

Caracterización del campo acústico generado por transductores focalizados



Silvia Adrián Martínez, Noé Jiménez,
Francisco Camarena Femenía,
Víctor Sánchez-Morcillo, Yuri Makov.
Instituto de Investigación para la Gestión
Integrada de Zonas Costeras (IGIC).
Universidad Politécnica de Valencia
E-mail: siladmar@upv.es

PACS: 43.10.-a; 43.35.-c; 43.25-.x; 43.38.-p

Resumen

El estudio de las características del campo acústico generado por fuentes ultrasónicas focalizadas es un activo campo de investigación dada la relevancia que éstas poseen tanto en aplicaciones médicas como industriales. En este trabajo se evalúa, experimental y numéricamente, el desplazamiento de foco lineal (distancia entre el foco geométrico de la fuente y la posición del máximo de presión en el eje: foco real) y el desplazamiento de foco no lineal (desplazamiento del máximo de presión en el eje al aumentar la tensión aplicada al transductor) en un haz ultrasónico generado por un transductor de focalización media ($N_F=6$). Se comprueba que los máximos de presión y rarefacción se desplazan en sentido opuesto al aumentar la potencia suministrada al transductor, y que el máximo de presión en el eje llega a superar la posición del foco geométrico del transductor.

Abstract

The study of the acoustic field characteristics generated by focusing sources, both in linear and nonlinear regime, is an active field of research as they are relevant in most of the ultrasonic applications in medicine and industry. In this work we evaluate, experimentally and numerically the *linear shift* phenomenon (the distance between the geometrical focus of the focused source and the on-axis maximum pressure position in linear regime, real focus) and the *nonlinear shift* phenomenon (the movement of the pressure maximum position along the axis of focused acoustic beams under increasing driving voltages) of an ultrasonic beam with medium Fresnel number ($N_F=6$), it is important to cover this region of focusing as some of the medical devices are there, as well as we demonstrate that

the *nonlinear shift* is able to move the on axis maximum pressure location beyond the geometrical focus.

1. Introducción

El estudio del campo acústico generado por fuentes focalizadas, tanto en régimen lineal [1], como en régimen no lineal [4], es un área de investigación muy activa debido a su relevancia en el campo de las aplicaciones médicas e industriales.

En una fuente focalizada, la diferencia entre la posición del foco geométrico y la posición del máximo de presión axial en régimen lineal es lo que se conoce como *shift lineal* y fue explicado en 1982 por Lucas y Muir [3] y posteriormente corregido por Makov et al. en 2008 [5].

Por otro lado, el fenómeno conocido como *shift no lineal* hace referencia al cambio de posición del máximo de presión en el eje de un haz acústico focalizado que se produce con el aumento de la tensión aplicada al transductor. Este fenómeno fue descrito en trabajos previos por Bakhvalov et al. [6], estudiaron el *shift no lineal* en fuentes planas mostrando como el máximo de presión inicialmente se aleja del transductor y, al aumentar la tensión de entrada, tiende a aproximarse al mismo.

Posteriormente, en 1986, Duck et al. [7] presentaron un estudio del *shift no lineal* producido en fuentes ligeramente focalizadas ($N_F \approx [0.98 \text{ a } 2.81]$), utilizadas comercialmente en equipamiento médico para técnicas de eco-impulso, mostrando que este fenómeno se da tanto en el máximo axial como en el mínimo y con diferente comportamiento.

En 1997 Averkirov y Hamilton [8] observaron experimentalmente el *shift lineal* en un pistón de focalización media. En 2006 Makov et al.[9] propusieron una explicación al *shift lineal* en base a la descomposición armónica de la forma de onda para haces de bajo *Número de Fresnel*, y fue en 2008 [5] cuando propusieron una relación entre el *shift no lineal* y el *Número de Fresnel* del transductor. Estos estudios demostraron cómo el *shift lineal* decrece con el aumento del grado de focalización (mayor N_F), obteniendo valores cercanos a 2.5 mm para haces de 1.3 de N_F y valores en torno a pocos milímetros cuando la focalización alcanza valores de N_F en torno a 6, todavía lejanos de los valores asociados a los dispositivos HIFU (High Intensity Focused Ultrasound) que se encuentran alrededor de $N_F \approx 15$.

2. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar el campo acústico generado por una fuente focalizada. Se trata de determinar si existe un desplazamiento apreciable de la localización del máximo de presión en el eje de simetría del haz ultrasónico al aumentar la tensión aplicada al transductor.

Se utiliza el concepto de *Número de Fresnel* como parámetro para caracterizar fuentes focalizadas y se estudia cómo la magnitud del desplazamiento depende de éste.

En este trabajo se pretende también poner de manifiesto que el *shift no lineal* y el *shift lineal* están relacionados en transductores de focalización media, tal y como ya se demostró para transductores de menor *número de Fresnel* en artículos previos [5], [9] y la conexión entre el estado lineal y no lineal del efecto del desplazamiento focal.

Finalmente, se estudiará experimentalmente la posibilidad de que el foco real del transductor supere al foco geométrico en condiciones de propagación no lineal.

