no solo de las fuentes emisoras (generador de vórtices), sino también de los planos de observación donde se desea estimar los resultados de campo radiado (Figura 14). El presente trabajo usa los siguientes planos de observación:

- Planos transversales: a una distancia dada del plano de origen $Z=0$.
- Plano azimutal: plano $Y=0$, coincidente con el eje principal del vórtice.
- Plano de elevación: plano $X=0$, coincidente con el eje principal del vórtice.

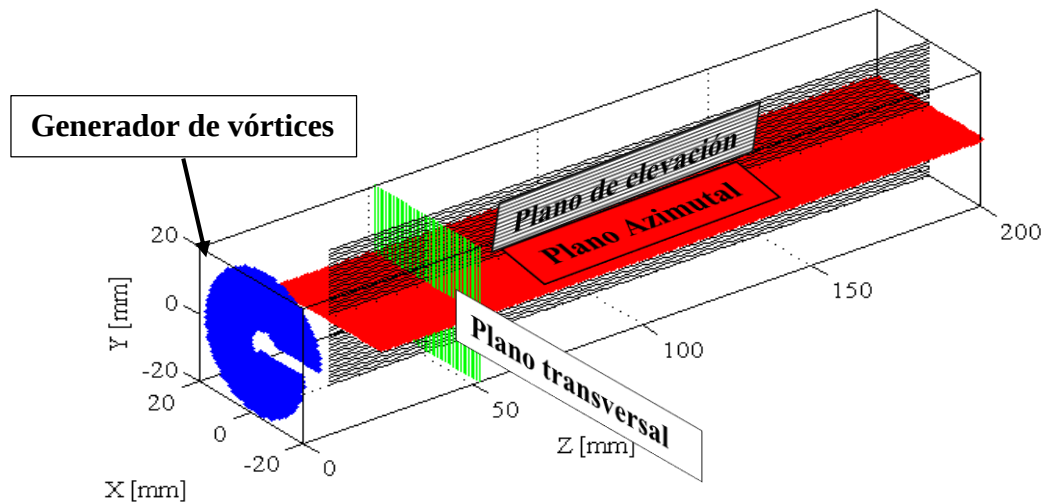


Figura 14. Planos de observación del campo radiado

Pruebas preliminares mostraron que se obtienen resultados aceptables cuando se garantiza una discretización de los planos observadores con distancias de separación de al menos 1 mm en el simulador del mono-elemento y 1.7 mm para los del simulador del multitransductor. En este trabajo se empleó una distancia de separación entre puntos de

observación de 0.2 mm y 0.5 mm para los planos del simulador del mono-elemento y del multitransductor, respectivamente. Así pues, se tienen suficientes fuentes puntuales observadoras y la cantidad total de ellas variará de acuerdo al tamaño del plano de observación que se desee estudiar.

4.3 Montaje experimental para la generación y caracterización de VAF en aire

La Figura 15 muestra un esquema del montaje experimental. Con este montaje se midió el campo de presión azimutal y transversal en propagación libre de los transductores fabricados. La configuración del montaje consiste básicamente de tres sistemas: el de generación de los vórtices acústicos (excitación de transductores), dispositivos de medición acústica y la unidad de control de posición (para medición de campos acústicos sobre líneas y planos predefinidos).

Para la generación de VAF se empleó el transductor mono-elemento construido y el multitransductor de 30 elementos piezo-cerámicos, los cuales fueron excitados con una señal sinusoidal de 10 ciclos, a frecuencias de 70 kHz y 40 kHz, y amplitudes de 150 Vpp y -100 Vpp, respectivamente. Las señales de excitación se aplicaron empleando un generador de señales arbitrarias (Modelo AFG3022C, Tektronix, Beaverton, Oregon, Estados Unidos) y un amplificador de voltaje (Modelo WMA-300, Falco Systems, Amsterdam, Holanda) para el transductor mono-elemento; y, un sistema *Phased Array* (Modelo SITAU 32-128, Daseel Sistemas, Madrid, España) para el multitransductor de 30 elementos.

Los transductores fueron ubicados sobre un soporte fijo y, el dispositivo de medida, un micrófono calibrado (1/8 pulg., Tipo 40BF, GRAS, Holte, Dinamarca) sobre una unidad de control de posición XY (Modelo NSC-G2 eTrack Linear Stage, Newmark System, Rancho Sta Marg, Estados Unidos). Dicha unidad permite controlar de forma precisa la posición del micrófono, tiene una resolución de 1.3 μm y se usó para tomar medidas sobre planos (o líneas) de interés. Cabe anotar que cada sistema de excitación de transductores se emplea independientemente para cada caso, es decir, no se emplearon simultáneamente los dos tipos de generación de VAF.

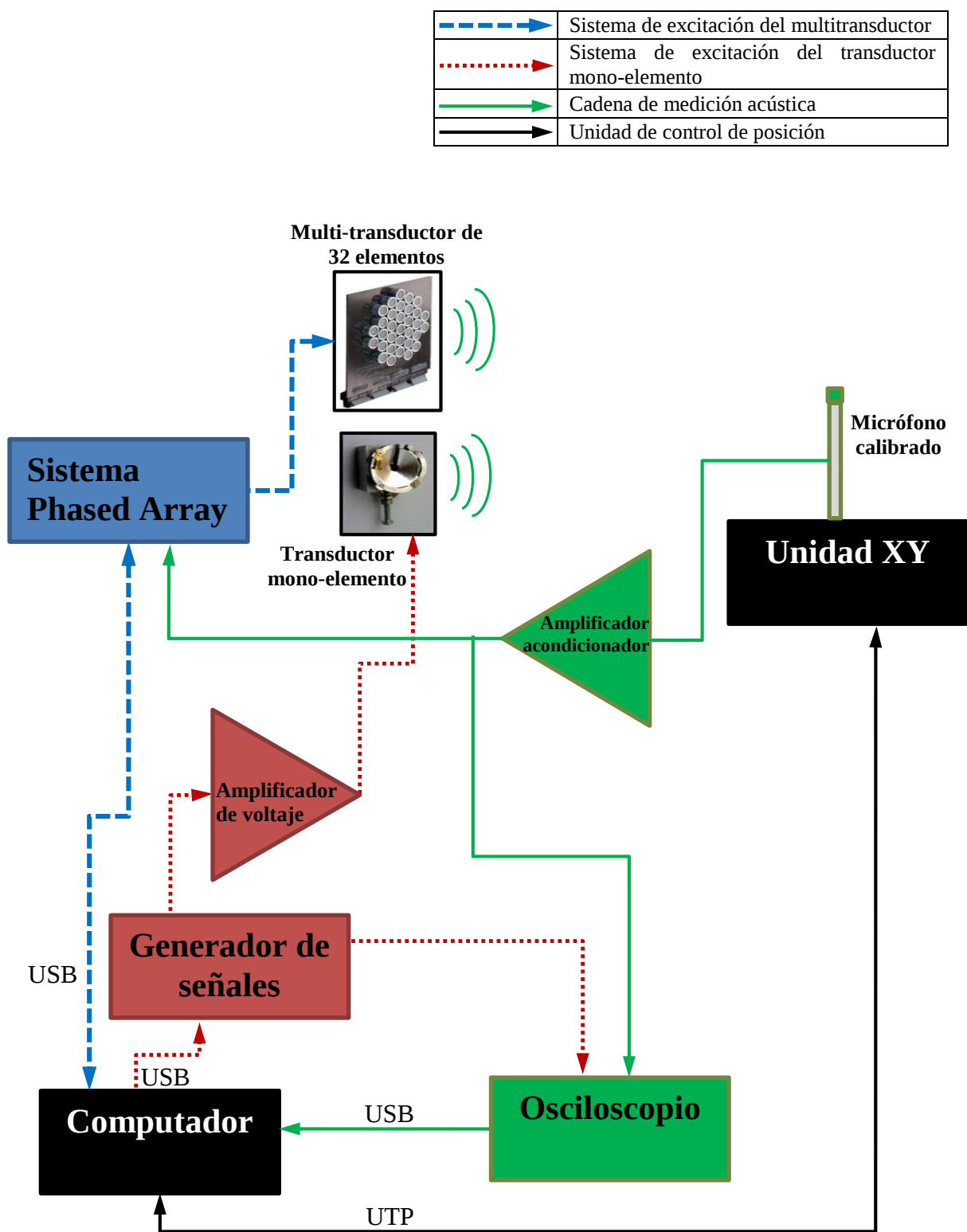


Figura 15. Esquema del montaje experimental utilizado

Completa la cadena de medición acústica un amplificador/acondicionador de señal (Nexus 2690 - 0F2, Bruel & Kjaer, Nærum, Dinamarca) y un osciloscopio digital (Modelo TDS 2014C, Tektronix, Beaverton, Oregon, Estados Unidos), el cual es controlado por computador permitiendo almacenar los datos para su posterior procesamiento.

5 Resultados

A continuación se presentan los resultados de simulación computacional y caracterización experimental de VAF empleando las dos técnicas propuestas en este trabajo: a partir de un transductor mono-elemento de película Emfit® y el multitransductor de arreglo hexagonal de 30 elementos piezo-cerámicos.

5.1 Resultados con el transductor mono-elemento

En este apartado se presentan los resultados de simulación y caracterización del transductor mono-elemento. La herramienta computacional se trabajó para diferentes formas de focalización empleando uno de los simuladores implementados usando DPSM. Posteriormente, se presentan las mediciones experimentales del GVAF mono-elemento diseñado a partir de los resultados de simulación.

5.1.1 Evaluación de las superficies de focalización

En las simulaciones computacionales, el área radiante del transductor se construye mediante N fuentes puntuales, configuradas como radiadores omnidireccionales, distribuidas dentro de un arreglo circular y forma cónico-helicoidal de 4.9 mm de paso¹³ en la espira. Los resultados que se muestran abajo corresponden a un código computacional que emplea 1506 fuentes generadoras¹⁴ (Figura 11); y, planos de observación azimutales y de elevación (40 mm x 200 mm); y, transversales (20 mm x 20 mm) discretizados cada 0.2 mm.

5.1.1.1 Vórtice con focalización cónica

Las Figura 16 y Figura 17 muestran los planos azimutales de presión para un vórtice con focalización cónica (Vórtice Cónico) y diferentes ángulos de construcción de cono (de 0 a 45 grados). En las figuras, “ A_{max} ” representa la razón de la amplitud máxima sobre el número de fuentes radiantes y “ Z_{pos} ” la distancia de localización en Z del punto donde se

¹³ El paso de 4.9 mm equivale a una longitud de onda en aire a 70 kHz.

¹⁴ Las 1506 fuentes se producen al discretizar el área circular con 5 fuentes por longitud de onda a la frecuencia seleccionada (70 kHz en este caso).

presenta “ A_{max} ”. En la parte inferior de cada imagen se observan las fuentes radiantes formando la estructura helicoidal que cambia con la conicidad.

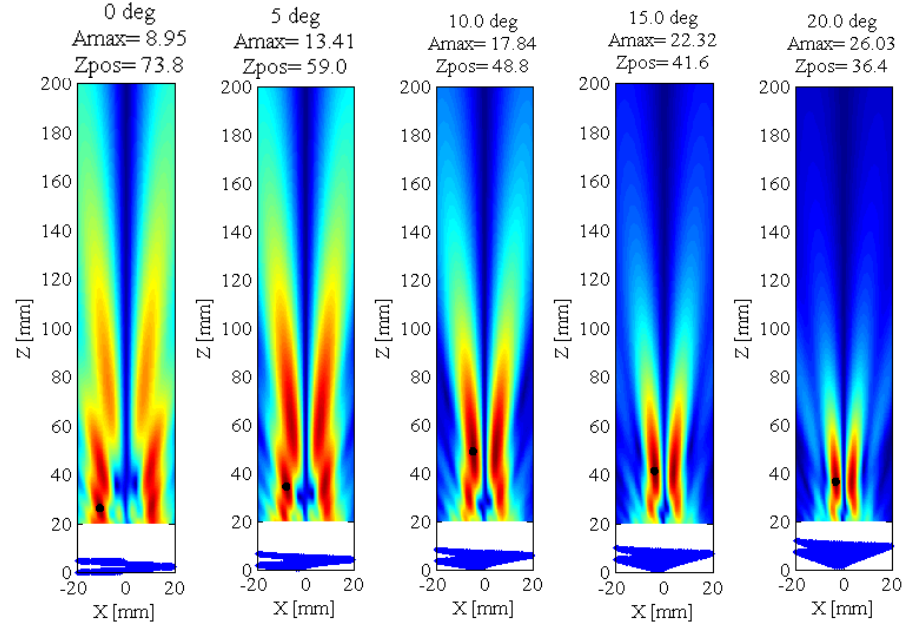


Figura 16. Planos azimutales de presión simulados para un vórtice cónico a 70 kHz y ángulos de focalización de 0° a 20°

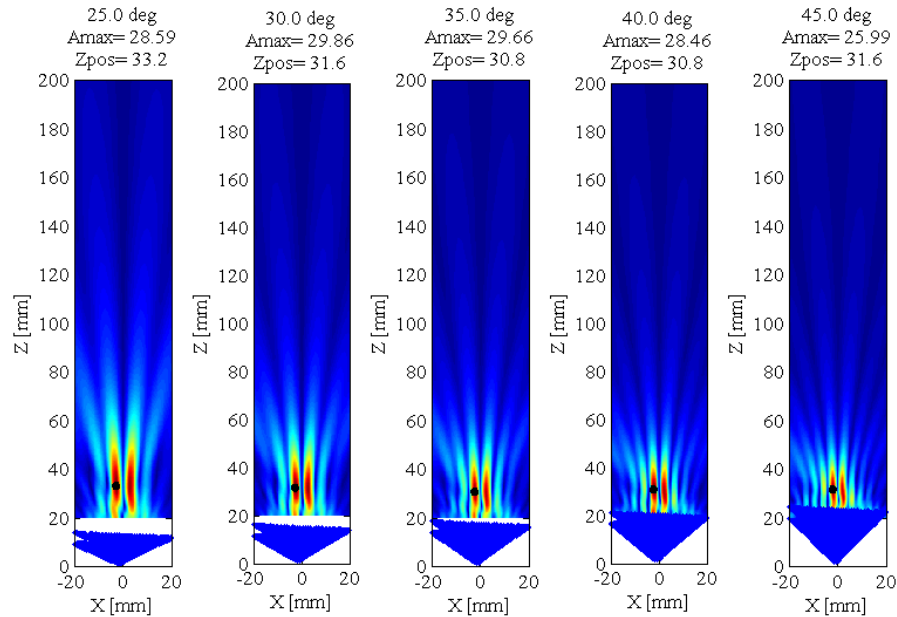


Figura 17. Planos azimutales de presión simulados para un vórtice cónico a 70 kHz y ángulos de focalización de 25° a 45°

Las figuras muestran concentración de la energía acústica conforme se incrementa el ángulo de cono. Además, la profundidad del haz disminuye al aumentar el ángulo de focalización. Asimismo, la amplitud máxima “ A_{max} ” de la presión incrementa hasta alcanzar un máximo para un ángulo de 30 grados. Para los ángulos mayores a 30, la presión máxima disminuye ligeramente. Se observan cambios significativos en la estructura del campo, tal como un estrechamiento del haz, degradación del nulo de presión en el eje principal y una ganancia significativa de presión o energía concentrada en una región cada vez más pequeña. La Figura 18 muestra los planos transversales de observación ubicados a la distancia (Z_{obs}) donde aparece la amplitud máxima (A_{max}) de los planos azimutales mostrados en las Figura 16 y Figura 17 para cada distancia focal. Esto significa que se tendrán diferentes distancias en Z de los planos transversales observadores, pues, para propósitos comparativos, se requiere que cada vórtice se conforme plenamente. De los planos transversales graficados se puede ver que se reduce el ancho del haz (zona anular de color rojo) y el núcleo (punto central de color azul), además, la magnitud de “ A_{max} ” difiere de la calculada en los planos azimutales, esto debido a que, los valores de presión máxima no se localiza sobre los planos azimutales seleccionados (planos $Y=0$) sino sobre otras regiones por encima o por debajo de éstos. También, se puede ver el aumento progresivo de la presión y la distorsión de la forma de anillo, volviéndose ovalado y no uniforme.

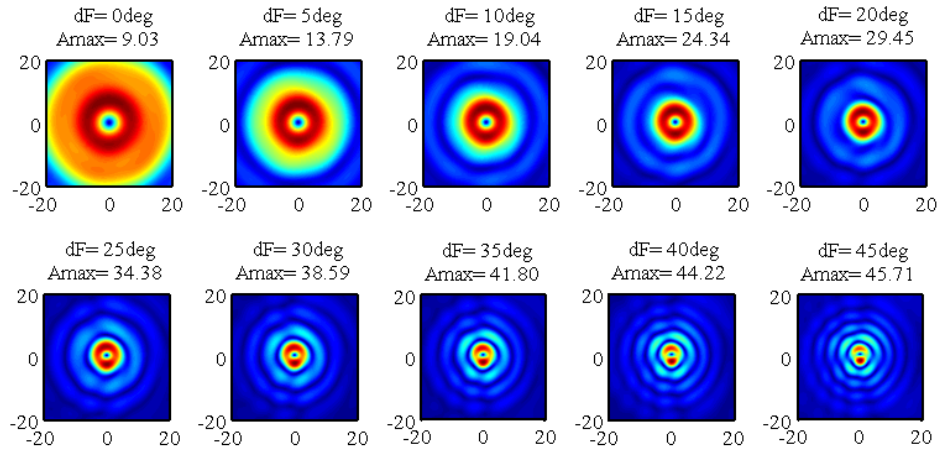


Figura 18. Amplitud de presión en planos transversales simulados de observación ubicados a la distancia de localización (Z_{obs}) de la presión máxima (A_{max}) para un vórtice con focalización cónica y ángulos de construcción de cono de 0 a 45 grados.

Las diferencias de “*Amax*” reportadas en los planos azimutales se deben a que el núcleo se ha desplazado ligeramente por encima del plano $Y=0$. La Figura 19 muestra los patrones laterales de emisión (horizontal y vertical) tomados de un plano transversal a 37 mm para un vórtice cónico a 20 grados y se puede ver que, el núcleo del vórtice – el cual se espera que se mantenga cercano a presión cero – sobre el patrón lateral horizontal representa un 22% de la presión máxima, mientras que, en el patrón vertical se acerca mucho más al cero de presión, mostrando que éste sí pasa por el núcleo del vórtice. De lo visto en esta figura se puede determinar que un plano observador de elevación (patrón o envolvente vertical) coincide, en este caso, con el núcleo del vórtice.

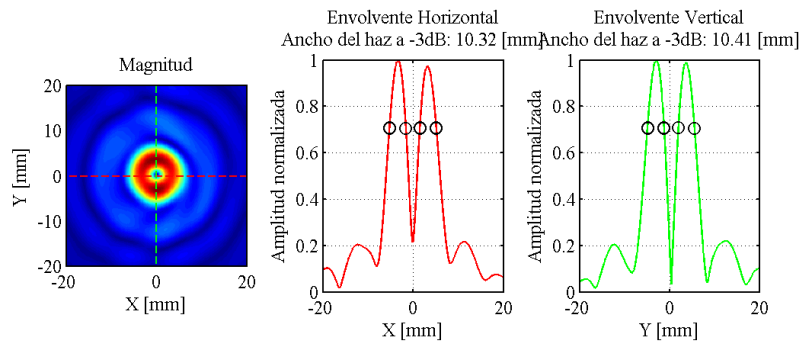


Figura 19. Coincidencia del núcleo de un Vórtice Cónico de 20 grados a 70 kHz con el plano azimutal y de elevación. Amplitud de presión en un plano transversal simulado a 37 mm (izquierda), patrón lateral horizontal del haz (centro) y patrón lateral vertical del haz (derecha).

