

**UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA**



**FOCALIZACIÓN PASIVA Y DINÁMICA DE CAMPOS
ACÚSTICOS PARA USOS INDUSTRIALES**

CARLOS ANDRÉS RIQUELME OSSES

Profesor guía
Dra. Yolanda Vargas Hernández

Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Físico

Santiago de Chile
2014

FOCALIZACIÓN PASIVA Y DINÁMICA DE CAMPOS ACÚSTICOS PARA USOS INDUSTRIALES

Trabajo de graduación presentado a la Facultad de Ciencia, en cumplimiento
parcial de los requisitos exigidos para optar al Título Profesional de
Ingeniero Físico

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

2014

FOCALIZACIÓN PASIVA Y DINÁMICA DE CAMPOS ACÚSTICOS
PARA USOS INDUSTRIALES

CARLOS ANDRÉS RIQUELME OSSES

Este trabajo de Graduación fue preparado bajo la supervisión de la profesora guía Dra. Yolanda Vargas Hernández del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile y ha sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora del candidato.

.....

Dr. Luis Gaete Garretón

.....

Ms. Ricardo Pesse Lohr

.....

Dra. Yolanda Vargas Hernández

Profesora Guía

.....

Dra. Yolanda Vargas Hernández

DIRECTORA

© **Carlos Andrés Riquelme Osses**

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

Dedicado a mi familia

Agradecimientos

Primero que todo quisiera agradecer a mis padres Carlos Riquelme y Litta Osses por darme la oportunidad de estudiar una carrera profesional y ser un apoyo fundamental a lo largo de toda la carrera universitaria, donde siempre me brindaron todo su cariño y dieron lo mejor de sí para que creciera como persona y no titubearon en ayudar en los momentos difíciles. A mi hermana Litta Riquelme por su apoyo y cariño en los buenos y malos momentos.

A Natalia Salazar, por haber compartido este largo proceso donde siempre tuve su apoyo incondicional, consejos, preocupación y afecto. Además todo lo aprendido en las horas de estudio y ocio que ayudaron a desarrollar como ingeniero y persona. Siempre estaré profundamente agradecido.

A mis amigos y compañeros y a todos que aportaron de alguna forma en este trabajo.

A los profesores Luis Gaete y Yolanda Vargas por sus consejos, paciencia y preocupación para llevar a cabo este trabajo.

A mis compañeros de laboratorio por su disposición, consejos y buena voluntad en el día a día. Y en especial a Josué Meneses, Gabriel Fuentes, Nicolás Candía y Renato Galleguillos por aportar y colaborar en la realización de esta tesis.

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto FONDEF D09 I 235.

Resumen

La cavitación acústica es un fenómeno ampliamente usado en la industria, por ejemplo, limpieza de inyectores, procesos de cristalización, reacciones químicas, etc. Gobernar este fenómeno, sobre todo manejar la zona en la que se produce, es una tarea pendiente. El mayor problema que tienen los sistemas que basan su funcionamiento en la cavitación es la enorme energía que libera el proceso que finalmente destruye la superficie del sistema radiante. Una solución para éste problema estaría en conseguir que el campo cavitatorio se produzca lejos de la superficie radiante, es decir focalizar el campo.

En este trabajo se utilizó un sistema de arreglo lineal de transductores ultrasónicos de potencia con el que se logró realizar una focalización de campo acústico mediante el desfase de señales de alimentación de los transductores en la región transite del campo cercano al campo lejano. Este arreglo lineal fue diseñado mediante estudios de modelación en COMSOL para la determinación de parámetros de optimización en el arreglo, los que fueron: distancia total del arreglo lineal, distancia entre transductores y desfases de señales de alimentación.

De los resultados obtenidos, el desfase óptimo en el que se produjo mayor concentración de energía en la región de focalización y menor energía en cercanías del arreglo lineal de transductores ultrasónicos de potencia fue a 50° , desfase determinado mediante un factor de optimización.

Índice de contenidos

Agradecimientos	i
Resumen	ii
Índice de figuras	iv
Índice de Tablas	vii
Introducción	1
Capítulo 1. La ecuación de onda	3
1.1. Ecuación de onda unidimensional.....	3
1.2. Ecuación de onda en tres dimensiones	5
1.3. Ecuación de Helmholtz	6
Capítulo 2. Transductor pistón circular	8
2.1. Campo acústico generado por un transductor circular plano	9
2.2. Campo lejano o región de Fraunhofer.....	11
2.3. Campo cercano o región de Fresnel	13
2.3.1. Campo de un transductor circular en su centro axial.....	13
2.4. El efecto de fenómenos cavitatorios en el campo cercano	15
2.4.1. Umbral de Blake	16
Capítulo 3. Focalización en ultrasonidos	19
3.1. Focalización por concentradores	19
3.1.1. Concentrador parabólico	20
3.1.2. Simulación numérica del concentrador parabólico	21
3.2. Focalización por arreglo de transductores	26
3.2.1. Arreglo lineal de transductores ultrasónicos	27
Capítulo 4. Desarrollo experimental	31
4.1. Caracterización de transductores.....	31
4.2. Modelamiento de transductores	33
4.3. Medición de desplazamiento en función de la corriente.....	35
4.4. Arreglo lineal de transductores de potencia	38
4.4.1. Estudio de distancia entre transductores.....	38
4.4.2. Estudio de desfase en arreglo lineal de transductores	42
4.4.3. Sistema experimental	45
4.5. Proceso de medición del campo acústico	47
4.6. Análisis y resultados	48
Conclusiones	55
Referencias	56
Anexo	57

Índice de figuras

Figura 2.1: Representación del principio de Huygens. Superficie compuesta por fuentes puntuales.....	9
Figura 2.2: Sistema de coordenadas utilizadas para obtener el campo acústico en el espacio donde el campo es calculado en el plano del observador (x_0, y_0, z)	10
Figura 2.3: Amplitud normalizada para el campo lejano o región de Fraunhofer para un transductor circular con $X = 2az/\lambda$	12
Figura 2.4: Campo de un transductor no focalizado: (Imagen superior) Región de presión acústica en el plano XZ para un pistón circular [5]. (Imagen inferior) Variación de presión a lo largo del eje central Z.	15
Figura 2.5: Ciclo de formación de una burbuja de cavitación cercana a la superficie donde genera una implosión creando un Micro-Jet. Fuente: http://indycleanblinds.com/	16
Figura 2.6: Umbral de Blake para una burbuja de aire en condición ambiente para radios de burbujas entre 0.1 y 100[μ m].	18
Figura 3.1: Diagrama de concentrador parabólico [7]......	21
Figura 3.2: Geometría del concentrador parabólico: a) vista transversal o 2D, b) vista 3D.	22
Figura 3.3: Campo de presión absoluta relativa en concentrador parabólico: a) 20[kHz], b) 60[kHz], c) 100[kHz], d) 200[kHz], e) 300[kHz], f) 400[kHz], g) 500[kHz], h) 600[kHz].	24
Figura 3.4: Presión absoluta a lo largo del eje central a 20[mm] del transductor hasta la zona de focalización.	25
Figura 3.5: Diagrama representativo de un arreglo lineal de transductores.....	27
Figura 3.6: Arreglo de transductores N con señales no desfasadas generando un campo acústico no focalizado.	29

Figura 3.7: Arreglo de N transductores con señales desfasadas para producir focalización del campo acústico.....	29
Figura 4.1: Imagen de transductor ultrasónico de potencia y geometría replicada en COMSOL.	33
Figura 4.2: Desplazamiento total de la geometría del transductor modelada en COMSOL. Vista axisimétrica con unidades en la leyenda en milímetros.....	34
Figura 4.3: Sistema experimental empleado para la medición de velocidad de la cara radiante de transductor ultrasónico de potencia.	35
Figura 4.4: Amplitud de desplazamiento en función de la corriente RMS para transductor ultrasónico TC1.....	36
Figura 4.5: Amplitud de desplazamiento en función de la corriente RMS para transductor ultrasónico TC2.....	36
Figura 4.6: Amplitud de desplazamiento en función de la corriente RMS para transductor ultrasónico TC3.....	37
Figura 4.7: Geometría utilizada en estudio de variación del parámetro e. Línea roja representa la distancia a la que se entregaran los resultados de las simulaciones. Las unidades de los ejes están en milímetros.....	39
Figura 4.8: Campo de presión absoluta con variación del parámetro “e” donde: a) e = 19[mm], b) e = 29[mm], c) e = 39[mm], y d) e = 49[mm].....	40
Figura 4.9: Presión absoluta a lo largo del eje de referencia z impuesto en Figura 4.7.....	41
Figura 4.10: Campo de presión absoluta con variación del parámetro de fase ϕ : a) $\phi = 0[^\circ]$, b) $\phi = 10[^\circ]$, c) $\phi = 20[^\circ]$, d) $\phi = 30[^\circ]$, e) $\phi = 40[^\circ]$, f) $\phi = 50[^\circ]$	43
Figura 4.11: Presión absoluta normalizada producto del desfase de las señales a lo largo del eje de propagación z.	45
Figura 4.12: Esquema del sistema experimental empleado para la obtención de los perfiles de campo acústico en estanque con agua para el arreglo lineal de transductores ultrasónicos.	46

Figura 4.13: distribución del campo acústico a lo largo del eje vertical z. Visualización de región de focalización.	48
Figura 4.14: Comparación de distribución del campo acústico a lo largo del eje de propagación z para desfase de 50[°].	49
Figura 4.15: distribución del campo acústico en cercanías del arreglo lineal de transductores de potencia con respecto al eje vertical y.....	50
Figura 4.16: Presión en función del desfase a una distancia de 160[mm] donde se produce el máximo de presión en la región de focalización.	51
Figura 4.17: Presión en función del desfase a una distancia de 2[mm] donde se produce el máximo de presión cercano al arreglo lineal de transductores de potencia.	52

Índice de Tablas

Tabla 3.1: Valores de entrada de las propiedades para los dominios del fluido y concentrador parabólico.....	22
Tabla 3.2: Diferentes tipos de arreglos de transductores comúnmente utilizados en variadas aplicaciones [5].....	26
Tabla 4.1: Valores de circuito equivalente de un transductor medidos en puente de impedancia.....	32
Tabla 4.2: Cálculos de inductancia en paralelo para cada transductor ultrasónico de potencia.	32
Tabla 4.3: Valores de entrada de las propiedades para los dominios del fluido y masa frontal del transductor ultrasónico de potencia.....	42
Tabla 4.4: Porcentajes de mejora del campo acústico en región de focalización y disminución en las cercanías del arreglo lineal de transductores de potencia.	53
Tabla 4.5: factor de optimización en función del desfase para puntos máximos de presión en región de focalización y arreglo lineal de transductores de potencia.	54

Introducción

Los ultrasonidos de potencia pueden generar altos niveles de intensidad de campos acústicos y son utilizados preferentemente para cambiar las propiedades físicas, químicas o biológicas de los materiales o sistemas en los que se aplica [8]. Sus frecuencias de operación se encuentran en el rango de 10 a 500[kHz].

Al utilizar ultrasonidos de potencia en fluidos, ocurre un fenómeno muy particular llamado cavitación acústica, que se manifiesta debido a las altas concentraciones de energía, logrando crear cavidades en el fluido, más conocidas como burbujas. Estas burbujas, al situarse en las regiones de mayor presión, entre otras cosas, pueden implotar, generando micro corrientes. Este colapso genera altas presiones así como también grandes aumentos en la temperatura en tiempos muy cortos, del orden de los microsegundos [11]. Este y otros fenómenos cavitatorios reducen la vida útil de los transductores de potencia, ya que su superficie radiante se ve fuertemente afectada llegando a ser, en el peor de los casos, destruida. Por lo tanto, es de sumo interés evitar que sobre la cara radiante de los transductores se genere la cavitación acústica y así evitar que los altos niveles de energía generados estén sobre la superficie radiante de los transductores.

Una manera eficiente de obtener ondas ultrasónicas muy intensas y distantes de la superficie radiante es realizando una focalización del campo acústico. La focalización puede ser originada mediante diferentes métodos de concentración de haces ultrasónicos, como por ejemplo: utilización de lentes acústicos, por reflexión de un campo acústico en un concentrador, generación de un campo acústico con una superficie radiante cóncava o arreglos de transductores con sus respectivos desfases calculados para llevar a cabo la focalización [8].

Según las técnicas de focalización existentes, dos de éstas serán estudiadas en este trabajo: focalización por reflexión sobre un concentrador y focalización dinámica por arreglo de transductores. Ambas técnicas serán simuladas por elementos finitos mediante el software COMSOL 5.0, para evaluar el perfil del campo acústico que será modelado con los parámetros reales de los transductores ultrasónicos de potencia a utilizar, logrando que las simulaciones sean lo más aproximadas a la realidad. Posteriormente, se realizará un sistema experimental con el que se deben corroborar los resultados de tales simulaciones.

En resumen, el *objetivo principal* de este trabajo de título es estudiar las alternativas de focalización del campo acústico para un rango de frecuencias cercanas a 20[kHz], teniendo como *objetivos específicos*:

Evaluar la mejor alternativa de focalización de la energía ultrasónica mediante la simulación y realización de sistemas experimentales.

Construir un sistema experimental para verificar los estudios de focalización.

Capítulo 1. La ecuación de onda

Frecuentemente en física se utiliza la ecuación de onda para el análisis de fenómenos relacionados a la propagación de ondas en medios continuos como por ejemplo estudios de ondas acústicas, ondas electromagnéticas, etc. Por lo tanto, es fundamental hacer una breve descripción de esta ecuación para realizar un análisis de un campo acústico y poder entregar soluciones mediante el uso de elementos finitos.

1.1. Ecuación de onda unidimensional

A partir de la ecuación de movimiento en una dimensión es posible derivar la ecuación de onda unidimensional. Para este procedimiento, se deben introducir dos ecuaciones: La primera es la Ley de Gases y la segunda corresponde a la Ley de Conservación de Masa.

Las ecuaciones (1.1) y (1.2) mostradas a continuación, corresponden a la ecuación de movimiento y Ley de gases (Ecuación de continuidad [1]), respectivamente:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad 1.1$$

$$\frac{1}{P_0} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\gamma}{V_0} \frac{\partial \tau}{\partial t} = 0 \quad 1.2$$

Donde p es la presión, ρ_0 es la densidad del medio, γ el coeficiente de dilatación adiabática, τ la variación de volumen, v la velocidad, V_0 el volumen inicial y P_0 la presión inicial.

La segunda ecuación relevante, como se decía, es la de conservación de masa:

$$V_0 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial \tau}{\partial t} = 0 \quad 1.3$$

Al combinar la ecuación de conservación de masa y la Ley de gases resulta:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \gamma P_0 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad 1.4$$

Diferenciando esta ecuación respecto al tiempo y la ecuación de movimiento con respecto a la coordenada espacial se tiene:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \gamma P_0 \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} = 0 \quad 1.5$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \rho_0 \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} = 0 \quad 1.6$$

Al combinar las ecuaciones (1.5) y (1.6) resulta:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\rho_0}{\gamma P_0} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad 1.7$$

Donde $\sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}} = c$ es la velocidad de propagación de la onda en el medio.

Considerando esto para reescribir la ecuación anterior, se tiene:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad 1.8$$

Finalmente esta ecuación diferencial de segundo orden es la llamada ecuación de onda unidimensional, la que puede tener cualquier tipo de solución de la forma $p(x, t) = f(x \pm ct)$

1.2. Ecuación de onda en tres dimensiones

En un caso más general, la presión cambia en el medio según:

$$\nabla p = i \frac{\partial p}{\partial x} + j \frac{\partial p}{\partial y} + k \frac{\partial p}{\partial z} \quad 1.9$$

Donde i , j y k son los vectores unitarios en las direcciones x , y , z , respectivamente, p es la presión acústica en un punto arbitrario en el espacio.

