

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR DE GANDIA

Grado en Ing. Sist. de Telecom., Sonido e Imagen



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR DE GANDIA

“Diseño, construcción y caracterización de un transductor ultrasónico focalizado”

TRABAJO FINAL DE GRADO

Autor/a:

María Rocío Peña Maestre

Tutor/a:

D. Francisco Camarena Femenía

D. Pablo C. Iglesias

GANDIA, 2014

Diseño, construcción y caracterización de un transductor ultrasónico focalizado

Autora:

María Rocío Peña Maestre

Directores:

Francisco Camarena Femenía

Pablo C. Iglesias

RESUMEN

En el presente proyecto, se pretende diseñar un transductor ultrasónico focalizado, cuya frecuencia de trabajo se encuentre en torno a 500 kHz. Una vez construido se realizará la caracterización electro-acústica del mismo para comprobar su correcto funcionamiento, con el fin de ser empleado en investigaciones futuras para la apertura de la barrera hematoencefálica en primates.

El análisis eléctrico del transductor muestra un máximo de admitancia a la frecuencia de 507kHz, por lo que éste satisface una de las especificaciones propuestas. Sin embargo, el análisis del campo acústico generado por el mismo muestra que existe un desplazamiento del máximo de presión en el eje axial respecto de la focal geométrica de aproximadamente 4 mm, debido posiblemente a dos efectos; por un lado a que la cerámica ha quedado rígidamente fija por su contorno a la carcasa exterior, y por otro a la difracción producida en el borde del transductor. Ambas posibilidades se estudian mediante técnicas de simulación.

Palabras clave: *ultrasonidos, transductor focalizado, barrera hematoencefálica*

ABSTRACT

In this work, is intended to design a focused transducer, whose working frequency is around 500 kHz. Once built, electro-acoustic characterization will be performed to verify its proper operation, in order to be used in future research for the BBB opening in primates.

The electric analysis of the transducer shows a maximum of admittance at the frequency of 507 kHz, so it satisfies one of the specifications proposed. However, the analysis of the acoustic field generated by it, shows a displacement of the maximum pressure on the axial axis in respect of the geometric focal of about 4 mm, possibly due to two effects; on one hand the ceramic has been rigidly fixed at its contour to the outer housing, and on the other hand due to the diffraction produced at the edge of the transducer. Both options are studied using simulation techniques.

Keywords: *ultrasounds, focused transducers, BBB opening*

ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	2
1 INTRODUCCIÓN	5
1.1 ESTADO DEL ARTE.....	5
1.2 OBJETIVOS.....	5
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
2.1 CAMPO ACÚSTICO GENERADO POR UN TRANSDUCTOR.....	7
2.2 EFECTOS DE FOCALIZACIÓN Y DIFRACCIÓN.....	7
2.2.1 <i>Campo acústico focalizado</i>	8
3 MATERIALES Y MÉTODOS	11
3.1 ELEMENTOS DE UN TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO.....	11
3.2 DISEÑO DEL TRANSDUCTOR.....	12
3.2.1 <i>Elección de la cerámica</i>	12
3.2.2 <i>Elección del backing y capa de adaptación</i>	13
3.2.3 <i>Materiales de encapsulado</i>	14
3.3 CONSTRUCCIÓN.....	14
3.3.1 <i>Análisis eléctrico</i>	19
3.4 EQUIPAMIENTO.....	21
3.4.1 <i>Elementos mecánicos</i>	21
3.4.2 <i>Generación y detección de ultrasonidos</i>	21
3.4.3 <i>Sistema de adquisición</i>	22
3.4.4 <i>Medidor de impedancias</i>	23
3.4.5 <i>Esquema de conexión</i>	24
3.5 PROTOCOLO DE MEDIDA.....	25
3.5.1 <i>Configuración del sistema</i>	25
3.5.2 <i>Alineación del sistema</i>	26
3.5.3 <i>Fase de adquisición</i>	28
3.6 POST-PROCESADO.....	30
3.6.1 <i>Filtrado punto a punto</i>	31
3.6.2 <i>Valor medio de cada punto del plano</i>	33
3.6.3 <i>Centro de radiación de cada plano</i>	35
3.6.4 <i>Velocidad de propagación del medio</i>	37
3.6.5 <i>Fase de optimización</i>	39

4 RESULTADOS	41
4.1 CAMPO ACÚSTICO FOCALIZADO.....	41
5 CONCLUSIONES.....	44
6 LÍNEAS FUTURAS.....	47
7 BIBLIOGRAFÍA.....	48
ANEXO. CÓDIGO DE POSTPROCESADO.....	50

1 INTRODUCCIÓN

1.1 ESTADO DEL ARTE

El *sistema nervioso central (SNC)* requiere de un aporte continuo de sustratos energéticos, fundamentalmente oxígeno y glucosa, para su correcto funcionamiento. Éstos son suministrados a través de la red de capilares sanguíneos probablemente más compleja de todo el organismo. Sin embargo, el medio interno del *SNC* se encuentra aislado respecto a la circulación sanguínea por una estructura también única en el organismo, denominada *barrera hematoencefálica (BHE)* [1].

La BHE constituye una estructura formada por células epiteliales en los capilares que irrigan al sistema nervioso central. Esta barrera permite de forma selectiva la entrada de ciertas sustancias, bloqueando al mismo tiempo la entrada de aquellas que pueden resultar tóxicas o nocivas para el tejido cerebral, por lo que se le atribuye una función protectora del sistema nervioso central.

La propiedad de BHE se basa en la existencia de una permeabilidad muy restringida del endotelio vascular del SNC al paso de solutos plasmáticos, de modo que, excepto el agua, gases como el oxígeno y el CO₂ y determinadas moléculas liposolubles muy pequeñas (menores de 400-600 Da de peso molecular), las moléculas orgánicas no pueden atravesar libremente dicho endotelio, sino que deben hacerlo a través de sistemas de transporte específicos y regulados [1].

La presencia de esta barrera supone un gran inconveniente a la hora de administrar los fármacos necesarios para el tratamiento de ciertas enfermedades de origen neurológico, como el Alzheimer o el Parkinson.

En los últimos años se viene desarrollando una técnica innovadora, segura y no invasiva [2,3], basada en la aplicación de haces ultrasónicos focalizados de media intensidad, para la apertura de la barrera hematoencefálica de manera localizada y así permitir la administración de fármacos. Algunos de los estudios han sido realizados en primates, y estos se centran en la búsqueda de la frecuencia a emplear, para que se produzcan las menores variaciones de la posición del foco geométrico del transductor, por efecto de la propagación del haz a través del cráneo.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo del presente proyecto es diseñar, construir y realizar una caracterización electro-acústica de un transductor focalizado de ultrasonidos. El transductor se construirá para, posteriormente, ser utilizado en investigaciones para la apertura de la barrera hematoencefálica en primates.

Teniendo en cuenta las relaciones entre las longitudes de onda y la velocidad de propagación en el cráneo del primate no humano *Macaca Mulatta*, tenemos como resultado una frecuencia óptima, para obtener los menores desplazamientos de foco en la zona de interés, de 500 kHz.

Por tanto, el proyecto se divide en varias fases.

- La primera de ellas consistirá en el diseño del transductor, eligiendo tanto la cerámica como los materiales a emplear, para que éste trabaje a la frecuencia deseada, y procurando que quede completamente aislado de posibles interferencias electromagnéticas.
- Posteriormente se procederá a su construcción, ensamblando las piezas de manera que quede totalmente aislado del agua.
- Después se caracterizará el dispositivo realizando un análisis eléctrico, y unas medidas experimentales del campo acústico generado por el mismo.
- Para tratar los datos obtenidos mediante las medidas experimentales será necesario el desarrollo de ciertos algoritmos en MATLAB.
- Por último, se analizarán los resultados obtenidos, comprobando así el correcto funcionamiento del transductor para su uso clínico.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este apartado se definirán algunos conceptos teóricos, tales como el campo acústico generado por un transductor focalizado y el número de Fresnel. Dichos conocimientos nos ayudarán posteriormente a evaluar los resultados obtenidos mediante medidas experimentales.

2.1 CAMPO ACÚSTICO GENERADO POR UN TRANSDUCTOR

El campo acústico generado por un transductor se divide en dos zonas:

- **Campo cercano (Zona de Fresnel):** es la región próxima al transductor, donde la presión acústica pasa a través de una serie de máximos y mínimos, y termina en el último máximo en el eje a una distancia N desde la superficie del transductor. Esta distancia, conocida como distancia de Fresnel, representa el foco natural del transductor.

Para un transductor circular:

$$N = \frac{a^2}{\lambda} - \frac{\lambda}{4} \quad (2.1)$$

Donde a es el radio del disco. La mayoría de textos consideran $N = a^2/\lambda$, despreciando el término $\lambda/4$. Para la mayoría de los casos, en los que el radio del transductor es grande en comparación con la longitud de onda, esta aproximación resulta satisfactoria [4].

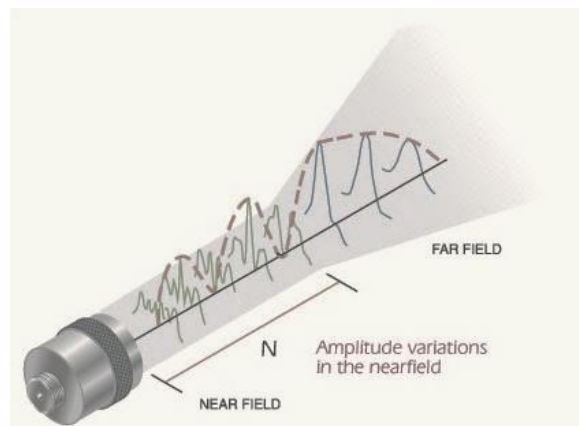


Figura 2.1 Campo acústico de un transductor [19].

- **Campo lejano o Zona de Fraunhofer:** es la región pasado N , donde la presión del sonido decrece gradualmente hasta cero mientras que el diámetro del haz se expande y su energía se disipa en el medio.