La Figura 20 y la Figura 21 muestran los planos de elevación para vórtices cónicos y diferentes ángulos de focalización. A diferencia de los planos azimutales, se observa que la magnitud de la presión máxima en los planos de elevación es siempre creciente al aumentar la conicidad del vórtice y que el núcleo del vórtice se conserva, todo esto hasta alcanzar el mayor ángulo de focalización (45 grados). No obstante, cabe anotar que nuevamente se observa una degradación del vórtice (pérdida de simetría respecto al eje principal) para ángulos mayores a 30 grados.

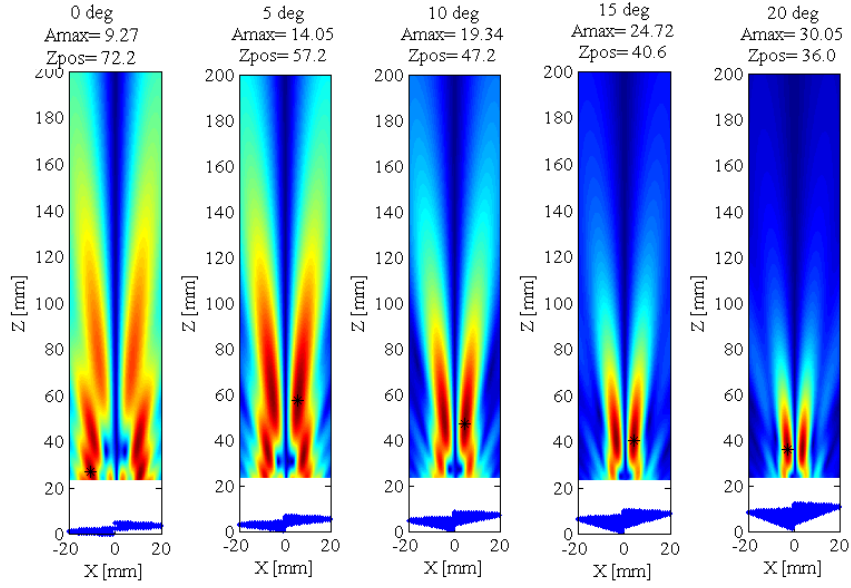


Figura 20. Planos de elevación simulados para un vórtice cónico a 70 kHz, carga topológica unitaria y ángulos de focalización de 0° a 20°

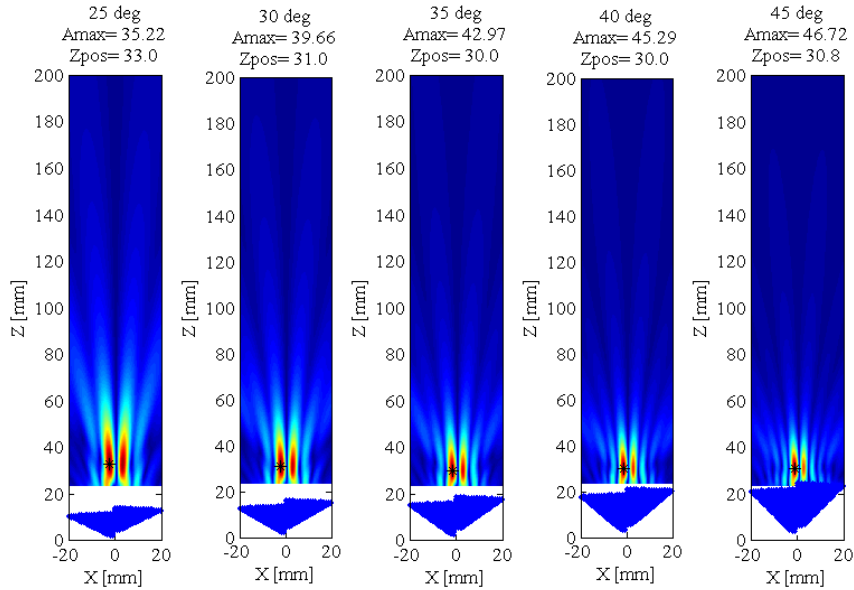


Figura 21. Planos de elevación simulados para un vórtice cónico a 70 kHz, carga topológica unitaria y ángulos de focalización de 25° a 45°.

La Figura 22 muestra la diferencia en la magnitud de A_{max} de los planos azimutales respecto a los de elevación y, ésta muestra que, por ejemplo para focalización a 20 grados la diferencia entre ambos alcanza un 14% aproximadamente. Estas diferencias de la magnitud de A_{max} son debidas a que la dislocación helicoidal del generador (salto de la hélice) coincide

(es paralelo) con el plano de observación azimutal y, los efectos del campo radiado por las fuentes en la región de dislocación se hacen más notorios al incrementar la focalización. Por este motivo, los resultados correspondientes a los otros dos métodos de focalización (esférica y parabólica), serán tratados adelante empleando los planos de elevación, omitiendo el uso de planos azimutales.

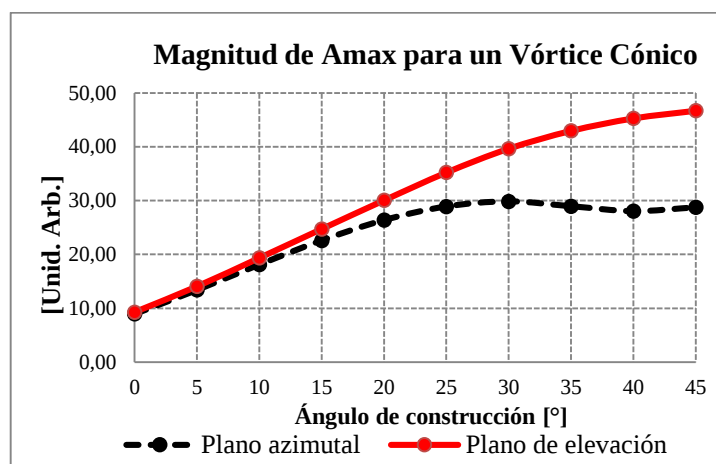


Figura 22. Diferencia en las magnitudes de A_{max} (Amplitud máxima / fuentes radiantes) para Vórtices Cónicos a 70 kHz.

La Figura 23 muestra el valor de Z_{pos} (distancia de localización de A_{max}) para cada ángulo de conicidad, en la cual se ve que para ambos planos observadores, el valor de Z_{pos} no cambia.

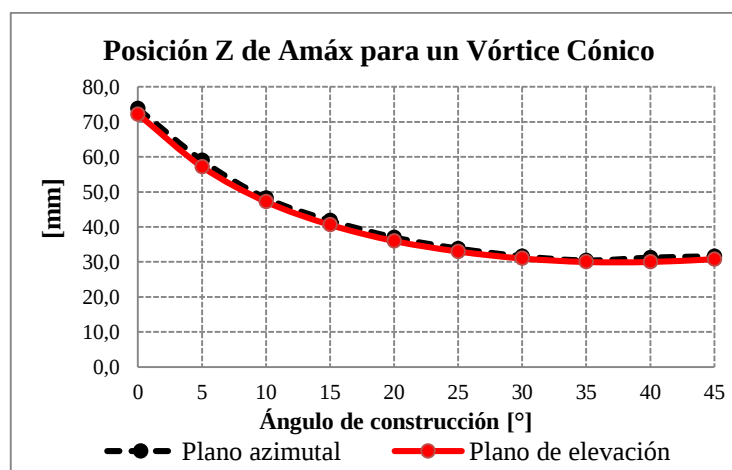


Figura 23. Distancia de localización del punto de amplitud máxima para un vórtice cónico a 70 kHz

Relación: Diámetro – Longitud de onda (D/λ)

Para identificar los efectos de focalización de un Vórtice Cónico a diferentes frecuencias de operación y tamaños (diámetro) de transductor, se empleó la razón adimensional diámetro sobre longitud de onda (D/λ), para seleccionar adecuadamente la frecuencia y calcular el paso helicoidal del transductor. Se simuló el campo de presión radiado para diferentes razones de D/λ mediante simulaciones computacionales empleando DPSM.

La Figura 24 muestra que la magnitud de A_{max} (Amplitud máxima) crece a medida que los vórtices se focalizan mediante ángulos de cono mayores para todos los casos de la relación D/λ . Además, se observa que, se obtendrán valores mayores de A_{max} para vórtices cuando dicha relación sea baja. Visto de otra forma y dado que la longitud de onda y la frecuencia tienen una relación inversa, a manera de ejemplo en el caso de comparación a diámetro constante, las relaciones D/λ bajas corresponden a frecuencias bajas.

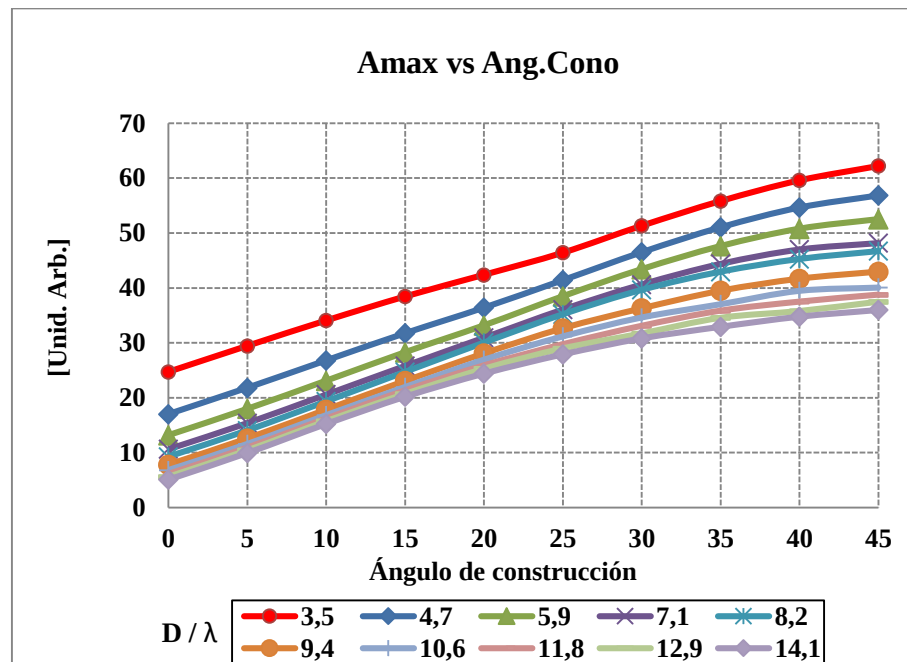


Figura 24. Magnitud de A_{max} respecto al ángulo de construcción para vórtices cónicos y diferentes relaciones D/λ .

En la Figura 25 se observa el ajuste de una función sinusoidal de un término de la forma: $f(x) = a1 \sin(b1 x + c1)$ para las relaciones D/λ ¹⁵ de 4.7, 8.2 y 11.7. Los coeficientes de la función y de correlación R^2 se muestran en la Tabla 2.

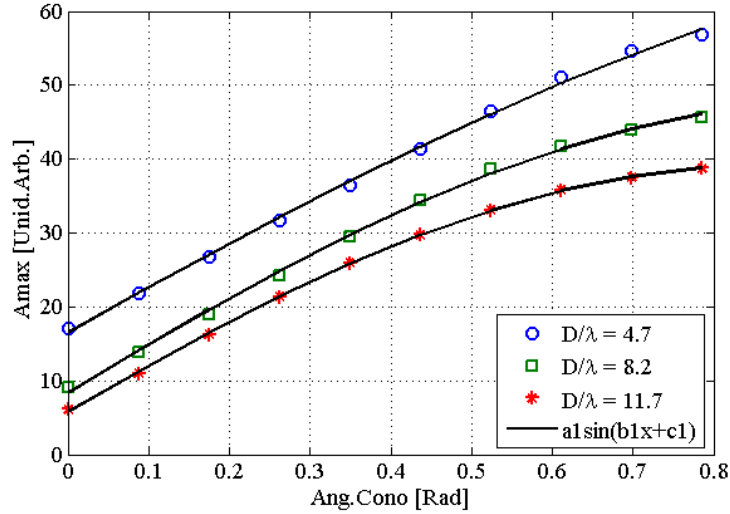


Figura 25. Ajuste de una función sinusoidal para valores de A_{max} vs. Ángulo de cono para diferentes D/λ .

D/λ	a1	b1	c1	R^2
4.7	73.31	0.8642	0.2272	0.9985
8.2	48.05	1.414	0.1727	0.9987
11.7	39.17	1.634	0.1485	0.9997

Tabla 2. Coeficientes de la función de ajuste sinusoidal para las curvas de A_{max} vs. Ángulo de cono y diferentes relaciones de D/λ .

La Figura 26 presenta la localización del punto de amplitud máxima para cada vórtice cónico y diferentes relaciones de D/λ . En la figura se aprecia que para valores bajos de esta relación, la ubicación Z_{pos} no se ve afectada al focalizar el vórtice, mientras que si se presenta un cambio significativo al aumentar la conicidad del vórtice cuando D/λ es alta.

¹⁵ Para un diámetro de transductor de 40 mm, las relaciones D/λ de 4.7, 8.2 y 11.7 corresponden respectivamente a las frecuencias en aire de 40 kHz, 70, kHz y 100 kHz, respectivamente.

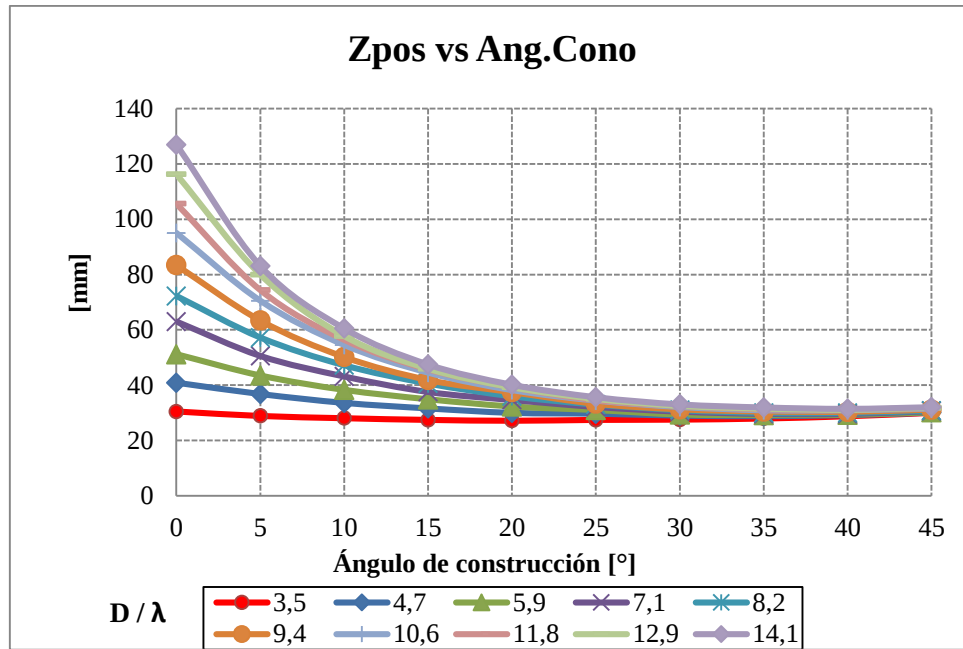


Figura 26. Valor de Z_{pos} (ubicación del punto donde se encuentra A_{max}) respecto al ángulo de construcción para vórtices cónicos y diferentes relaciones D/λ

El ajuste de una función exponencial de dos términos de la forma: $f(x) = ae^{bx} + ce^{dx}$ para las relaciones D/λ de 4.7, 8.2 y 11.7 se muestra en la Figura 27. Los coeficientes de la función y el de correlación R^2 se muestran en la Tabla 3.

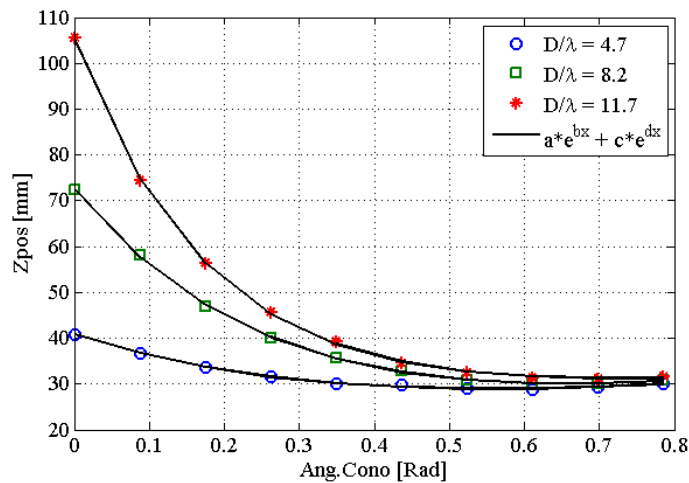


Figura 27. Ajuste de una función exponencial de dos término para valores de Z_{pos} vs. Ángulo de cono para diferentes relaciones D/λ .

D/λ	a	b	c	d	R^2
4.7	23.86	-2.729	17.03	0.5942	0.9982
8.2	56.57	-3.788	16.01	0.7031	0.9998
11.7	80.51	-5.574	24.88	0.2519	0.9998

Tabla 3. Coeficientes de la función de ajuste exponencial para las curvas de Z_{pos} vs. Ángulo de cono y diferentes relaciones de D/λ .

En las figuras anteriores, la relación D/λ de 8.2 corresponde a los parámetros de diámetro y frecuencia de operación escogidos para el dimensionamiento del GVAF (sección 4.1.1). Cabe mencionar que los resultados de simulación computacional, empleando el parámetro adimensional D/λ es un apartado especial del caso de vórtices cónicos requerido para dimensionar adecuadamente el GVAF de la sección 4.1.1, por lo tanto, no se hicieron las simulaciones y las curvas de comportamiento de este parámetro para los vórtices esféricos y parabólicos que se muestran a continuación.

5.1.1.2 Vórtice con focalización esférica

En la focalización esférica, el parámetro generatriz de la superficie se ha denominado distancia focal (DF), diferente al caso cónico que se hacía en función del ángulo de construcción del cono. Las Figura 28 y Figura 29 muestran los campos de presión en planos de elevación para un vórtice con focalización esférica (Vórtice Esférico) y diferentes distancias focales. Para propósitos comparativos, cada valor de DF fue calculado de tal forma que al generar la superficie focalizada esféricamente, la altura de ésta coincidiera con cada valor de altura de los casos de focalización cónica de 0° a 45° , vistos en el apartado anterior. Esto se hace para permitir la comparación entre los métodos de focalización, ya que como se vio anteriormente (sección 4.2.1), éstos poseen parámetros de generación diferentes. Nótese que para generar un vórtice esférico sin focalización, éste requiere que la distancia focal (radio de la esfera) sea infinita, por tal razón, el código computacional del simulador no puede mostrar este resultado (Figura 28). Al igual que en el caso de focalización cónica, “ A_{max} ”

representa la razón de la amplitud máxima sobre el número de fuentes radiantes y “ Z_{pos} ” la distancia de localización del punto donde se presenta “ A_{max} ”.

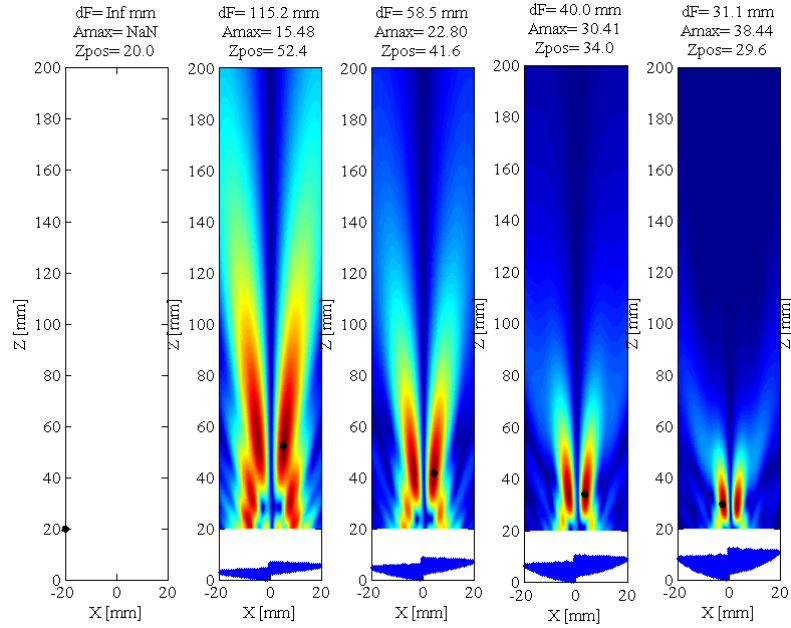


Figura 28. Planos de elevación simulados para un vórtice a 70 kHz, con focalización esférica y distancias focales de Inf, 115.2, 58.5, 40.0 y 31.1 mm.