3. Materiales y métodos

3.1. Dispositivo Experimental

El dispositivo experimental utilizado consiste en el clásico esquema de un transductor emisor enfrentado al transductor receptor inmersos en un tanque (60x40x38) de agua destilada (véase Fig.1). El transductor emisor (Fig.2) está formado por un único elemento piezoeléctrico (PZ 26, Ferroperm Piezoceramics, Denmark) plano de 50 mm de diámetro ensamblado en una carcasa metálica. Para la focalización del haz se adhiere a la cerámica una lente de metacrilato de 50 mm de diámetro y 70 mm de radio de curvatura (R). La frecuencia de resonancia del sistema es 2.227 MHz, la apertura 50 mm ($2r_0$) y la distancia focal geométrica 157.0 \pm 1.5 mm (F), avaluada a partir de la Ecuación 1.

$$F = \frac{R}{1 - c_m/c_l} \quad (1)$$

dónde c_m y c_l son la velocidad del sonido en el agua y en el metacrilato respectivamente.

El emisor es excitado con ráfagas de pulsos (30 ciclos, tipo senoidal) mediante un generador de funciones (14 bits, 100 MS/s, modelo PXI5412, National Instruments). La señal se amplifica previamente mediante un Amplificador RF lineal (ENI 1040L, 400W, +55dB, ENI, Rochester, NY). Para medir las formas de onda se utiliza como receptor un hidrófono de membrana (0.229 V/MPa de sensibilidad, modelo MH2000B, 200 μ m de diámetro activo, NTR/Onda Corp.) y un digitalizador (64 MS/s, model PXI5620, National Instruments). El receptor está fijado a un sistema de microposicionamiento que permite desplazarlo en las tres direcciones ortogonales del campo acústico con una precisión de 10 μ m (OWIS GmbH). Tanto la generación de la señal como el proceso de adquisición se llevan a cabo desde un controlador PXI (NI 8176, National Instruments) que a su vez controla el sistema de microposicionamiento.

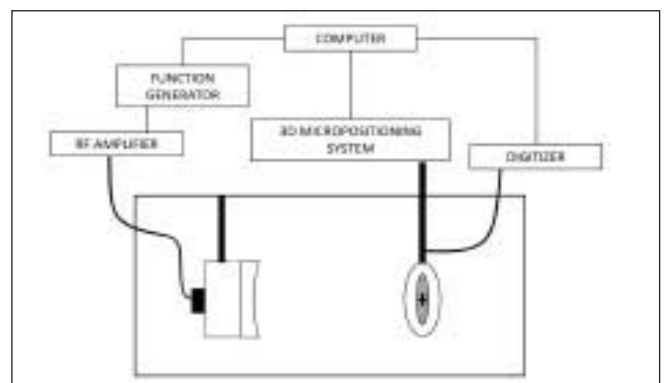


Figura 1. Esquema del dispositivo experimental.



Figura 2. Transductor emisor con la lente focalizadora adherida.

3.2. Modelo Numérico

La ecuación de onda parabólica KZK (Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov) es conocida por describir con exactitud la propagación de haces de sonido teniendo en cuenta la combinación de los tres efectos clave en la propagación, la difracción, la absorción y la no linealidad. Puede escribirse en términos de la presión acústica p , considerando la propagación en la dirección z positiva como:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z \partial t'} = \frac{c_0}{2} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{D}{2c_0^3} \frac{\partial^3 p}{\partial t'^3} + \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p^2}{\partial t'^2} \quad (2)$$

donde $t' = t - z/c_0$ es un tiempo de retardo, c_0 la velocidad del sonido, r de distancia radial desde el eje z , ρ_0 la densidad del fluido y D es la difusividad del sonido en un medio termoviscoso. El coeficiente de no linealidad se define por $\beta = 1 + B/2A$, donde B/A es el parámetro de no linealidad del medio. La Ecuación 2 es válida en aproximación paraxial ($Ka \gg 1$) y tiene en cuenta la no linealidad, la difracción y la absorción termoviscosa. El efecto de focalización se considera en las condiciones iniciales.

Hasta la fecha, no hay soluciones analíticas a la ecuación *KZK*. Solo se han dado soluciones en régimen quasilineal, desarrolladas para casos en que la no linealidad es débil. Para entender los efectos de la no linealidad en los haces acústicos se debe obtener completamente las soluciones no lineales de la ecuación *KZK* y, ya que, por el momento, no existen estas soluciones, se debe recurrir al modelado numérico.

Para el análisis numérico se ha utilizado el algoritmo *KZKTexas* [10][11], es un código informático que trabaja con diferencias finitas en el dominio del tiempo para modelar haces acústicos con simetría axial en fluidos. El algoritmo es capaz de resolver la ecuación parabólica no lineal *KZK* para haces acústicos pulsados, axisimétricos y de amplitud finita. Para llevar a cabo todos los cálculos en el dominio del tiempo, evita los problemas asociados usando series de Fourier truncadas en cálculos en el dominio de la frecuencia. La ecuación diferencial resultante se resuelve para cada punto en el espacio (paso espacial) considerando los efectos de difracción, absorción y no linealidad por separado. Se asume que cada efecto actúa independiente del resto si el paso es lo suficientemente pequeño.