2.2 EFECTOS DE FOCALIZACIÓN Y DIFRACCIÓN

Los transductores focalizados concentran la energía de sonido en un lugar cuyo diámetro es menor que el de un haz no focalizado producido por un elemento transductor de la misma frecuencia y diámetro, y su importancia radica en el incremento de amplitud que se pueden lograr dentro de la zona focal, así como una mayor definición del haz [4].

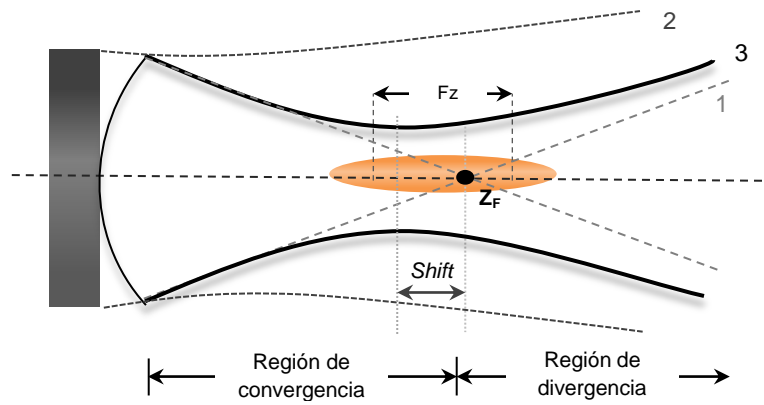


Figura 2.2 Efectos de focalización y difracción.

Desde el punto de vista de la teoría de rayos de óptica geométrica, para un radiador esférico focalizado, se puede considerar que la energía acústica se concentra en el centro de curvatura del transductor (Z_F).

En la *figura 2.2* se ilustra el efecto de cada uno de los efectos de focalización y difracción, donde (1) representa la convergencia geométrica de los rayos, cuya trayectoria determina la focal geométrica del transductor, y está relacionada con el radio de curvatura del mismo. (2) representa la divergencia que sufren los rayos debido a la difracción producida en los bordes del transductor, en el caso de un transductor plano (no focalizado), y por último la línea continua (3) muestra el resultado cuando se producen ambos efectos de focalización y difracción, donde se aprecia claramente el desplazamiento (*shift*) que sufre la zona focal respecto del foco geométrico [5,6].

La zona focal de un transductor focalizado se define como la distancia entre el punto en el eje en el cual la amplitud de la señal disminuye un 50% (-6dB) del máximo de amplitud en el punto focal [4]. La zona focal viene dada por:

$$FZ = N(S_F^2) \left[\frac{2}{1 + 0.5S_F} \right] \quad (2.2)$$

Donde S_F es la distancia focal normalizada, también conocida como factor de focalización.

$$S_F = Z_F/N = Z_F(\lambda/a^2) \quad (2.3)$$

La longitud focal de un transductor se ha definido como la distancia de la superficie radiante hasta la posición del máximo en el eje. Todos los transductores, ya sea focalizados o no, producen ese máximo. En el caso de transductores no focalizados, la posición del máximo coincide con el valor N . La *figura 2.3* muestra la relación entre el radio de un elemento transductor esférico y el punto focal Z_F [4].

2.2.1 Campo acústico focalizado

Existen diversas aplicaciones que utilizan transductores ultrasónicos focalizados, algunos de los ejemplos más conocidos son la medicina y las técnicas no destructivas. Uno de los métodos más eficaces de focalización consiste en emplear un transductor cuya cerámica adopte una forma esférica y cóncava, aunque se pueden aplicar otros métodos para conseguir este efecto, como la utilización de una cerámica plana unida a una lente cóncava.

En la actualidad, no existe ninguna teoría que describa con exactitud el campo acústico generado por este tipo de transductores, sin embargo, existen varias aproximaciones, de las que utilizaremos la fórmula de O'Neil.

La teoría planteada por O'Neil considera que un radiador focalizado de forma esférica dispone de una simetría axial, con una distribución uniforme de la velocidad normal en su superficie [7]; y a partir de su fórmula podemos determinar la presión acústica a lo largo del eje del transductor [8]:

$$|p(\tilde{z})| = 2p_o \left| \frac{1}{1-\tilde{z}} \sin\left(\frac{\pi N_F}{2} \cdot \frac{1-\tilde{z}}{\tilde{z}}\right) \right| \quad (2.4)$$

Dónde p_o es la presión constante a lo largo del transductor; N_F es el número de Fresnel, que depende de la longitud de onda λ y está relacionado con dos de las características básicas de un transductor focalizado: la apertura a y el radio de curvatura R ; y \tilde{z} se corresponde con las distancias normalizadas respecto de la focal geométrica.

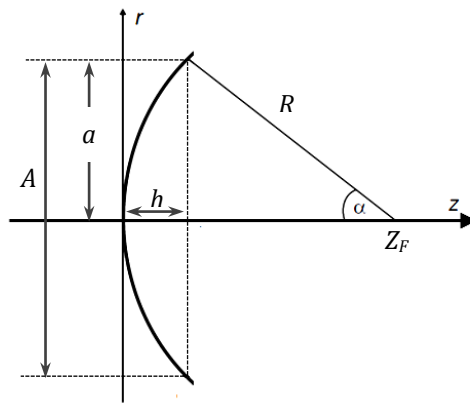


Figura 2.3 Notación de los parámetros de un transductor focalizado [9].

El concepto de número de Fresnel es una característica ampliamente usada en sistemas ópticos [11]. Éste se corresponde con el número de longitudes de onda contenidas en la profundidad h del transductor focalizado (distancia axial desde el transductor hasta la apertura plana). En la aproximación de Fresnel con $a \ll R$, la profundidad del transductor viene dada por:

$$h = R - \sqrt{R^2 - a^2} \approx \frac{a^2}{2R} \quad (2.5)$$

Y por tanto, se puede expresar el número de Fresnel como:

$$N_F = \frac{h}{\lambda/2} = \frac{a^2}{\lambda R} \quad (2.6)$$

A continuación se muestra el campo acústico generado por un transductor focalizado según la fórmula de O'Neil, para distintos valores de apertura, y por tanto, de número de Fresnel, manteniendo el radio de curvatura en un valor fijo ($R=50$ mm), y considerando una frecuencia de trabajo de 500 kHz propagándose en agua ($c=1500$ m/s):

:

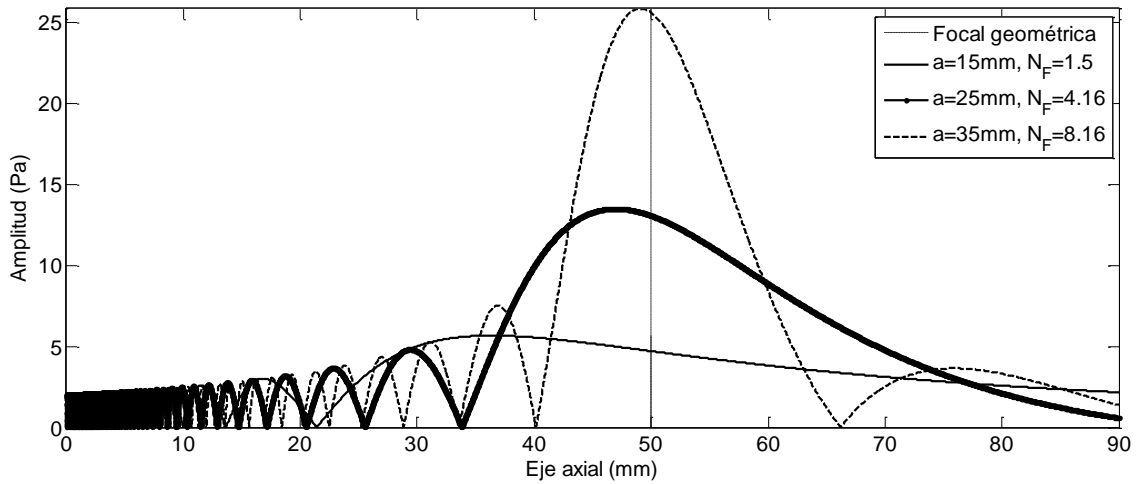


Figura 2.4 Distribución de presión en el eje axial, para $p_0=1$.

Como se puede observar en la figura anterior, y como se demuestra en [11], para transductores focalizados de alto Número de Fresnel $N_F > 6$, es decir, de alta focalización, el máximo de presión se encuentra muy próximo al foco geométrico, mientras que para transductores focalizados de bajo Número de Fresnel $N_F < 3$ la diferencia entre ambos puntos axiales puede ser grande y la posición del máximo de presión se desplaza considerablemente hacia el transductor [12].

Además, se puede apreciar una tendencia a incrementar la direccionalidad a medida que aumenta la apertura de la fuente en términos de longitud de onda (λ) [13].

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 ELEMENTOS DE UN TRANSDUCTOR ULTRASÓNICO

Los principales componentes de un transductor ultrasónico de cerámica simple son: el elemento activo, el backing y una capa de material de acoplamiento acústico (matching layer). A continuación se describen las funciones de cada componente:

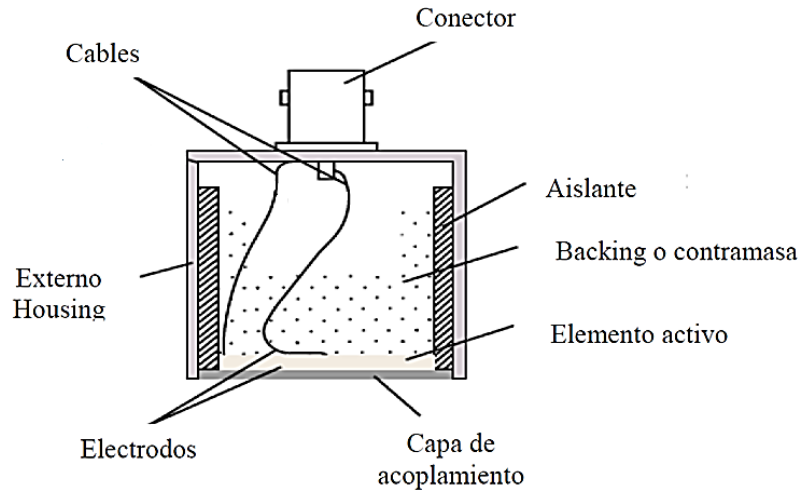


Figura 3.1 Esquema de un transductor ultrasónico.