Por otro lado, la ecuación de movimiento de Euler para un fluido relaciona la presión y la velocidad de la partícula de la siguiente forma:

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -\nabla p \quad 1.10$$

Al igual que en el procedimiento para el caso unidimensional, será necesario introducir la relación de conservación de masa que relaciona la densidad del medio y la velocidad de la partícula:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \nabla \cdot \vec{v} \quad 1.11$$

Finalmente, podemos combinar la ecuación anterior con la ecuación que relaciona la presión con la densidad $p = c^2 \rho$, para obtener:

$$\rho_0 \nabla \cdot \vec{v} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad 1.12$$

Diferenciado con respecto al tiempo obtenemos:

$$\rho_0 \nabla \cdot \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad 1.13$$

Y utilizando la relación de presión y densidad para sustituir el vector de velocidad resulta:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad 1.14$$

Esta es la llamada ecuación de onda tridimensional donde el símbolo que acompaña la presión es el operador Laplaciano en tres dimensiones [2].

1.3. Ecuación de Helmholtz

Una vez descritas las ecuaciones de propagación del sonido en un medio, podemos suponer que el campo acústico generado por una fuente puntual es provocado por una variable, la presión p . Esta es representada por la ecuación de onda tridimensional descrita en la sección anterior:

$$\nabla(\nabla p - q) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = Q \quad 1.15$$

Donde q y Q son los términos de posible dipolo acústico y fuente monopolar, respectivamente. Si suponemos una solución a la ecuación de onda de la forma:

$$p = p(x)e^{i\omega t} \quad 1.16$$

Donde $p(x)$ es la componente espacial y $e^{i\omega t}$ la componente temporal, la ecuación de onda se reduce a la ecuación de Helmholtz:

$$\nabla(\nabla p - q) + \frac{\omega^2}{c^2} p = Q \quad 1.17$$

Con ω la frecuencia angular. En el caso de que la solución sea homogénea (q y Q sean cero) la solución para la ecuación de Helmholtz [3], será:

$$p = P_0 e^{i(Kx - \omega t)} \quad 1.18$$

Donde P_0 es la amplitud de la onda con movimiento en la dirección K y número de onda $k = |K|$

Capítulo 2. Transductor pistón circular

Cuando el propósito es focalizar un campo acústico generado por un arreglo lineal de transductores, se deben tener en cuenta múltiples factores, los que determinarán la posibilidad de focalizar en las distintas regiones del espacio. Algunos de éstos son: la geometría de los transductores utilizados, la frecuencia con la que éstos son excitados o el medio por el que viajarán las ondas acústicas.

Por lo tanto, para llevar a cabo el propósito de focalizar el campo en cierta región del espacio, es indispensable realizar previamente una descripción de tal campo acústico tomando en cuenta los factores anteriormente señalados. Esto se puede realizar mediante métodos numéricos, donde se puede obtener aproximadamente el perfil del haz acústico del arreglo de transductores.

Para calcular el perfil del haz de un transductor ultrasónico se puede considerar que la superficie del transductor se compone de infinitas fuentes puntuales donde cada fuente emite ondas esféricas, así la presión se puede determinar en cualquier punto arbitrario.

El principio de Huygens describe el sonido como ondas esféricas donde cada punto del frente de onda es considerado como una fuente de ondas esféricas secundarias. Las distintas fuentes puntuales pueden ser sumadas teniendo en cuenta la amplitud y fase de cada contribución [4] (ver Figura 2.1). De esta manera el campo total se puede aproximar integrando cada contribución de cada uno de los elementos de la superficie del transductor.

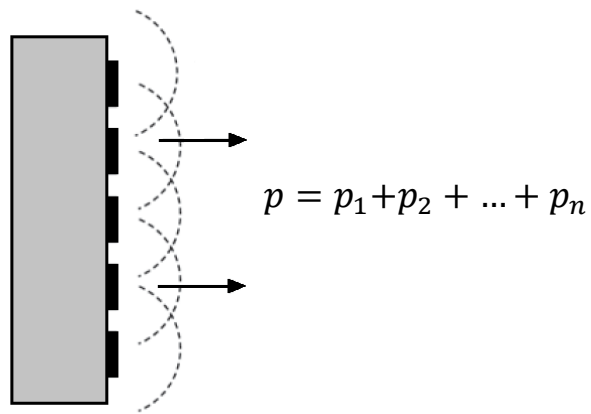


Figura 2.1: Representación del principio de Huygens. Superficie compuesta por fuentes puntuales.

2.1. Campo acústico generado por un transductor circular plano

Al igual que en óptica, existen dos regiones en la forma del campo acústico que son de interés: El campo cercano o región de Fresnel y el campo lejano o región de Fraunhofer. Los principios básicos de la formación del haz fueron dados por Rayleigh-Sommerfeld mediante la expresión que describe el fenómeno de difracción, la que puede ser interpretada en términos del principio de Huygens y puede predecir el campo en cualquier punto del espacio producido por una apertura finita [4]. Si la apertura es un transductor circular con diámetro $D = 2a$, entonces cualquier punto en la superficie del transductor tendrá coordenadas $\vec{r}_1 = (x_1, y_1, 0)$ y el punto en el plano del observador tendrá coordenadas $\vec{r}_0 = (x_0, y_0, z)$ (ver Figura 2.2):

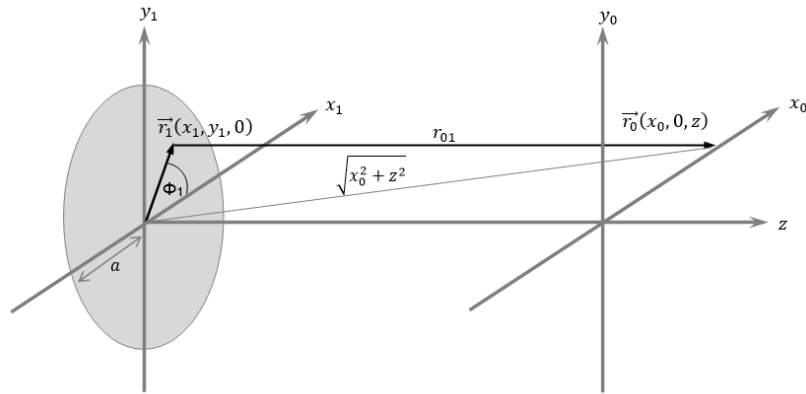


Figura 2.2: Sistema de coordenadas utilizadas para obtener el campo acústico en el espacio donde el campo es calculado en el plano del observador (x_0, y_0, z) .

Por lo tanto la expresión para la difracción en su forma reducida será:

$$\tilde{\Phi}(\vec{r}_0, \omega) = \frac{1}{i\lambda} \iint_{0-\pi}^{a \pi} \tilde{\Phi}(\vec{r}_1, \omega) \frac{z e^{ikr_{01}}}{r_{01}^2} r_1 dr_1 d\phi_1 \quad 2.1$$

Con $\tilde{\Phi}(\vec{r}_0, \omega)$ y $\tilde{\Phi}(\vec{r}_1, \omega)$ son las transformadas de Fourier del campo y apertura compleja en la superficie del transductor, respectivamente, ω la frecuencia angular, λ la longitud de onda, a el radio de la apertura, k el número de onda y r_{01} la distancia entre la apertura y el plano del observador definida como:

$$r_{01} = \sqrt{((x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + z^2)} \quad 2.2$$

Para cálculos posteriores debemos obtener el campo en el plano $y_0 = 0$ (Figura 2.2), realizando una aproximación de Fresnel en la ecuación (2.2) y sustituyendo en la ecuación (2.1), el campo para un transductor circular en el plano $y_0 = 0$ será [4]:

$$\tilde{\Phi}(\vec{r}_0, \omega) = \frac{2\pi e^{ik\left(z+\frac{x_0^2}{2z}\right)}}{i\lambda z} \int_0^a \tilde{\Phi}_1(r_1, \omega) e^{ikr_1^2/(2z)} \cdot \left(J_0\left(\frac{kx_0 r_1}{z}\right) \right) r_1 dr_1 \quad 2.3$$

Con $J_0(z)$ la función de Bessel de primera clase de orden cero:

$$J_0(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} e^{iz\cos\phi} d\phi \quad 2.4$$

2.2. Campo lejano o región de Fraunhofer

Esta región es aplicable en el caso en que el plano del observador esté lejos de la apertura del transductor, o sea:

$$r_{01} \gg \frac{a^2}{\lambda} \quad 2.5$$

Si para un transductor circular con campo no focalizado su superficie es uniformemente ponderada, esto significa que:

$$\tilde{\Phi}_1(r_1, \omega) \equiv 1 \quad 2.6$$

Por lo que la ecuación (2.3) se simplifica a:

$$\tilde{\Phi}(\vec{r}_0, \omega) = \frac{2\pi e^{ik\left(z+\frac{x_0^2}{2z}\right)}}{i\lambda z} \int_0^a e^{ikr_1^2/(2z)} \cdot \left(J_0\left(\frac{kx_0 r_1}{z}\right) \right) r_1 dr_1 \quad 2.7$$

Si se tiene un campo lejano (región de Fraunhofer), r_{01} es aproximadamente z , con $z \gg kr_1^2/2$ por lo que el término exponencial en la integral es aproximadamente uno en toda la apertura $e^{ikr_1^2/(2z)} \approx 1$. Finalmente el campo será descrito por:

$$\tilde{\Phi}(\vec{r}_0, \omega) = \frac{ka^2}{iz} e^{ik\left(z + \frac{x_0^2}{2z}\right)} \cdot \text{jinc}\left(\frac{2x_0a}{\lambda z}\right) \quad 2.8$$

Donde la función $\text{jinc}(X)$ está definida como:

$$\text{jinc}(X) = \frac{2J_1(\pi X)}{\pi X} \quad 2.9$$

Con $J_1(z)$ función de Bessel de primera clase y de primer orden. Si se quiere obtener la intensidad del haz recurrimos a:

$$|\tilde{\Phi}(\vec{r}_0, \omega)| = \left(\frac{ka^2}{iz}\right)^2 \left(\text{jinc}^2\left(\frac{2x_0a}{\lambda z}\right)\right) \quad 2.10$$

En la Figura 2.3 se muestra el gráfico de la ecuación 2.8:

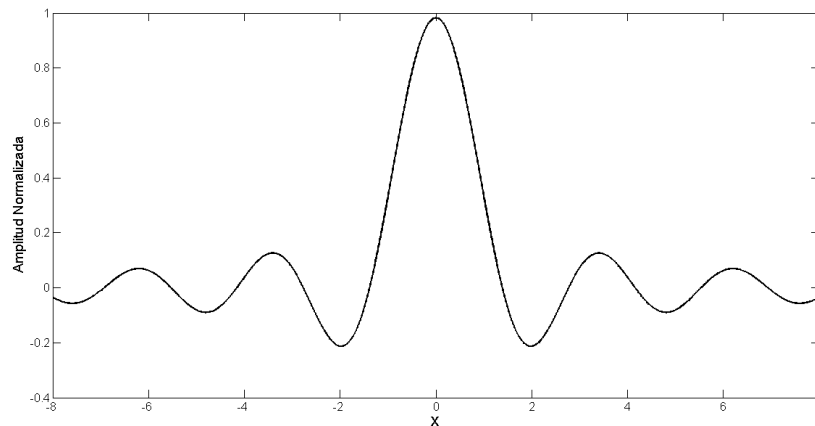


Figura 2.3: Amplitud normalizada para el campo lejano o región de Fraunhofer para un transductor circular con $X = 2az/\lambda$.

Al analizar el gráfico se pueden identificar los lóbulos que causan la pérdida de energía en el lóbulo principal. La solución ideal es que no existan estos lóbulos pero hay formas de reducirlos ya que la longitud del radio del transductor circular es un parámetro determinante a la hora de evaluar estos lóbulos que afectan al lóbulo principal. Cuanto más sea comparable el radio del transductor circular con la longitud de onda, más lóbulos acompañarán al lóbulo principal,

mientras que si el radio es menor a la longitud de onda, el lóbulo principal tendrá mayor ancho y los lóbulos que acompañan al lóbulo principal disminuyen en amplitud.

2.3. Campo cercano o región de Fresnel

El campo cercano es la región entre el campo lejano y la superficie del transductor, que en el caso de un transductor circular plano es cuando:

$$r_{01} \ll \frac{a^2}{\lambda} \quad 2.11$$

Esto significa que cerca de la superficie del transductor ocurren interferencias constructivas y destructivas. A continuación se hará una descripción del perfil del campo acústico en el campo cercano.

2.3.1. Campo de un transductor circular en su centro axial

Para obtener el campo acústico en el centro del eje x ($x_0 = 0$, ver Figura 2.4), la ecuación 2.7 se transforma a:

$$\tilde{\Phi}(\vec{r}_0, \omega) = \frac{1}{i\lambda} \frac{e^{ikz}}{z} \int_0^a e^{ikr_1^2/(2z)} r_1 dr_1 \quad 2.12$$

Realizando una sustitución de $u = ikr_1^2/(2z)$ en la ecuación, entonces $du = (ikr_1/z)dr_1$ y $r_1 dr_1 = (z/(ik))du$ por lo que la ecuación queda:

$$\tilde{\Phi}(\vec{r}_0, \omega) = e^{ikz} \left(1 - e^{ik\frac{a^2}{2z}} \right) \quad 2.13$$

El valor absoluto de la ecuación resulta:

$$|\tilde{\Phi}(\vec{r}_0, \omega)| = U(z) = \sqrt{2 - 2\cos\left(\frac{ka^2}{2z}\right)} \quad 2.14$$

Esta ecuación es la intensidad aproximada como función del parámetro de Fresnel (S) en el eje central $x = 0$ (ver Figura 2.4), $S = \left(\frac{z\lambda}{a^2}\right)$. Para valores de $S < 1$ (Concordante con el campo cercano), el diámetro del haz se mantiene constante con respecto al diámetro de salida. Para valores $S > 1$ (Concordante con el campo lejano) el haz tiende a cero cuando $S \rightarrow \infty$ y la apertura del haz tiene un ángulo de salida:

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{1.22\lambda}{2a}\right) \quad 2.15$$

Cuando el parámetro de Fresnel toma valor $S = 1$, quiere decir que es el límite entre el campo cercano y el campo lejano pero en realidad existe una transición gradual del campo cercano al campo lejano y esta transición es llamada distancia de Rayleigh [6] o como lo definiremos z_{0max} :

$$z_{0max} = \frac{2a^2}{\lambda} \quad 2.16$$

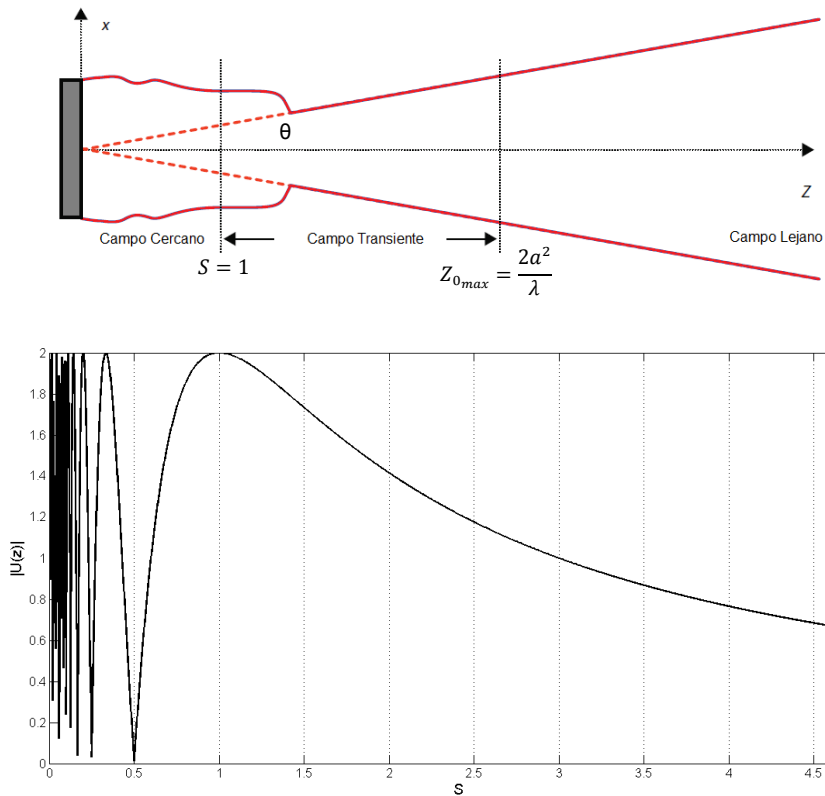


Figura 2.4: Campo de un transductor no focalizado: (Imagen superior) Región de presión acústica en el plano XZ para un pistón circular [5]. (Imagen inferior) Variación de presión a lo largo del eje central Z.