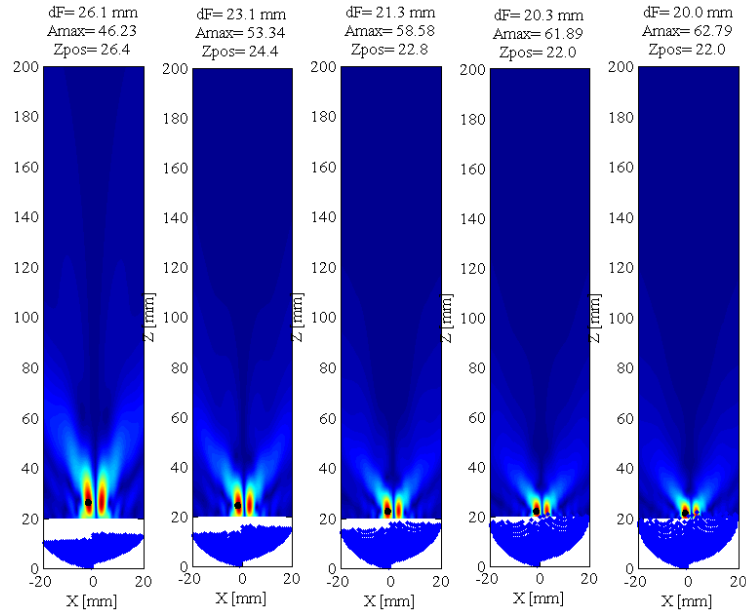


Figura 29. Planos de elevación simulados para un vórtice a 70 kHz, con focalización esférica, y distancias focales de 26.1, 23.1, 21.3, 20.3, 20.0 mm

El efecto de la focalización se hace evidente a medida que la distancia focal disminuye (mayor curvatura en la superficie esférica). La longitud o profundidad del haz se hace más corta, el ancho del haz y el núcleo del vórtice se hacen más estrechos y las magnitudes de presión crecen, demostrando que se concentra la energía acústica. De igual forma, el vórtice pierde calidad en su estructura con focalizaciones donde la distancia focal se acerca al radio del generador helicoidal (20 mm).

La Figura 30 muestra los planos transversales de observación ubicados a la distancia (Z_{obs}) donde aparece la amplitud máxima (A_{max}) de los planos de elevación mostrados en las Figura 28 y Figura 29 para cada distancia focal. Los planos de amplitud de la presión muestran la reducción del ancho del haz (zona anular de color rojo) y del núcleo (punto central de color azul).

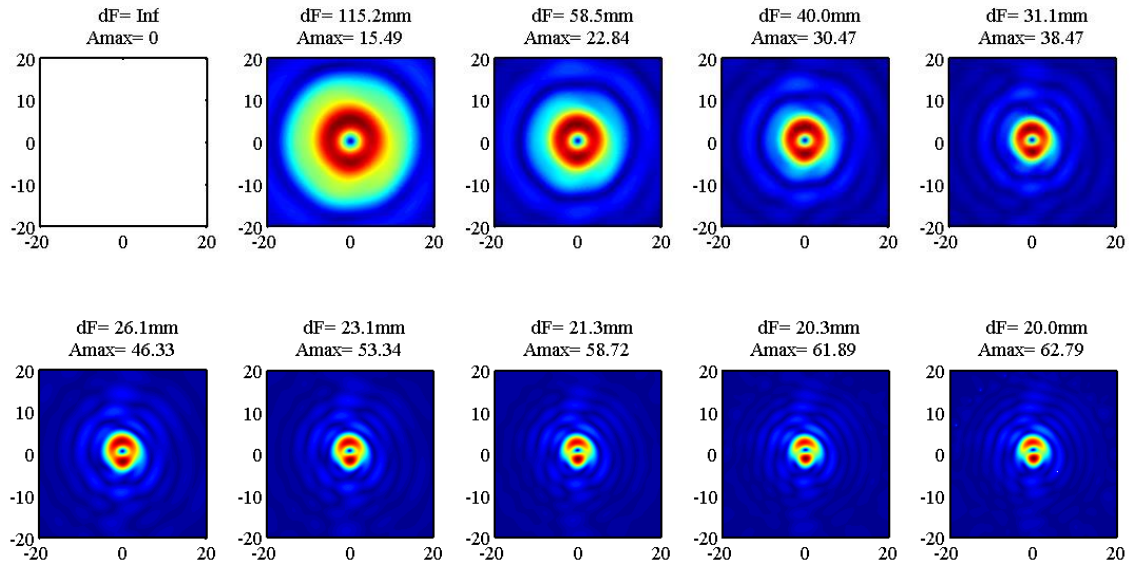


Figura 30. Planos transversales de observación ubicados a la distancia de localización (Z_{obs}) de la presión máxima (A_{max}) para un vórtice esférico y diferentes distancias focales.

Al igual que en los planos de elevación, el código computacional no logra simular el campo de presión cuando la distancia del foco debe ser al infinito. Se observa además, que a medida que la focalización se incrementa, se pierde la forma circular del vórtice, formándose aberraciones indeseadas. Este fenómeno aparece con todos los casos de superficie de focalización empleados en este trabajo, y se considera que son debido a la dislocación del

helicoides y que el método DPSM implementado en las simulaciones no tiene en cuenta las reflexiones internas de las superficies cónica, esférica y parabólica.

5.1.1.3 Vórtice con focalización parabólica

Las Figuras 31 y 32 muestran los planos de elevación para un vórtice con focalización parabólica (Vórtice Parabólico) y diferentes distancias focales (DF). Nuevamente, para propósitos comparativos, cada valor de DF fue calculado de tal forma que al generar la superficie focalizada parabólicamente, la altura de ésta coincidiera con cada valor de altura de los casos de focalización cónica de 0° a 45° vistos anteriormente.

Se puede observar que al focalizar empleando una superficie parabólica se producen efectos cualitativos similares a los mostrados por las dos geometrías anteriores.

Los planos transversales de observación ubicados en la distancia donde se presentan los máximos de presión se pueden ver en la Figura 33.

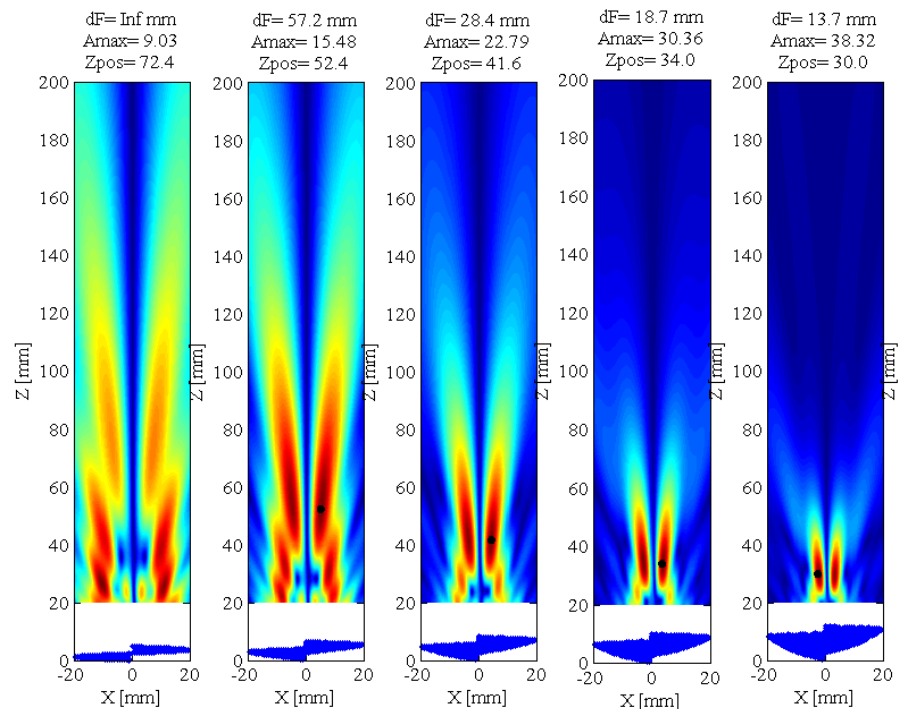


Figura 31. Planos de elevación simulados para un vórtice a 70 kHz, con focalización parabólica y distancias focales de Inf, 57.2, 28.4, 18.7 y 13.7 mm

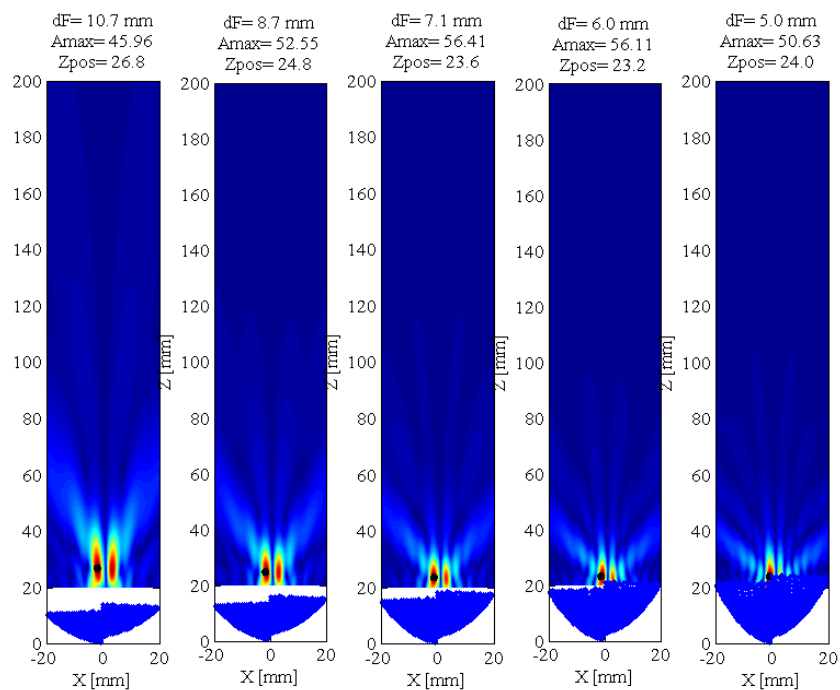


Figura 32. Planos de elevación simulados para un vórtice a 70 kHz, con focalización parabólica y distancias focales de 10.7, 8.7, 7.1, 6.0 y 5.0 mm

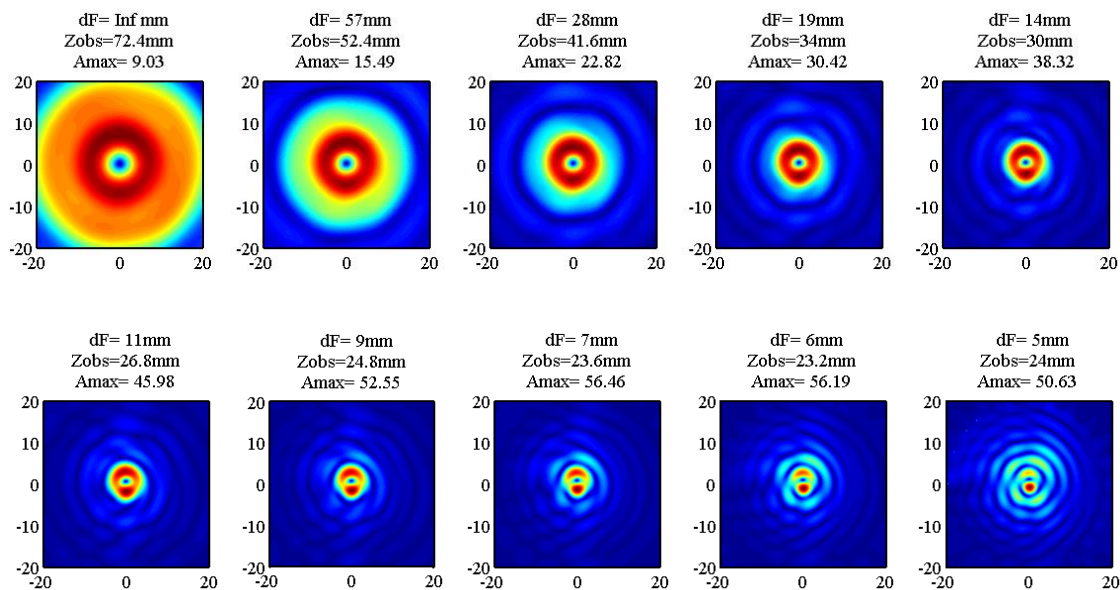


Figura 33. Planos transversales de observación ubicados a la distancia de localización (Z_{obs}) de la presión máxima (A_{max}) para un vórtice parabólico y diferentes distancias focales (dF).

Nuevamente, los efectos que degradan el vórtice aparecen cuando se hace una focalización más fuerte, el vórtice pierde forma circular y el núcleo se desplaza por encima del plano azimutal (plano $Y=0$). Esto ocurre debido a que los efectos producidos por distorsiones en el campo cercano se hacen más notorios al aumentar la focalización, es decir, la cercanía del plano de observación con las fuentes puntuales generadoras del vórtice.

5.1.2 Análisis de la afectación de la estructura del vórtice debido a la focalización

Para determinar los efectos de la focalización se hace necesario comparar cuantitativamente aspectos tales como: el incremento o ganancia del máximo de presión, dimensionar el ancho del haz y del núcleo del vórtice; y, la profundidad del haz.

5.1.2.1 Ganancia de presión debida a la focalización

El aumento en los valores de presión máxima debido al efecto de focalización del haz empleando los tres métodos se resume en la Tabla 4. Los resultados de simulación computacional empleando el método de las fuentes puntuales predicen un incremento de hasta casi 4 veces en los valores de presión para ángulos de focalización de 45° con vórtices cónicos. En el caso de las focalizaciones esférica y parabólica, se pueden obtener niveles de presión de más de cinco veces respecto a un vórtice no focalizado. Además, el aumento en los niveles de presión ocurre al disminuir la distancia focal, y, al igual que con el Vórtice Cónico, con degradación en la forma del vórtice. Los resultados sugieren que a la hora de escoger un método de focalización para aumentar los niveles de presión, la esférica y la parabólica son mejores. Sin embargo, en la construcción del transductor mono-elemento, estas geomerías se descartaron por no ser superficies desarrollables. No obstante, estas superficies pueden ser aproximadas por secciones discretas (a trozos) tal como lo sugiere Ealo (Ealo, 2009).

Comparando los resultados de las geometrías esférica y parabólica con el caso real del prototipo cónico-helicoidal de 20° construido (caso 5 de la tabla), en el caso de usar una superficie esférica o parabólica para fabricar un transductor de igual diámetro y altura, la

ganancia en amplitud pasaría del doble al triple, aproximadamente, respecto a un vórtice no focalizado.

Tabla 4. Incremento de amplitud de la presión debida a la focalización

Caso ¹⁶	Focalización cónica		Focalización esférica		Focalización Parabólica	
	Amax	Incremento	Amax	Incremento	Amax	Incremento
1	9,27	0,0%	9,27	0,0%	9,03	-2,6%
2	14,05	51,6%	15,48	67,0%	15,48	67,0%
3	19,03	105,3%	22,80	146,0%	22,79	145,8%
4	24,29	162,0%	30,41	228,0%	30,36	227,5%
5	29,45	217,7%	38,44	314,7%	38,32	313,4%
6	34,38	270,9%	46,23	398,7%	45,96	395,8%
7	38,59	316,3%	53,34	475,4%	52,55	466,9%
8	41,80	350,9%	58,58	531,9%	56,41	508,5%
9	43,97	374,3%	61,89	567,6%	56,11	505,3%
10	45,71	393,1%	62,79	577,3%	50,63	446,2%

5.1.2.2 Estrechamiento de la cintura del haz

Para evaluar la disminución en el ancho del haz se emplea el criterio de -3dB, el cual equivale al 70.7% de la presión máxima (Figura 34). Luego, al trazar una línea de corte y midiendo la distancia entre los extremos se obtiene el ancho del haz. El ancho del núcleo del vórtice también se estima al medir las distancias en los cortes internos.

¹⁶ El caso # 1 representa el vórtice no focalizado, y los casos con numerales del 2 al 10 son incrementos graduales de focalización de acuerdo al parámetro requerido por cada método (Ángulo de cono o distancia focal)

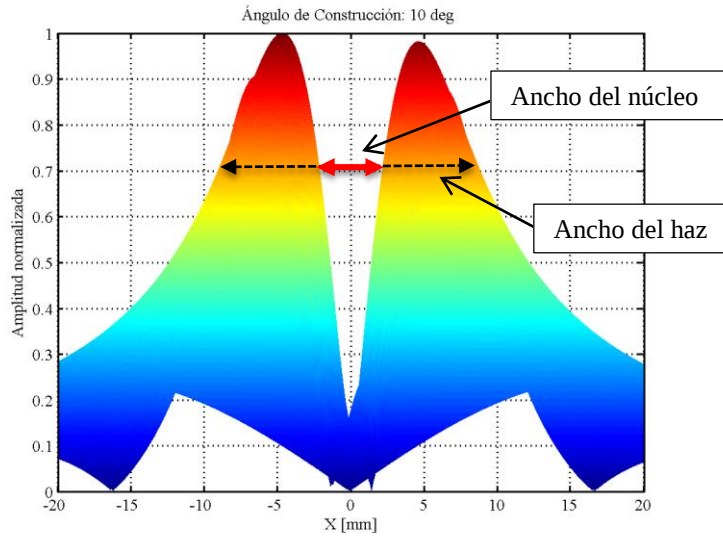


Figura 34. Ancho del haz y del nulo de presión para un vórtice cónico de 10° a 70kHz

Se debe tener en cuenta que los resultados mostrados de los anchos del haz y del núcleo representan, respectivamente, el diámetro externo e interno del anillo (sección transversal del haz) cuando se observa el espectro de amplitud del vórtice.

La disminución en el ancho del haz (Figura 35) y del ancho del núcleo (Figura 36) para los tres métodos (Cónico, esférico y parabólico) a medida que la focalización se hace más fuerte tienen un comportamiento semejante pero difieren en magnitud.