El **elemento activo**, es un material piezo o ferro-eléctrico, que convierte la energía eléctrica de un pulso de excitación en energía mecánica. Los materiales usados comúnmente son cerámicas polarizadas que pueden ser cortadas de numerosas maneras para producir diferentes formas de onda.

Entre los diferentes tipos de elementos piezoeléctricos, las cerámicas piezoeléctricas (PZT: titanato zirconato de plomo) son las usadas más comúnmente debido a su alta eficiencia de conversión.

Al ser excitada, la cerámica piezoeléctrica vibra emitiendo energía mecánica en ambos sentidos. En la práctica, se suele utilizar únicamente la emisión en una sola de las caras. Con este fin se coloca el **backing** en la cara posterior, que tiene como objetivo fundamental absorber la energía mecánica en esa dirección y detener la oscilación producida por el elemento piezo-eléctrico, originando un transductor con mayor resolución [14].

Teniendo en cuenta que el coeficiente de transmisión, a incidencia normal, es [15]:

$$T = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (3.1)$$

Donde Z_1 y Z_2 se corresponden con la impedancia acústica de cada medio, cerámica y backing respectivamente.

Según la expresión anterior, a medida que la impedancia acústica del material utilizado como *backing* se asemeje más a la del material piezoeléctrico, mayor cantidad de energía será transmitida hacia el primero, el resultado será un transductor fuertemente amortiguado, de manera que se reducirá la amplitud de la señal

ultrasónica producida, pero aumentará el ancho de banda. Si por el contrario la diferencia entre las impedancias acústicas de estos elementos es muy grande, mayor cantidad de energía será reflejada hacia adelante, por lo que la amortiguación en este caso es baja, dando como resultado una mayor amplitud de la señal, y un ancho de banda reducido [16].

La *capa de adaptación (matching layer)* tiene dos funciones: proteger el elemento activo y asegurar una mayor transferencia de energía. Esto último se logra utilizando un material con una impedancia acústica intermedia entre el elemento activo y el material o medio sobre el cual se espera utilizar el transductor.

3.2 DISEÑO DEL TRANSDUCTOR

Lo primero que se debe tener en cuenta a la hora de diseñar un transductor es la aplicación para la que estará destinado, y en consecuencia, se deben elegir los materiales y medidas de cada componente.

En la gran mayoría de aplicaciones relacionadas con el uso médico o biológico, los dispositivos están diseñados para operar en modo espesor. Aunque no se debe olvidar la posible existencia de otros modos de vibración, a veces no deseados [13].

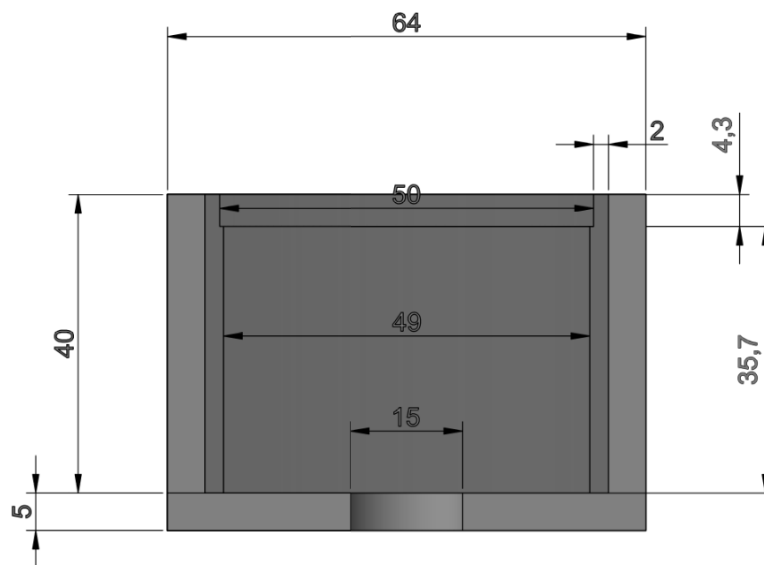


Figura 3.2 Diseño del transductor focalizado (dimensiones en mm).

3.2.1 Elección de la cerámica

Las frecuencias de resonancias dependen de las dimensiones de la cerámica piezoeléctrica. Todo indica que estas varían inversamente con dichas dimensiones. Para una cerámica vibrando en espesor, el parámetro decisivo en la determinación de la frecuencia de resonancia es el espesor h de la pieza. La relación entre la frecuencia de resonancia y el espesor del material piezoeléctrico plano viene dado por la siguiente expresión:

$$f_r = \frac{N_3^D}{h} \quad (3.2)$$

Donde N_3^D : es conocida como la constante de frecuencia de espesor, medido en Hz·m.

Al tratarse de transductor focalizado, es el fabricante (*ferroperm*) el que proporciona la cerámica adecuada para vibrar a una frecuencia de 500 kHz, dando forma cóncava a una cerámica Pz26. Sus características geométricas son las que se muestran a continuación:

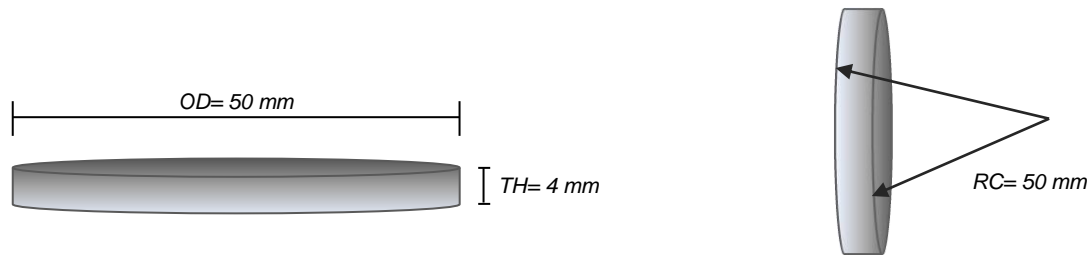


Figura 3.3. Dimensiones de la cerámica Pz26.

	Pz26 (<i>focusing Bowl</i>)
TH: Espesor (mm)	4
OD: Diámetro (mm)	50
RC: Radio de curvatura (mm)	50

Tabla 3.1. Propiedades geométricas Pz26.

3.2.2 Elección del backing y capa de adaptación

Como se ha comentado anteriormente, una propiedad importante del backing debe ser que absorba en gran medida la energía generada o transmitida hacia la parte trasera del transductor, antes de que la onda se refleje de nuevo hacia la cerámica. Por esta razón, la forma y composición del backing requieren un diseño cuidadoso [13].

Al tratarse de un transductor de potencia, nos interesa radiar toda la energía hacia el medio, por tanto se elige un backing de aire (cuya impedancia acústica es del orden de $Z=400\text{Rayls}$, muy baja en comparación con la de la cerámica que suele estar en torno a 35MRayls). Por lo que tenemos un factor de transmisión hacia el backing inferior al 0.01 %.

Además, teniendo en cuenta la atenuación que sufren las ondas de sonido en el aire, y que ésta aumenta con la frecuencia, no será necesaria una gran longitud para conseguir el efecto deseado. Para una frecuencia de trabajo de 500 kHz, la longitud de onda es de $680\ \mu\text{m}$, teniendo en cuenta que la velocidad de propagación en el aire es de 340 m/s. En una longitud de backing de 35.7 mm se puede albergar aproximadamente 52.5λ , suficiente para que se produzca una gran atenuación.

Para la mayoría de aplicaciones médicas por ultrasonidos, el transductor produce ondas que se propagan en un medio con propiedades similares al agua [16]. Sin una correcta adaptación, una gran diferencia de impedancia acústica entre el elemento piezoeléctrico y el tejido en cuestión, hará que la mayor parte de la energía de ultrasonidos sea reflejada.

En este caso el transductor se encontrará sumergido en agua ($Z=1.5\text{MRayls}$), y por tanto, se prescindirá de la capa de adaptación, ya que será el propio medio el encargado de dicha función de acoplamiento.

3.2.3 Materiales de encapsulado

Para la elección de los materiales que van a formar parte del encapsulado del transductor, se debe tener en cuenta que éste deberá estar sumergido en agua durante un largo periodo de tiempo, y por tanto, debe estar completamente aislado para evitar que se produzcan filtraciones al interior del transductor, donde se encuentran las conexiones eléctricas.

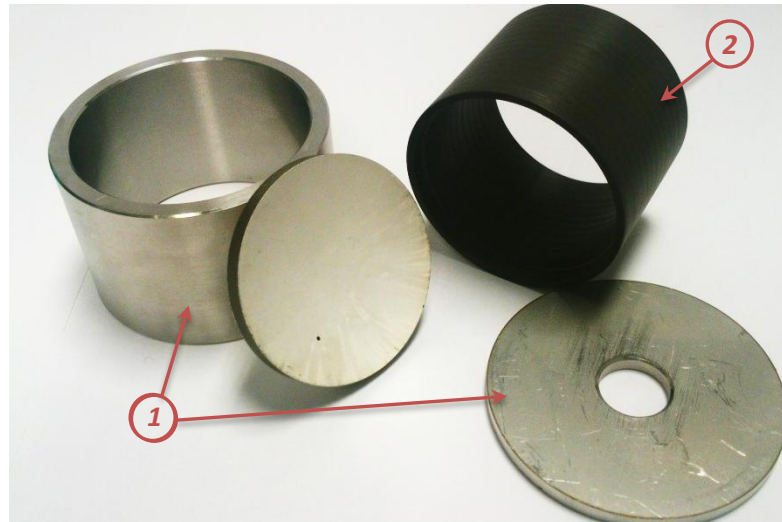


Figura 3.4 Materiales de encapsulado.

- 1) La carcasa exterior será de acero inoxidable 316. Esta aleación es especialmente resistente a la corrosión.
- 2) El aislante interno será de cloruro de polivinilo, más conocido como PVC, que es un material derivado del plástico.