2.4. El efecto de fenómenos cavitatorios en el campo cercano

En los ultrasonidos de potencia, una onda ultrasónica de alta intensidad puede generar cavidades o burbujas en los ciclos de expansión de ésta, donde estas burbujas aumentan en tamaño y terminan colapsando, generando, por ejemplo, turbulencias y micro corrientes. Este fenómeno es conocido como cavitación acústica, que a bajas frecuencias ultrasónicas puede generar burbujas que son relativamente grandes en diámetro cuando están en expansión (10 a 100[μm], [11]). Su violento colapso conduce a generar “Micro-jets” (Figura 2.5) y

turbulencia localizada donde pueden generar temperaturas y presiones muy altas en el interior de las burbujas, provocando daños irreversibles si se encuentran cerca de una superficie de algún material.

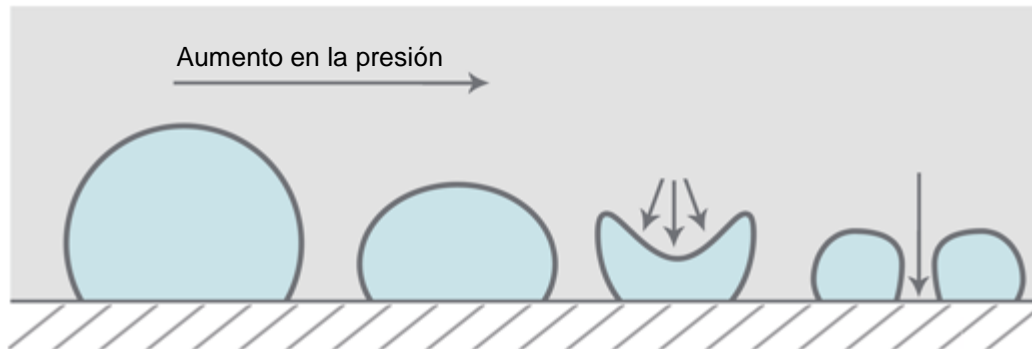


Figura 2.5: Ciclo de formación de una burbuja de cavitación cercana a la superficie donde genera una implosión creando un Micro-Jet. Fuente: <http://indycleanblinds.com/>.

En transductores ultrasónicos de potencia y arreglo de transductores el fenómeno de cavitación en el campo cercano limita la energía de la radiación acústica a lo largo del eje de propagación [6], ya que la variación espacial de la presión en las inmediaciones del transductor causa una disminución en el umbral de cavitación.

Por lo que para tener una estimación del umbral de cavitación necesariamente necesitamos saber la variación espacial de presión en el campo cercano.

2.4.1. Umbral de Blake

Si suponemos una burbuja que contiene una masa m_g de un gas no condensable en un líquido a presión ambiente p_0 , temperatura T_0 y vapor del fluido. La presión parcial del vapor es la presión saturada cuando llega al equilibrio $p_{v,eq}(T_0)$ [10].

Si queremos encontrar el radio R_0 de la burbuja en equilibrio mecánico, con presión dentro de la burbuja p_b definida como tensión de Laplace:

$$p_b = p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \quad 2.17$$

Utilizando la Ley de Gases ideales, se tiene:

$$p_{v,eq}(T_0) + \frac{m_g}{M_g} \frac{\mathcal{R}T_0}{\frac{4}{3}\pi R_0^3} - \frac{2\sigma}{R_0} = p_0 \quad 2.18$$

Con \mathcal{R} constante universal de los gases, M_g masa molar de un gas no condensable en la burbuja y σ la tensión superficial.

Si se observa la evolución de la burbuja de un radio R_0 a R cuando la presión en el líquido disminuye como $p = p_0 - p_a$, suponiendo que esta disminución es lo suficientemente lenta para que se produzcan transformaciones isotérmicas en el gas, la evolución de R puede ser obtenida implícitamente por [10]:

$$p_{v,eq}(T_0) + \left(p_0 - p_{v,eq}(T_0) + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - \frac{2\sigma}{R} = p_0 - p_a \quad 2.19$$

Se puede ver que si la presión externa es mejor que el valor mínimo, no hay un valor posible para el radio de equilibrio R . Por lo que el valor crítico de presión p_a^{crit} , el que depende de R_0 y de la cantidad de gas contenido en la burbuja, es el llamado Umbral de Blake y puede ser obtenido explícitamente evaluando el valor mínimo de R en la ecuación 2.19:

$$p_a^{crit} = p_0 - p_{v,eq} + p_0 \left(\frac{4}{27} \frac{\alpha_s^3}{1 + \alpha_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 2.20$$

Con α_s la tensión de Laplace adimensional para una burbuja en condición ambiente:

$$\alpha_S = \frac{2\sigma}{p_0 R_0} \quad 2.21$$

Los valores de p_a^{crit} son presentados en la Figura 2.6 para una burbuja de aire en agua en condición ambiente ($\sigma = 0.0725[Nm^{-1}]$, $p_{v,eq} = 2[kPa]$, $p_0 = 100[kPa]$ [10]) con variación de R entre 0.1 y 100 [μm].

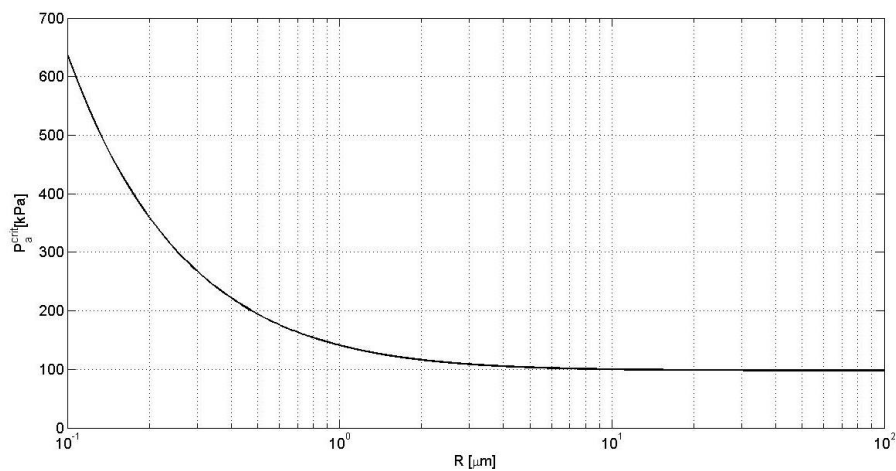


Figura 2.6: Umbral de Blake para una burbuja de aire en condición ambiente para radios de burbujas entre 0.1 y 100 [μm].

De la Figura 2.6 se observa que para los valores de p_a^{crit} hay un valor que converge a aproximadamente 98[kPa] para burbujas con radios mayores (tamaños que se presentan a bajas frecuencias [11]). Este valor servirá posteriormente para realizar comparaciones de presión a lo largo del eje de propagación del arreglo de transductores mediante simulaciones en software de elementos finitos con el fin de conocer a que desplazamientos y frecuencias de excitación se producirá el fenómeno de cavitación.

Capítulo 3. Focalización en ultrasonidos

Para la mayoría de los procesos en los que se emplea los ultrasonidos se necesitan altas intensidades para provocar cambios en las propiedades físicas, químicas o biológicas de materiales, sustancias, etc. Pero resulta complejo alcanzar altos valores de energía en el campo acústico generado por un transductor debido a limitaciones eléctricas y mecánicas características de éstos, además de la desventaja de formación de cavitación en las cercanías de la superficie radiante del transductor.

La posibilidad de concentrar la energía emitida por el transductor ya sea mediante un sistema de reflexión o un sistema de focalización dinámica (arreglo de transductores) se torna en una forma viable de contrarrestar lo mencionado anteriormente, ya que al concentrar la energía a una cierta distancia de la cara radiante del transductor podría eventualmente disminuir la cavitación cerca de la superficie de ésta.

3.1. Focalización por concentradores

Las ondas cuando viajan por un medio y se enfrentan a obstáculos o superficies, éstas sufren dos fenómenos de interés: Reflexión, que se refiere a cuando la onda incide sobre la superficie con cierto ángulo, ésta tendrá el mismo ángulo de salida con respecto a la superficie. Y el fenómeno de interferencia el que en simples palabras es la superposición de una o más ondas para producir una onda resultante de mayor o menor amplitud.

Existe una gama de aparatos o sistemas que concentran la energía irradiada por los transductores, éstos son llamados concentradores o focalizadores y

concentran la energía mediante reflexión de las ondas. A. Barone propuso en el año 1952 [7], [6], dos tipos de concentradores que focalizan la energía de manera puntual o en una región. Estos concentradores se confeccionaron de un material con alta impedancia específica para obtener el máximo de energía reflejada por la superficie.

3.1.1. Concentrador parabólico

Este concentrador fue diseñado para focalizar toda la energía en una región específica lejos de la superficie radiante, como se observa en Figura 3.1 la fuente de radiación ultrasónica se encuentra en la parte inferior del concentrador, las ondas se reflejan en el cono perpendicularmente hacia las superficies parabólicas donde finalmente éstas reflejan las ondas a cierta distancia focal que está determinada por la ecuación de la parábola:

$$y^2 = 2px \quad 3.1$$

Las variables x e y pueden ser sustituidas por las coordenadas del punto P en el diagrama para determinar el valor del parámetro p en la ecuación 3.1:

$$y = H \quad 3.2$$

$$x = f - \frac{HR}{h} \quad 3.3$$

Donde H es la distancia desde la parte inferior del cono hasta el foco F, h la distancia desde la parte superior del cono hasta el foco F, R el radio del cono, f la distancia focal de la parábola con origen en O.

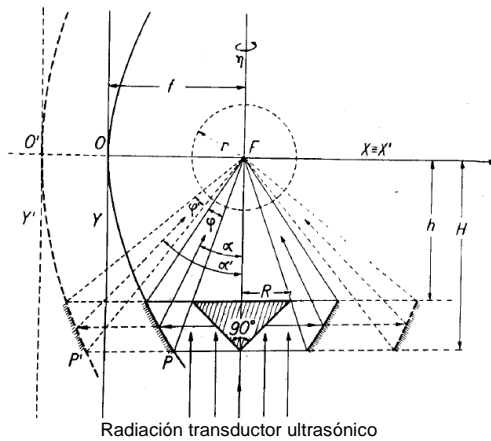


Figura 3.1: Diagrama de concentrador parabólico [7].

3.1.2. Simulación numérica del concentrador parabólico

Según el radio de la superficie radiante del transductor a utilizar se determinarán los parámetros para la construcción del concentrador parabólico. Si el radio de la superficie radiante es de 25[mm], el radio del cono será $R = 20[mm]$, y la distancia donde se focalicen las ondas será $H = 60[mm]$, el parámetro p será 90. Con esto se obtiene la ecuación de la parábola que determina las superficies parabólicas del concentrador:

$$y^2 = 180x \tag{3.4}$$

Mediante COMSOL Multiphysics programa basado en el método de elementos finitos, se analizará la focalización en un campo libre (condiciones de borde infinitas), para frecuencias de excitación bajo los 1[MHz] ya que los transductores ultrasónicos de potencia operan por debajo de esta frecuencia. Se trabajará en el espacio de frecuencias y los módulos a utilizar son de presión acústica para denotar el medio en el que se propagan las ondas y de mecánica estructural, el que define las propiedades mecánicas del concentrador parabólico para la reflexión del haz.

Utilizando la ecuación 3.4 para calcular la superficie parabólica del concentrador se obtiene la siguiente geometría en COMSOL (Figura 3.2):

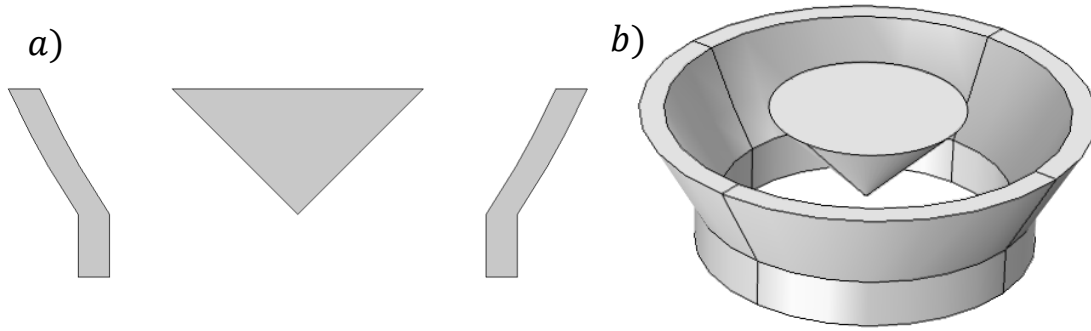


Figura 3.2: Geometría del concentrador parabólico: a) vista transversal o 2D, b) vista 3D.

Finalmente, la superficie radiante del transductor ultrasónico de potencia se simulará mediante aceleración normal, la que depende de la frecuencia a la que se excita y el desplazamiento de la superficie, que en este caso será de $1[\mu\text{m}]$ (desplazamiento acorde a datos medidos experimentalmente). Las frecuencias a analizar serán: 20[kHz], 60[kHz], 100[kHz], 200[kHz], 300[kHz], 400[kHz], 500[kHz], 600[kHz]. El material del concentrador parabólico será acero estructural y el medio donde se propagarán las ondas será agua. Las propiedades de estos materiales se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Valores de entrada de las propiedades para los dominios del fluido y concentrador parabólico.

Dominio del fluido	Material	Agua
	Densidad (ρ)	$997[\text{kg}/\text{m}^3]$
	Velocidad (c)	$1454[\text{m}/\text{s}]$
Dominio del concentrador parabólico	Material	Acero estructural
	Densidad (ρ)	$7850[\text{kg}/\text{m}^3]$
	Módulo de Young (E)	$200[\text{GPa}]$
	Radio de Poisson (ν)	0.33

De los resultados de las simulaciones numéricas (Figura 3.3), es posible observar que a medida que la frecuencia de excitación del transductor ultrasónico de potencia va en aumento, el campo acústico se focaliza a la distancia calculada para el concentrador de 60 [mm] (Figura 3.3h).

Esto quiere decir que para frecuencias de operación cercanas a las comúnmente utilizadas en transductores de potencia (cercanas a 20[kHz]), la longitud de onda en agua es muy grande comparada con las dimensiones de la superficie del concentrador (superficie reflectora) lo que no permite hacer la aproximación con óptica geométrica, aproximación que si es válida para altas frecuencias como se puede apreciar en la Figura 3.4 donde a partir de frecuencias superiores a 400[kHz] las ondas comienzan a focalizar acorde con el diseño propuesto del concentrador parabólico y que desde 600[kHz] claramente el máximo de presión comienza en 60[mm] desde la superficie radiante del transductor.