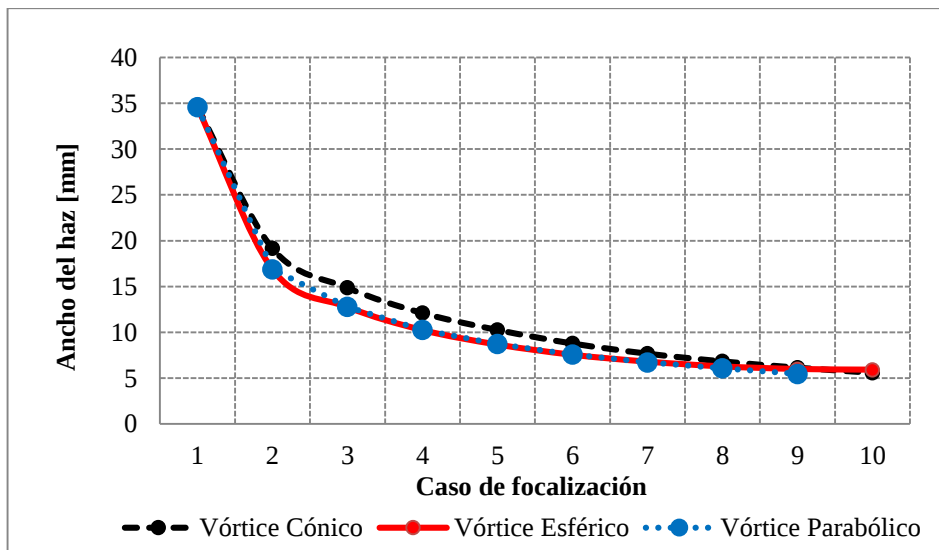


Figura 35. Ancho del haz a -3dB para vórtices: cónico, esférico y parabólico a 70 kHz

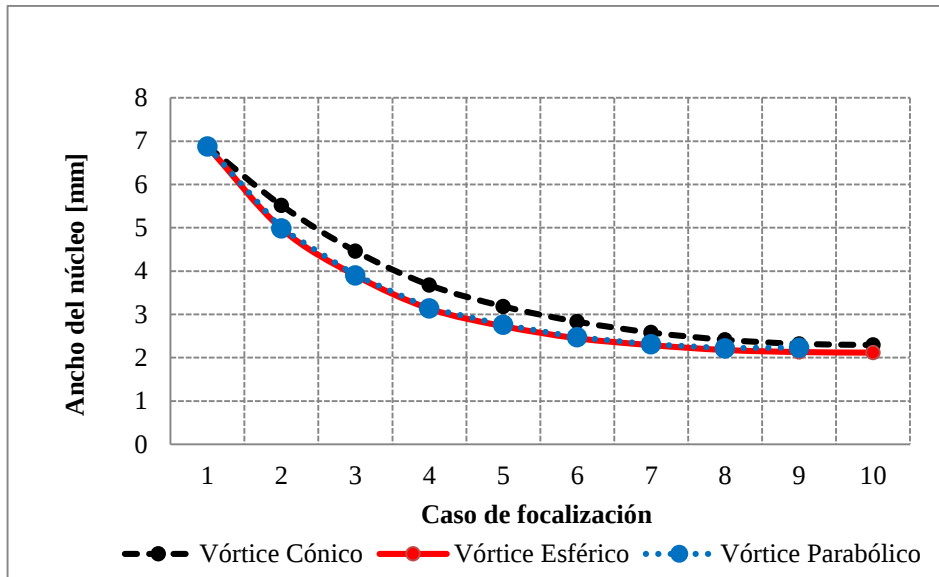


Figura 36. Ancho del núcleo a -3dB para los tres tipos de vórtices focalizados a 70 kHz

Nótese en las figuras que a partir del séptimo caso de focalización, no se presenta un efecto significativo en la disminución del ancho y el núcleo del haz acústico. Estas figuras ofrecen una información valiosa, ya que en el caso de una aplicación de manipulación de partículas, permite estimar el tamaño que deben tener para ser manipuladas. De igual forma, al utilizar el núcleo en sistemas de alineación, el tamaño define la resolución y exactitud de la medida.

5.1.2.3 Profundidad del haz

La profundidad del haz hace referencia a la distancia que éste alcanza en la dirección de propagación con una amplitud dada (criterio a -3 dB, Figura 37). Los resultados de simulación predicen la disminución de la profundidad del haz con el aumento en el ángulo de construcción del vórtice cónico y disminución de la distancia focal para vórtices esféricos y parabólicos. Esto indica que la energía se ha concentrado en una región más pequeña y a la vez, más cerca del generador del haz.

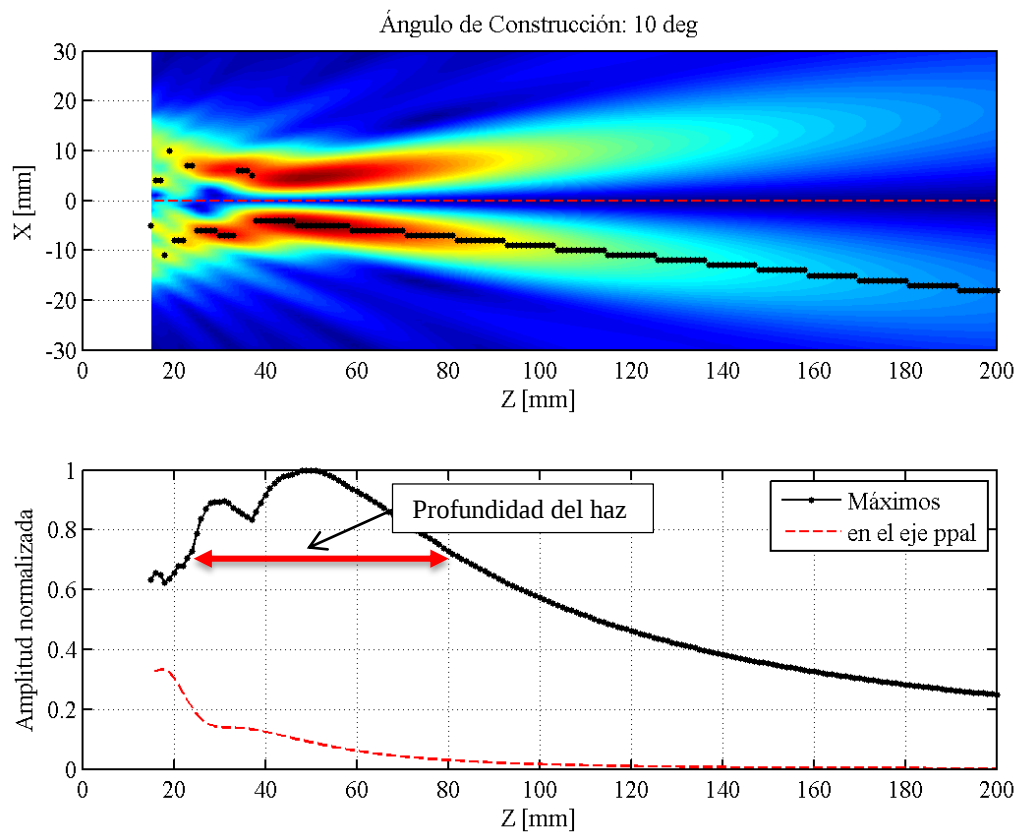


Figura 37. Determinación de la profundidad del haz de un vórtice cónico focalizado 10° a 70 kHz. Plano azimutal (arriba), curvas de máximos y presión sobre el eje principal (abajo).

En la figura se muestra la metodología empleada para determinar la profundidad del haz de un vórtice cónico de 10 grados. Primero se determinaron los máximos de presión sobre cada sección transversal del haz (puntos negros de la Figura 37, arriba) y posteriormente se graficó la magnitud de dichos máximos respecto a la distancia a la que están localizados (Figura 37, abajo). Finalmente, se toma la distancia en Z entre los puntos ubicados al 70.7% (-3dB) de la amplitud máxima. Simultáneamente, los valores de presión sobre el eje principal ($X = 0$) son graficados.

La Figura 38 muestra lo que le ocurre a la profundidad del haz a medida que la focalización se aumenta por las tres geometrías descritas anteriormente. Se observa que el haz se hace cada vez más corto.

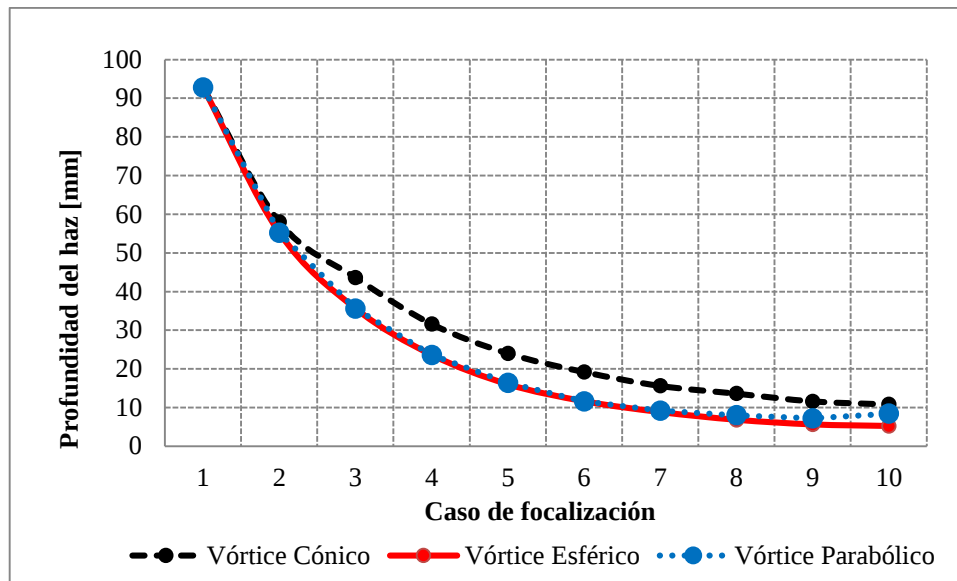


Figura 38. Variación en la profundidad del haz debido a la focalización para un vórtice a 70 kHz.

5.1.2.4 Consideraciones de los resultados de focalización

Una atención cuidadosa en el comportamiento de los vórtices al ser focalizados permite el dimensionamiento del dispositivo apropiado para determinada aplicación. Por ejemplo, para un manipulador de partículas, se requiere que el campo de presión acústica sea suficientemente fuerte como para atraparlas en su interior o inducirles rotación. La ganancia que se obtiene al aumentar los niveles de presión con focalizaciones grandes (casos del 7 al 10) se pierde cuando el diámetro del vórtice y la profundidad se reducen, limitando la resolución y el alcance en profundidad de la aplicación. En el caso de sistemas de alineación, donde haces largos o profundos son deseados, se emplearían dispositivos con muy baja o nula focalización, a pesar de tener vórtices con núcleos de mayor diámetro que limitan la resolución de la medida de alineación.

En cuanto al tipo de geometría a utilizar en la fabricación de un dispositivo que genere VAF, se debe estimar una relación de compromiso que compense las ventajas de focalizar con superficies esféricas o parabólicas con la dificultad de fabricarlas. En el caso de transductores mono-elemento con películas piezo-eléctricas, no cabe duda que las superficies desarrollables como la cónica-helicoidal son la mejor alternativa por facilidad de

construcción, pero, son las que menos aportan en el aumento y concentración de energía acústica útil para el desarrollo de alguna aplicación.

5.1.3 Caracterización del transductor mono-elemento

La siguiente sección muestra los resultados de medición experimental del campo de presión acústica radiado por el transductor mono-elemento de película electromecánica Emfit® que genera VAF a 70 kHz en aire y con una focalización cónica de 20°. Estos resultados se comparan con simulaciones computacionales con los mismos parámetros de frecuencia y focalización sobre patrones de emisión lateral (envolventes) y planos azimutales y transversales a una distancia dada del GVAF.

La Figura 39 muestra la señal acústica temporal y la respuesta en frecuencia medida sobre un punto ubicado a 50 mm de distancia del transductor mono-elemento de película Emfit®, correspondiente a una excitación tipo *chirp* (barrido) de 20 a 180 kHz.

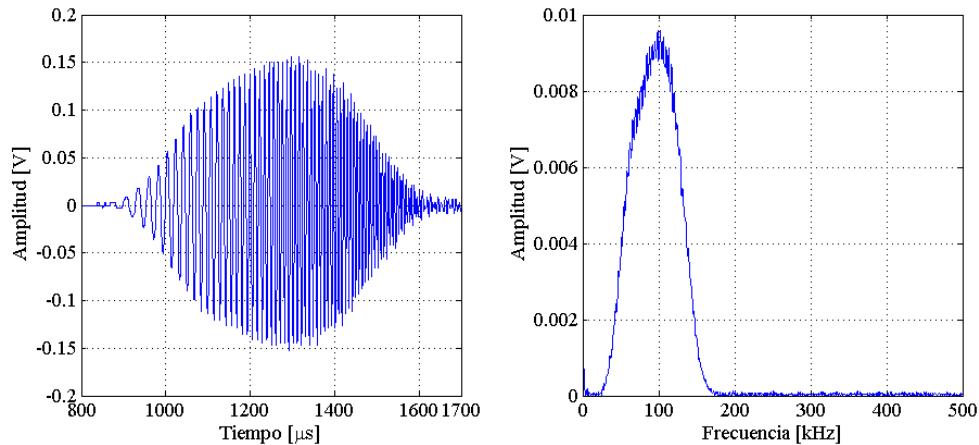


Figura 39. Señal medida de un VAF ante una excitación tipo *chirp* de 20 a 180 kHz, sobre un punto de medición a 50 mm generado por el transductor mono-elemento. Respuesta temporal (izquierda) y en frecuencia (derecha).

Si bien el transductor construido se diseñó para operar a la frecuencia de 70 kHz, la utilización de un barrido de frecuencias se hace teniendo en cuenta el rango utilizable de la película Emfit®, que permitiría generar vórtices de carga topológica 2 al excitar con 140 kHz

(el doble de la frecuencia de diseño). Debido a la incapacidad del micrófono para medir más arriba de 140 kHz, se observa un decaimiento en la amplitud de la señal, no acorde con la respuesta real del material de la película Emfit®, que posee su frecuencia de resonancia alrededor de 300 kHz.

La Figura 40 muestra el plano azimutal de los espectros de presión en amplitud y fase para un VAF a 70 kHz generado con el prototipo construido. Se presenta el resultado de la medición experimental del plano en contraste con una simulación computacional empleando el DPSM.

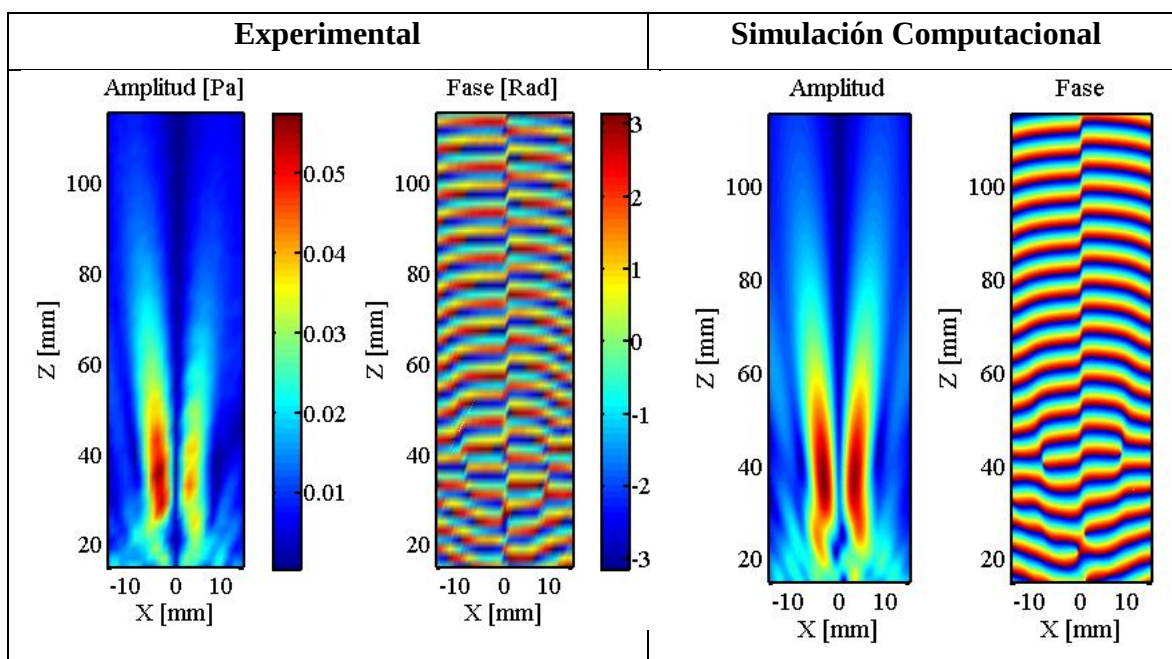


Figura 40. Medición experimental y simulación computacional de los espectros de amplitud y fase para un VAF de 20° a 70 kHz sobre un plano azimutal.

Las figuras muestran que el campo de emisión acústica, tanto experimental como computacionalmente presentan las características típicas de un vórtice, tal como el núcleo o nulo de presión (en color azul) coincidente con el eje en $X=0$ flanqueado por dos máximos de presión (en color rojo). El plano azimutal experimental muestra que no hay una simetría con respecto al núcleo sobre el eje principal. Esta diferencia pudo haber sido ocasionada por problemas de alineación del transductor y la unidad XY que desplaza el micrófono sobre

cada punto de medición. Este problema de alineación se presenta por la dificultad de orientar adecuadamente la unidad al no hacer coincidir el plano de medida con el núcleo del vórtice. Se debe tener en cuenta que el vórtice generado tiene 10 mm de diámetro y 55 mm de profundidad aproximadamente y, una ligera desviación angular produce el efecto mostrado en la Figura 40. Para corregir este problema, se procedió a graficar un plano azimuthal a partir de los datos tomados en 11 planos transversales, que cubren un espacio que va desde 25 mm hasta 50 mm del campo de emisión del vórtice. La Figura 41 muestra los planos transversales medidos y el plano azimuthal obtenido a partir de extraer los datos de dichos planos.

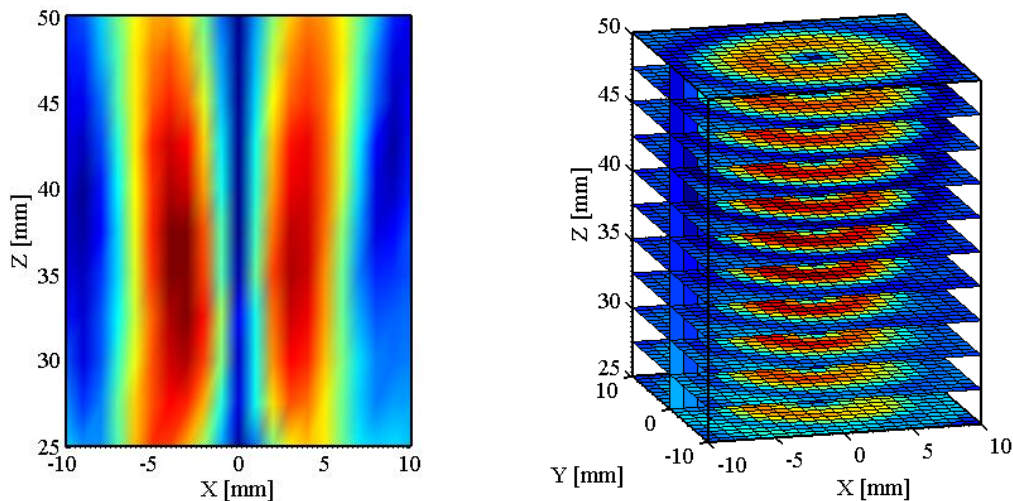


Figura 41. Plano azimuthal (izquierda) obtenido a partir de la medición de planos transversales (derecha), para un VAF de 20° a 70 kHz.

Una de las características de los vórtices es que rotan sobre su eje principal de propagación transfiriendo momento angular a la materia. La Figura 42 muestra esta propiedad a través de la respuesta temporal en cinco instantes de tiempo, correspondientes a un mismo periodo de oscilación para un vórtice a 70 kHz con focalización cónica de 20° sobre un plano ubicado a 50 mm del transductor. Los planos mostrados corresponden a la composición de las amplitudes de presión sobre un arreglo rectangular de 41 x 41 puntos medidos, espaciados cada 0.5 mm entre ellos. De la figura, se puede apreciar como las zonas de alta presión (en color rojo) y depresión (en color azul) se alternan mutuamente, mostrando que existe rotación del vórtice en el sentido contrario de las manecillas del reloj.