3.3 CONSTRUCCIÓN

Una vez que se ha realizado el diseño del transductor, conociendo los materiales y medidas que vamos a usar para cada pieza, y una vez de disponemos de ellas, se procede a su construcción. En este apartado se describe cada uno de los pasos de dicho proceso.

- En primer lugar se hace una muesca en el tubo de PVC, para permitir el contacto de uno de los cables con la carcasa exterior de acero inoxidable. Después se introduce dicho tubo en el interior de la pieza de acero, para que haga la función de aislante eléctrico.



Figura 3.5 Unión de la cerámica a la carcasa exterior.

- La cerámica quedará apoyada sobre la hendidura del tubo de PVC (figura 3.5). Para sellar las juntas existentes entre el tubo, la cerámica y la carcasa exterior, se utiliza una fina capa de un material adhesivo con una cierta elasticidad, de manera que la cerámica no quede rígidamente sujeta al tubo, evitando desvanecer los modos de vibración de la misma, y aislando el interior del transductor de posibles filtraciones de agua. Para ello se utiliza sikaflex, un adhesivo y sellador a base de poliuretano de elasticidad permanente que se caracteriza por su resistencia al agua, al envejecimiento e intemperie, y que tiene una buena adherencia a la gran mayoría de los materiales de construcción.
- Por la parte superior de la cerámica unir el polo positivo de la cerámica a la carcasa metálica del transductor utilizando una fina capa de epoxy conductor.



Figura 3.6 Compuesto epóxico con plata CW2400.



Figura 3.7 Unión de la carcasa exterior con la cerámica.

- Para comprobar que el transductor ha quedado adecuadamente aislado, y que no van a producirse filtraciones de agua, introducimos el transductor en un recipiente con agua durante 2 horas, colocando una tira de papel en su interior, lo que nos ayudará a comprobar que no existe filtración.

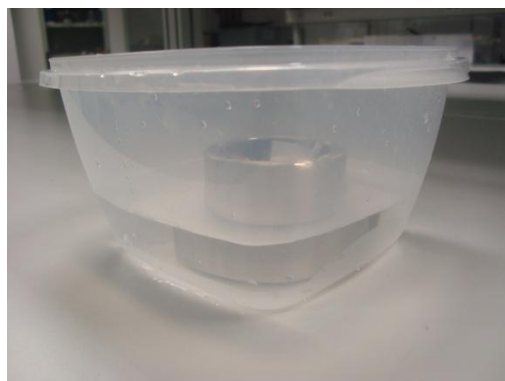
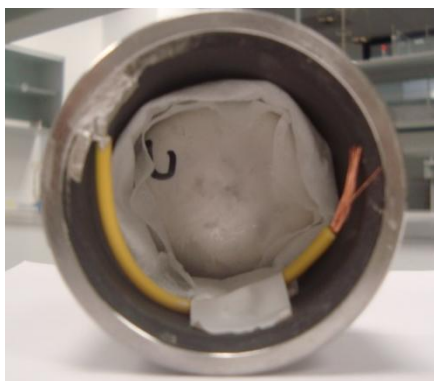


Figura 3.8 Prueba de aislamiento frente a filtraciones de agua.

- Una vez fijada la cerámica a la estructura con epoxy, se conecta un cable a dicha estructura, lo que constituirá el polo positivo.

- En la parte interior se adhiere una placa metálica al tubo de PVC usando epoxy conductor, y un pequeño hilo de cobre para que haya conducción entre esta placa y el polo negativo de la cerámica.



Figura 3.9 Adhesión de placa metálica.

- Antes de cerrar el transductor comprobamos su correcto funcionamiento, para lo que se sumerge en un tanque con agua destilada. En un osciloscopio visualizamos la señal generada en un canal (CH1), alimentado el transductor con una señal sinoidal que iremos variando de frecuencia en torno a los 500 kHz, coincidiendo con los picos de admitancia vistos al analizar la respuesta eléctrica de la cerámica. Y en el otro canal del osciloscopio (CH2) se visualiza la señal recibida por un hidrófono.



Figura 3.10 Tanque con agua destilada.

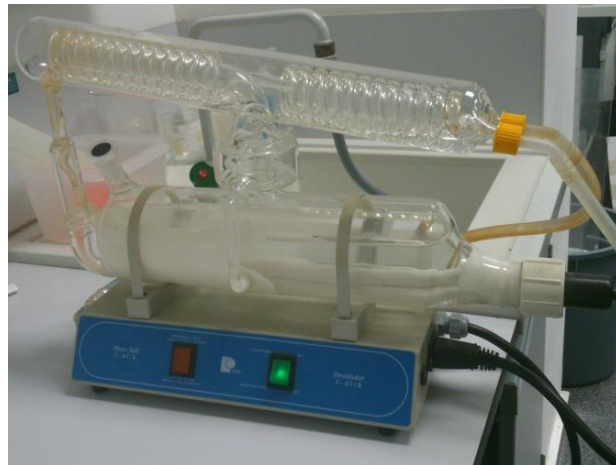


Figura 3.11 Destilador de laboratorio.

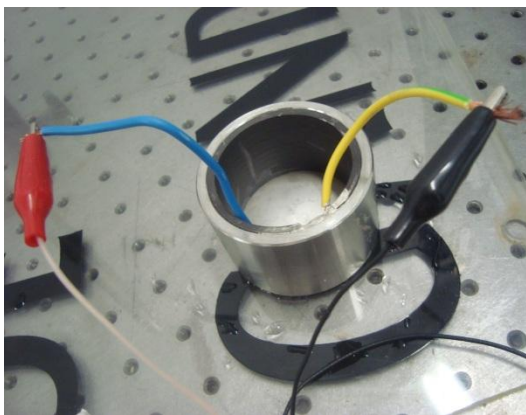


Figura 3.12 Conexión del transductor a un generador de señal.

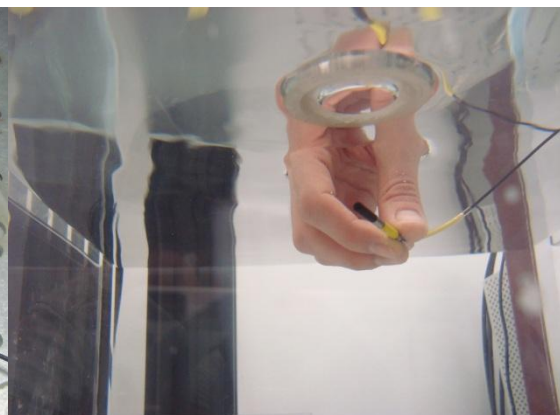


Figura 3.13 Prueba de funcionamiento del transductor.

De esta manera se comprueba que el transductor emite la señal, y que la amplitud emitida es máxima en torno a la frecuencia de trabajo de 500 kHz.

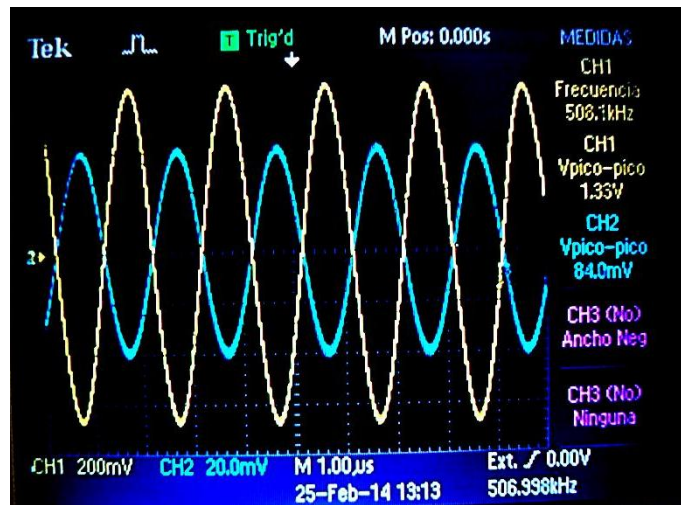


Figura 3.14 Prueba de funcionamiento del transductor en torno a 500 kHz.

- Una vez comprobado su correcto funcionamiento, se procede a realizar la conexión de los cables. En este caso se ha decidido disponer de dos cables coaxiales, utilizando un conector BNC en el extremo final de cada uno. Esto proporciona cierta ventaja en el caso de que uno de los dos falle, sin embargo, puede producir ciertas interferencias electromagnéticas, por lo que hay que tener especial cuidado con el conector que queda desconectado.



Figura 3.15 Conector BNC en el extremo del cable coaxial.

- Por tanto, se pasarán los cables por el orificio de la pieza que cerrará el transductor por su parte posterior, y el hueco resultante se sellará utilizando nuevamente Sikaflex, de manera que permita cierta flexibilidad al movimiento de

los cables, pero que evite que el agua pueda penetrar al interior, protegiendo así las conexiones internas.

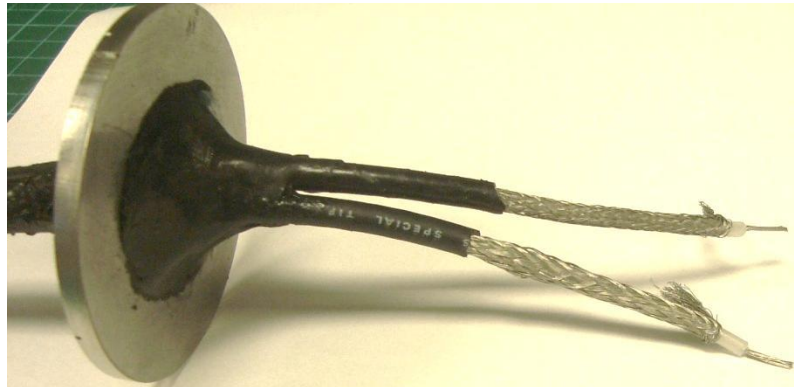


Figura 3.16 Sellado del orificio posterior con Sikaflex.

- Por último se soldará el polo positivo al hilo de cobre de cada cable coaxial, y el polo negativo a la malla o apantallamiento del cable.