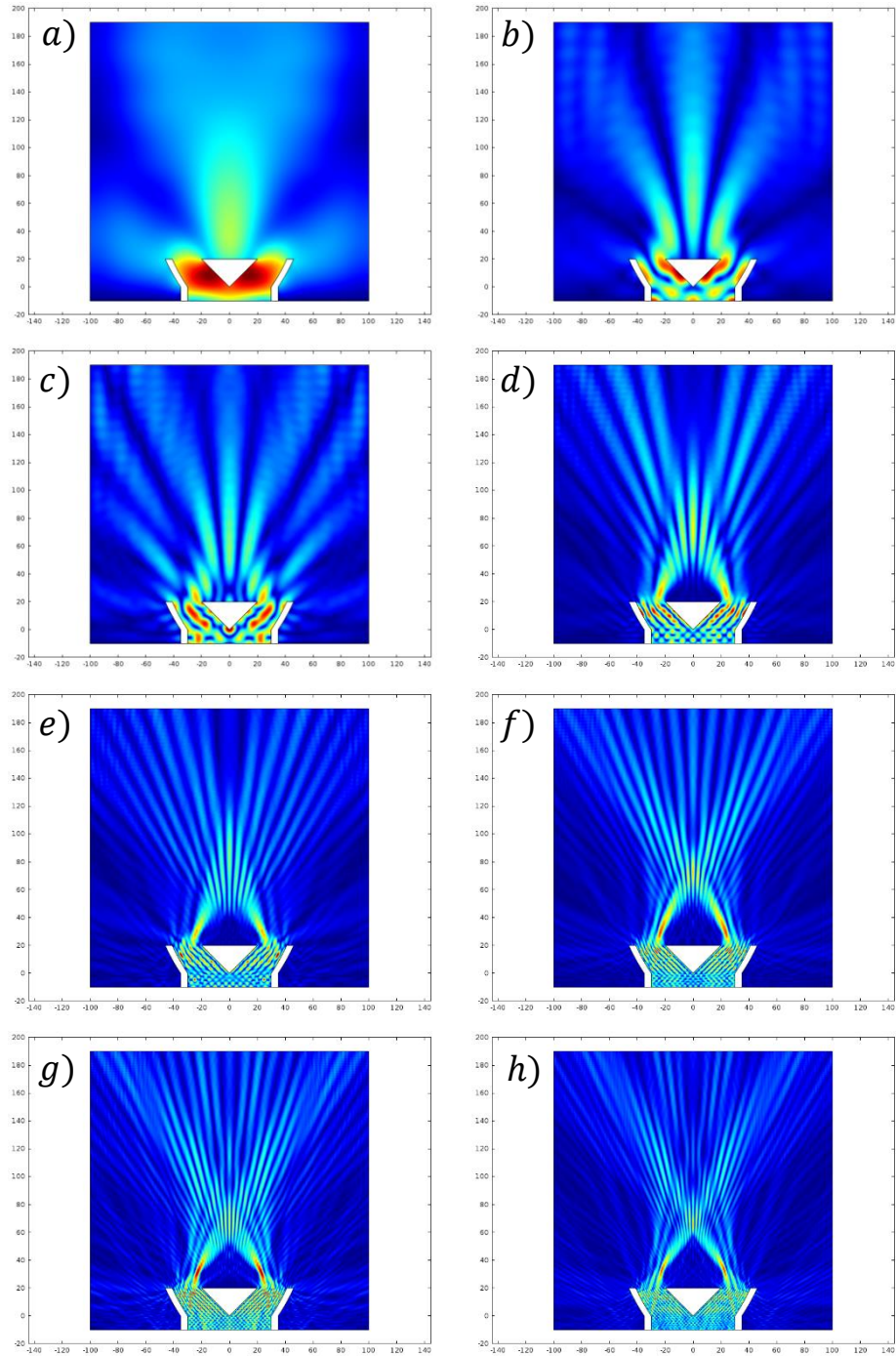


Figura 3.3: Campo de presión absoluta relativa en concentrador parabólico: a) 20[kHz], b) 60[kHz], c) 100[kHz], d) 200[kHz], e) 300[kHz], f) 400[kHz], g) 500[kHz], h) 600[kHz].

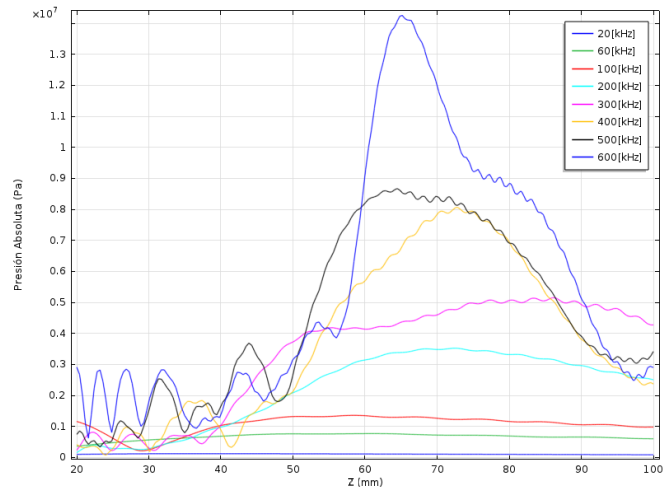


Figura 3.4: Presión absoluta a lo largo del eje central a 20[mm] del transductor hasta la zona de focalización.

Si se realiza un análisis de la frecuencia a la que comienza a ser válida la aproximación a óptica geométrica para el concentrador parabólico, ésta es a 400[kHz]. La longitud de onda resulta ser $\lambda_{400[kHz]} = 3.635[mm]$ y si las paredes reflectoras tienen una distancia de 20[mm], se puede hacer una relación de estas dos cantidades para establecer un número adimensional que nos asegure la focalización:

$$\frac{L_r}{\lambda} \approx 6 \tag{3.5}$$

Donde L_r es la distancia de la superficie reflectora.

Existe la opción de realizar un escalamiento del sistema experimental aumentando las dimensiones del transductor y del concentrador y operar a frecuencias cercanas a los 20[kHz] cumpliendo la relación $\frac{L_r}{\lambda} \geq 6$ que nos asegura que el diseño focalizará a la distancia calculada, pero no resulta conveniente ya que hacer un escalamiento de un transductor ultrasónico de potencia resulta complejo a tales dimensiones.

Es por esto que se propone un tipo de focalización dinámica en base a un arreglo de transductores de potencia, los que serán controlados en términos de fase para lograr la focalización del campo acústico a frecuencias cercanas a 20[kHz].

3.2. Focalización por arreglo de transductores

Existen diversos tipos de arreglo de transductores ultrasónicos para diferentes tipos de aplicaciones. Por ejemplo, en el área de la medicina comúnmente se utilizan arreglos de transductores para realizar cirugías no invasivas, litotricia, etc. [8]. Los tipos de arreglos se muestran en la Tabla 3.2:

Tabla 3.2: Diferentes tipos de arreglos de transductores comúnmente utilizados en variadas aplicaciones [5].

Tipo de arreglo	Forma del haz
Anular	Esférico
Lineal 1-D	Elíptico
Matriz 2-D	Elíptico
Anular segmentado 2-D	Esférico/Elíptico
Matriz 1.5-D	Elíptico

En este trabajo se utilizará el arreglo lineal de transductores ultrasónicos de potencia ya que tienen ciertas ventajas como la fácil configuración y diseño, fácil programación de desfases y simulación del campo acústico focalizado.

A continuación se introducirá el arreglo lineal de transductores ultrasónicos desfasados para producir focalización del campo acústico a lo largo del eje central los que están orientados en la misma dirección y tienen los mismos desplazamientos en la cara radiante (sin variaciones en el dominio espacial, solamente en el dominio espectral).

3.2.1. Arreglo lineal de transductores ultrasónicos

El arreglo lineal de transductores, como dice la palabra, es una configuración de elementos posicionados a una misma distancia uno de otro a lo largo de un eje (1-D), pero este posicionamiento no es al azar ya que influye enormemente en el ancho del lóbulo principal y también en el número y amplitud de los lóbulos que acompañan al lóbulo principal.

Para conocer que parámetros se deben controlar y obtener un campo acústico de alta intensidad, definiremos cada parámetro en el diagrama que se muestra en la Figura 3.5:

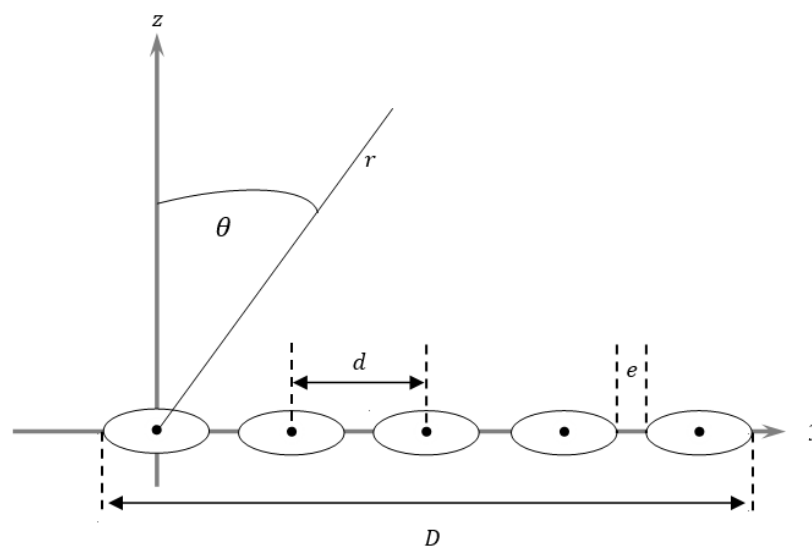


Figura 3.5: Diagrama representativo de un arreglo lineal de transductores.

La longitud D se define como la apertura activa, que es la distancia total del arreglo de transductores y se puede escribir como:

$$D = N \cdot d + (N - 1)e \quad 3.6$$

Donde N es el número de transductores en el arreglo, e es la separación entre dos transductores adyacentes y d es la distancia medida entre centros de dos transductores vecinos (ver Figura 3.5).

Para evitar lóbulos de difracción generados por el espaciado de cada elemento el parámetro e , definido como la distancia entre dos transductores adyacentes, no debe ser mayor a media longitud de onda, o sea:

$$e \leq \frac{\lambda}{2} \quad 3.7$$

Esta definición nos permitirá realizar una configuración sin que el campo acústico sea deformado por lóbulos que afecten al lóbulo principal del arreglo lineal de transductores ultrasónicos. Un buen diseño de arreglo lineal de transductores se traduce en que el ancho del haz principal sea el menor posible, que los lóbulos que acompañan al lóbulo principal idealmente sean suprimidos y que los lóbulos por difracción productor del arreglo mismo sean minimizados o en el mejor de los casos eliminados.

Un parámetro importante en la focalización mediante arreglo lineal de transductores es r_0 :

$$r_0 = \frac{D^2}{4\lambda} \quad 3.8$$

El que fue definido en el Capítulo 2 como la distancia que separa el campo lejano y el campo cercano, este parámetro es relevante ya que en el arreglo lineal la focalización ocurre antes de esta distancia r_0 [9]. Este límite de focalización ayudará a corroborar en capítulos posteriores si las modelaciones del arreglo lineal de transductores de potencia con y sin desfases son correlacionadas con el modelo y con los resultados experimentales.

Si en el arreglo lineal no se les aplica ningún desfase a los transductores el frente de onda combinado será como se observa en la Figura 3.6:

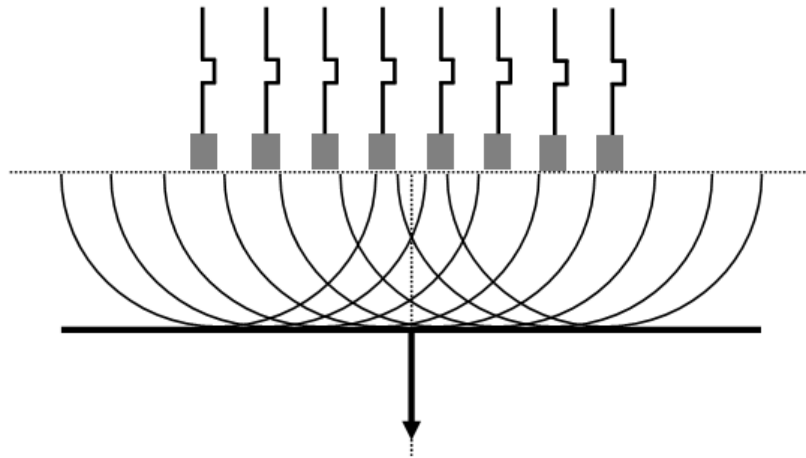


Figura 3.6: Arreglo de transductores N con señales no desfasadas generando un campo acústico no focalizado.

Si al arreglo lineal se le aplica desfases correctamente calculados a cada transductor en el arreglo, el frente de onda combinado, que se obtendrá, será como el que se representa en la Figura 3.7:

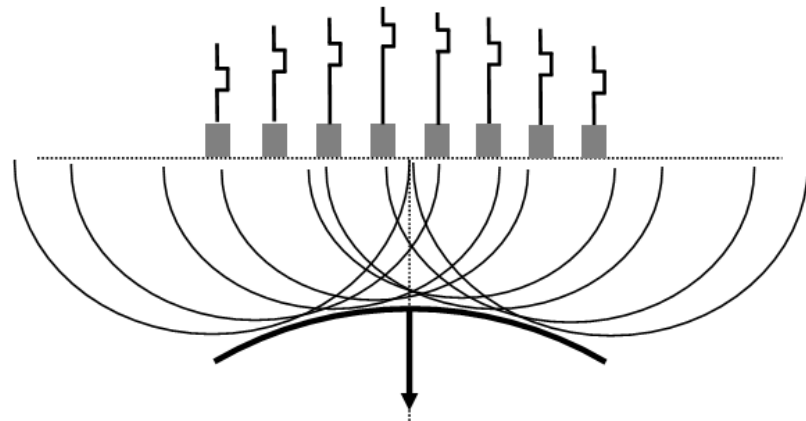


Figura 3.7: Arreglo de N transductores con señales desfasadas para producir focalización del campo acústico.

Donde el campo acústico de cada arreglo lineal de transductores con y sin desfases se puede obtener mediante el Teorema del Producto [6], simplificado para arreglos del tipo lineal (Figura 3.5) de la forma:

$$p(r, \theta) = \left[\frac{i\rho ckQ_0 e^{-ikr}}{2\pi r} \right] \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{kD\sin\theta}{2}\right)}{\left(\frac{kD\sin\theta}{2}\right)} \right) \quad 3.9$$

Con Q_0 la intensidad de la fuente, D la apertura activa, θ el ángulo formado entre el eje z y vector r .

Capítulo 4. Desarrollo experimental

En este capítulo se llevó a cabo la caracterización, diseño y construcción del arreglo lineal de tres transductores ultrasónicos de potencia para la obtención de perfiles de campo acústico en un estanque con agua.

Además se realizaron estudios de modelamientos para determinar: el modo de vibración o deformación de los transductores de potencia, distancia a la que se dispuso cada transductor en el arreglo lineal para obtener información de la influencia de los lóbulos por difracción en el campo acústico y finalmente un barrido de desfases en la señal de alimentación del arreglo lineal de transductores de potencia para encontrar el desfase óptimo donde ocurre focalización del campo acústico a lo largo del eje de propagación.

4.1. Caracterización de transductores

Si bien el diseño de los tres transductores de potencia que llamaremos TC1, TC2 y TC3, respectivamente fue el mismo, esto no asegura que tengan las mismas propiedades (como frecuencia, impedancia, etc.).

Se dispuso de un puente de impedancias para la realización de un barrido de frecuencias para determinar la frecuencia de resonancia e impedancia del transductor en dicha frecuencia. Los valores medidos en el puente de impedancia se muestran en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1: Valores de circuito equivalente de un transductor medidos en puente de impedancia.

	Transductores ultrasónicos de potencia		
	TC1	TC2	TC3
Frecuencia [kHz]	17,037	17,359	17,831
Impedancia Z [Ω]	9,91	13,90	23,99
R1 [Ω]	9,86	13,78	23,87
L1 [mH]	27,13	53,83	31,86
C1 [nF]	3,21	1,56	2,50
C0 [nF]	13,64	10,11	11,93

Donde R_1 , L_1 , C_1 y C_0 son los parámetros del circuito equivalente.

Una vez obtenidos los datos de los transductores ultrasónicos de potencia con el puente de impedancia, éstos servirán para calcular la inductancia en paralelo L_p con las frecuencias de resonancia medidas mediante la siguiente expresión:

$$L_p = \frac{1}{(2\pi)^2 C_0} \quad 4.1$$

Tabla 4.2: Cálculos de inductancia en paralelo para cada transductor ultrasónico de potencia.

Transductor ultrasónico de potencia	Inductancia en paralelo L_p [mH]
TC1	6,39
TC2	8,31
TC3	6,68

Estos valores de inductancia fueron empleados para la adaptación del arreglo lineal de transductores de potencia.