4. Procedimiento de medida

Para medir las características del haz generado por la fuente se registran formas de onda en veinticinco planos a lo largo del eje z del sistema de microposicionamiento, estos planos son transversales al eje z del transductor de tamaño 6x6 mm (planos x,y) y las formas de onda se registran con una resolución espacial en el plano de 0.25 mm. Para evaluar la distribución de presión en el eje, de cada plano $x-y$ (144 puntos medidos), se debe extraer el valor máximo y sus coordenadas (x_{max} , y_{max}). Como el eje z mecánico no coincide con el eje de simetría del transductor, normalmente, el máximo de presión no estará situado en el origen del plano $x-y$, es decir, tiene coordenadas distintas de cero, esto obliga a localizar el eje del transductor y los valores de presión en el mismo de forma alternativa como la usada en [13].

La mayoría de los planos medidos se localizan cerca de la posición del máximo de presión axial (Fig.3) con una se-

paración mínima de 1mm entre ellos. Esta resolución espacial en z es crítica en el experimento ya que se necesita evaluar la posición del máximo de presión axial con una precisión mayor de 3 mm con el objetivo de poder detectar el fenómeno del *shift no lineal* (estimado en menos de 1 cm en simulaciones numéricas [5]).

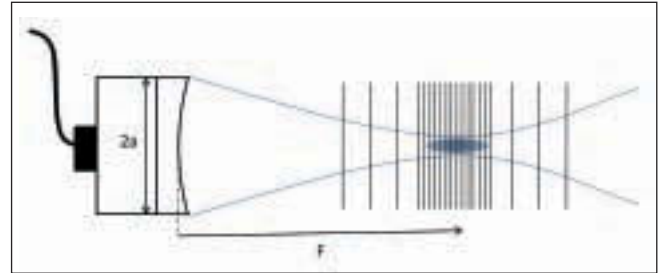


Figura 3. Estrategia de medida. Formas de onda evaluadas en veinticinco planos a lo largo del eje z del sistema de microposicionamiento.

Asimismo, como el experimento presenta un error aleatorio estimado en un 2%, la determinación de la posición del máximo de presión tiene asociada una incertidumbre ligeramente superior a 1 mm.

Este procedimiento de medida se repitió hasta en ocho ocasiones incrementando la tensión de entrada al emisor en el rango comprendido entre $2.5 V_{pp}$ (régimen lineal, $p_0=2\text{kPa}$) y $125 V_{pp}$ para poder estudiar la evolución de las características del campo acústico al pasar de régimen lineal a régimen no lineal.

4.1. Tratamiento de datos experimentales

Una vez registradas todas las formas de onda de cada plano sería sencillo extraer el máximo total de todas ellas y afirmar que es el máximo axial en ese punto, pero si se observa con detenimiento las formas de onda es fácil intuir que este método puede dar un valor falseado de la medida de la presión axial.

Las formas de onda registradas están afectadas por ruido. La información útil de la medida registrada está concentrada en un determinado número de muestras e incluso en esta zona, observando la envolvente, se aprecia como ésta es poco estable.

La solución inmediata, para procesar una señal de estas características sería un filtrado paso banda de la señal. De este modo se conseguiría minimizar el ruido y mejorar la calidad de la señal, pero pese a los buenos resultados que el filtrado reportaría debemos desecharlo ya que no va a ser de utilidad en todo el proceso. Al trabajar a alta potencia, y por tanto salir fuera del régimen lineal, el filtrado paso banda eliminaría los armónicos de la señal y se perdería información importante. El filtrado paso banda solo sería adecuado si se trabajase en régimen lineal.

Se propone a continuación un criterio para procesar la señal que respete las frecuencias superiores y que permita:

- a) Discriminar el ruido adherido a la medida
- b) Distinguir el máximo de la señal a partir de las muestras más estables
- c) Diseñar un método válido a alta y baja potencia

4.2. Procesado de la Señal

El procesado que se plantea en este trabajo se lleva a cabo en tres niveles:

1. Procesado de la señal a nivel de punto: Discrimina el máximo de la forma de onda descartando picos aislados de la señal y tomando como datos de referencia las muestras que presentan información más estable.
2. Corrección de error sistemático del movimiento del motor: El cambio brusco de posición del hidrófono cuando hace la variación en el eje y desajusta ligeramente los datos en la matriz que define el plano. Con el objetivo de conocer con exactitud la forma y tamaño de la zona de máxima presión es necesario colocar de forma correcta la información guardada en la matriz teniendo en cuenta el patrón de movimiento del hidrófono.

3. Procesado a nivel de plano: Localiza el máximo en el plano, obtiene su situación en fila y columna de la matriz, seguidamente se realizan dos cortes, uno en x y otro en y, en la fila y columna dónde se localiza el máximo. Se ajustan ambas curvas a un polinomio de grado 4. El máximo total del plano será el promedio de los máximos de los polinomios de ajuste

Tras obtener el valor del máximo de cada plano se puede localizar el máximo axial (véase figura 4).

5. Resultados

5.1. Caracterización del haz en Régimen Lineal

La caracterización del haz en régimen lineal permite conocer varias características importantes sobre la fuente acústica focalizada, como por ejemplo la posición del foco geométrico y la posición del máximo de presión axial, es decir, el *shift lineal*.

Esta caracterización lineal puede ejecutarse en tres pasos.