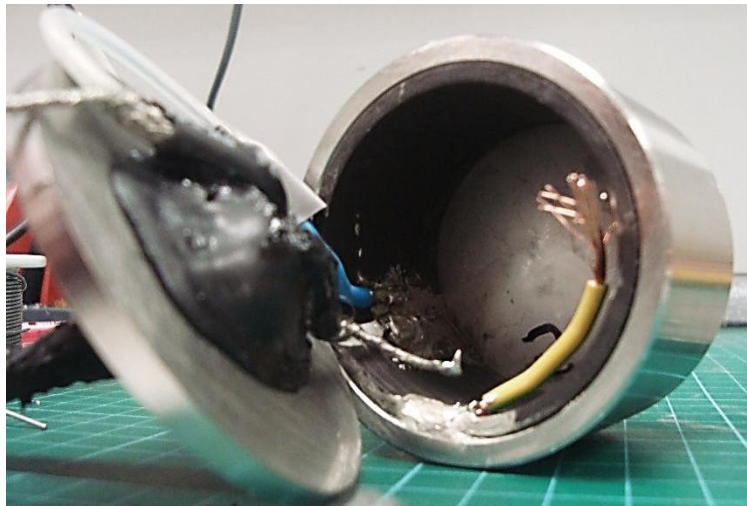


Figura 3.17 Conexiones internas de los polos positivo y negativo al cable coaxial.

- Por último, se une la pieza posterior con los cables ya introducidos por su orificio y soldados los extremos al polo positivo y negativo de la cerámica correspondiente, con la carcasa exterior. De nuevo se usa como material adhesivo una capa de Sikaflex.

Tanto en este paso, como en pasos anteriores en los que se emplearon materiales adhesivos y selladores, incluyendo el epoxy conductor, se respetaron los tiempos de secado recomendados por el fabricante.

3.3.1 Análisis eléctrico

Durante el proceso de construcción se realiza un seguimiento del comportamiento eléctrico del transductor en 2 fases:

- **Fase 1:** En el momento previo a la construcción, se realiza un análisis del comportamiento de la cerámica simple.
- **Fase 2:** Una vez adherida la cerámica a la carcasa exterior, y después de sellar el transductor por su parte posterior.

La finalidad de este seguimiento es comprobar que durante el proceso de construcción no se ha variado el comportamiento de la cerámica y que sigue vibrando a la frecuencia de trabajo deseada de 500 kHz.

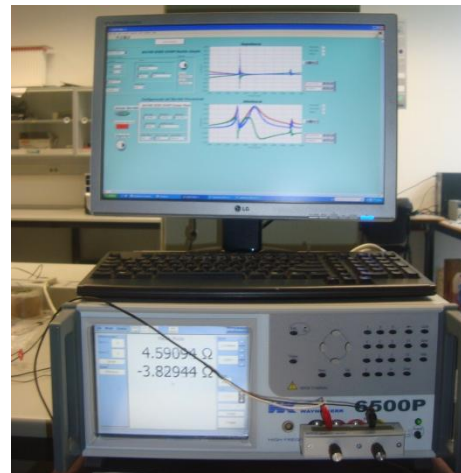
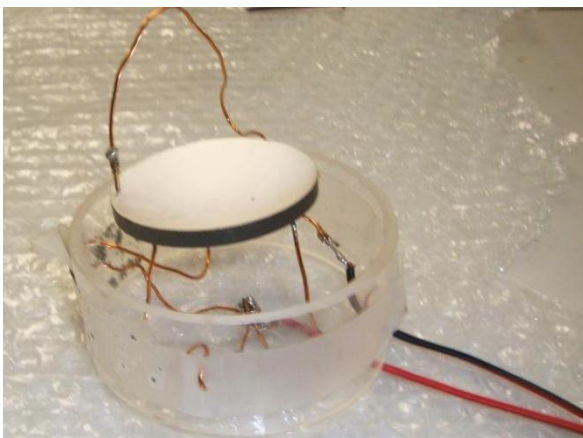


Figura 3.18 Medida de la impedancia y admitancia para la cerámica simple Pz26 focalizada.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las medidas de impedancia y admitancia en ambas fases del proceso:

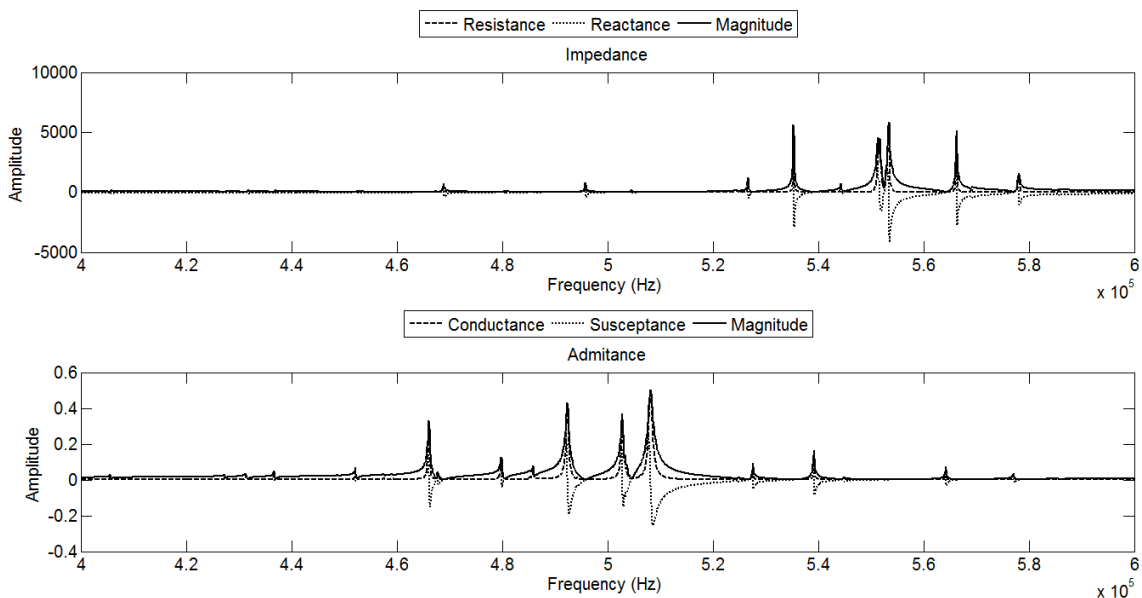


Figura 3.19 Cerámica simple Pz26: Impedancia y admitancia en aire.

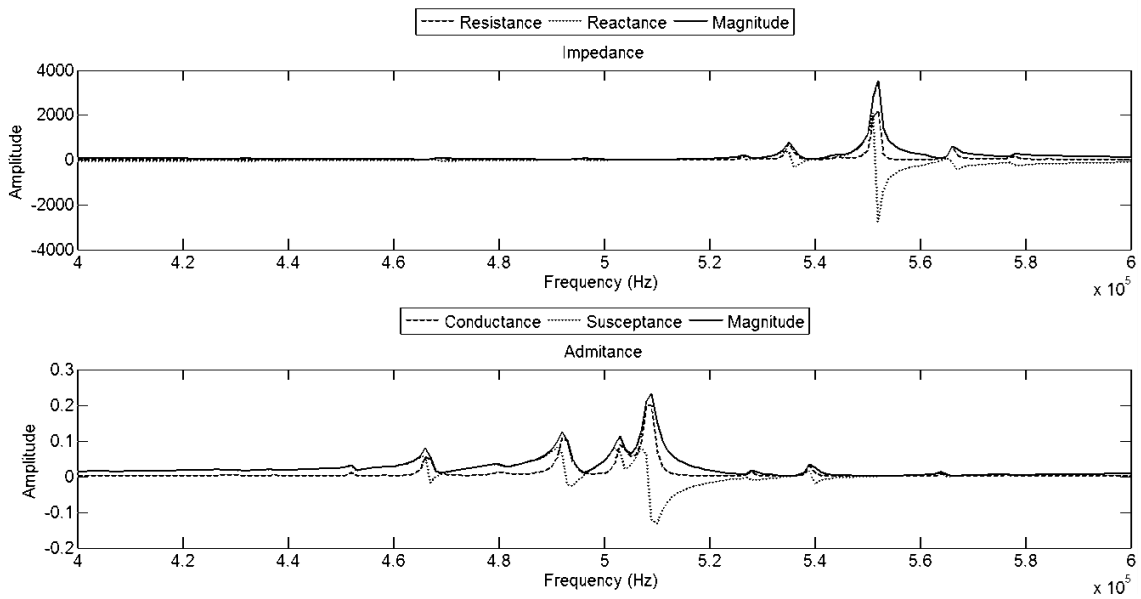


Figura 3.20 FUS cerrado: Impedancia y admitancia en aire.

De la comparación de las *figuras 3.19* y *3.20* podemos verificar que, aunque han desaparecido algunos modos de vibración al depositar la cerámica sobre el chasis del transductor, sigue vibrando a la frecuencia de trabajo deseada.

Estas pruebas se han realizado en aire, pero debemos tener en cuenta que el transductor será usado inmerso en agua, por lo que es importante también conocer su comportamiento en esa situación. Como se puede ver en la siguiente gráfica, aunque no tan definido, sigue existiendo un máximo de admitancia, a la frecuencia deseada.