4.2. Modelamiento de transductores

El diseño del transductor de potencia utilizado es el correspondiente a Ensminger [12]. El transductor está conformado por una contramasa, una masa frontal y un arreglo de electrodos y cerámicas piezoeléctricas que conforman el “sándwich” (ver Figura 4.1).

Para corroborar las frecuencias de resonancia de los transductores TC1, TC2 y TC3 con los valores medidos en la Tabla 4.1, se realizó una modelación para determinar las autofrecuencias en torno a los 17[kHz] y así observar el modo de vibración de los transductores y su deformación.

Los materiales asignados para cada componente del transductor de potencia en la modelación, fueron tomados de la librería de COMSOL, asignando cobre para los electrodos, PZT-8 para las cerámicas piezoeléctricas y acero inoxidable para la masa frontal y contramasa.

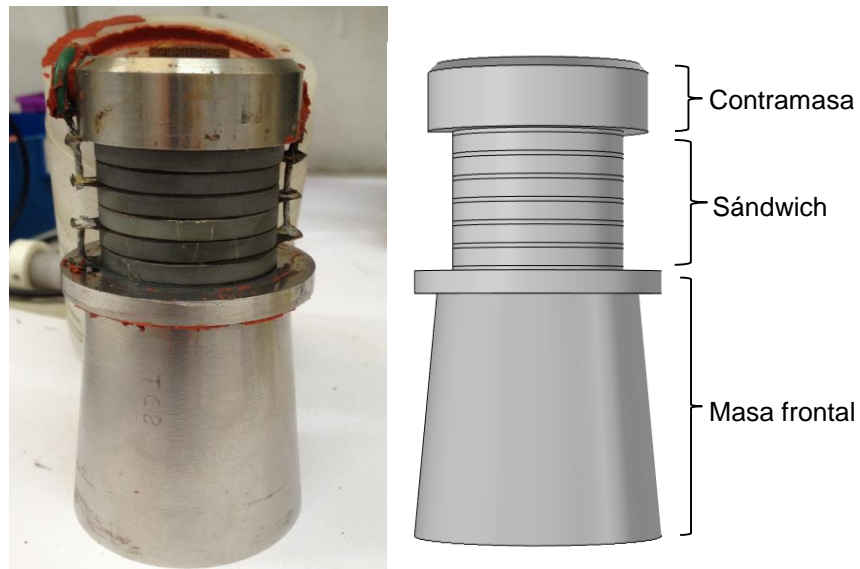


Figura 4.1: Imagen de transductor ultrasónico de potencia y geometría replicada en COMSOL.

Para la simulación del transductor ultrasónico de potencia, el resultado de la frecuencia de resonancia fue de 17,141[kHz], resultado en buena concordancia con los medidos en el puente de impedancia.

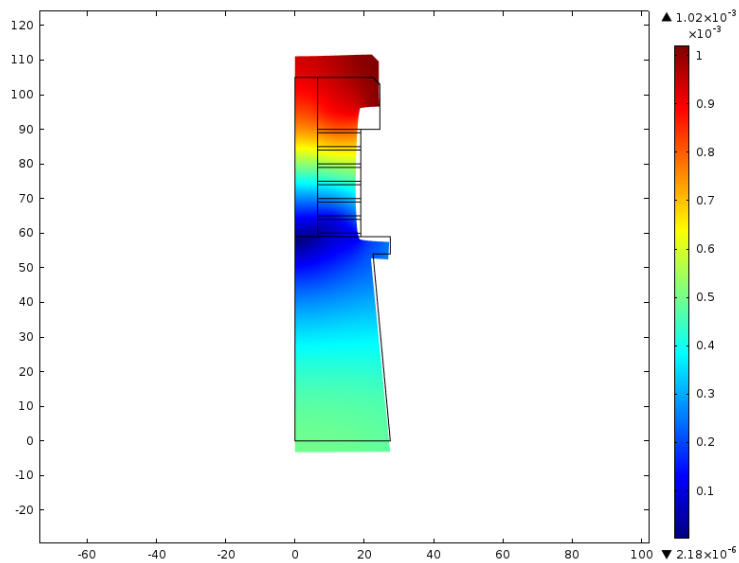


Figura 4.2: Desplazamiento total de la geometría del transductor modelada en COMSOL. Vista axisimétrica con unidades en la leyenda en milímetros.

El modo de vibración del transductor, si se hace una representación de un movimiento armónico completo, la deformación de éste será a lo largo del eje vertical como se muestra en la Figura 4.2. Con una deformación máxima de aproximadamente 1[μm] para una alimentación de 5[Vpp].

4.3. Medición de desplazamiento en función de la corriente

Para obtener los desplazamientos producidos en la cara radiante del transductor a determinadas corrientes de alimentación se montó el sistema experimental mostrado en la Figura 4.3:

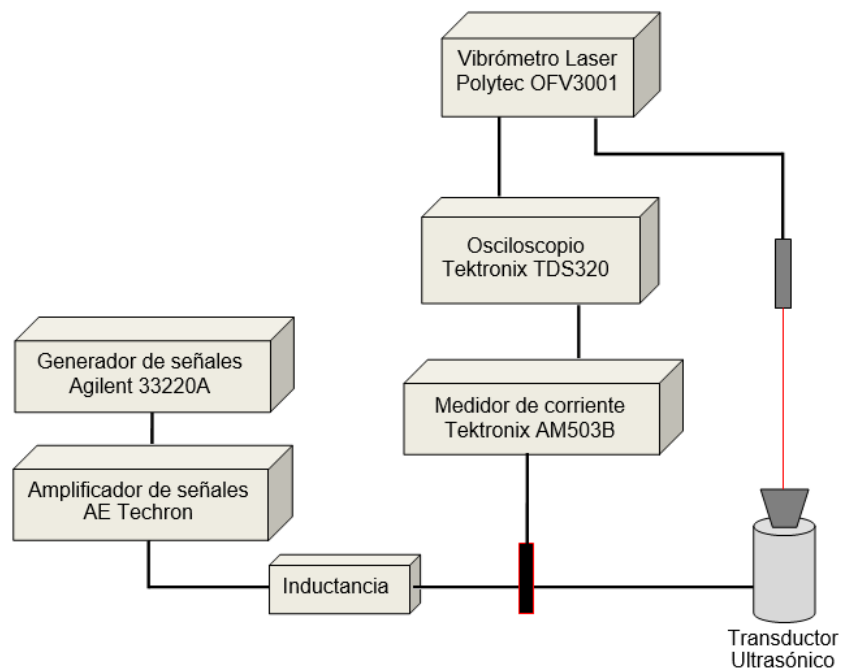


Figura 4.3: Sistema experimental empleado para la medición de velocidad de la cara radiante de transductor ultrasónico de potencia.

Utilizando un osciloscopio y una adaptación para el transductor ultrasónico, se midió la velocidad con la que se desplaza la cara radiante del transductor mediante el uso del vibrómetro láser, y se midió la corriente RMS con la que se alimenta el transductor mediante el uso de una sonda de corriente. Ambas mediciones tienen parámetros de conversión para que finalmente se obtengan la amplitud de desplazamiento en función de la corriente. A continuación se muestran los gráficos de amplitud de desplazamiento en función de la corriente

de alimentación para cada uno de los transductores (Figura 4.4, Figura 4.5 y Figura 4.6):

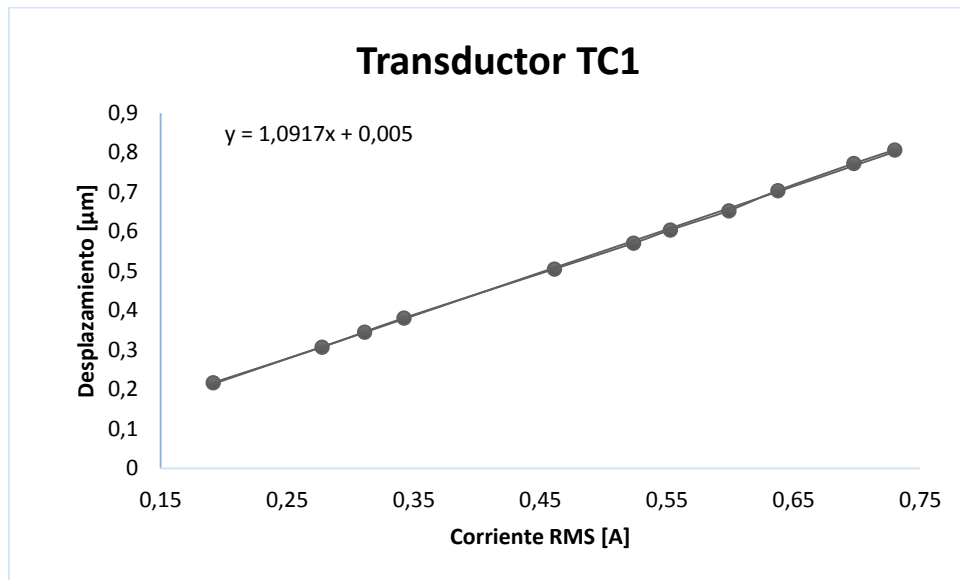


Figura 4.4: Amplitud de desplazamiento en función de la corriente RMS para transductor ultrasónico TC1.

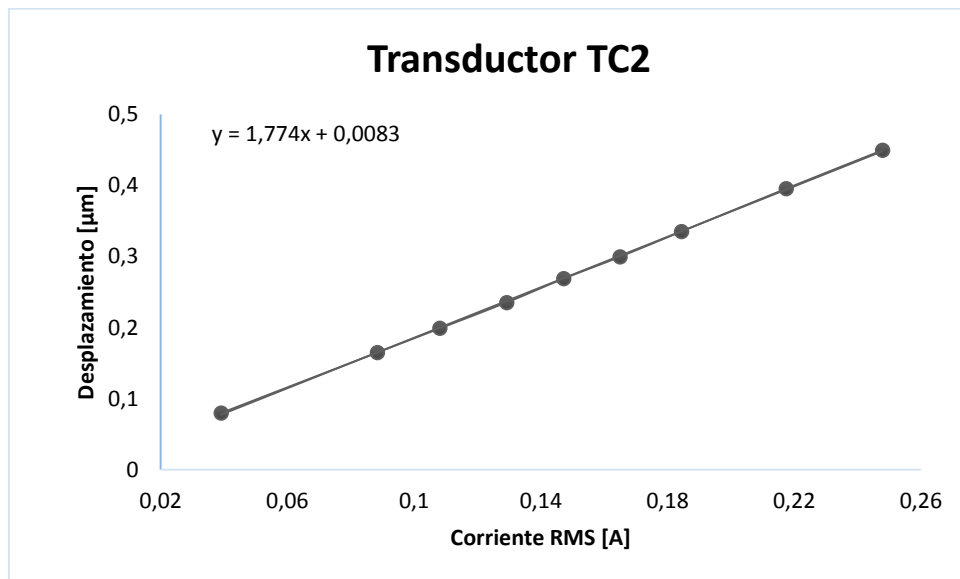


Figura 4.5: Amplitud de desplazamiento en función de la corriente RMS para transductor ultrasónico TC2.

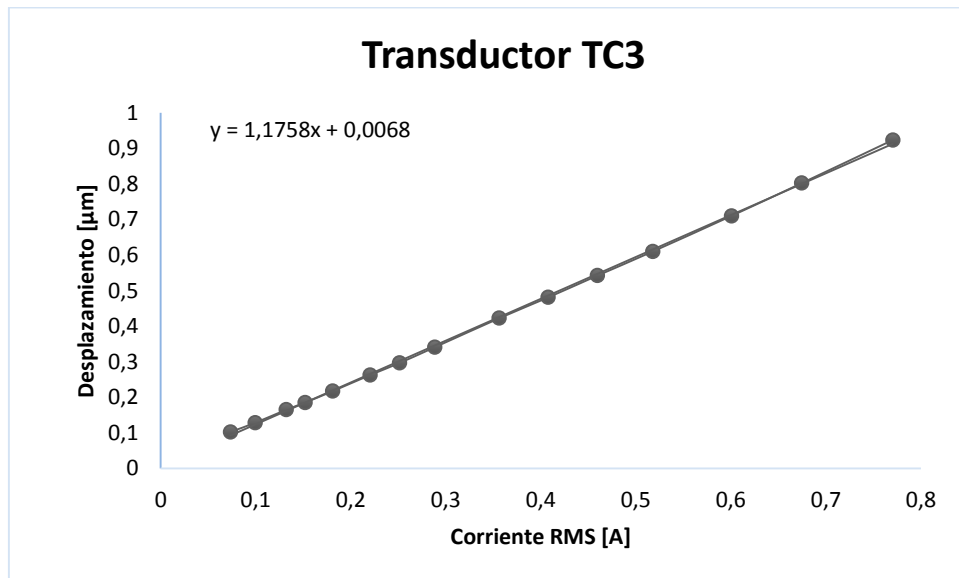


Figura 4.6: Amplitud de desplazamiento en función de la corriente RMS para transductor ultrasónico TC3.

El propósito de obtener la relación entre amplitud de desplazamiento y corriente es saber a qué corriente RMS se necesita alimentar cada transductor ultrasónico de potencia para tener un determinado desplazamiento en la cara radiante de éste.

Además es fundamental conocer el rango en que el transductor ultrasónico de potencia tiene un comportamiento lineal con respecto al desplazamiento de su cara radiante en función de la corriente de alimentación.

Es de suma importancia tener este control del desplazamiento de la cara radiante ya que como se puede observar en cada grafica de amplitud de desplazamiento vs corriente RMS, los transductores no tienen los mismos desplazamientos para las mismas corrientes de alimentación, lo que en definitiva se tendrá es que a cierto desplazamiento pretendido por los transductores se deberá calcular para cada uno la corriente RMS

correspondiente a dicho desplazamiento para así no tener problemas en el dominio espacial y solo depender de la variación del dominio temporal.

4.4. Arreglo lineal de transductores de potencia

A continuación se muestra el estudio realizado al parámetro de distancia entre cada transductor ultrasónico de potencia “e” para determinar a qué distancia hay un óptimo en que el lóbulo principal y que no se ve afectado por lóbulos laterales producido por difracción.

4.4.1. Estudio de distancia entre transductores

Como se indicó en capítulos anteriores, la distancia que debe tener un transductor con respecto al otro no es al azar. Ya que, si sobrepasa cierto límite comenzaran a interferir lóbulos por difracción en el lóbulo principal producto del arreglo lineal de transductores de potencia.

Según la relación 3.7 la distancia entre cada transductor no debe sobrepasar media longitud de onda y como éste es un valor límite, no se tiene real certeza a que valores comienzan a presentarse estos lóbulos producto de la difracción. Por lo que se realizó un estudio de variación de la distancia entre cada transductor “e” en COMSOL hasta sobrepasar el límite impuesto por la ecuación 3.7, que en nuestro caso la longitud de onda en el agua a frecuencias de operación del arreglo lineal de transductores de 17,5[kHz] será de $\lambda_{17.5[kHz]} \approx 83[mm]$, entonces $e \leq 41,5[mm]$.

Por un tema de diseño de los transductores TC1, TC2 y TC3, la distancia mínima de separación entre cada transductor es de $e = 19[mm]$. Por ende el

barrido de distancia comenzará en 19[mm] realizando un paso de 10[mm] y finalizando en 49[mm] para sobrepasar el límite de 41,5[mm].

En la siguiente figura se muestra la geometría en el plano del arreglo lineal de transductores de potencia en la simulación para un campo libre (sin condiciones de borde) en donde la línea roja representa la distancia en que se presentaran los resultados de las simulaciones para el campo acústico.