- *Primero*: se evalúa la distancia focal geométrica nominal a partir de los valores nominales de la lente utilizada.
- *Segundo*: se ajustan de los datos experimentales, tomados a baja potencia, con la solución analítica de *O'Neil* [1] para el campo focalizado en régimen lineal. Este ajuste proporciona un nuevo valor para la focal geométrica y para la apertura.
- *Tercero*: el ajuste de los datos experimentales en régimen lineal y la simulación numérica del haz, basada en la ecuación KZK. Este paso permite determinar los parámetros adecuados en cuanto a apertura y distancia focal geométrica para realizar la simulación en régimen no lineal.

En el primer paso, la distancia focal geométrica y la apertura del transductor proporcionadas por el fabricante son $F=157$ mm y $2r_0=50$ mm respectivamente. Estos datos suponen un Número de Fresnel de 5.9 y una ganancia de $G=19$.

Para proceder al segundo paso, los datos registrados de forma experimental se ajustan a la curva (*O'Neil*) que describe la presión a lo largo del eje z.

$$\left| \frac{P}{P_0} \right| = \left| \frac{2}{1 - \xi} \sin \left(\frac{\pi N_F}{2} \frac{1 - \xi}{\xi} \right) \right| \quad (3)$$

En el ajuste se dejan dos parámetros libres, P_0 , F (focal geométrica contenida en la definición del Número de Fresnel, $N_F = \alpha^2 / F\lambda$).

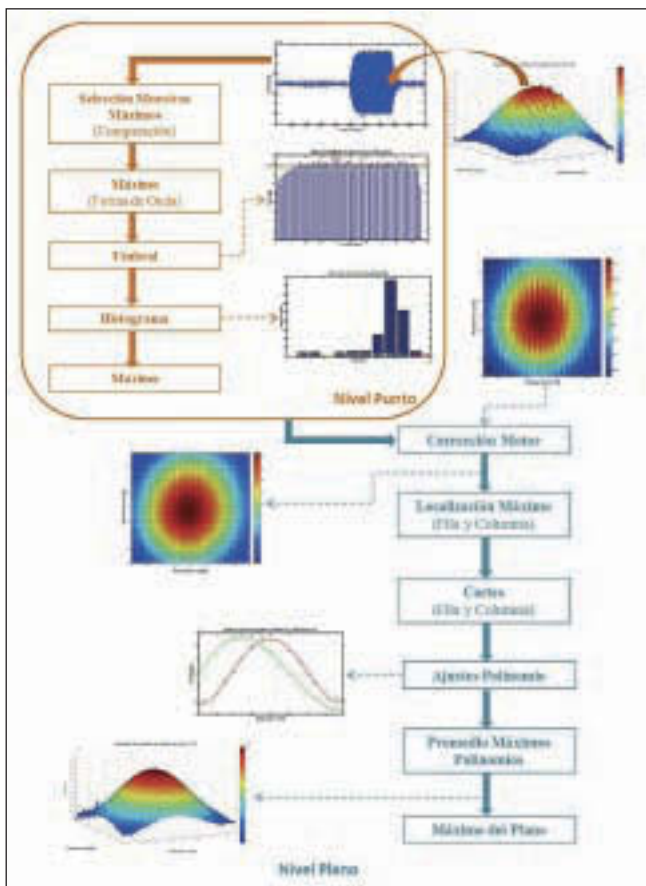


Fig.4. Diagrama de bloques del algoritmo de procesado de la señal. En la imagen superior derecha y la inferior se aprecia la diferencia entre el plano con los datos registrados y tras el procesado

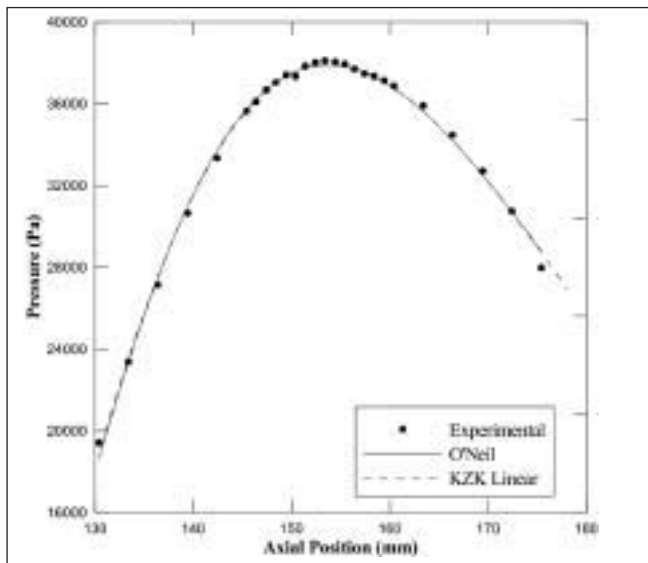


Figura 5. Distribución axial de presión en régimen lineal. Valores experimentales, expresión analítica de O'Neil y simulación KZK.