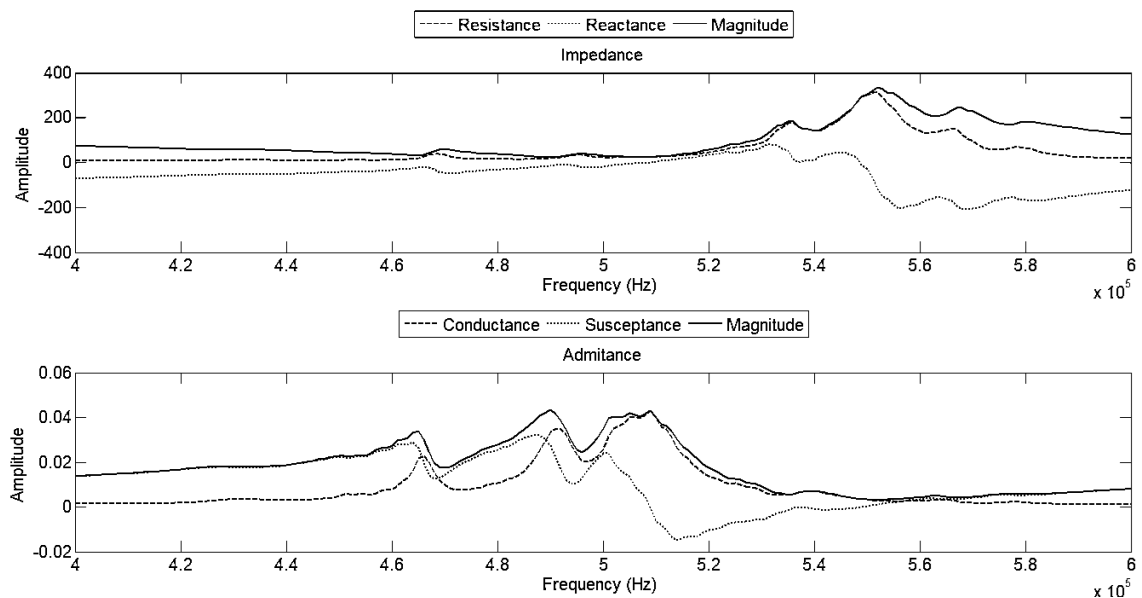


Figura 3.21 FUS cerrado: Impedancia y admitancia en agua.

3.4 EQUIPAMIENTO

Para la realización de las medidas experimentales se han utilizado los equipos que se describen a continuación.

3.4.1 Elementos mecánicos

Sistema de tres ejes y motor paso a paso

Este sistema permite realizar desplazamientos en los ejes cartesianos (x,y,z) para un posicionamiento preciso describiendo planos alrededor del transductor de manera automatizada, en los pasos que indiquemos mediante el software empleado.



Figura 3.22 . Brazo robótico de tres ejes. Fabricante Owis.



Figura 3.23 Motor paso a paso National Instruments MID- 7604. Permite hasta 4 ejes.

3.4.2 Generación y detección de ultrasonidos

Sonda de aguja Müller-Platte

Hidrófono piezoeléctrico basado en pvdf (o polivinilideno fluoruro), material de alta resistencia y rigidez, diseñado para medidas ultrasónicas de alta energía en fluidos. Posee una cabeza semiesférica de pequeño diámetro (menos de 0.5 mm) y tiempo de subida aproximado de 50 ns, apropiado para medidas de la distribución en las regiones focales de transductores ultrasónicos como el diseñado [20].



Figura 3.24 Sonda de aguja Müller-Platte.

Principales características:

- Ancho de Banda: 0.3 – 11 MHz \pm 3.0 dB.
- Elemento activo: PvdF piezoeléctrico.
- Diámetro activo: <0.5mm.
- Diámetro del tubo: 1.2 mm en la punta, 4.0 mm para el cuerpo, de acero inoxidable.
- Rango de temperatura: Max. 60°C.
- Conector: BNC

Amplificador de potencia 2100L

El 2100L es un amplificador de estado sólido de banda ancha que cubre el espectro de frecuencias de 10 KHz a 12 MHz. Está clasificado en 100 vatios de potencia de RF de baja distorsión armónica y de intermodulación. Diseño de clase A altamente lineal, útil para aplicaciones de ultrasonidos, modulación láser, RFI / EMI, equipos de plasma y en general, para aplicaciones de laboratorio.



Figura 3.25 Amplificador de potencia 2100L.

3.4.3 Sistema de adquisición

National Instruments NI PXI-1000B

El chasis NI PXI-1000B combina un plano trasero PXI de 8 ranuras de alto rendimiento con un alto suministro de potencia de salida, ofreciendo características avanzadas de temporización y sincronización.

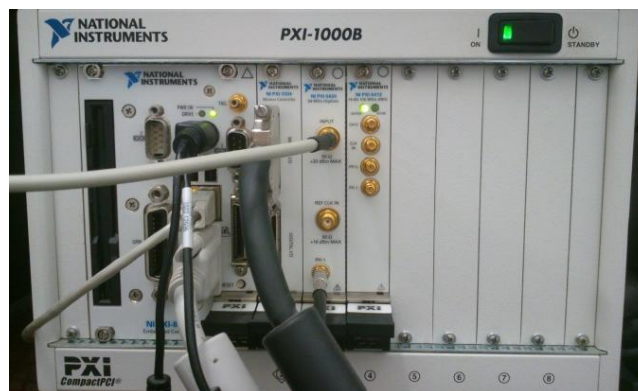


Figura 3.26 Vista frontal del módulo de adquisición PXI de National Instruments.

Módulo de entrada NI PXI-5620

El módulo *PXI-5620* es un módulo digitalizador de un solo canal. Su rango dinámico y resolución lo hacen ideal para todos los tipos de análisis en el dominio de frecuencia. Muy adecuados para aplicaciones de ultrasonido.

Algunas especificaciones técnicas:

- Canales de entrada: 1
- Resolución: 14 bits
- Rango de frecuencia de muestreo: 1 kS/s to 64 MS/s
- Nivel de entrada: +10 dBm (± 1 Vp)
- Impedancia nominal: 50 Ω
- Ancho de banda analógico (-3 dB): de 10 kHz a 36 MHz
- Respuesta en frecuencia: 4-25 MHz
- Trigger externo: conexión PFI1.

Modulo generador de funciones PCI-5412

La *PCI-5412* de *National Instruments* es un generador de forma de onda arbitraria de 100 MS/s que presenta resolución de 14 bits y hasta 256 MB de memoria interna en una sola tarjeta PCI.

Software de adquisición LabVIEW

LabVIEW es un entorno de programación flexible que permite construir cualquier aplicación de medida o control [21].

Junto con el módulo digitalizador PXI de *National Instruments*, permite la automatización de los ejes para la adquisición de los datos de interés, y la representación de la amplitud en función del tiempo.

Los datos almacenados de cada medida se corresponderán con la posición de los ejes, y la amplitud de las señales recibidas por el hidrófono en función del tiempo.

3.4.4 Medidor de impedancias

Medidor de impedancia de alta frecuencia y gran precisión. Permite medir diferentes parámetros tales como capacitancia, inductancia, impedancia y admitancia, entre otros, con una precisión de $\pm 0.05\%$.



Figura 3.27 Medidor de impedancias Wayne Kerr Electronics 6500P.

3.4.5 Esquema de conexión

A continuación se presenta el esquema de conexiones de los equipos descritos anteriormente, para la adquisición de los datos experimentales.

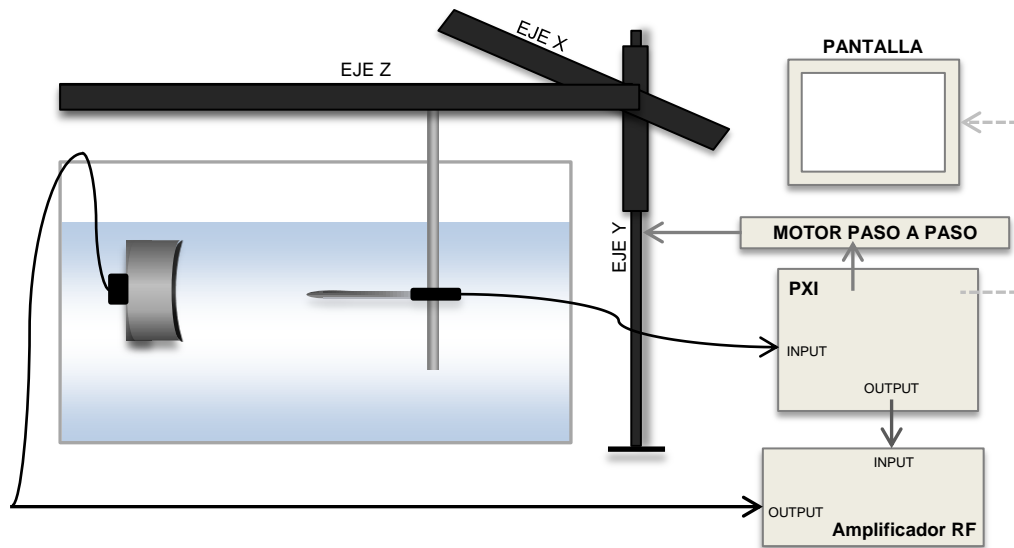


Figura 3.28 Esquema de conexionado.

Como se trabaja con señales de alta potencia, se utiliza un amplificador RF para alimentar el transductor bajo estudio, generando la señal de excitación mediante el módulo *PCI-5412* de *National Instruments*.

Para caracterizar dicho transductor, utilizaremos como receptor un hidrófono (sonda de aguja) que irá conectado al módulo digitalizador *PXI-5620*, también de *NI*. La ubicación del hidrófono estará controlada por un sistema de posicionamiento automatizado, que permite su desplazamiento a lo largo de los ejes cartesianos (x,y,z).

Tanto el transductor bajo estudio como el hidrófono usado como receptor estarán inmersos en un tanque que contiene agua destilada.



Figura 3.29 Soporte para el transductor.

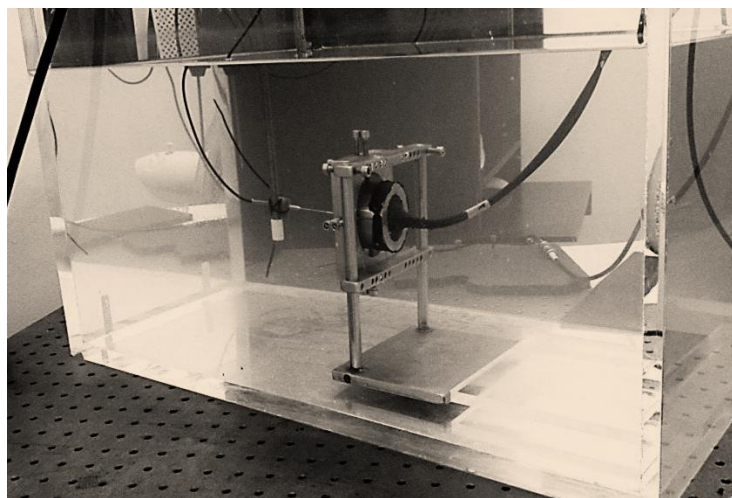


Figura 3.30 Dispositivo experimental.