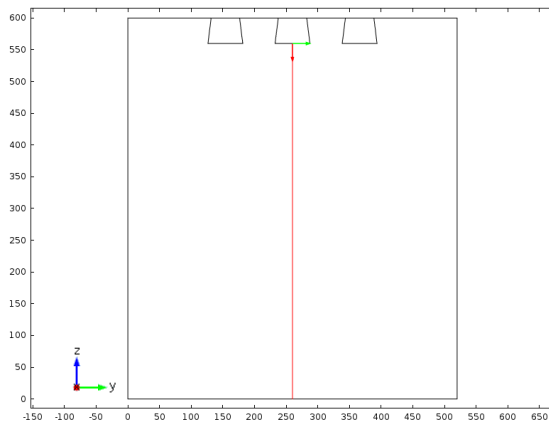


Figura 4.7: Geometría utilizada en estudio de variación del parámetro e . Línea roja representa la distancia a la que se entregaran los resultados de las simulaciones. Las unidades de los ejes están en milímetros.

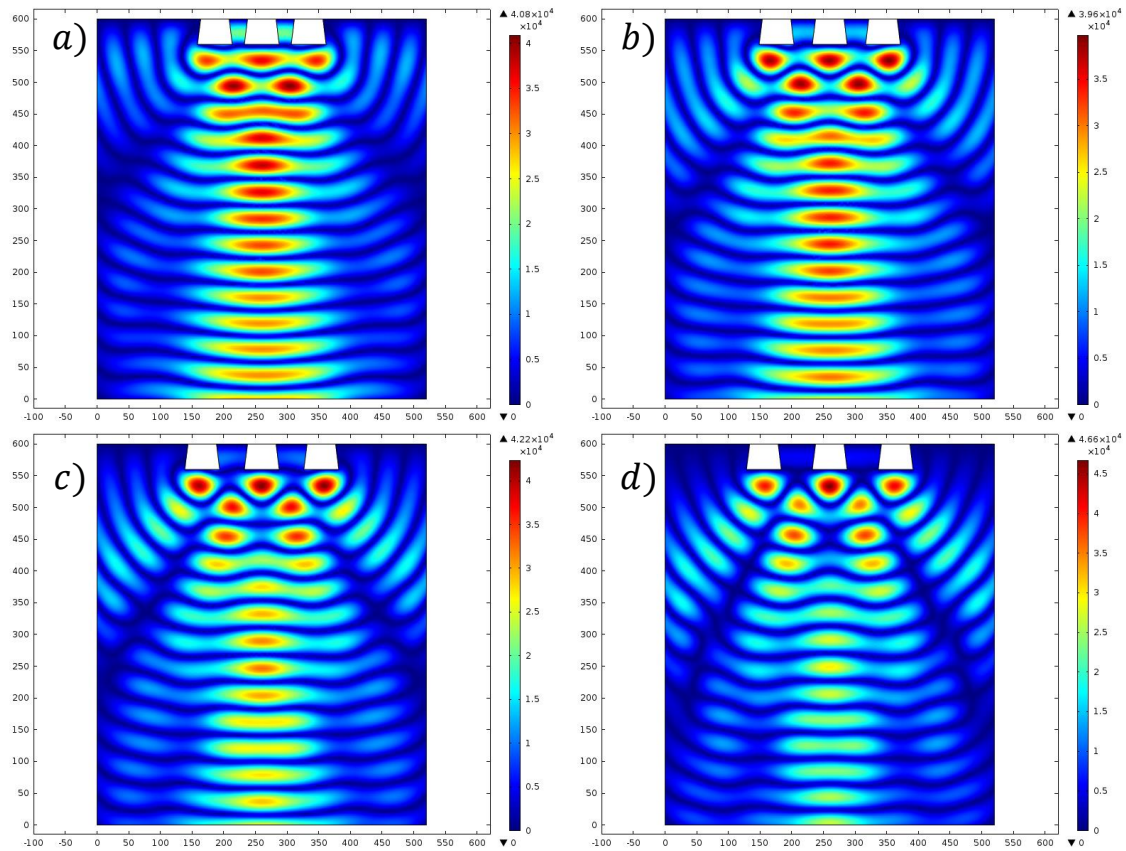


Figura 4.8: Campo de presión absoluta con variación del parámetro “e” donde: a) $e = 19[mm]$, b) $e = 29[mm]$, c) $e = 39[mm]$, y d) $e = 49[mm]$.

De los resultados obtenidos de los modelamientos para el parámetro “e” (ver Figura 4.8), se puede observar que a medida que aumenta la distancia entre transductores ultrasónicos en el arreglo lineal, comienzan a aparecer los llamados lóbulos por difracción.

Estos lóbulos por difracción afectan directamente al lóbulo principal disminuyendo el haz e intensidad a lo largo del eje en el que se está propagando la onda. Este fenómeno se comienza a apreciar levemente a $e = 29[mm]$ y con mayor fuerza alrededor de $e = 39[mm]$ logrando casi atenuar totalmente el lóbulo principal cuando el valor del parámetro “e” sobrepasa el valor límite de $e = 41,5[mm]$.

Para hacer una comparación general de los perfiles del campo acústico se graficaron las presiones absolutas de cada uno de los parámetros “e” simulados en COMSOL (Figura 4.9):

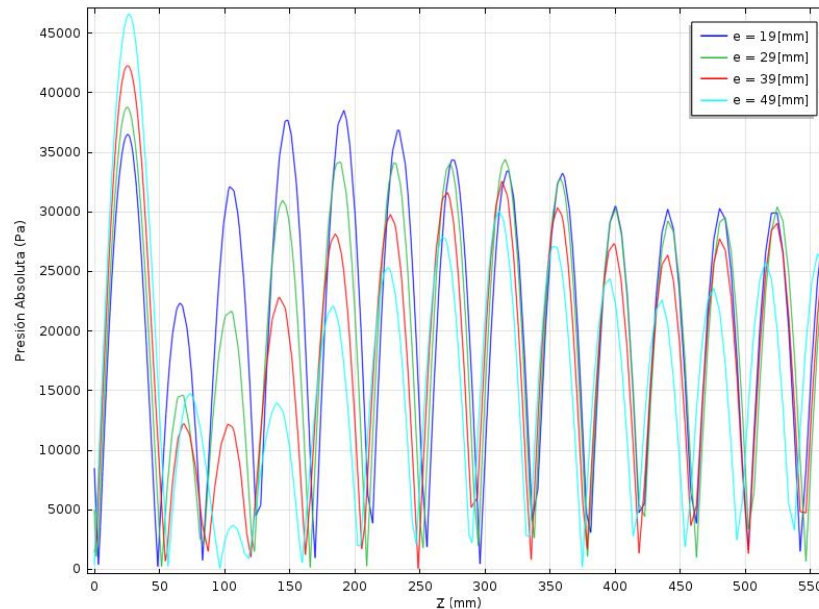


Figura 4.9: Presión absoluta a lo largo del eje de referencia z impuesto en Figura 4.7.

De la Figura 4.9 se observa el campo a lo largo del eje z, que para este gráfico, 0 [mm] representa la posición en la cara radiante del transductor y 560[mm] la parte más lejana con respecto al transductor.

Finalmente, se escoge el parámetro $e = 19[\text{mm}]$ para la separación entre transductores ya que la presión en la cara radiante es menor en comparación a los otros parámetros “e” y la presión en el lóbulo principal es la menos atenuada a lo largo del eje de propagación.

4.4.2. Estudio de desfase en arreglo lineal de transductores

Si se quiere tener conocimiento de a qué desfases (ϕ) se produce focalización del campo acústico y a qué distancia del arreglo lineal de transductores de potencia, debemos realizar una modelación de la distribución de presión en función de los desfases.

La geometría utilizada fue la misma que en Figura 4.7 y la disposición de los transductores es como se observa en Figura 4.12. El estudio contó con un barrido de ángulos de desfase cada un grado (el programa COMSOL utiliza sistema internacional por lo que se debe realizar la conversión de radianes a grados, $[rad] = [grad] * (\pi/180)$), desde 0 a 180[°] para los transductores TC1 y TC2, donde TC3 no sufrió variación de fase.

Al igual que en la sección 3.1.2, se estableció una aceleración normal en la cara radiante como condición de borde, la que tiene como variable importante la frecuencia de excitación y el desplazamiento de la cara radiante. Las ondas se propagarán en un campo libre (condición de borde infinita). Además, los materiales utilizados de la librería del software COMSOL se muestran en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3: Valores de entrada de las propiedades para los dominios del fluido y masa frontal del transductor ultrasónico de potencia.

Dominio del fluido	Material	Agua
	Densidad (ρ)	997[kg/m ³]
	Velocidad (c)	1454[m/s]
Dominio de masa frontal	Material	Acero inoxidable
	Densidad (ρ)	7850[kg/m ³]
	Módulo de Young (E)	205[GPa]
	Radio de Poisson (ν)	0.28

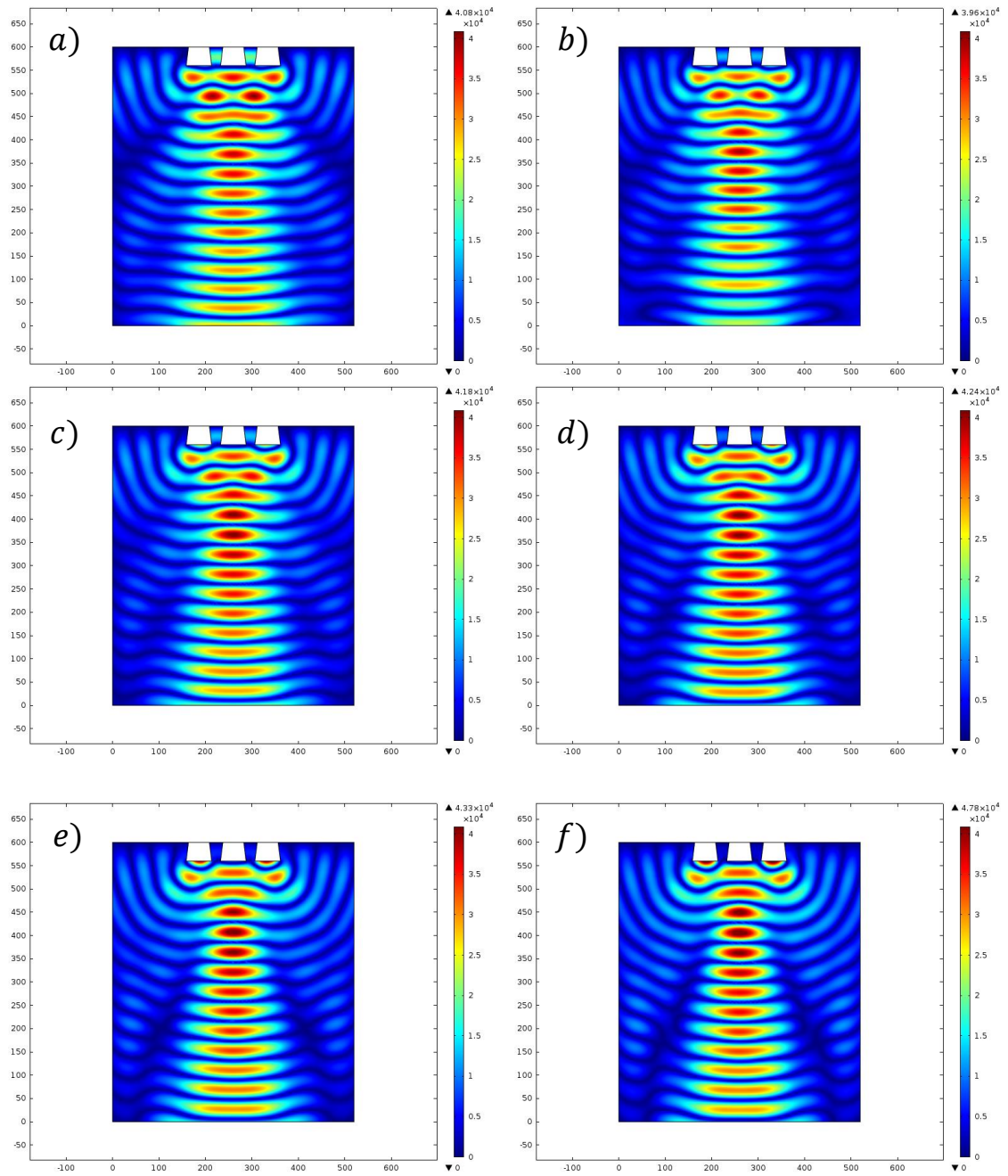


Figura 4.10: Campo de presión absoluta con variación del parámetro de fase ϕ : a) $\phi = 0[^\circ]$, b) $\phi = 10[^\circ]$, c) $\phi = 20[^\circ]$, d) $\phi = 30[^\circ]$, e) $\phi = 40[^\circ]$, f) $\phi = 50[^\circ]$.

De los resultados obtenidos de los modelamientos de desfases de transductores para un barrido desde 0 a 180[°], se determinó el desfase óptimo en el que la focalización del campo acústico es máxima para el arreglo lineal de transductores ultrasónicos de potencia, este óptimo ocurrió a los 50[°].

En la Figura 4.10 se observa los resultados de la simulación para el campo acústico cuando se aplica un desfase entre 0 y 50[°] a la señal de excitación. De la figura se puede distinguir que la Figura 4.10f muestra que existe una región de mayor presión, que corresponde a la zona en la que se produce la focalización de los haces ultrasónicos.

Según las ecuaciones 2.11 y 2.16, el rango donde existe la región de focalización para la configuración del arreglo lineal utilizado, es entre $N = 124[mm]$ y $N_{máx} = 248[mm]$, recordando que no puede comenzar a ocurrir focalización posterior al valor calculado de N, si no que la focalización comienza a ocurrir antes de este valor y su región máxima es entre N y $N_{máx}$.

Al analizar el gráfico de presión absoluta normalizada a lo largo del eje de propagación obtenido de las modelaciones (ver Figura 4.11), se puede distinguir claramente que las focalizaciones del campo acústico comienzan a ocurrir antes del valor N y llegando a un máximo de presión en la región de focalización calculada, donde para el desfase de 50[°], el máximo de presión se produce a una distancia de $z = 155[mm]$.

En el gráfico, 0 [mm] representa la cara radiante del arreglo lineal y 240[mm] representa la zona más alejada del arreglo lineal.

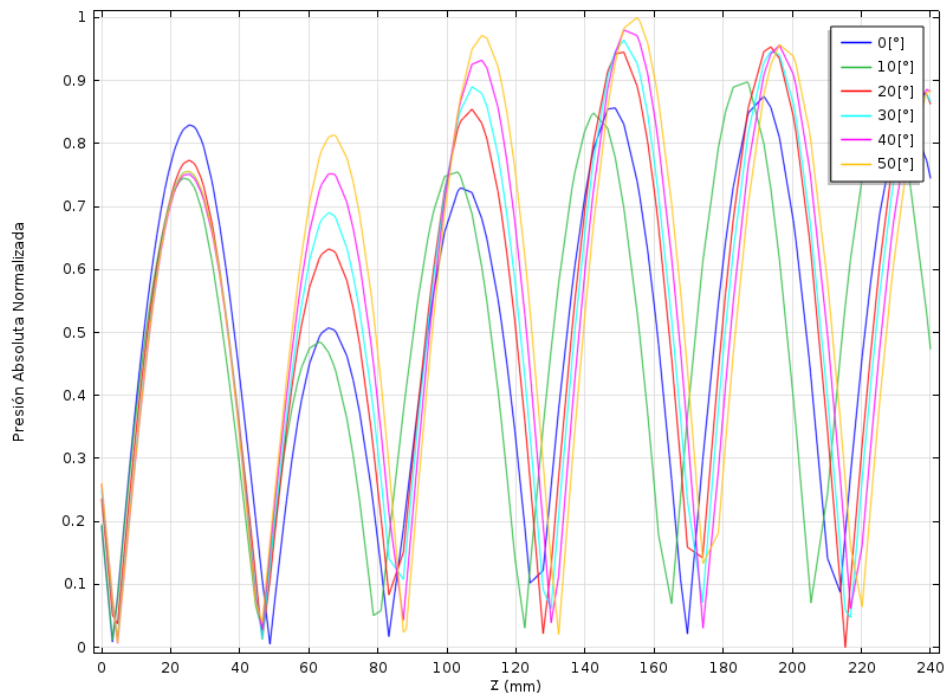


Figura 4.11: *Presión absoluta normalizada producto del desfase de las señales a lo largo del eje de propagación z.*

4.4.3. Sistema experimental

Una vez caracterizado cada uno de los transductores ultrasónicos en el arreglo lineal, y determinado el parámetro de distancia entre transductores “e”, se procedió a realizar la configuración para la adquisición de datos mediante una sonda sumergible.