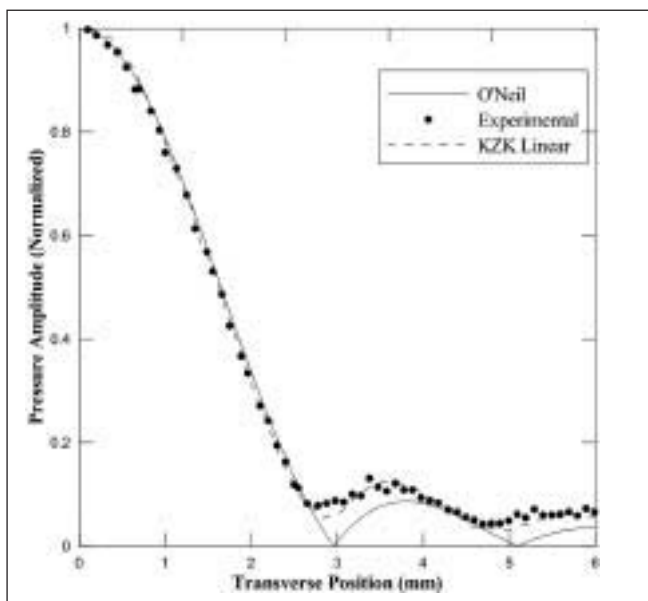


Figura 6. Distribución transversal de presión normalizada. Valores experimentales, expresión analítica de O'Neil y simulación KZK.

El ajuste de la solución analítica de O'Neil a los datos experimentales (Fig.5 Fig.6) proporciona una apertura efectiva del transductor de $2r_0=51.6$ mm y una distancia focal geométrica efectiva de $F=158.2$ mm. El máximo de presión axial obtenido con la expresión analítica se sitúa a 153 mm del transductor, es decir el 96.7% de la distancia focal geométrica, de acuerdo al valor para el *shift lineal* predicho por Makov et. al. [5], para transductores de Número de Fresnel en torno a 6.

Finalmente, en el tercer paso, se realiza una serie de simulaciones con diferentes valores de apertura numérica y

distancia focal geométrica que proporcionan, una vez obtenido el mejor ajuste con los datos experimentales (Fig.5 y Fig.6), un valor para la apertura efectiva del transductor de $2r_0=50.2$ mm y una distancia focal geométrica de $F=157$ mm.

Como puede apreciarse en la Fig.5 y Fig.6, los resultados de ambos modelos, calculados con la apertura y distancia focal que mejor ajusta, son coherentes con los datos experimentales. La reducción en la apertura nominal del transductor ha sido documentada previamente en diversos trabajos [8][12] y es debida al hecho de que el transductor no es un pistón perfecto. La carcasa del transductor, y el efecto de los bordes de la lente contribuyen a limitar y distorsionar su vibración.

5.2. Comportamiento no Lineal

El fenómeno conocido como *shift no lineal* hace referencia al cambio de posición del máximo, de presión, en el eje de un haz acústico focalizado que se produce con el aumento de la tensión aplicada al transductor.

Se ha evaluado experimentalmente y numéricamente, con los valores de apertura y distancia focal extraídos en el tercer paso de la caracterización lineal. En la Fig.7 se observa, mediante puntos, la variación del máximo de presión axial registrado experimentalmente a distintas potencias. En trazo continuo se representa la variación del máximo de presión en simulación. La línea vertical situada en 157.5 mm denota la posición del foco geométrico del sistema con un error de ± 0.5 mm.

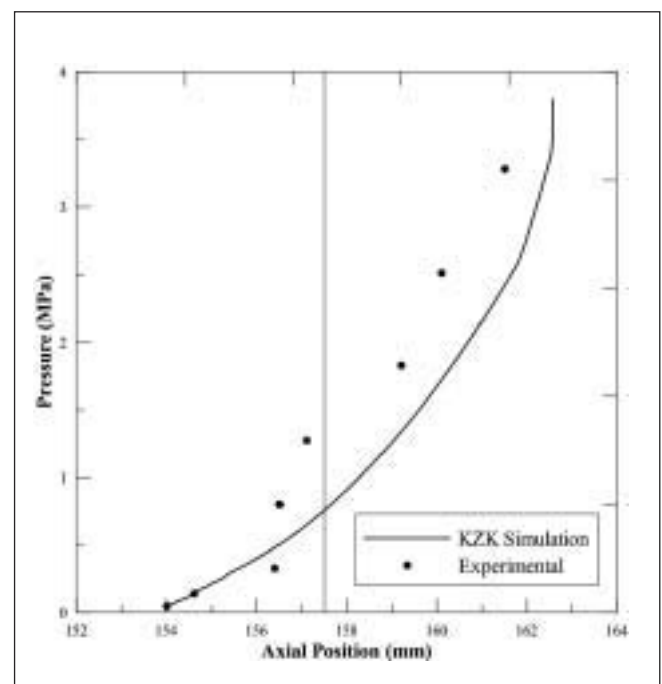


Figura 7. Variación de la posición del máximo de presión al aumentar la potencia suministrada al transductor.



Acústica y Vibraciones **Tecnología a su medida**

Alava Ingenieros le ofrece una solución completa en Instrumentación de Medida y Sistemas de Ensayo en los diferentes campos de la ACÚSTICA y las VIBRACIONES, basadas en los productos más novedosos de nuestros socios tecnológicos.

Lo que nos hace únicos y especiales en este mercado es el alto grado de capacitación de nuestro equipo humano, que ponemos a su disposición para Asesoramiento, Formación, Instalación y Puesta en Marcha.