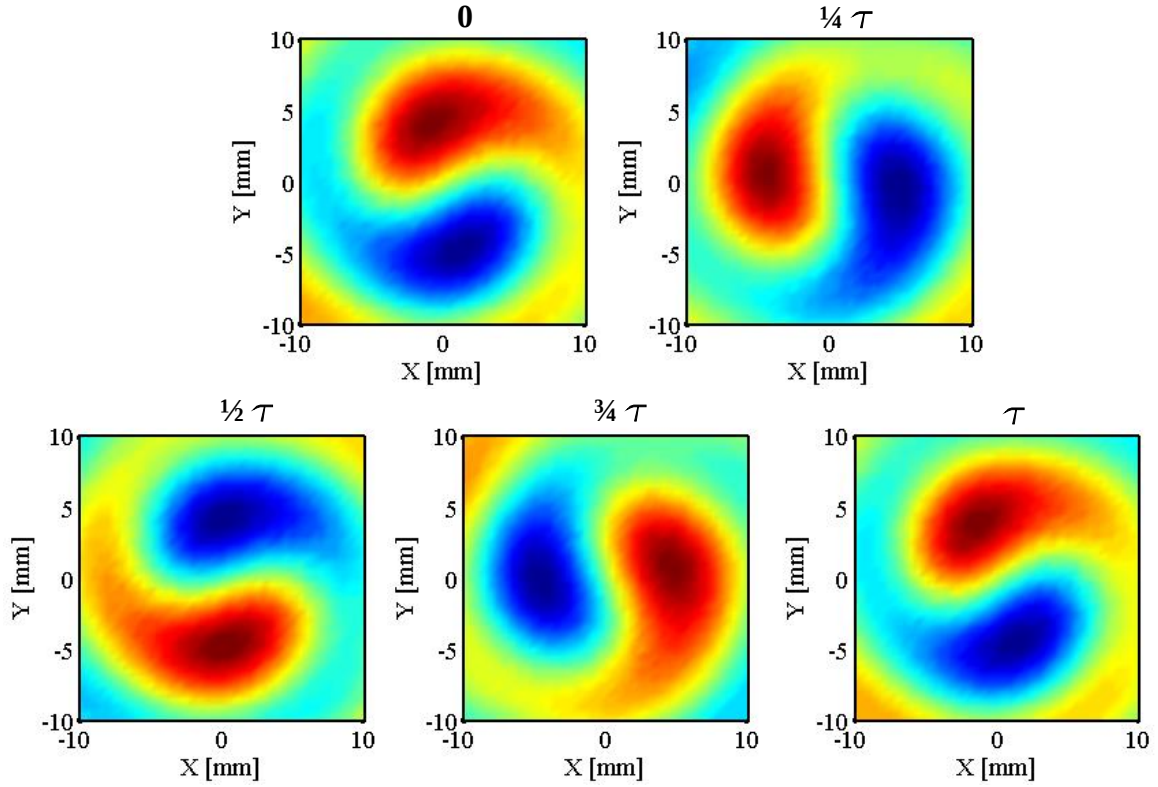


Figura 42. Planos transversales de la respuesta temporal en cinco instantes de un periodo (τ) para un vórtice cónico de 20° a 70 kHz y 50 mm de distancia de observación generado con transductor mono-elemento.

Un esquema comparativo entre medición experimental y simulación computacional de la respuesta temporal sobre planos de observación ubicados a diferentes distancias del transductor mono-elemento se observa en la Figura 43. Cabe recordar que las simulaciones computacionales de la sección 5.1.1.1 predicen que la distancia de ubicación de Z_{pos}^{17} es de 36.4 mm para un vórtice cónico a 20° y que a partir de esta distancia el vórtice se ensancha.

¹⁷ Distancia de ubicación de la amplitud de presión máxima A_{max}

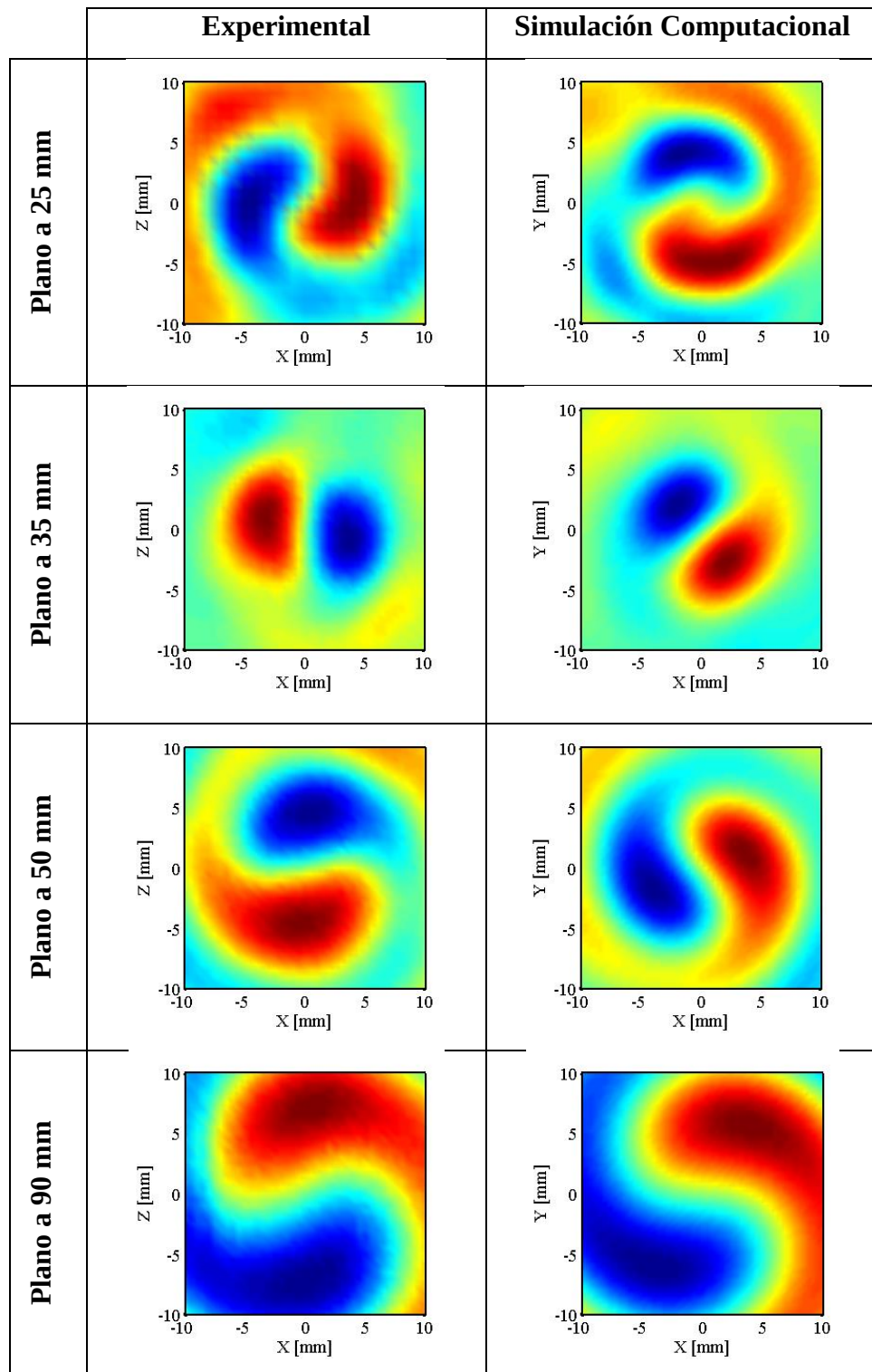


Figura 43. Medición experimental y simulación computacional del campo de presión instantánea para un VAF a 70 kHz sobre planos transversales a 25 mm, 35 mm, 50 mm y 90 mm del transductor.

Nótese que, dependiendo de la ubicación del plano de observación, se puede encontrar que el campo de presión del vórtice tiene o no forma espiral. Se observa que en el plano a 35 mm (cercano a Z_{pos}) la energía se encuentra más concentrada en una zona compuesta de sobrepresión y depresión. En los planos por encima y por debajo de esta distancia, se observa que el vórtice tiene forma espiral, y que, el tamaño de éste, depende de la distancia del plano de observación.

La Figura 44 muestra los VAF generados experimentalmente y simulados a la frecuencia de 70 kHz. Se muestran en paralelo los espectros de amplitud y fase sobre planos de observación transversales al haz, a distancias de 25 mm, 35 mm, 50 mm y 90 mm. Se puede apreciar que los resultados comparativos para cada distancia del plano de observación presentan similitud en cuanto al tamaño y forma. Algunas características del vórtice están presentes para ambos casos: la forma de anillo, el nulo de presión o núcleo, la forma espiral del espectro de fase, la singularidad de fase en el núcleo y la variación lineal de la fase sobre cualquier trayectoria circular centrada en la singularidad. Una particularidad adicional producida por la focalización ocurre con los planos más allá de Z_{pos} , en los cuales se observa una aparente inversión del sentido del plano de fase (resultado también observable en los campos de presión instantánea de la Figura 43). Este hallazgo es interesante para investigaciones posteriores a este trabajo, para explicar mejor lo que ocurre en Z_{pos} , distancia en donde la forma de la espiral de la fase y de la presión instantánea se invierte.

Para corroborar los resultados experimentales y de simulación, además de los planos mostrados arriba, también se emplean los patrones laterales de emisión, los cuales consisten en dibujar los valores de presión acústica sobre una línea de observación, transversal al eje de propagación y ubicada a una distancia determinada. Para este propósito, se midió y simuló un VAF sobre diversos puntos de dos líneas horizontales, paralelas al eje X y localizadas a 44 mm y 70 mm de distancia del transductor.

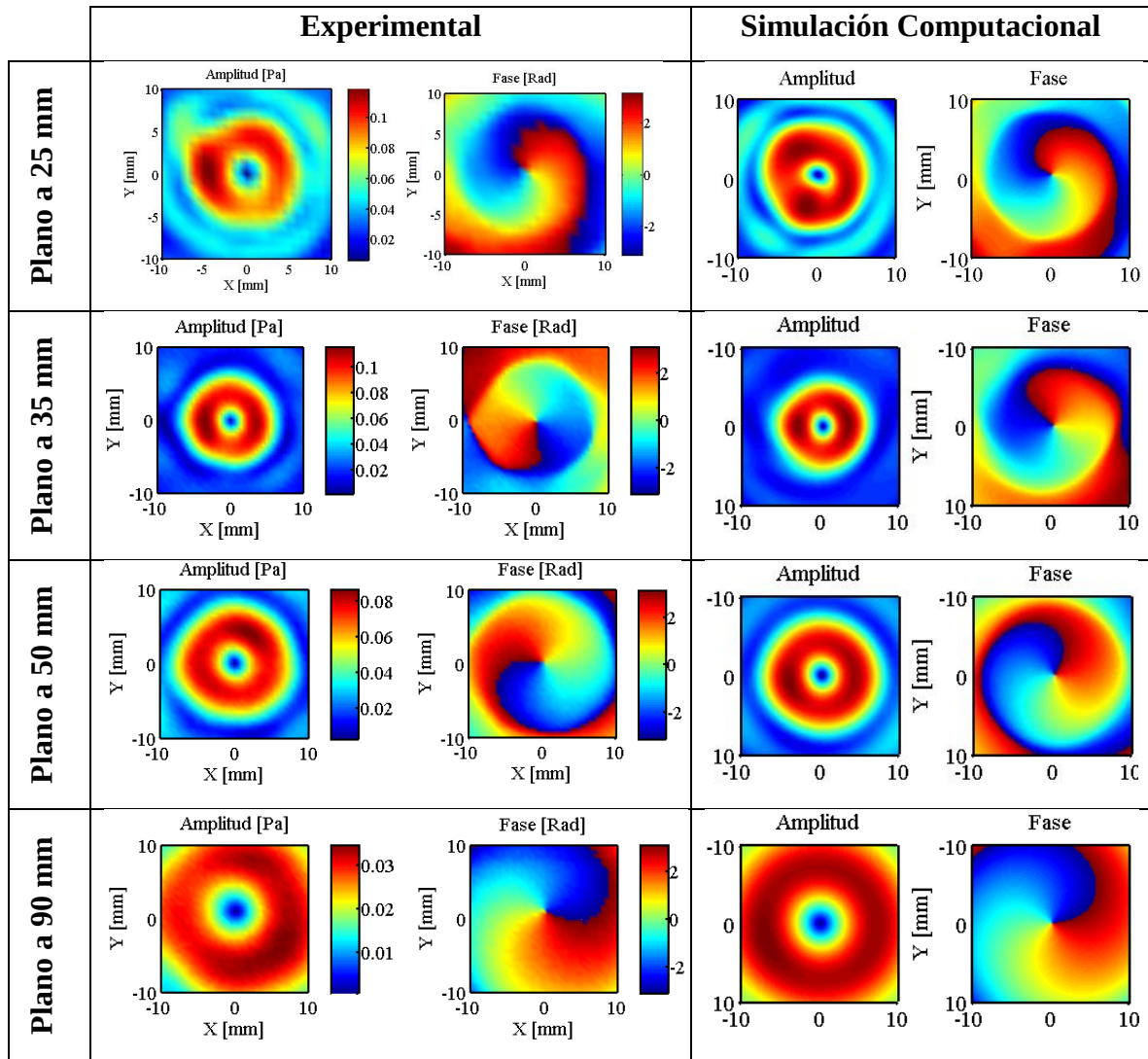


Figura 44. Medición experimental y simulación computacional de los espectros de presión y fase para un VAF de 20° a 70 kHz sobre planos transversales a 25 mm, 35 mm, 50 mm y 90 mm del transductor.

La Figura 45 muestra la comparación de la magnitud y fase del vórtice medido versus el simulado computacionalmente. Se pueden observar las características típicas del vórtice, tales como el nulo de presión (o núcleo del vórtice) localizado en $X=0$ y en medio de dos máximos de presión; y, que la fase es indeterminada en el núcleo (singularidad). Se puede ver que experimentalmente se encontró que uno de los máximos de presión es significativamente menor (30 % aprox.), esto puede deberse a problemas de alineación de la unidad de posición XY, encargada de desplazar el micrófono sobre el barrido lineal realizado.

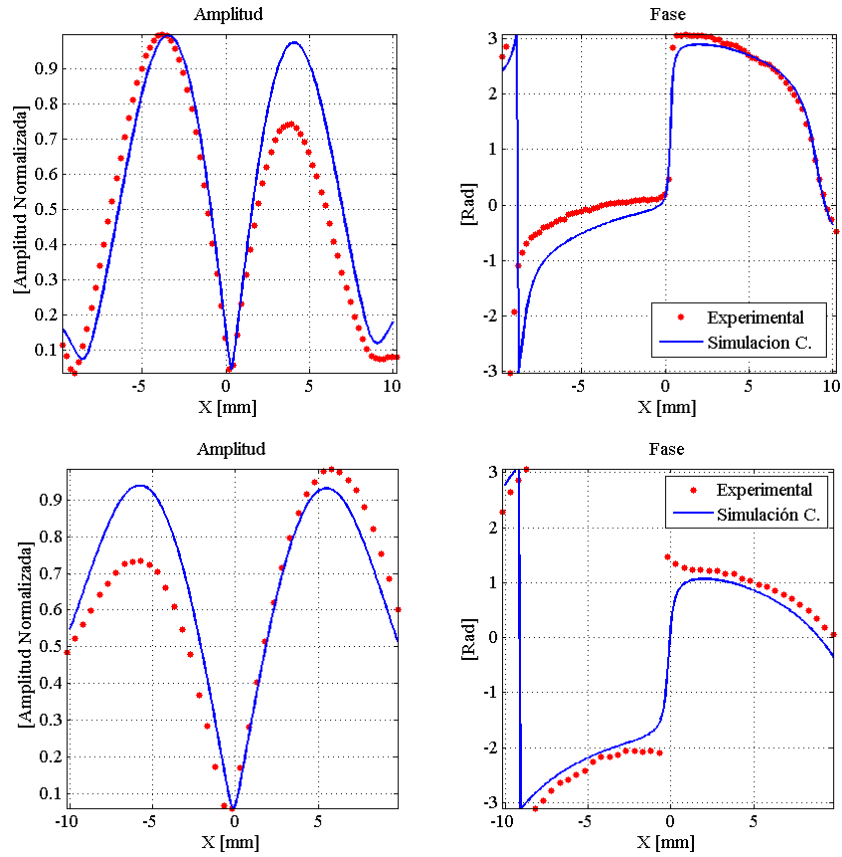


Figura 45. Patrones laterales de emisión de un VAF de 20° , a 70 kHz y a 44 mm (arriba) y 70 mm (abajo) de distancia del transductor. Espectros de amplitud (izquierda) y fase (derecha).

La Figura 46 muestra la distribución de todos los puntos que tienen la misma fase en todos los instantes de tiempo en que el haz del vórtice generado con el transductor mono-elemento de focalización cónica de 20° a 70 kHz, en un plano transversal de observación ubicado a 35 mm. La imagen que forman los puntos de fase constante se asemejan a un tornillo de una sola entrada con superficie cónico-helicoidal, propia del transductor que la generó.

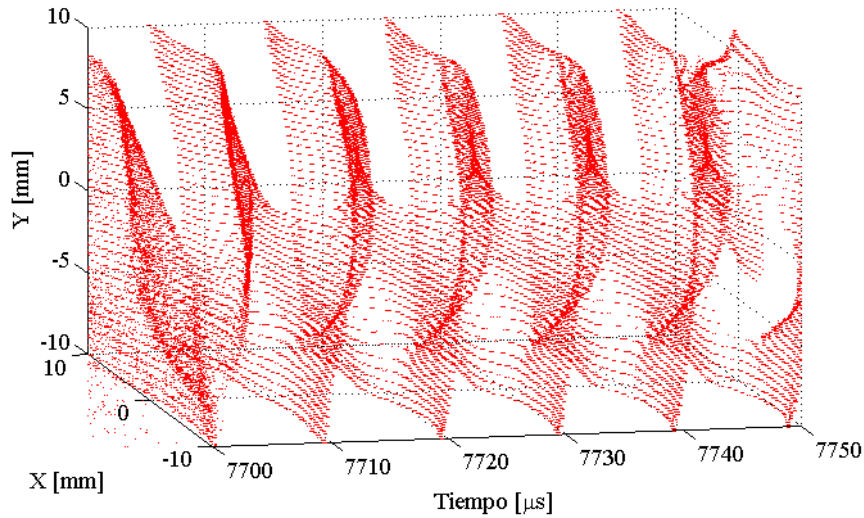


Figura 46. Superficie de fase constante de un vórtice cónico de 20° a 70 kHz, generado con un transductor mono-elemento, medidos instantáneamente en el plano (X, Y, 35 mm).

5.2 Resultados con el multitransductor de 30 elementos piezo-cerámicos

En esta sección se presentan los resultados de caracterización experimental del multitransductor hexagonal de 30 elementos piezo-cerámicos y se compara con simulaciones computacionales DPSM.

5.2.1 Caracterización del multitransductor de 30 elementos

La caracterización experimental del *array* hexagonal de 30 elementos se hizo mediante mediciones de campo de presión acústica sobre planos azimutales y transversales ubicados a una distancia dada del multitransductor. La Figura 47 muestra la señal de respuesta temporal de todos los elementos del *array* emitiendo para generar un vórtice focalizado a 40 kHz. La señal mostrada fue medida sobre un punto ubicado a una distancia de 100 mm del multitransductor. La señal de excitación aplicada a cada elemento del *array* fue una onda sinusoidal de cinco pulsos para evitar la aparición de posibles reflexiones o ecos en la respuesta.