Configuración que contó con el uso de dos generadores de señales Agilent 33220A y 33250A para la alimentación de los transductores ultrasónicos de potencia en el arreglo lineal.

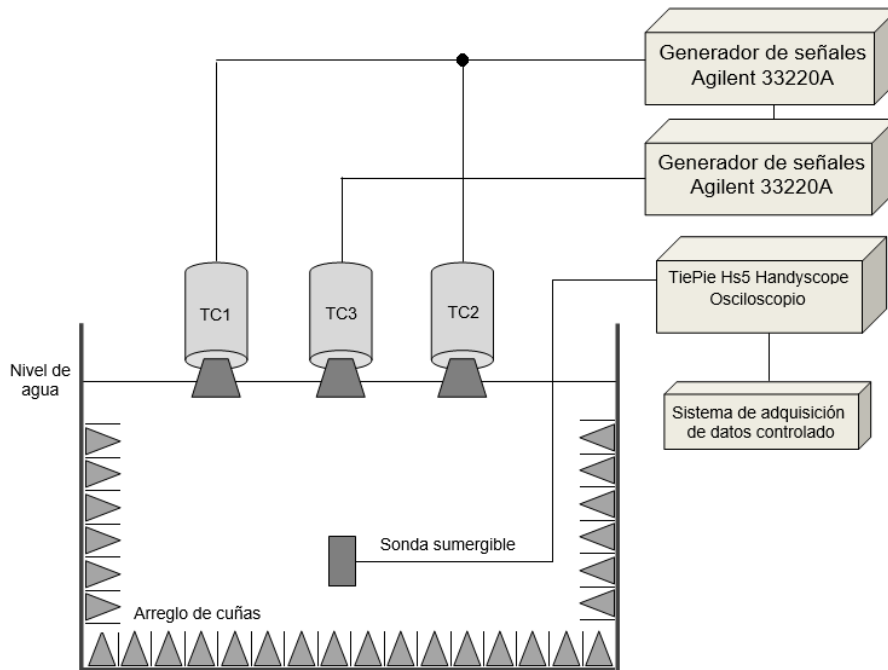


Figura 4.12: Esquema del sistema experimental empleado para la obtención de los perfiles de campo acústico en estanque con agua para el arreglo lineal de transductores ultrasónicos.

Se utilizó un estanque de acrílico de dimensiones 52,0[cm] de largo, 41,5[cm] de ancho y 38,0[cm] alto, el que fue relleno con agua. En el estanque se instaló un arreglo de cuñas las que tienen frecuencias de cortes bajo los 22[kHz], esto hará que no se reflejen ondas en las paredes del estanque provocando que haya interferencia, simulando una cámara anecoica. Este arreglo de cuñas tiene un 4,08% de campo reflejado, lo que es aceptable ya que los arreglo de cuñas típicos tienen una eficiencia del 95%.

Además se dispuso de un sistema automatizado de medición el que se conectó una sonda sumergible para adquirir datos de voltaje a lo largo del eje vertical, datos que fueron adquiridos por un osciloscopio/generador de funciones TiePie HS5 Handyscope y luego procesados para obtener el campo acústico.

4.5. Proceso de medición del campo acústico

Como se observa en el diagrama del sistema experimental (ver Figura 4.12) se dispuso de dos generadores de señales Agilent 33220A y 33250A para controlar la alimentación y desfase de los transductores TC1 y TC2 con respecto al transductor TC3.

La ventaja de utilizar estos generadores es que disponen de un sistema de sincronización incorporado para que ambas señales de alimentación tengan la misma fase de salida. Una vez ajustadas ambas señales, se realiza el desfase de una señal con respecto a la otra, desfasando los transductores ultrasónicos TC1 y TC2 con respecto a TC3 cada $10[^\circ]$ hasta $50[^\circ]$. Desfases determinados mediante el modelamiento en COMSOL (ver sección 4.4.2).

Se realizó un barrido vertical para la obtención del campo acústico a lo largo del eje de propagación de las ondas al igual que en la Figura 4.7. Una vez adquiridos los datos, se realizó una comparación con los resultados de las modelaciones.

En la siguiente sección se muestran los resultados y análisis de los datos obtenidos para los desfases propuestos.

4.6. Análisis y resultados

Los resultados obtenidos mediante la adquisición de datos para el campo acústico generado por el arreglo lineal de transductores se muestran en la Figura 4.13. El barrido de la sonda fue desde la cara radiante del arreglo lineal (0[mm]) hasta el punto más lejano (240[mm]), a lo largo del eje z:

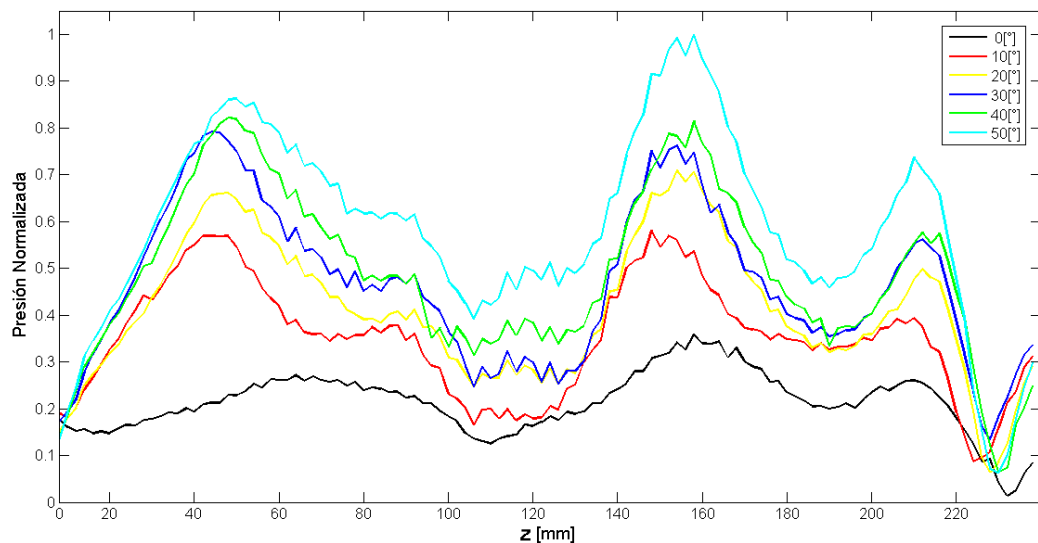


Figura 4.13: distribución del campo acústico a lo largo del eje vertical z. Visualización de región de focalización.

Al comparar los resultados del modelamiento y los obtenidos de los experimentos, se confirma el buen modelamiento realizado ya que concuerdan de manera aceptable las regiones de focalización de ambos estudios.

El modelamiento para la focalización del campo acústico entregó como resultado que el máximo de presión se encontraría a una distancia del arreglo lineal $z = 155[mm]$. Mientras que los resultados experimentales muestran que el máximo de presión se genera a una distancia de $z = 158[mm]$, o sea una diferencia de aproximadamente del $(2 \pm 0,03)\%$ (ver Anexo A.3).

Para apreciar de mejor forma la distribución del campo acústico de los datos obtenidos experimentalmente y mediante modelación en COMSOL, se muestra en la Figura 4.14 la comparación de ambos estudios:

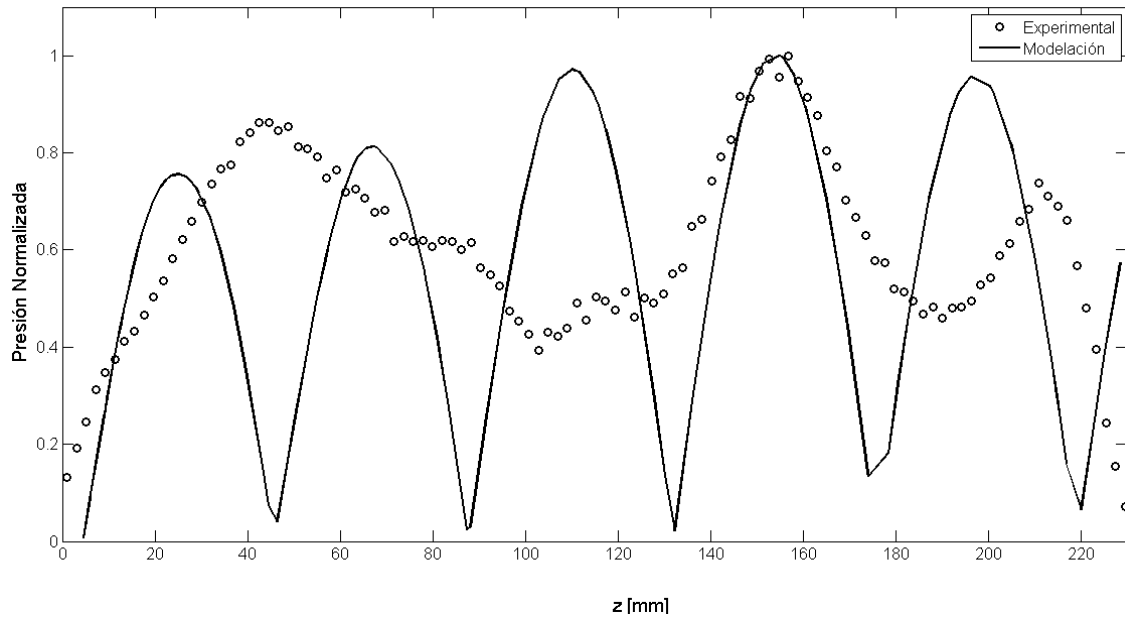


Figura 4.14: Comparación de distribución del campo acústico a lo largo del eje de propagación z para desfase de 50[°].

Los máximos de campo acústico en la región de focalización coinciden en ambos casos, sin embargo, existen máximos vecinos al máximo de focalización en los datos experimentales que no tienen coincidencia con los datos modelados. Esto pudo haber sido afectado por el estanque utilizado ya que el arreglo de cuñas no absorbe totalmente las ondas ultrasónicas.

Se hace un análisis del campo acústico en las cercanías de la cara radiante del arreglo, esto es entre los 0 y 5[mm] de distancia en el eje z (Figura 4.15). Al analizar la gráfica descrita, ocurren fenómenos que se alejan de los predichos en la modelación del campo acústico en función del desfase. Si bien la presión es mayor cuando no existe desfase alguno entre señales, la presión a 50[°] de

desfase no es la menor si no que se produce a los $20[^\circ]$. Este fenómeno se puede dar debido a las fuertes interacciones de ondas constructivas y destructivas en las cercanías del arreglo lineal de transductores, por lo que al ir realizando los desfases de los transductores TC1 y TC2 con respecto a TC3, pueden aumentar dichas interacciones magnificando la construcción o destrucción de regiones de campo acústico.

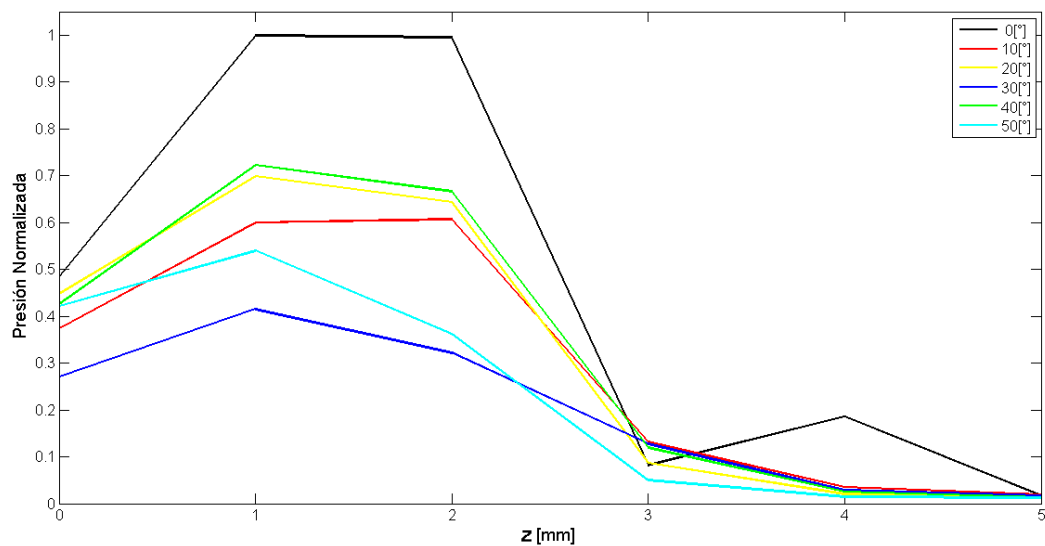


Figura 4.15: distribución del campo acústico en cercanías del arreglo lineal de transductores de potencia con respecto al eje vertical z .

De los resultados mostrados en la Figura 4.13, se encontró que el máximo de presión está en $z = 158[mm]$, correspondiendo a la región de focalización de los haces ultrasónicos. Para este punto de focalización se gráfica la presión normalizada en función del desfase (Figura 4.16).

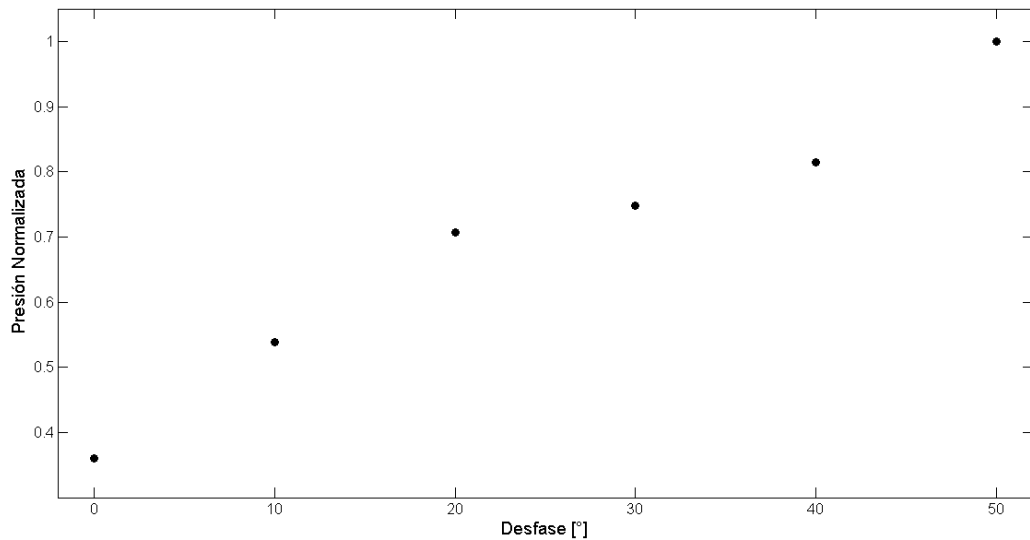


Figura 4.16: Presión en función del desfase a una distancia de 158[mm] donde se produce el máximo de presión en la región de focalización.

Este resultado corrobora que es posible tener un máximo de presión, cambiando el desfase entre los transductores. Esto es ventajoso para el caso en que se tenga que controlar la energía en la zona de focalización, ya que si se quiere aumentar o disminuir la energía solamente se debe aumentar o disminuir la fase hasta el valor máximo o mínimo de desfase previamente determinado.

Realizando el mismo análisis de máximo de presión en función de los desfases pero en cercanías del arreglo lineal de transductores de potencia, no tiene la misma linealidad en comparación con la región de focalización. Para mostrar este resultado en la Figura 4.17 se grafica la presión normalizada en función del desfase para una distancia de 2[mm] de la cara radiante del arreglo.