3.5 PROTOCOLO DE MEDIDA

3.5.1 Configuración del sistema

Una vez establecidas las conexiones del equipo que se muestra en el diagrama de la *figura 3.28*, se procede a la configuración para la adquisición de los datos experimentales desde el software LabVIEW.

El primer paso es poner en marcha la aplicación (*Run*) e inicializar los ejes. Después se procede a la configuración del generador de funciones.

El transductor que hemos diseñado y que vamos a caracterizar, será excitado con un tren de pulsos (señal senoidal mediante una ráfaga de 50 ciclos y 800 μ s de duración), a una frecuencia de 507kHz (frecuencia a la que observamos un pico de admitancia a la hora de realizar el análisis eléctrico) y una amplitud de 300mV de pico.

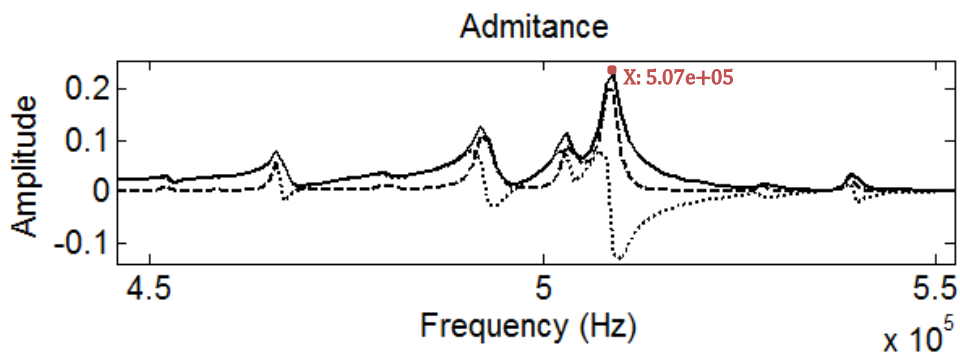


Figura 3.31 FUS cerrado: Admitancia en aire.

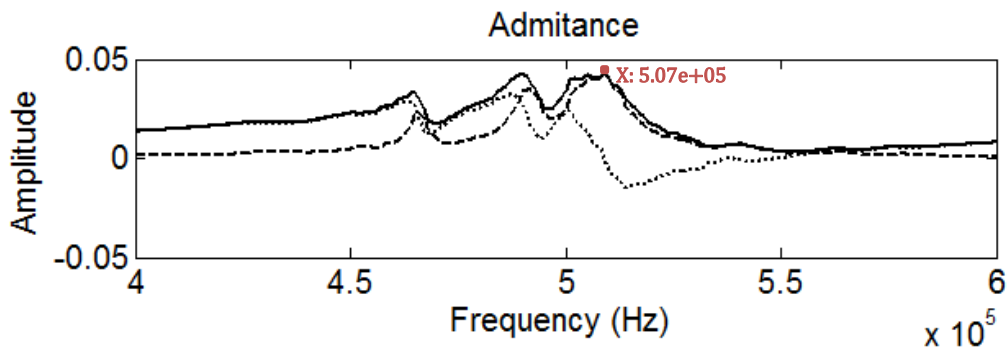


Figura 3.32 FUS cerrado: Admitancia en agua.

Después se procede a la configuración del osciloscopio. Se toma la máxima frecuencia de muestreo de 64 MHz, una captura de 300 μ s de duración y el inicio del tiempo de captura en 0s.

El número de medidas por punto indica si se están realizando medidas simples, en caso de que el valor sea 1, o si la media es el resultado del número de promedios que indiquemos (para valores superiores a 1). En este caso, las medidas realizadas son el resultado de realizar 10 promedios, lo que implica una reducción considerablemente en el ruido de la señal registrada, a costa de un aumento del tiempo de medida.

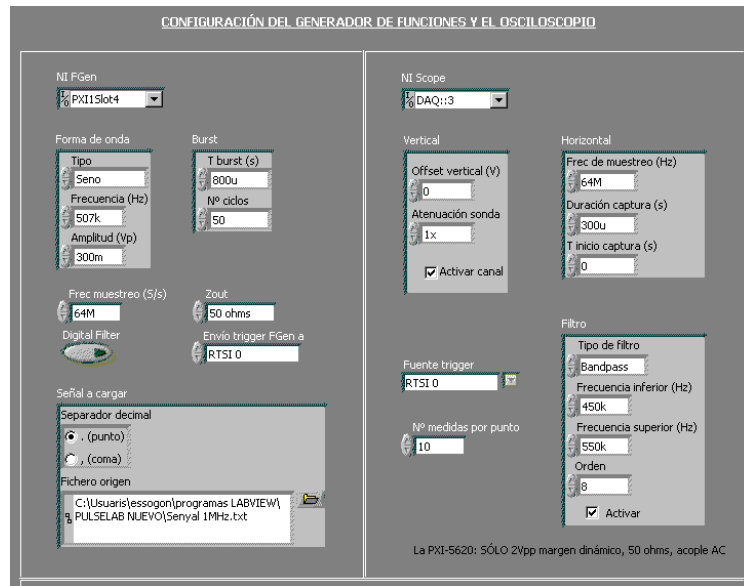


Figura 3.33 Configuración del osciloscopio y del generador de funciones.

3.5.2 Alineación del sistema

Antes de realizar las medidas experimentales que nos permitan caracterizar el campo acústico generado por el transductor, se debe alinear el sistema. El objetivo es localizar la posición del eje axial, y tomar medidas describiendo planos en torno a este eje, para así comparar la distribución de la presión en dicho eje con la que se espera según la teoría de O’Neil [8]. Para localizar el eje axial del transductor deberemos alinear el sistema.

Con el hidrófono colocado aproximadamente frente a la posición central de nuestro transductor, lo alejamos realizando desplazamientos en el eje z hasta situarlo a una distancia de 5 cm respecto al transductor, distancia a la que teóricamente se encuentra el foco geométrico de éste.

Partiendo de esta posición inicial, iremos buscando la máxima presión recibida en el hidrófono, para encontrar la posición real del foco, y tomar ese punto como el origen.

En primer lugar, se tomarán medidas al mismo tiempo que nos desplazamos en pasos de 0.1 mm en el eje x, realizando un barrido de línea en esta dirección, y recorriendo un total de unos 40 mm. Una vez encontrada la posición del máximo en el eje x, inicializamos el eje a 0 en dicho punto.

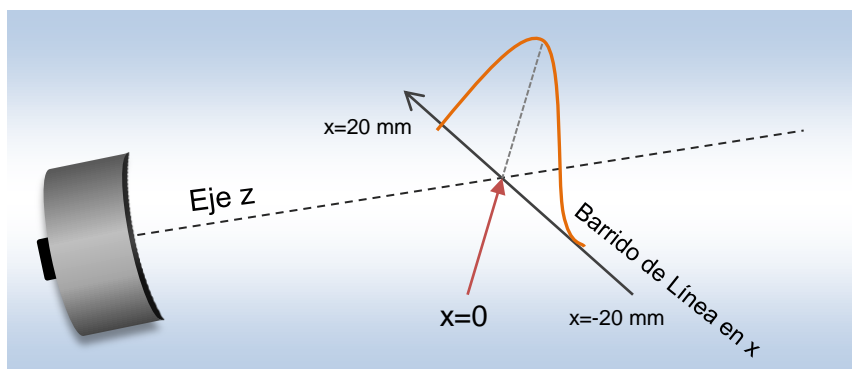


Figura 3.34 Alineación del sistema: inicialización del eje x a 0.

La figura 3.35 muestra varios cortes transversales de la distribución de presión en distintas posiciones del eje axial.

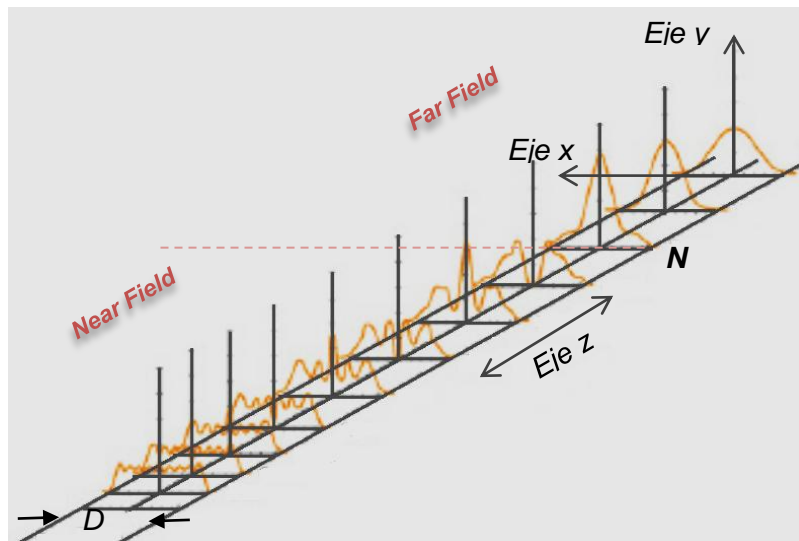


Figura 3.35 Vista transversal de la distribución de presión para distintas posiciones del eje axial [4].

En caso de haber tomado una posición inicial incorrecta, el resultado de un barrido de línea en la dirección del eje x será algo similar a lo mostrado en la figura 3.36, ya que nos encontramos en la zona de campo cercano tal y como muestra la figura 3.35, por lo que deberemos desplazarnos a lo largo del eje z hasta ver un resultado como el de la figura 3.37.

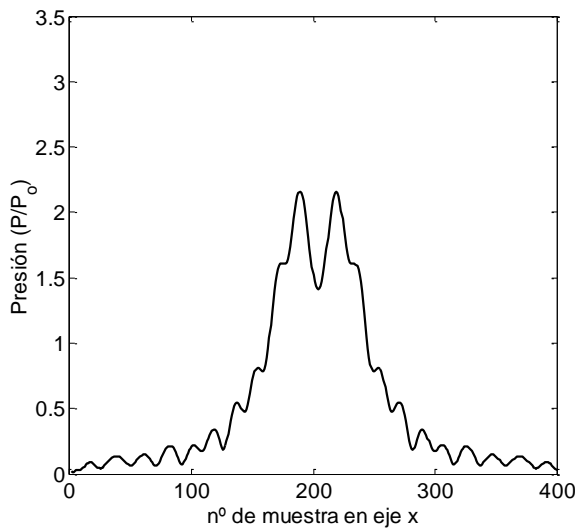


Figura 3.36 Barrido de línea fuera de la zona focal.