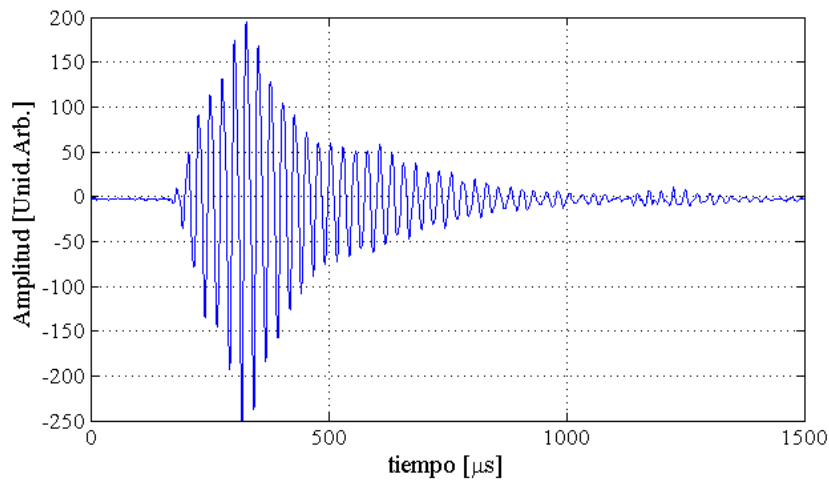
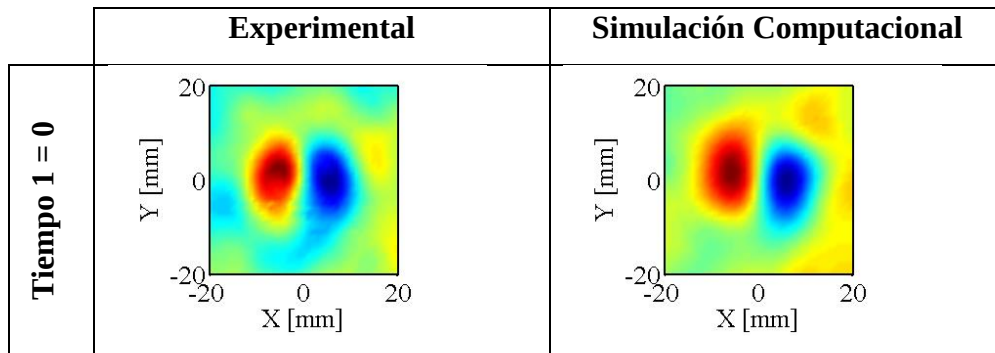


Figura 47. Señal temporal de un VAF sobre un punto de medición a 100 mm de un *array* de 30 elementos

La respuesta temporal en cinco instantes de tiempo, correspondientes a un mismo periodo de oscilación para un vórtice a 40 kHz con focalización cónica de 20° sobre un plano ubicado a 55 mm del multitransductor se muestra en la Figura 48. Los planos mostrados corresponden a la composición de las amplitudes de presión sobre un arreglo rectangular de 41×41 puntos medidos, espaciados cada 1 mm entre ellos. En la figura, tanto los planos medidos como los simulados muestran la propiedad de rotación de los vórtices, en el cual la zona de alta presión persigue a la depresión en el sentido de las manecillas del reloj.



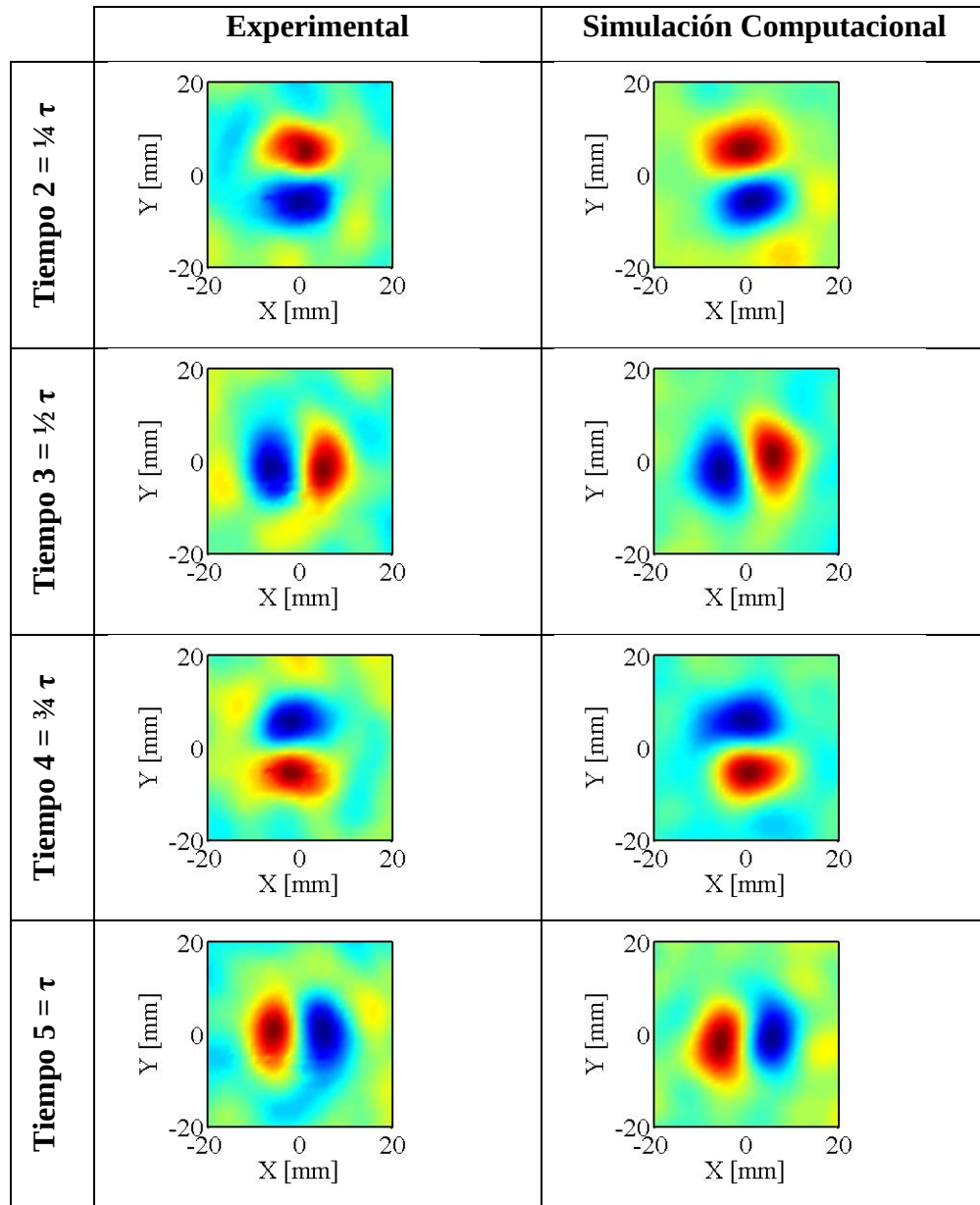


Figura 48. Planos transversales de la respuesta temporal en cinco instantes diferentes de un vórtice cónico de 20° a 40 kHz y 55 mm de distancia de observación generado con multitransductor de 30 elementos.

Las imágenes de la respuesta en frecuencia que muestra la Figura 49 representan los espectros de amplitud y fase de presión acústica sobre planos transversales experimentales y simulados de focalización cónica (0°, 10°, 20° y 30°) con el *array* de 30 elementos para algunas distancias de observación de interés.

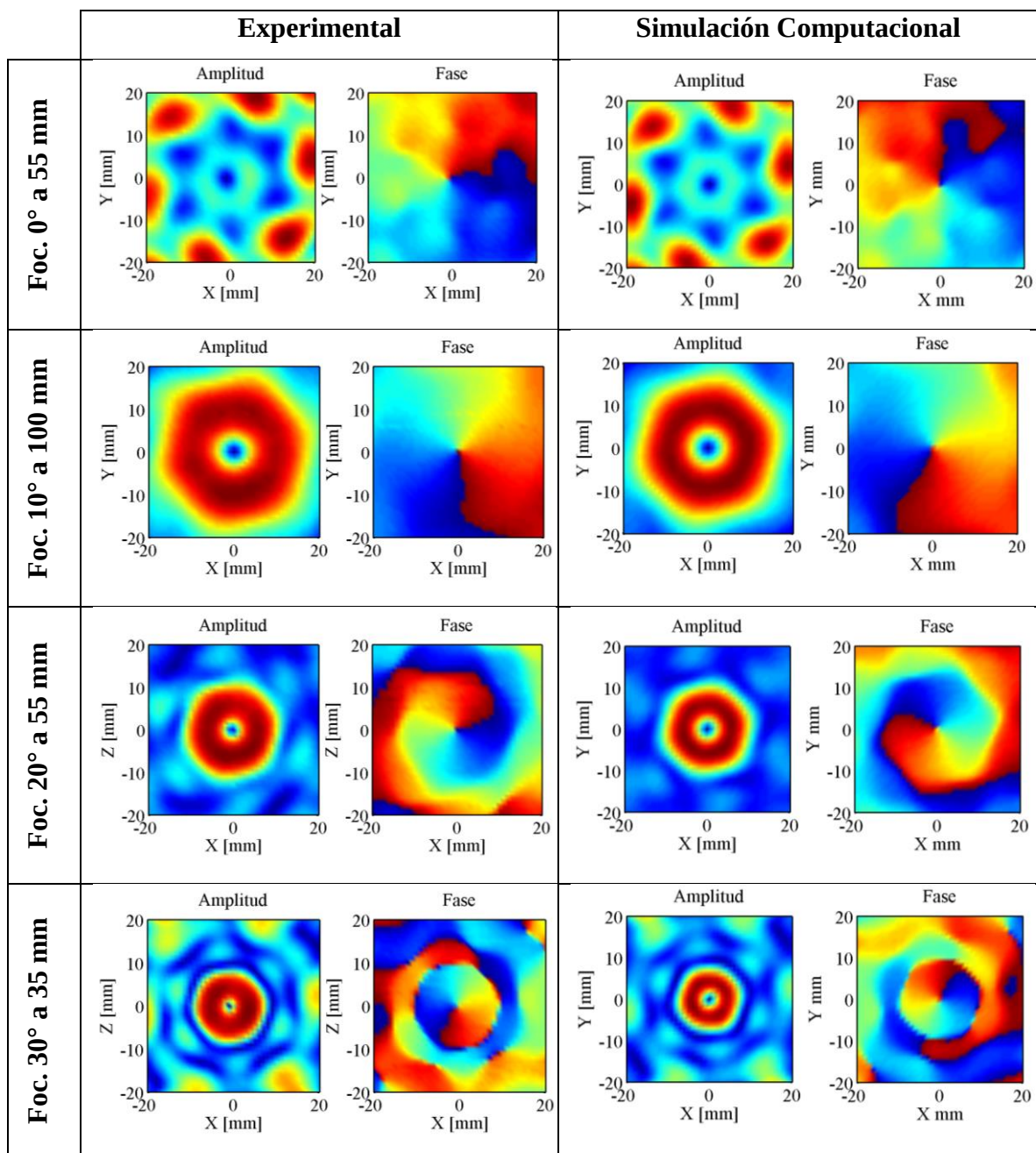


Figura 49. Medición experimental y simulación computacional de VAF generados con un multitransductor de 30 elementos a 40 kHz con diferentes ángulos de focalización cónica.

Los resultados muestran características del vórtice ya discutidas anteriormente, tales como la disminución del diámetro externo e interno del anillo al aumentar la focalización,

efecto también visible en los espectros de fase; variación lineal de la fase al seguir una trayectoria circular centrada en el núcleo y la singularidad o indeterminación de la fase en el centro del vórtice. Curiosamente, la *donut* adopta la forma hexagonal del transductor que lo genera, pero, como se verá más adelante, a medida que el vórtice se propaga, va adquiriendo forma circular.

Los resultados mostrados en la Figura 50 corresponden a una comparación entre medición experimental y simulación computacional de los espectros de amplitud de presión del campo radiado por el multitransductor sobre planos de observación azimutales. Se presentan tres casos de focalización cónica de diferentes ángulos de cono: 0° (no focalizado), 15° y 30° . Para el vórtice no focalizado, el ancho del plano de observación es insuficiente para visualizarlo completamente, ya que se espera que éste sea tan amplio como el diámetro del GVAF (80 mm aprox.), por ende, lo que se observa en la imagen es básicamente la composición del haz en campo cercano y el núcleo o nulo de presión a lo largo del eje central de propagación. Ahora, al focalizar el vórtice se ve que la energía (en color rojo) – representada como presión medida o simulada – se concentra y hace el haz más corto, ubicando los máximos de presión a las distancias de 80 mm y 40 mm del transductor para focalización de 15° y 30° respectivamente. Al observar los resultados experimentales puede notarse que la dificultad para alinear adecuadamente la unidad de desplazamiento XY y el transductor se hizo presente de nuevo, afectando de igual manera cada uno de los planos medidos. Por simple inspección visual, en los planos experimentales se presenta falta de simetría respecto al eje principal, las zonas en color rojo (de alta presión) que bordean el núcleo del vórtice, el lado izquierdo del haz supera en amplitud al lado derecho, esto, para los tres casos de ángulo de cono. Esta dificultad produce que la utilización de herramientas computacionales gane importancia a la hora de predecir un campo acústico dado. Características como la rapidez, versatilidad y facilidad de implementación de una prueba simulada aumentan la eficiencia para encontrar resultados.

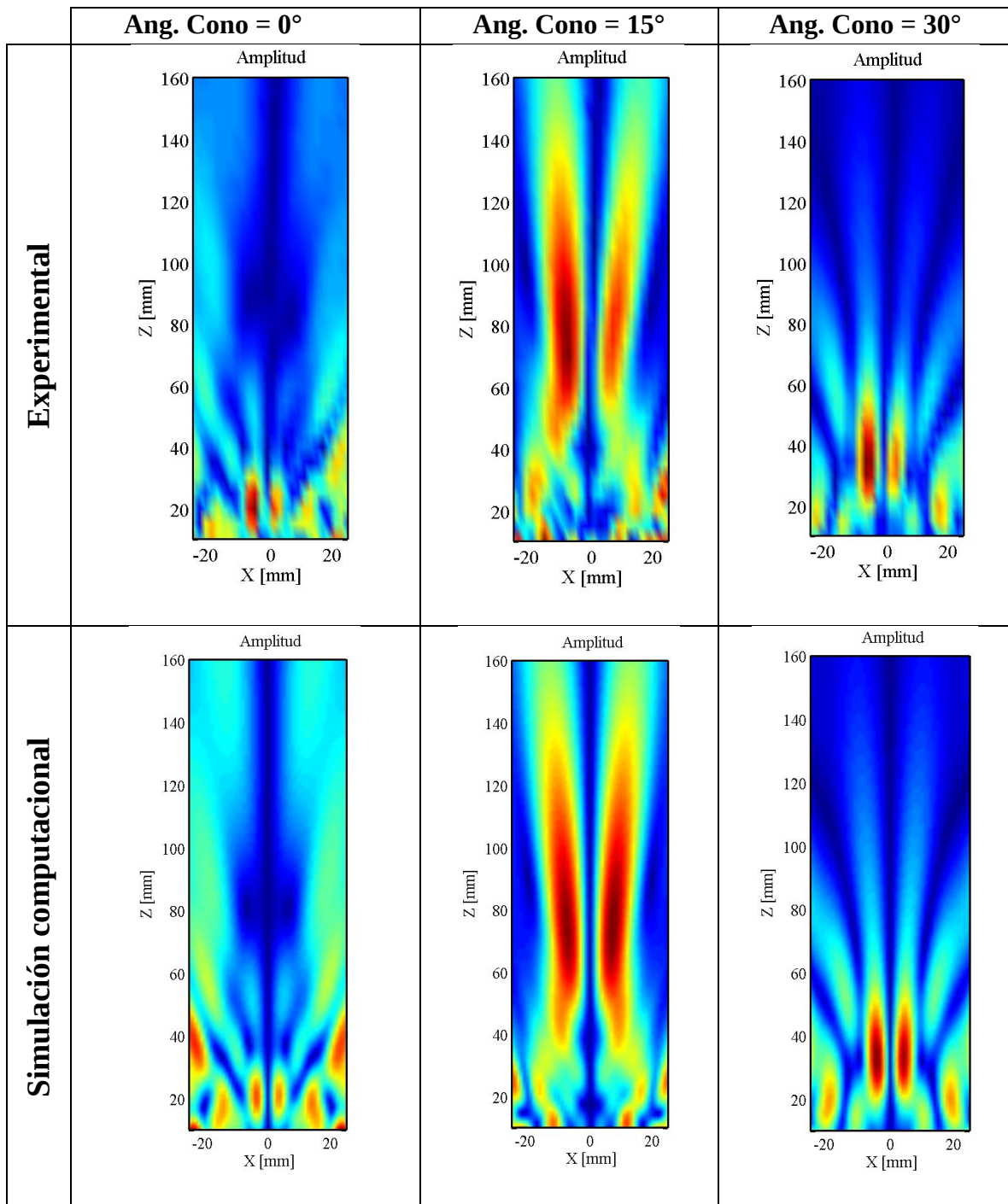


Figura 50. Medición experimental y simulación computacional de VAF generados con un multitransductor de 30 elementos a 40 kHz sobre planos azimutales.

La Figura 51 muestra la variación temporal de la presión medida en 41 puntos equidistantes distribuidos sobre una línea, contenida en el plano (X, Y, 55 mm), y que atraviesa transversalmente un vórtice focalizado cónicamente de 20° , cruzando por el centro. 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.

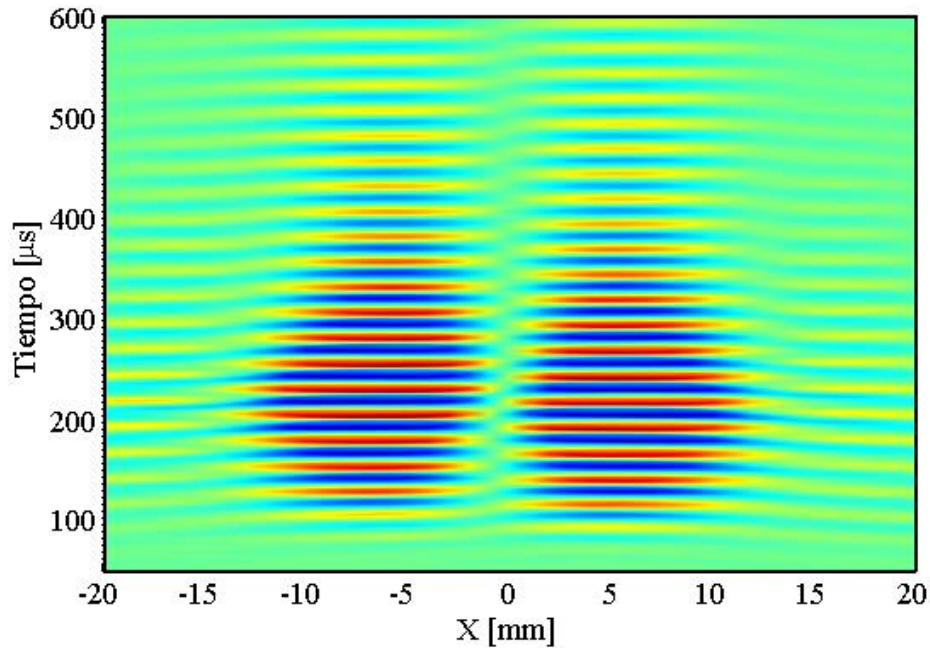


Figura 51. Evolución temporal de la presión a lo largo de 41 puntos de medida que atraviesan transversalmente un VAF cónico de 20° observado a 55 mm.

Asimismo, la Figura 52 muestra la distribución de los puntos de fase constante a todos los instantes de tiempo en los que el haz de un vórtice con focalización cónica de 10° atraviesa el plano de observación (X, Y, 100 mm). La estructura helicoidal que conforman dichos puntos se logra apreciar con claridad, emulando en gran medida esta característica propia de los vórtices acústicos.