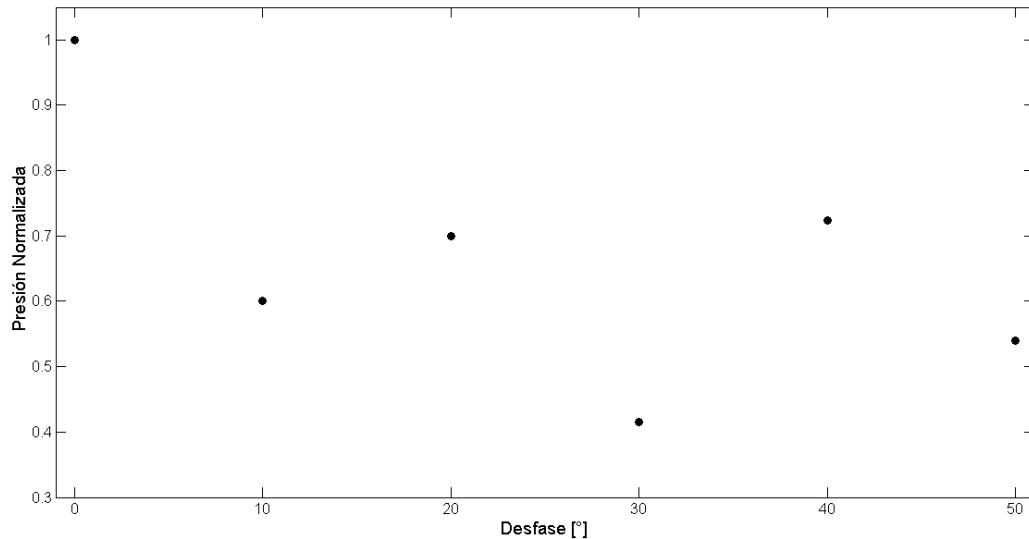


Figura 4.17: Presión en función del desfase a una distancia de 2[mm] donde se produce el máximo de presión cercano al arreglo lineal de transductores de potencia.

Al observar la Figura 4.17, si bien todos los puntos de presión donde existe desfase son menores en comparación al punto de presión sin desfasar, estos no tienen una tendencia de ir incrementando o ir disminuyendo en comparación a los modelamientos realizados.

De los resultados experimentales se encontró que a 30[°] de desfase se produce un mínimo de presión, en contraste a los resultados del modelamiento que fue de 50[°]. Como se dijo anteriormente esta zona es compleja de analizar ya que las interacciones de ondas ultrasónicas es mayor, provocando mayor interferencia constructiva y destructiva.

Finalmente, para escoger un desfase óptimo que garantice disminución de presión cerca del arreglo lineal de transductores de potencia y un aumento en la región de focalización se define un factor de optimización que relaciona el porcentaje de disminución de presión en el máximo cercano al arreglo lineal y el

porcentaje de aumento de presión en la región de focalización en el máximo de concentración de haces ultrasónicos:

$$Factor\ de\ optimización\ (FO) = \frac{\% \text{ región de focalización}}{\% \text{ cercano arreglo lineal}} \quad 4.2$$

Este factor adimensional entre mayor sea su valor, mayor será la relación de optimización.

A continuación se muestran los porcentajes de aumento de presión en el punto máximo en la región de focalización (% región de focalización) y el porcentaje de disminución en el punto máximo en las cercanías del arreglo lineal de transductores de potencia (% cercano arreglo lineal):

Tabla 4.4: Porcentajes de mejora del campo acústico en región de focalización y disminución en las cercanías del arreglo lineal de transductores de potencia.

Desfase [°]	Porcentaje Focalización	Porcentaje Focalización
	$z = 158[mm]$	$z = 2[mm]$
10	50	61
20	97	70
30	108	42
40	127	72
50	178	54

Estos valores serán empleados en el cálculo del factor de optimización para determinar el desfase óptimo. Dichos factores de optimización en función del desfase se muestran en la Tabla 4.5:

Tabla 4.5: factor de optimización en función del desfase para puntos máximos de presión en región de focalización y arreglo lineal de transductores de potencia.

Desfase [°]	Factor de optimización (FO)
10	0,81
20	1,38
30	2,60
40	1,75
50	3,29

Finalmente, el desfase óptimo para lograr una focalización de mayor energía y una disminución de la presión en la cercanías del arreglo lineal para evitar la formación de burbujas o fenómeno llamado cavitación es a 50[°].

Conclusiones

- Aplicando desfases a las señales de alimentación de un arreglo lineal de transductores de potencia se puede focalizar haces ultrasónicos.
- Hay un desfase óptimo para cada punto de focalización.
- El máximo de presión, para la disposición de transductores considerada en esta Tesis, ocurre en la región de transición entre el campo cercano y el campo lejano.
- Se ha encontrado un límite de frecuencia de 400 kHz para el sistema de focalización por reflexión.
- Es posible predecir, mediante el método de los elementos finitos, la distancia de focalización con una precisión del $2\pm 0,03\%$ respecto de los resultados experimentales.
- También se determinó que hay desfases a los que ocurre mayor concentración de energía en la región de focalización y menor concentración de energía en las cercanías del arreglo lineal de transductores de potencia.
- La focalización dinámica puede emplearse para distanciar las zonas de mayor actividad cavitatoria de la superficie radiante de los transductores prolongando su vida útil.

Referencias

- [1] Leo L. Beranek, *Acoustics*, Massachusetts Institute of Technology, Acoustical Society of America, 1993.
- [2] Hossein J. Gohari, *Focusing of ultrasound beams*, Universidad de Oslo, 1997.
- [3] COMSOL Multiphysics, *Introduction to the Acoustics Module*, 2012.
- [4] N. González Salido, *Análisis Numérico de Parámetros de Calidad en Haces Focalizados*, Universidad Politécnica de Valencia, 2010.
- [5] Olympus, *Introduction to phased array ultrasonic technology applications*, 48 Woerd Avenue, USA, 2004.
- [6] C. H. Sherman, J. L. Butler, *Transducers and Arrays for Underwater Sound*, The Underwater Acoustics Series, Springer, 2007.
- [7] A. Barone, *Aspects of the concentration of ultrasonic energy*, Instituto Nazionale di Ultracustica, Roma, 1952
- [8] J. A. Gallego-Juárez, K. F. Graff, *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*, Woodhead publishing series in electronic and optical materials, Elsevier, 2014.
- [9] L. Azar, Y. Shi, S. C. Wooh, *Beam focusing behavior of linear phased arrays*, NDT&E International 22 (2000) 189-198.
- [10] O. Louisnard, J. Gonzalez-Garcia, *Chapter 2: Acoustic Cavitation, Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing*, Food Engineering Series, Springer, 2007
- [11] R. Mettin, *Bubbles structures in acoustic cavitation*, Universitat Gottingen, Germany
- [12] D. Ensminger, *Solid cone in longitudinal Half-wave resonance*, J. A. S. A., Voll.32, N°2, 194-196, 1964.

Anexo

A.1 Resultados de modelamientos para desfases entre 0 y 180[°]

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las modelaciones en COMSOL 5.0 de la distribución del campo acústico a lo largo del eje de propagación z para los desfases provocados en el arreglo lineal de transductores ultrasónicos de potencia:

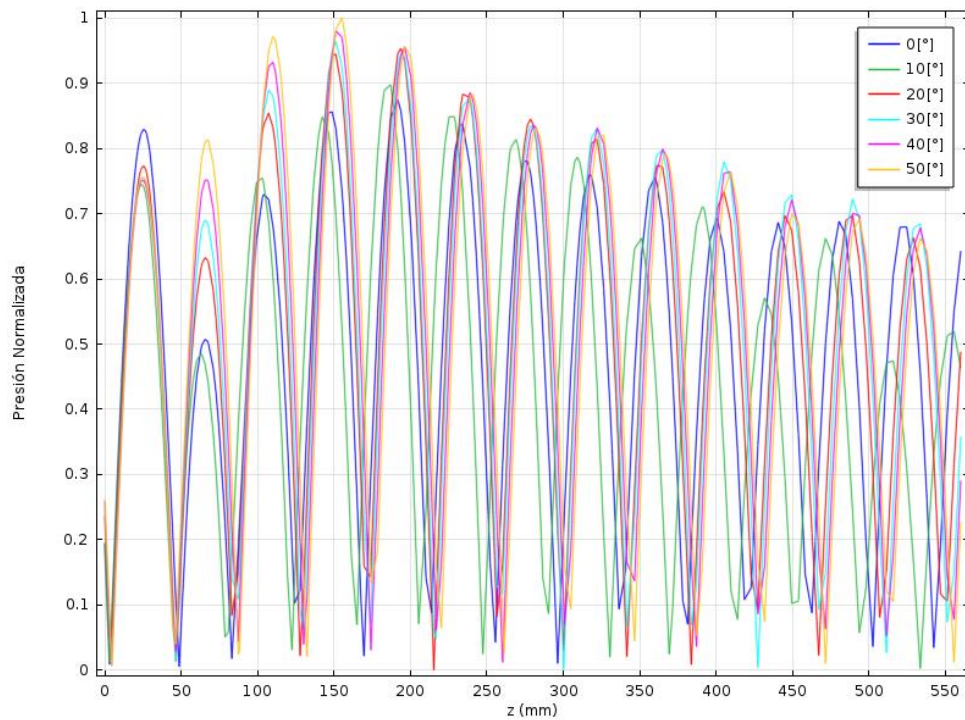


Figura A.1: Distribución del campo acústico a lo largo del eje z .

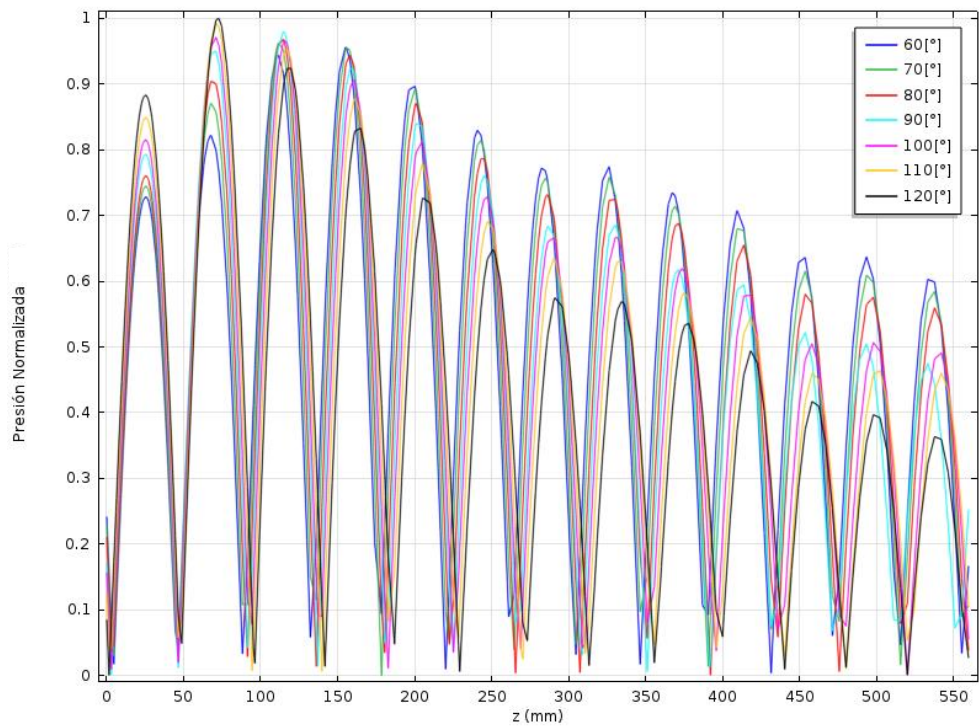


Figura A.2: Distribución del campo acústico a lo largo del eje z.

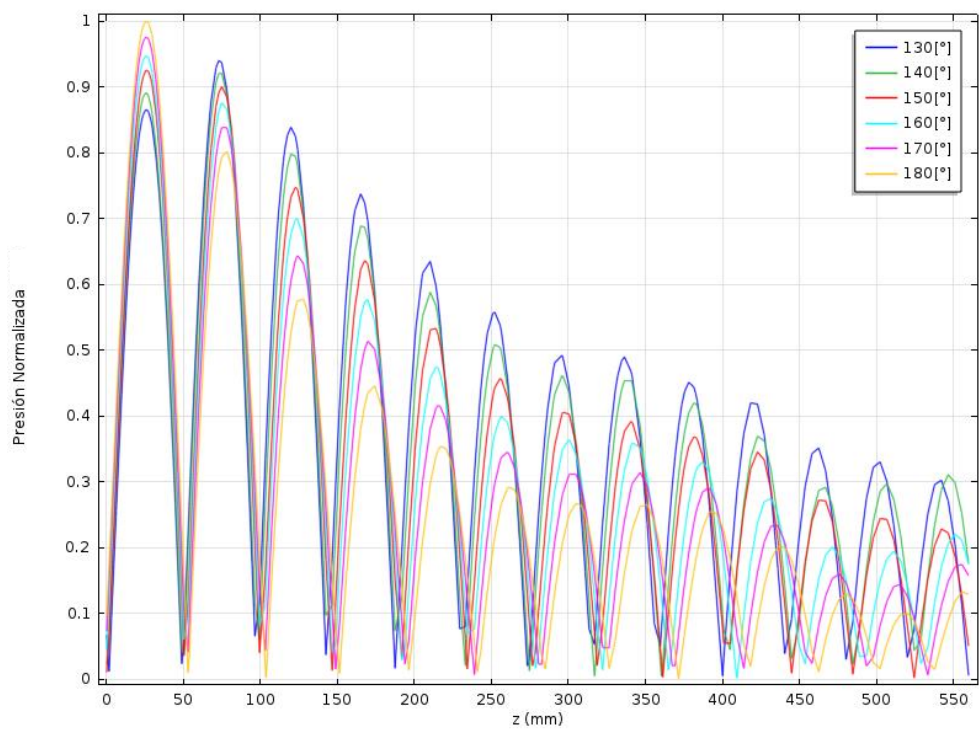


Figura A.2: Distribución del campo acústico a lo largo del eje z.

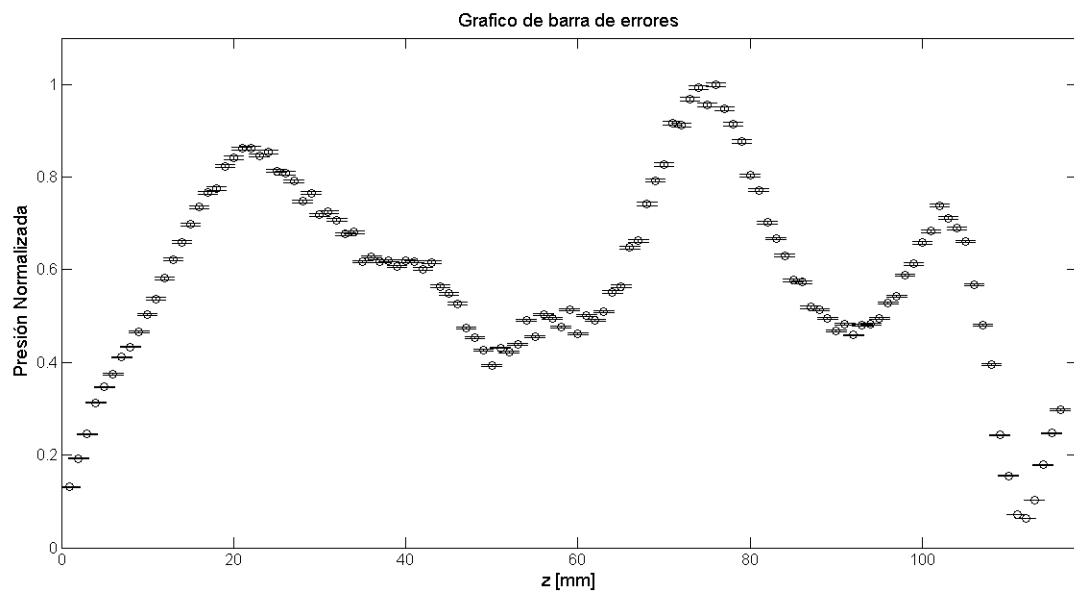


Figura A.3: Distribución del campo acústico a lo largo del eje z con su respectivo barra de error.