Alava Ingenieros, tecnología a su medida

Acústica ambiental y arquitectónica:

- Sonómetros y vibrómetros
- Analizadores multicanal
- Redes de monitorización acústica
- Software de simulación acústica

Seguridad e higiene laboral:

- Dosímetros
- Medidores de vibración
- Calibradores

Transductores y calibradores:

- Excitadores de vibración
- Micrófonos e hidrófonos
- Acelerómetros
- Fuentes sonoras
- Máquinas y martillos de impacto

Análisis avanzado:

- Analizadores multicanal
- Localización de fuentes sonoras
- Calidad acústica
- Análisis estructural
- Maquinaria rotativa

Cámaras para ensayos acústicos:

- Cámaras anecoicas y semianecoicas
- Cámaras reverberantes
- Tubos de impedancias
- Cámaras portátiles

Audio y Broadcast:

- Sistemas de telefonometría
- Analizadores de calidad de audio

Ambos resultados, experimentales y simulados, muestran dos conclusiones relevantes: a) la posición del máximo de presión axial se aleja del transductor cuando aumenta la potencia de excitación, y b) esta posición puede superar la posición del foco geométrico.

El comportamiento de la posición del máximo de presión que se observa en la Fig.7 puede justificarse, en régimen lineal, por la acción opuesta de dos efectos: focalización y difracción, la combinación de ambos es la responsable del desplazamiento del máximo de presión hacia la posición del transductor. Al entrar en el régimen no lineal, cuando éste es lo suficientemente bajo para que no se dé el efecto de absorción no lineal¹, aparecen armónicos superiores, esto produce una subida de la frecuencia efectiva del haz, responsable de que decrezca el fenómeno de difracción, y el máximo de presión se aproxima a la focal geométrica del transductor.

Cuando se va aumentando la potencia, con la formación de ondas de choque, entra en juego la absorción no lineal a alta frecuencia. Este fenómeno tiene un comportamiento opuesto al anterior, la absorción atenúa fuertemente los armónicos superiores y por tanto hace que decrezca la frecuencia efectiva del haz, aumentando de nuevo el fenómeno de la difracción y por tanto alejando el máximo de presión de la focal geométrica, aproximándolo a la posición que ocupaba en régimen lineal.

Los valores experimentales y simulados encajan perfectamente en la zona cercana al régimen lineal (bajas tensiones de entrada) pero difieren ligeramente a medida que aumenta la potencia y la propagación se aleja del régimen lineal, el

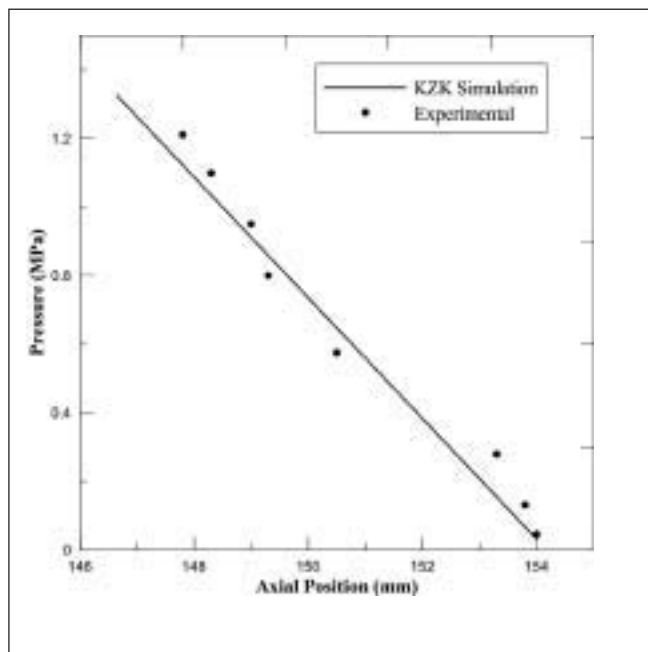


Figura 8. Variación de la posición del mínimo de presión al aumentar la potencia suministrada al transductor.

shift no lineal es mayor en los resultados de simulación. Existen varias razones posibles que explicarían estas pequeñas diferencias: en primer lugar, la respuesta en frecuencia del hidrófono impone un límite superior de 20 MHz el cual afecta al registro de armónicos superiores a esa frecuencia que contenga la señal. En segundo lugar, el campo acústico no presenta una distribución plana y uniforme bajo el área activa del receptor (200 μm de diámetro activo), por ello la medida del máximo de presión estará subestimada ya que el registro es el promedio espacial de la zona de medida, por el contrario, el máximo en simulación es la solución de la ecuación KZK en un punto infinitesimal. Otra posible fuente de error se asociaría a la vibración no uniforme de la fuente. El modelo numérico asume que la superficie del transductor vibra uniformemente, sin embargo, el transductor real no actúa como un pistón con vibración perfectamente uniforme. Además, la simulación presenta errores numéricos, sobre todo cuando aparecen ondas de choque, porque los picos máximos son muy complicados de resolver numéricamente.

Si se representan los máximos de rarefacción, es decir, la evolución de los mínimos, se aprecia que las diferencias entre los valores experimentales y los simulados al aumentar la potencia es mucho menor que en el caso de los máximos Fig.8.

5.3. Ancho del haz

En la Fig.9 se muestra cómo varía el ancho del haz con la distancia al transductor, tanto de compresión como de rarefacción, es decir observando el comportamiento de los picos positivos y de los negativos. Para la comparación se ha decidido medir el ancho del haz a -6dB del pico de máxima amplitud.