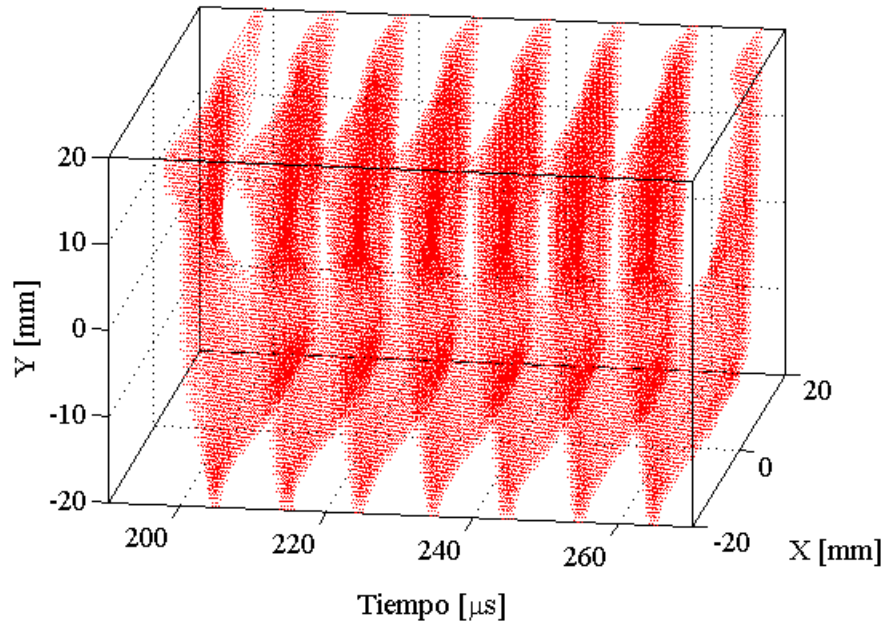


Figura 52. Superficie de fase constante de un vórtice cónico de 10° a 40 kHz generado con un *array* hexagonal, medidos instantáneamente en el plano (X, Y, 100 mm).

5.2.2 Resultados de simulación del *array* hexagonal de 30 elementos

Los resultados de simulación del campo radiado por el multitransductor que se presentan a continuación. Cada elemento del *array* es modelado en el simulador como una fuente que irradia acústicamente con el patrón de directividad de los transductores piezo-cerámicos empleados en el *array*. Además, las 30 fuentes puntuales están distribuidas sobre un arreglo hexagonal y poseen una distancia inter-elemento de 13.6 mm que coincide con el multitransductor empleado en este trabajo. La simulación emplea una o más leyes de retardos para producir el vórtice a una frecuencia dada y focalizarlo cónica o esféricamente. Incluso la ley de retardos para deflejar angularmente el vórtice ya está implementada en el simulador, pero el estudio de VAF deflejos ya fue preliminarmente reportado por (Ealo, et al., 2012) y es objeto de trabajos futuros.

La respuesta en frecuencia a 40 kHz para un VA con diferentes ángulos de focalización cónica, en planos de observación azimutales simulados, con el patrón de directividad y distancia inter-elemento reales, se muestra en la Figura 53. De las imágenes se aprecia una

disminución en la profundidad del haz al aumentar el ángulo de focalización y un notable incremento en la amplitud de la presión, haciendo que la energía se concentre (focalice) en una región cada vez más pequeña y más cerca de las fuentes generadoras. Resultado que coincide con las simulaciones de un transductor mono-elemento mencionadas en la sección 5.1.1.

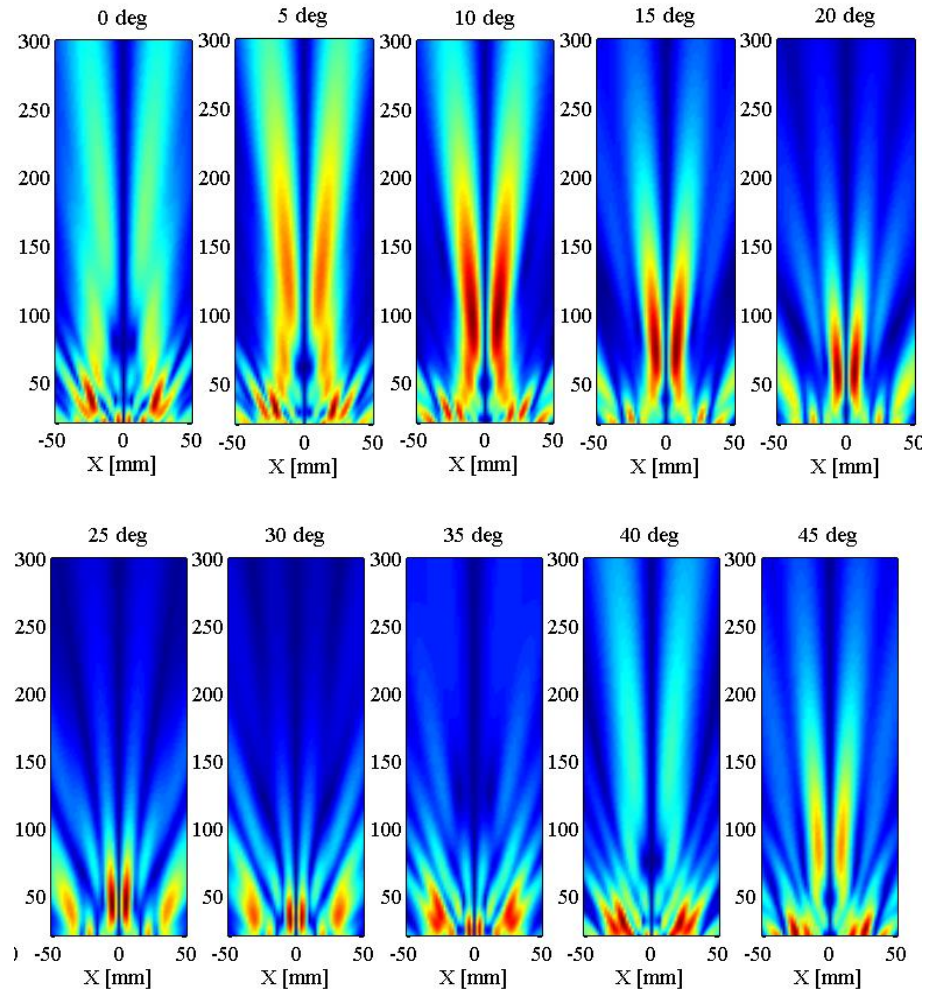


Figura 53. Planos azimutales de presión de un VA a 40 kHz, calculados con el simulador del *array* con paso de 13.6 mm y diferentes ángulos de focalización cónica.

De las figuras se aprecia en el campo cercano (por debajo de la distancia $Z=100$ mm aprox.), la aparición de aberraciones angulares al haz, las cuales se hacen más notorias y aumentan su valor de presión a medida que el ángulo de focalización es mayor. Tales aberraciones se

conocen en la literatura como lóbulos laterales (Pazos Ospina, 2012) y son producto de la composición constructiva, en campo cercano del campo radiado por cada elemento del transductor.

La Figura 54 presenta los mismos planos azimutales de la Figura 53 pero con una ampliación de 100 mm de observación hacia la izquierda del vórtice simulado, permitiendo ver los lóbulos de rejilla. Estos lóbulos, distinguidos por las regiones resaltadas de la figura, a diferencia de los lóbulos laterales, se componen en campo lejano y se producen debido a la discretización (distancia inter-elemento, d) de las fuentes generadoras.

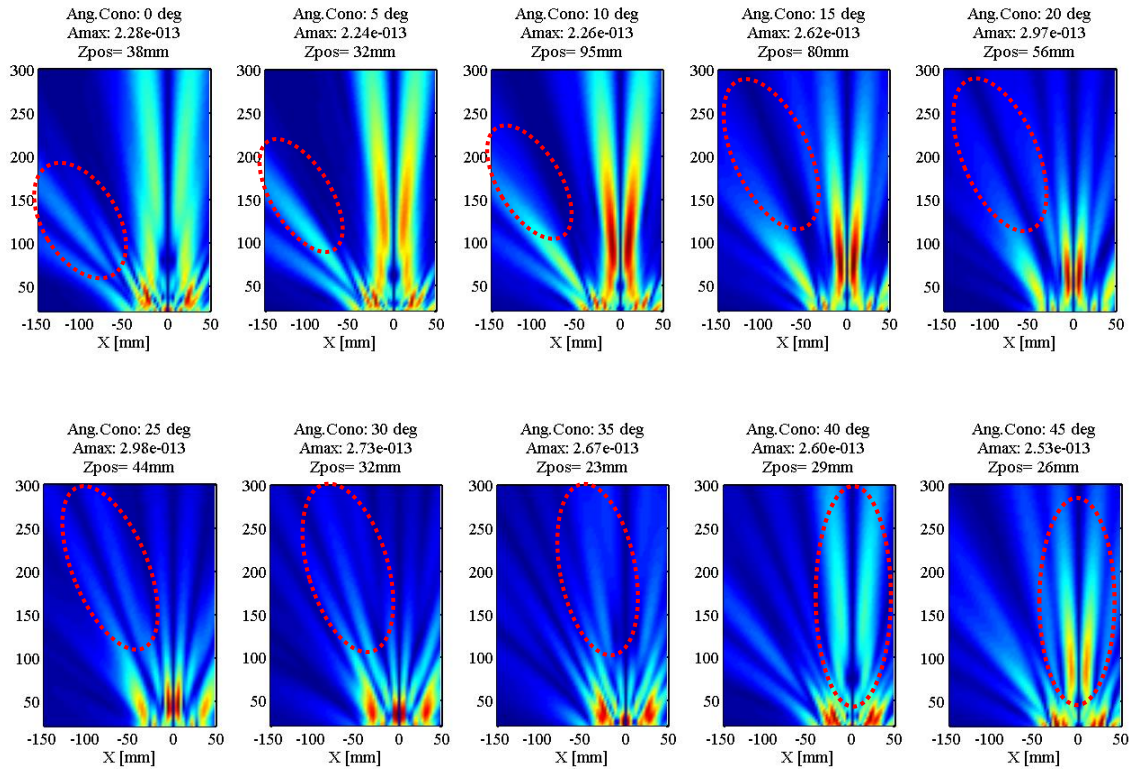


Figura 54. Planos azimutales (ampliados hacia la izquierda) de presión de un VA a 40 kHz, simulados computacionalmente para un *array* de 30 elementos piezo-cerámicos con $d = 13.6$ mm y diferentes ángulos de focalización cónica.

Para el caso de onda continua se reporta que los lóbulos de rejilla no aparecen cuando $d < \lambda/2$ (Pazos Ospina, 2012). En este caso, la mitad de la longitud de onda en aire a 40 kHz (frecuencia de operación del multitransductor) es de 4.3 mm, la cual es menor que el valor

de d (13.6 mm), por consiguiente, deben aparecer lóbulos de rejilla. Nótese que, en los resultados de simulación del transductor mono-elemento (sección 5.1.1), los lóbulos de rejilla no se presentan debido a que la distancia d (0.5 mm aprox.) es mucho menor que $\lambda/2$ a 70 kHz en aire (2.45 mm).

Una particularidad especial que se ve en la Figura 54 es que los lóbulos de rejilla¹⁸ se van acercando hacia el haz principal a medida que la focalización aumenta, mostrando que a partir de 40° de ángulo de focalización, un nuevo haz con las características de un vórtice se conforma. Este hallazgo, hasta donde se conoce, no ha sido reportado en ningún trabajo y requiere de estudio posterior que incluya mediciones experimentales para describir sus propiedades.

Planos transversales de observación ubicados a la distancia Z_{pos} de los vórtices cónicos simulados con el array de 30 elementos se muestran en las Figura 55 y Figura 56. Se puede ver que en los vórtices con focalización de 20° o más, los lóbulos de rejilla aparecen dentro del plano de observación debido a que éstos se van acercando al centro (eje principal) hasta el punto que, para focalización de 45° se ve claramente el nuevo vórtice mencionado arriba.

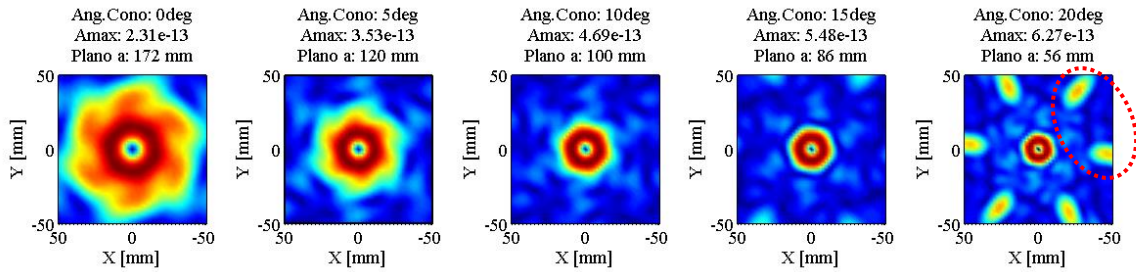


Figura 55. Amplitud de presión en planos transversales a la distancia Z_{pos} para un vórtice a 40 kHz con focalización cónica y ángulos de construcción de cono de 0 a 20 grados.

¹⁸ Por simetría, se supone la aparición de otro lóbulo de rejilla sobre el costado derecho del plano.

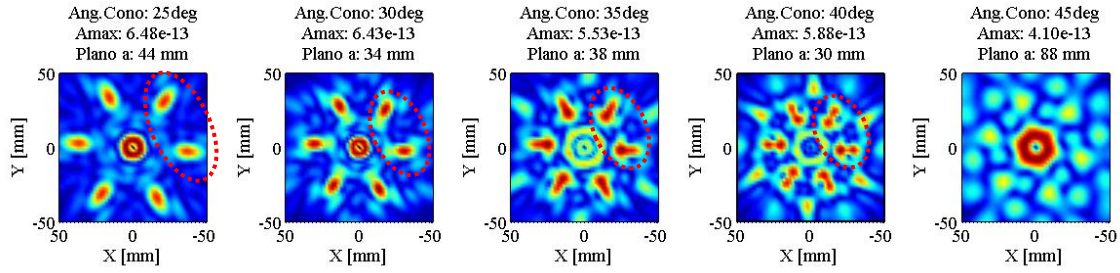


Figura 56. Amplitud de presión en planos transversales a la distancia Z_{pos} para un vórtice a 40 kHz con focalización cónica y ángulos de construcción de cono de 25 a 45 grados

Efecto de la variación de la distancia inter-elemento en la conformación de un VAF

Este apartado presenta los resultados de las simulaciones al aumentar o disminuir la distancia d , manteniendo el patrón de directividad real. La Figura 57 muestra los resultados de amplitud sobre un plano azimutal de 100 mm x 300 mm de un vórtice no focalizado a 40 kHz, al modificar el parámetro d , desde 8 mm hasta 16 mm. Se puede ver que se conserva la estructura fundamental del vórtice, representada por su núcleo (nulo de presión sobre su eje principal) bordeada por el haz de presión alta. En las imágenes se observa que el haz aumenta en profundidad a medida que d es mayor. Esto debido al aumento del diámetro o apertura del *array* producto de los incrementos de la distancia inter-elemento.

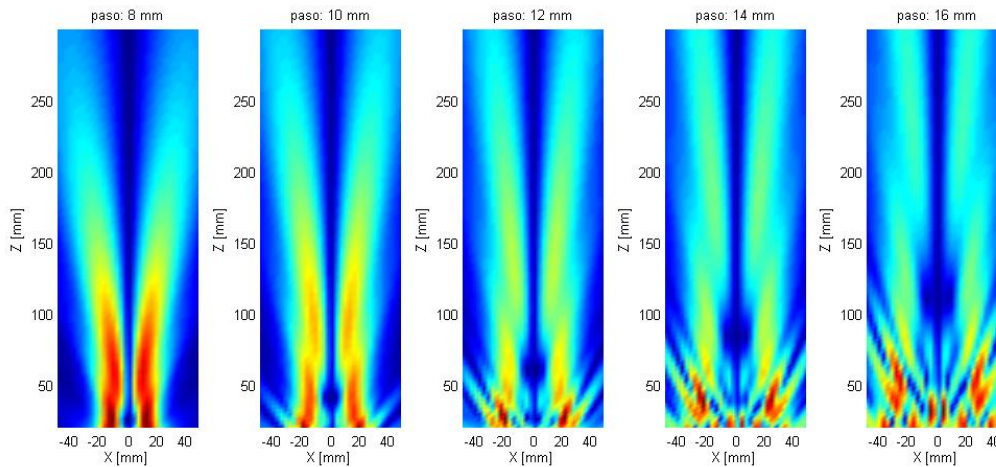


Figura 57. Planos azimutales de presión de un vórtice simulado no focalizado a 40 kHz para diferentes valores de distancia inter-elemento.

Si el diámetro del *array* aumenta, el campo cercano se hace más grande y explica la aparición de los lóbulos laterales para valores de $d \geq 10$ mm. De manera inversa, cuando el valor de d disminuye se ve una clara reducción de los lóbulos hasta el punto que para $d = 8$ mm son prácticamente inexistentes.

En la Figura 58 se puede ver el efecto de la distancia inter-elemento cuando se simula un vórtice focalizado cónicamente de 20° con el *array* hexagonal de 30 elementos. Para el caso de $d = 14$ mm (valor aproximado al transductor real, $d = 13.6$ mm), donde la presencia de lóbulos laterales son de notoria importancia debido a su magnitud, en el caso de $d = 8$ mm, dichos lóbulos no aparecen.

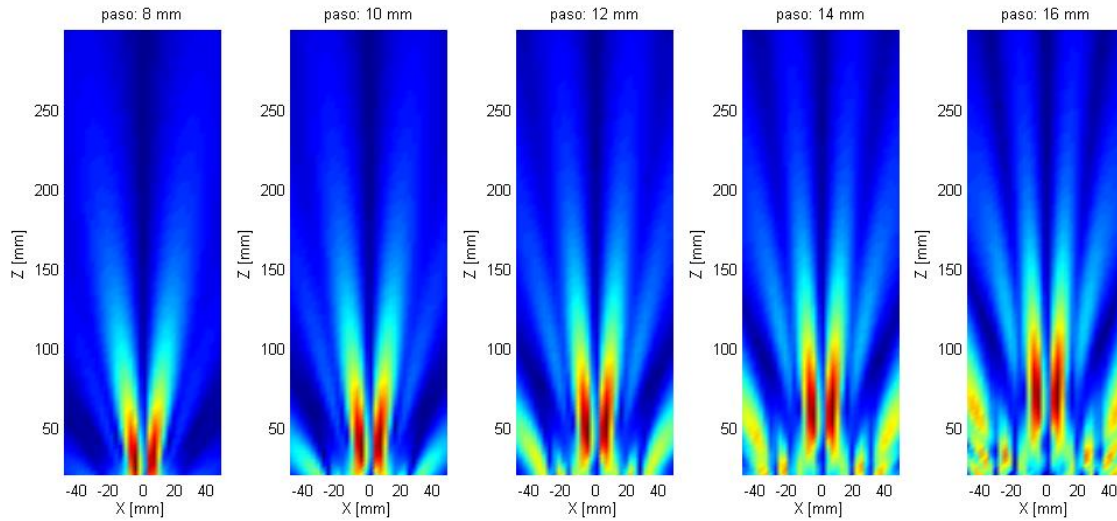


Figura 58. Planos azimutales de presión de un vórtice cónico de 20° a 40 kHz realizados con el simulador de 30 elementos y para diferentes valores de paso.

Los lóbulos de rejilla – no visibles en las dos figuras anteriores debido a las dimensiones del plano de observación – estarían presentes para todos los casos al seguir la norma $d < \lambda/2$.

En la Figura 59 se muestra el comportamiento de los valores de amplitud máxima de presión (A_{max}) del haz principal a medida que se focaliza cónicamente el vórtice generado con el simulador del *array* hexagonal y para diferentes distancias inter-elemento.

Se obtiene que la distancia inter-elemento de 8 mm con focalizaciones entre 15° y 30° produce los valores de A_{max} más altos. Resultado consecuente con lo observado antes, en el cual el valor de $d = 8$ mm tras la ausencia de lóbulos laterales, concentra mejor la energía.