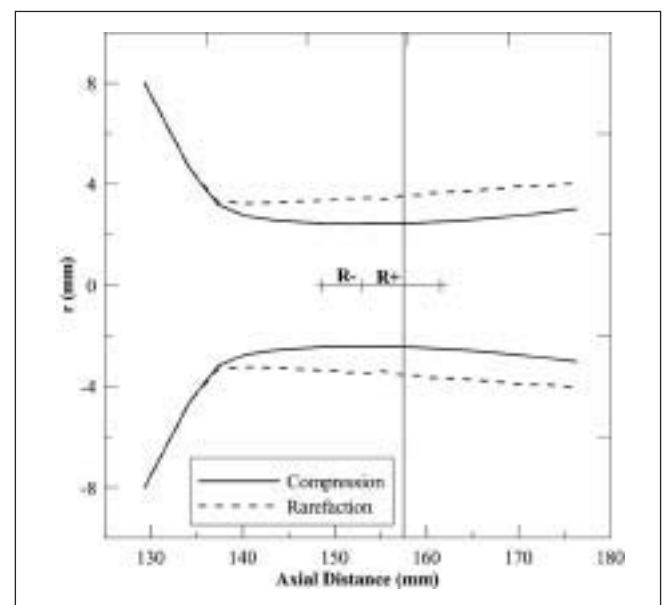


Figura 9. Ancho del haz a -6dB del máximo para las presiones positivas y negativas. $R+$ y $R-$ denotan el desplazamiento que sufre el máximo (*shift no lineal*). $P_0=67\text{ KPa}$.

¹ Afecta a cada componente espectral de manera exponencial, con los coeficientes de absorción aumentando con el orden de los armónicos.

En el caso más extremo (con la mayor potencia de excitación) la posición del máximo de presión está 4 mm por encima del foco geométrico, en este caso la distancia entre la posición del máximo de compresión y el de rarefacción es de 13.7 mm.

6. Conclusiones

El problema del cambio en la posición de la focal analizado en este trabajo es importante para la descripción teórica general de los haces ultrasónicos focalizados y para muchas aplicaciones prácticas relacionadas con ellos. Desde este punto de vista, la distinción del *shift* focal en el eje, en régimen no lineal, puede ser usada en la mejora de muchos procesos físicos inducidos por el campo radiado, en este caso focalizado. Por nombrar un ejemplo, en aplicaciones médicas, se usan transductores focalizados cuando se requiere grandes concentraciones de energía en zonas pequeñas. Es muy importante conocer con precisión la posición del máximo de presión, ya que, es allí donde aparece con fuerza la no linealidad, ampliando el espectro hacia las altas frecuencias. La absorción en los tejidos aumenta con la frecuencia, por ello, la formación de ondas de choque puede incrementar de forma significativa la cantidad de energía convertida en calor. También es importante conocer la zona en que se localizan los mínimos de presión, puesto que influyen en la aparición del fenómeno de cavitación.

En este trabajo se ha presentado el análisis del cambio de posición del máximo de presión en haces ultrasónicos de focalización media, resultados que no estaban recogidos en trabajos previos.

Se ha examinado la relación entre el *shift lineal* y el *shift no lineal*. Queda de manifiesto, como ya adelantaban otros autores [5], la dependencia del *Número de Fresnel* con el cambio de posición de la focal en régimen lineal. Se esperaba que en régimen lineal el máximo de presión estuviese alrededor del 96.8 %, considerando el 100% la distancia focal geométrica [5]. Así se ha observado en las medidas realizadas a baja potencia, el máximo de presión localizado a 153 mm del transductor indica un *shift lineal* de 4.5 mm, que corresponde al 96.7%.

Se ha comprobado experimentalmente cómo en régimen no lineal también se produce un cambio en la posición de la focal en transductores de *Número de Fresnel* medio, llegando incluso a sobrepasar la focal geométrica del sistema, resultado que no ha sido publicado ni predicho anteriormente. En las referencias anteriormente citadas ya se adelantaba que el intervalo en el que se mueve el máximo (régimen no lineal) en sistemas de *Número de Fresnel* medio es inferior a los de bajo, este aspecto también se ha constatado. Para $N_F=0.6$ el intervalo ronda los 30 mm, para $N_F=5.9$ el intervalo es aproximadamente de 7 mm.

Para la mayor potencia aplicada al transductor la posición del máximo de presión excede el foco geométrico en 4

mm, y la separación entre la posición del máximo y mínimo axiales de 13.7 mm.

Ha quedado de manifiesto que el dispositivo experimental utilizado, con las estrategias de medida seguidas en este trabajo, permiten detectar el máximo de presión y el desplazamiento que sufre el mismo con la precisión adecuada.

En cuanto al procesado de la señal se ha implementado una serie de algoritmos de mejora enfocados a extraer la información limpia de los datos registrados de la manera más fiel posible. Dichos algoritmos han permitido obtener resultados con resoluciones adecuadas para poder observar los fenómenos anteriormente descritos.

Se ha establecido dos métodos precisos para obtener la posición de la focal geométrica, a partir de medidas experimentales en régimen lineal, el primero utilizando la ecuación que describe la presión en el eje del transductor [1]. En este método se deja como parámetros ajustables la misma posición focal geométrica y la presión en el transductor. Con este método se puede determinar la focal geométrica con un error de aproximadamente 0.5 mm. En el segundo se método utiliza el ajuste de los datos experimentales y la simulación numérica siguiendo la misma filosofía.

Agradecimientos

La autora principal de este trabajo quiere expresar su agradecimiento a la Sociedad Española de Acústica por la oportunidad concedida a través del premio “Andrés Lara” para continuar con su investigación.

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología dentro del proyecto FIS2008-06024-C03-03 y por el Programa de Apoyo a la Investigación y Desarrollo de la Universidad Politécnica de Valencia (PAID-05-09) (002-618).

Referencias

- [1] H.T. O’Neil. “Theory of focusing radiators”, J. Acoust. Soc. Am. 21, 516-526 (1949).
- [2] Kossoff G. “Analysis of focusing action of spherically curved transducers”. Ultrasound in Medicine and Biology. 5, 359-365 (1979)
- [3] B.G. Lucas and T.G. Muir, “The field of a focusing source”, J. Acoust. Soc. Am. 72, 1289- 1296 (1982).
- [4] N.S. Bakhvalov, Ya.M. Zhileikin, and E.A. Zabolotskaya, Nonlinear Theory of Sound Beams .American Institute of Physics, New York, (1987)
- [5] Yu. Makov, V.J. Sánchez-Morcillo, F. Camarena, V. Espinosa. “Nonlinear change of on-axis pressure and inten-

- sity maxima positions and its relation with the linear focal shift effect”, *Ultrasonics Elsevier* 48, 678-686 (2008).
- [6] N.S. Bakhvalov, Ya.M. Zhileikin, and E.A. Zabolotskaya, “Nonlinear propagation of sound beams with a uniform amplitude distribution” .American Institute of Physics, New York, (1987)
- [7] Francis A. Duck and Hazel C. Starrit. “ The locations of peak pressures and peak intensities in finite amplitude beams from a pulsed focused transducer”, *Ultrasound in Medicine and Biology*, Volume 12, Number 5 (1986)
- [8] Michalakias A. Averkiou, Mark Hamilton. “Nonlinear distortion of short pulses radiates by plane and focused circular pistons”, *J. Acoust. Soc. Am.* 102, 2539-2548 (1997).
- [9] Yu. Makov, V. Espinosa, V.J. Sánchez-Morcillo, J. Ramis, J. Cruañes and F. Camarena. “Strong on-axis focal shift and its nonlinear variation in low- Fresnel-number ultrasound beams”. *J. Acoust. Soc. Am.* 119, 3618-3624 (2006).
- [10] Yang-Sub Lee, B.S, M.S. “Numerical solution of the KZK equation for pulsed finite amplitude sound beams in thermoviscous fluids”. The University of Texas at Austin. (1993).
- [11] KZKTexas. <http://people.bu.edu/robinc/kzk/>
- [12] Michael S. Canney, Michael R. Bailey, and Lawrence A. Crum, Vera A. Khokhlova and Oleg A. Sapozhnikov. “Acoustic characterization of high intensity focused ultrasound fields: A combined measurement and modeling approach”. *J. Acoust. Soc. Am.* 124, 2406-2420 (2008).
- [13] D. Cathignol, O. A. Sapozhnikov, J. Zhang. “Lamb waves in piezoelectric focused radiator as a reason for discrepancy between O’Neil’s formula and experiment”. *J. Acoust. Soc. Am.* 101, No. 3 (1997).
- [14] C .M. Langton, *Principles and Applications of Ultrasound* (Institute of Physics Publishing, 2004)
- [15] F.A. Duck, A.C. Baker and H.C. Starritt, Eds., *Ultrasound in Medicine*, (Advanced Medical Publishing, 1998).
- [16] Yu. N. Makov, O. A. Sapozhnikov, “Averaged characteristics (moments) of the generalized Khokhlov-Zabolotskaya equation” , *Acoust. Phys.* 40, 889-891 (1994)
- [17] M. F. Hamilton, V.A. Khokhlova, O. V. Rudenko, “Analytical method for describing the paraxial region of finite amplitude sound beams”, *J. Acoust. Soc. Am.* 101, 1298 – 1308 (1997).
- [18] “Ultrasound in Medicine “ F.A. Duck, A.C. Baker, H.C. Starritt (Eds.).Advanced Medical Publishing, 1998.



Audiotec

Ingeniería y Control del Ruido

[Mapas de Ruido y Planes de Acción]

[Mediciones de Ruido 'in-situ']

[Aislamientos y Acondicionamientos Acústicos]

[Tratamientos Acústicos en Instalaciones Industriales]

[Limitadores de Sonido con Transmisión Telemática]

[Proyectos Acústicos y Certificación Acústica]

[Consultoría y Formación en Acústica]

Centro Tecnológico de Acústica



Parque Tecnológico de Boecillo

Juanelo Turriano, 4

47151 Boecillo

Valladolid

España

info@audiotec.es

902 37 37 99

Tlf. 983 361 326

Fax 983 361 327

Delegaciones: Madrid, Barcelona, Bilbao, Cantabria, Levante, La Rioja y Zaragoza.



www.audiotec.es



empresa
familiarmente
responsable