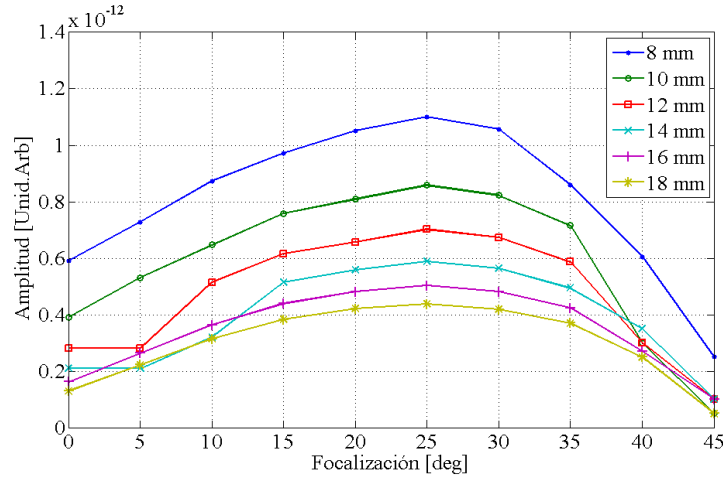


Figura 59. Curvas de A_{max} vs. ángulo de focalización cónica para vórtices a 40 kHz, simulados con un array hexagonal de 30 elementos y para diferentes valores de distancia inter-elemento.

La ubicación (Z_{pos}) de los puntos de amplitud máxima ($A_{máx}$) sobre cada plano azimutal simulado permite la construcción de las curvas que se muestran en la Figura 60, que muestra en buena medida una aproximación a la longitud o profundidad del haz. Los vórtices sin focalización (0°) y de valores de d altos (transductores de mayor diámetro) representan haces profundos que se afectan más fácilmente al ser enfocados. Nótese que los vórtices con $d = 8$ mm son en general haces cortos, en los que su longitud no se afecta significativamente con la focalización, pero sí en sus valores de presión.

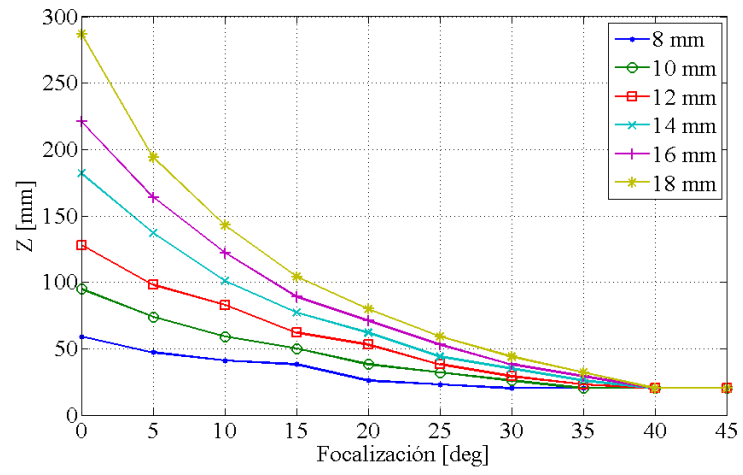


Figura 60. Curvas de Z_{pos} vs. ángulo de focalización cónica para vórtices a 40 kHz, simulados con un *array* hexagonal de 30 elementos y para diferentes valores de pitch.

6 Conclusiones y trabajo futuro

En este trabajo se diseñó y construyó un transductor mono-elemento que genera vórtices acústicos focalizados (VAF) a partir de la combinación de una superficie helicoidal con una cónica de 20° de ángulo de construcción, y se observó que el vórtice preserva su estructura. Simulaciones computacionales mostraron el mismo resultado, incluso para focalizaciones con un ángulo mayor al del transductor construido. Se obtuvo además, que la magnitud de la presión acústica aumenta a medida que incrementa el ángulo de cono para todos los valores de la relación Diámetro sobre Longitud de onda (D/λ) entre 3.5 y 14.1¹⁹. Las simulaciones predicen un aumento de la presión, respecto a vórtices no focalizados de hasta casi cuatro veces para vórtices cónicos y de más de cinco veces para vórtices con focalización esférica y parabólica.

Los modelos de simulación se validaron respecto a los transductores empleados, dejando abierta la posibilidad de simular transductores que operen a otras frecuencias, de diferente carga topológica, de geometría no circular e incluso que evalúe el resultado de focalizar con superficies elípticas o curvas de funciones arbitrarias. Además, los modelos permiten evaluar el efecto de la deflexión angular sobre la estructura del vórtice, especialmente para la generación de vórtices con sistemas *Phased Array*, donde la deflexión angular se produce anexando una ley focal de retardos que produzca dicho efecto.

El transductor mono-elemento construido se diseñó para trabajar con carga topológica unitaria y a 70 kHz en aire, muy por debajo de la frecuencia a la que el Emfit® presenta su mayor sensibilidad (300 kHz ~ 350 kHz aprox.). No obstante, este prototipo deja un precedente que indica que sí es factible focalizar vórtices con un transductor mono elemento. Un trabajo futuro consiste en excitar el transductor mono-elemento a las frecuencias de 280

¹⁹ Para $D = 40$ mm, los valores de 3.5 y 14.1 corresponden a frecuencias en aire de 30 kHz y 120 kHz, respectivamente

kHz y 350 kHz para generar VAF de cargas topológicas 4 y 5 respectivamente, y observar si hay interacción con coloides de fase continua gaseosa y de fase dispersa sólida.

Se demostró la generación de VAF a partir de un sistema *Phased Array* comercial y un multitransductor de 32 elementos piezo-cerámicos construido en el Laboratorio de Vibraciones y Acústica de la Universidad del Valle. La generación de VAF se logró con la programación de leyes de retardos. Aunque se probó únicamente la focalización cónica, el trabajo realizado abre la posibilidad para probar otras leyes de focalización como la esférica y la parabólica, que, en el caso del simulador del transductor mono-elemento, mostraron aumentar los niveles de ganancia en presión, mucho más que la focalización cónica. Además, la prueba de Vórtices de carga topológica de mayor orden mediante esta tecnología, aún no se ha hecho en nuestro laboratorio.

Se reportó la aparición de los lóbulos de rejilla, que dependen principalmente de la distancia inter-elemento del *array*. Además, al focalizar el vórtice, estos lóbulos también se mueven espacialmente hasta el punto de conformar un nuevo vórtice centrado sobre el eje principal de propagación para ángulos de cono por arriba de 40° . Este resultado supone el futuro trabajo de estudiar este fenómeno a profundidad, que, hasta donde nos consta, no ha sido reportado en la literatura. Se requiere establecer una relación entre la posición de los lóbulos de rejilla y el ángulo de focalización. Además queda por indagar si la carga topológica juega algún papel en la aparición de estos lóbulos de rejilla. Se mostró el efecto de la distancia inter-elemento, d , cuando ésta es más pequeña o más grande que la del multitransductor real, mostrando la disminución de los lóbulos de rejilla cuando d se hace cada vez más pequeño. Además, el haz principal se hace más corto, la energía se concentra y los valores máximos de presión aumentan, producto de una apertura del *array* menor.

El estudio de vórtices acústicos focalizados y a la vez deflectados no ha sido aún reportado en la literatura. Teniendo en cuenta que el gran potencial de aplicación de los vórtices apunta hacia la manipulación controlada de partículas, la posibilidad de deflectar angularmente el haz, permitiría desplazarlas sin contacto de un lugar a otro empleando un único dispositivo.

Otro trabajo futuro es la cuantificación del momento angular generado y transferido al medio. Se considera pertinente profundizar en el estudio de los campos de intensidad acústica de los vórtices, para determinar si la focalización es redundante o no para mejorar la capacidad de transferir el momento angular necesario para atrapar e inducir rotación a partículas suspendidas en aire.

El comportamiento de los VAF ante oclusiones parciales o un medio heterogéneo no está determinado. Se propone realizar este estudio mediante la metodología empleada por (Escobar, 2013), quien observó experimental y computacionalmente el comportamiento de vórtices no focalizados ante oclusiones.

7 Bibliografía

Abramovitz, M. & Stegun, I. A., 1972. *Handbook of Mathematical Functions*. Washington: United States Department of Commerce.

Alametsä, J. y otros, 2006. Automatic detection of spiking events in EMFi sheet during sleep. *Medical Engineering & Physics*, p. 267–275.

Allen, L., Beijersbergen, M. W., Spreeuw, R. J. C. & Woerdman, J. P., 1992. Orbital angular momentum of light and the transformation of laguerre-gaussian laser modes. *Physical Review A*, p. 8185–8189.

Alonzo, C. A., Rodrigo, P. J. & Glückstad, J., 2005. Helico-conical optical beams: a product of helical and conical phase fronts. *Optics express*, 13(5).

Anttonen, J., 2005. *Using the emfi chair to measure the user's emotion-related heart rate responses*, s.l.: s.n.

Bovtun, V. y otros, 2007. Ferroelectret non-contact ultrasonic transducers. *Applied Physics A*, p. 737–743.

Browne, R. F. J. & Et al, 2003. Intra-operative Ultrasound-guided Needle Localization for Impalpable Testicular Lesions. *Clinical Radiology*, pp. 566-569.

Burckhardt, C. B., Hoffmann, H. & Grandchamp, P. A., 1973. Ultrasound axicon: a device for focusing over a large depth. 54(6), pp. 1628-1630.

Courtney, C. R. P. y otros, 2013. Dexterous manipulation of microparticles using Bessel-function acoustic pressure fields. *Applied Physics Letters*, 102(12), p. 123508.

Dansachmiller, M. y otros, 2005. Elastic and electromechanical properties of polypropylene foam ferroelectrets. *Applied Physics Letters*, p. 86.

Degel, C. y otros, 2007. Ultrasound phased array for airborne applications based on cellular polymer. *IEEE International Ultrasonics Symposium*, p. 727–732.

Demore, C. y otros, 2012. Mechanical Evidence of the Orbital Angular Momentum to Energy Ratio of Vortex Beams. *Physical Review Letters*, Mayo, 108(19), p. 194301.

Demore, C. y otros, 2011. *A sonic screwdriver: Acoustic angular momentum transfer for ultrasonic manipulation*. s.l., IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings.

Ding, Z., Ren, H., Zhao, Y. & Stuart N, J., 2002. High-resolution optical coherence tomography over a large depth range with an axicon lens. *Optics Letters*, 27(4), pp. 243-245.

Ealo, J., 2009. *Transductores basados en ferroelectretos para aplicaciones ultrasónicas en aire*, Madrid, España; Tesis Doctoral (Ingeniero Mecánico), Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales: s.n.

Ealo, J., Camacho, J. & Fritsch, C., 2009. Airborne ultrasonic phased arrays using ferroelectrets: A new fabrication approach. *IEEE Transactions On Ultrasonics, Ferroelectrics, And Frequency Control*, p. 848–858.

Ealo, J., Camacho, J., Seco, F. & Fritsch, C., 2009. Ultrasonic air-coupled inspection of textile materials using ferroelectret-based phased arrays. *Review of progress in quantitative nondestructive evaluation*, pp. 933-940.

Ealo, J. y otros, 2006. 5h-5 broadband omnidirectional ultrasonic transducer for air ultrasound based on emfi. *Ultrasonics Symposium, 2006. IEEE*, p. 812–815.

Ealo, J. L. y otros, 2012. *Experimental analysis of the steering capabilities of airborne acoustic vortices*. Dresden, Germany, IEEE , pp. 759 - 762 .

Ealo, J., Prieto, J. C. & Seco, F., 2011. Airborne Ultrasonic Vortex Generation Using Flexible Ferroelectrets. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control*, pp. 1651-1657.

Ealo, J., Seco, F. & Jiménez, A., 2008. Broadband EMFi-Based transducers for ultrasonic. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, p. 919–929.

Ealo, J. y otros, 2008. Customizable field airborne ultrasonic transducers based on electromechanical film. *Ultrasonics Symposium 2008, IEEE*, p. 879–882.

Escobar, J. S., 2013. *Modelado y caracterización de vórtices acústicos ocluidos*, Santiago de Cali. Trabajo de Grado (Ingeniero Mecánico), Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica: s.n.

Evreinov, G. & Raisamo, R., 2005. One-directional position-sensitive force transducer based on EMFi. *Sensors and Actuators A: Physical*, p. 204–209.

Galvez, E., 2006. Gaussian beams in the optics course. *American Journal of Physics*, p. 355–361.

Ganic, D., Gan, X. & Gu, M., 2003. Focusing of doughnut beams by a high numerical-numerical-aperture objective in free space. 11(21).

Gao, L. y otros, 2014. Linear phase distribution of acoustical vortices. *Journal of Applied Physics*, Issue 116.

Gibson, G. y otros, 2004. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum. *Optics Express*, p. 5448–5456.

González Hernández, J. F., 2013. *Diseño y construcción de multitransductores con arreglo en fase para generar vórtices ultrasónicos en aire*, Santiago de Cali: Trabajo de Grado (Ingeniero Electrónico), Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.

Gspan, S., Meyer, A., Bernet, S. & Ritsch-Marte, M., 2004. Optoacoustic generation of a helicoidal ultrasonic beam. *The Journal of the Acoustical Society of America*, p. 1142–1146.

Hefner, B. T. & Marston, P. L., 1999. An acoustical helicoidal wave transducer with applications for the alignment of ultrasonic and underwater systems. *Journal of the Acoustical Society of America*, pp. 3313-3316.

He, H., Friese, M. E. J., Heckenberg, N. R. & Rubinsztein-Dunlop, H., 1995. Direct Observation of Transfer of Angular Momentum to Absorptive Particles from a Laser Beam with a Phase Singularity. *Physical Review Letters*, p. 826–829.

Hillenbrand, J. & Sessler, G., 2002. Piezoelectricity in cellular electret films. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, p. 537–542.

Junnila, S., Akhbardeh, A., Varri, A. & Koivistoinen, T., 2005. An emfi-film sensor based ballistocardiographic chair: Performance and cycle extraction method. *IEEE Workshop on Signal Processing Systems Design and Implementation*, p. 373–377.

Kacprzyk, R., Dobrucki, A. & Gajewski, 1997. Double-layer electret transducer. *Journal of electrostatics*, p. 33–40.

Kim, K.-H. y otros, 1998. *Cold atomic beam from an axicon trap*. s.l., s.n., p. 238.

Kirjavainen, K., 1987. Finlandia, Patente nº US Patent No.4654 546.

Kressmann, R., 2001. New piezoelectric polymer for air-borne and water-borne sound transducers. *Journal of the Acoustical Society of America*, p. 1412–1416.

Lei, M. & Yao, B., 2004. Characteristics of beam profile of Gaussian beam passing through an axicon. Volumen 239, pp. 367-372.

Lerch, R., Streicher, A. & Sutor, A., 2007. Broadband ultrasonic transducer. *19th International Congress on Acoustics*, September.

Li, J., Gao, X., Zhang, S. & Zhuang, S., 2009. Focusing properties of Gaussian beam with mixed screw and conical phase fronts. Volumen 121, p. 1794–1798.

Mallik, P., 2005. *axicon_Proteep.pdf*. [En línea]
Available at: http://www.optics.arizona.edu/OPTI696/2005/axicon_Proteep.pdf
[Último acceso: 29 03 2012].

Marchiano, R. & Thomas, J. L., 2005. E 71, 066616.

McGarrity, J. P. & Et al, 1990. *A facet ensemble approach for evaluation of array performance in ultrasonic NDE*. s.l., s.n., pp. 1129 - 1132.

Mitri, F. G., 2010. Interaction of a Nondiffracting High-Order Bessel (Vortex) Beam of Fractional Type α and Integer Order m With a Rigid Sphere: Linear Acoustic Scattering and Net Instantaneous Axial Force. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*.

Mitri, F. G., 2011. Potential-Well Model in Acoustic. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*.

Mitri, F. G. & Silva, G. T., 2011. Off-axial acoustic scattering of a high-order Bessel vortex beam by a rigid sphere. Volumen 48, pp. 392 - 400.

Nagai, S. & Izuka, K., 1982. A practical ultrasound axicon for non-destructive testing. 20(6), pp. 265-270.

Neild, A. & Et al, 2004. *Imaging using air-coupled polymer-membrane capacitive ultrasonic arrays*. s.l., s.n., pp. 859 - 864.

Nye, J. & Berry, M., 1974. Dislocations in wave trains. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, pp. 165-190.

Nye, J. F., 1999. *Natural focusing and fine structure of light*. s.l.:Institute of Physics Publishing.

Paaanen, M., Valimaki, H. & Lekkala, J., 1999. Modelling the electromechanical film EMFi. *Journal of Electrostatics*, pp. 193-204.

Pazos Ospina, J. F., 2012. *Construcción y evaluación de un multitransductor de focalización híbrida basado en ferroelectretos para inspección de materiales sin contacto*, Santiago de Cali: Trabajo de Grado (Ingeniero Mecánico), Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica.

Placko, D. & Kundu, T., 2007. *DPSM for Modeling Engineering Problems*. New Jersey: Wiley - Interscience.

Quiceno Buitrago, F. A., Pazos Ospina, J. F. & Ealo Cuello, J. L., 2012. *Los vórtices acústicos: generación, caracterización y potencial de aplicación*. Pereira, Risaralda, Colombia, s.n.

R/D Tech Corporation, 2004. *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications: R/D Tech Guideline*. s.l.:s.n.

Ren, Q. & Birngruber, R., 1990. Axicon: a new laser beam delivery system for corneal surgery. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 26(12).

Rozas, D., Law, C. T. & Swartzlander, G. A., 1997. Propagation dynamics of optical vortices. *Journal of the Optical Society of America*, p. 3054–3065.

Santillan, A. O. & Volke-Sepulveda, K., 2009. A demonstration of rotating sound waves in free space and the transfer of their angular momentum to matter. *American Journal of Physics*, p. 209–215.

Savio, D. & Ludwig, L., 2007. Smart carpet: A footstep tracking interface. p. 754–760.

Sessler, G. & Hillenbrand, J., 1999. Electromechanical response of cellular electret films. *Applied Physics Letter*, p. 3405–3407.

Song, J. & Chimenti, D. E., 2006. Design, fabrication and characterization of a spherically focused capacitive air-coupled ultrasonic transducer. *International Journal of Applied Science and Engineering*, pp. 1 - 19.

Stephens, D. & Et al, 2008. *The Acoustic Lens Design and in Vivo Use of a Multifunctional Catheter Combining Intracardiac Ultrasound Imaging and Electrophysiology Sensing*. s.l., s.n., pp. 602-618.

Streicher, A., Kaltenbacher, M., Lerch, R. & Peremans, H., 2005. Broadband EMFi ultrasonic transducer for bat research. *Proceedings 2005 IEEE Symposium on Ultrasonics*, p. 1629–1632.

Streicher, A., Muller, R., Peremans, H. & Lerch, R., 2003. Broadband ultrasonic transducer for a artificial bat head. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, p. 1364–1367.

Thomas, J. L. & Marchiano, R., 2003. Letter 91. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*.

Thomas, J.-L. & Marchiano, R., 2003. Pseudo Angular Momentum and Topological Charge Conservation for Nonlinear Acoustical Vortices. *Physical Review Letters*, p. 244302.

Tuncer, E. & Wegener, M., 2004. Elastic properties of cellular polypropylene films: Finite element simulations and their comparison with experiments. *Submitted to arXiv.org*.

Volke-Sepúlveda, K., O. Santillán, A. & R. Boullosa, R., 2008. Transfer of Angular Momentum to Matter from Acoustical Vortices in Free Space. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*.

Wilcox, P. D. & Et al, 2007. *Advanced Reflector Characterization with Ultrasonic Phased Arrays in NDE Applications*. s.l., s.n., pp. 1541 - 1550.

Wilson, S. & et al, 2007. *New materials for micro-scale sensors and actuators – an engineering review*, s.l.: s.n.

Zhang, L. & Marston, P. L., 2012. Axial radiation force exerted by general non-diffracting beams. *Journal Acoustics Society of America*, 131(4).

Zhang, X., Hillenbrand, J. & Sessler, M., 2007. Ferroelectrets with improved thermal stability made from fused fluorocarbon layers. *Journal of Applied Physics*, p. 101.

Zhang, Z., Pu, Y. & Wang, X., 2008. Distribution of phase and orbital angular momentum of tightly focused. 47(8).