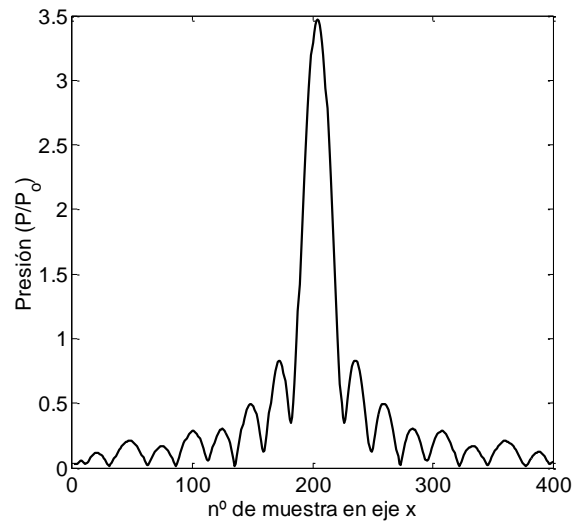


Figura 3.37 Barrido de línea dentro de la zona focal.

Tomando la posición del máximo como origen en x, se realizará el mismo proceso desplazándonos en el eje y, realizando un barrido de línea con la misma configuración anterior (pasos de 0.1 mm y un recorrido total de 40 mm en torno al eje axial). Una vez que obtenemos la posición del máximo se toma como origen de eje.

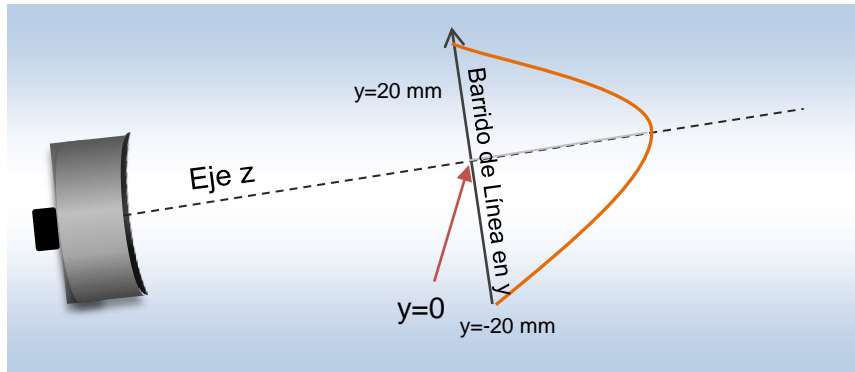


Figura 3.38 Alineación del sistema: inicialización del eje y a 0.

Por último, aunque partíamos de una distancia de 5 cm respecto al transductor, debemos encontrar la posición del máximo en el eje Z, por lo que se debe repetir el mismo proceso realizado en las otras dos direcciones para encontrar el origen también en este eje.

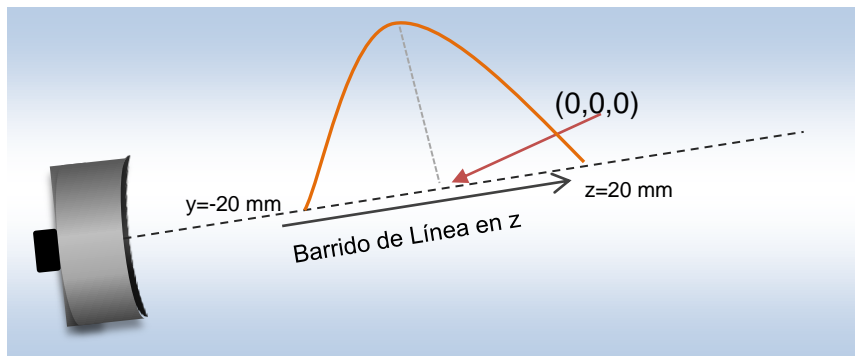


Figura 3.39 Alineación del sistema: inicialización de los ejes en la posición del punto focal.

Es posible que llegados a este punto, debemos realizar un barrido de línea en x y en y para comprobar que se ha realizado la alineación correctamente, y que hemos tomado como punto de origen el máximo de presión recibido en el hidrófono en los 3 ejes.

3.5.3 Fase de adquisición

Para la adquisición de los datos se realizaron barridos de plano en torno al punto que hemos tomado como origen en el proceso de alineación del sistema, que coincide con el punto focal del transductor bajo estudio.

En la figura 3.40 se muestra la configuración del barrido de plano establecido. Cada barrido consiste en desplazamientos de 4 milímetros hacia cada lado del eje x, y otros 4 milímetros hacia arriba y hacia abajo en y, utilizando en ambos casos pasos de 0.25 mm, desde el punto establecido como referencia (0,0,z), para una posición determinada en el eje z.

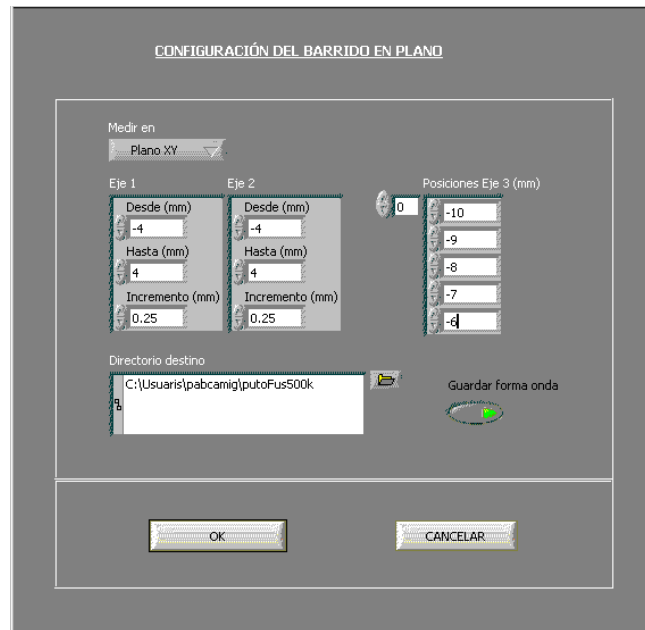


Figura 3.40 Configuración del barrido de plano.

Según se va desplazando el hidrófono, se irá registrando la forma de onda en cada punto del plano.

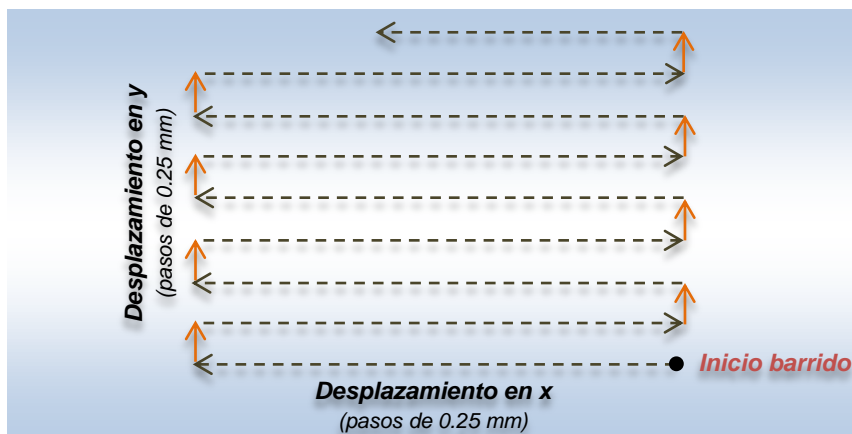


Figura 3.41 Patrón de movimiento de los ejes en cada barrido de plano.

Cada plano dista del siguiente una distancia de 1 mm, y se registra un total de 21 planos.

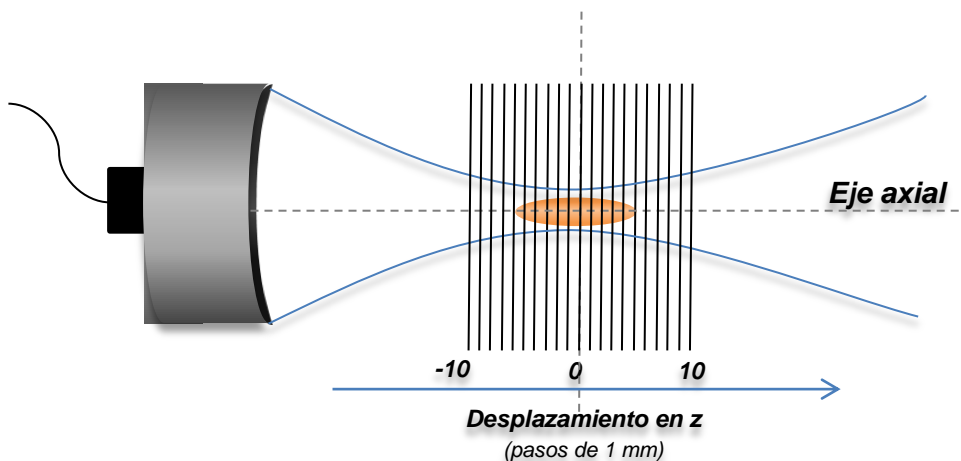


Figura 3.42 Posición en el eje z de cada barrido de plano.

El nombre asignado a cada archivo almacenado corresponde con la posición de los ejes en el momento de la adquisición. Estos datos serán cargados posteriormente en MATLAB para su proceso.

3.6 POST-PROCESADO

Una vez efectuadas las medidas de los distintos planos, es hora de procesar los datos obtenidos aplicando una serie de algoritmos desarrollados en MATLAB. El primer paso consiste en cargar los datos de cada plano en función de la posición de medida en el eje z. Como resultado se obtiene una matriz 3D.

El siguiente diagrama de bloques muestra un esquema de funcionamiento del algoritmo diseñado para procesar los datos.

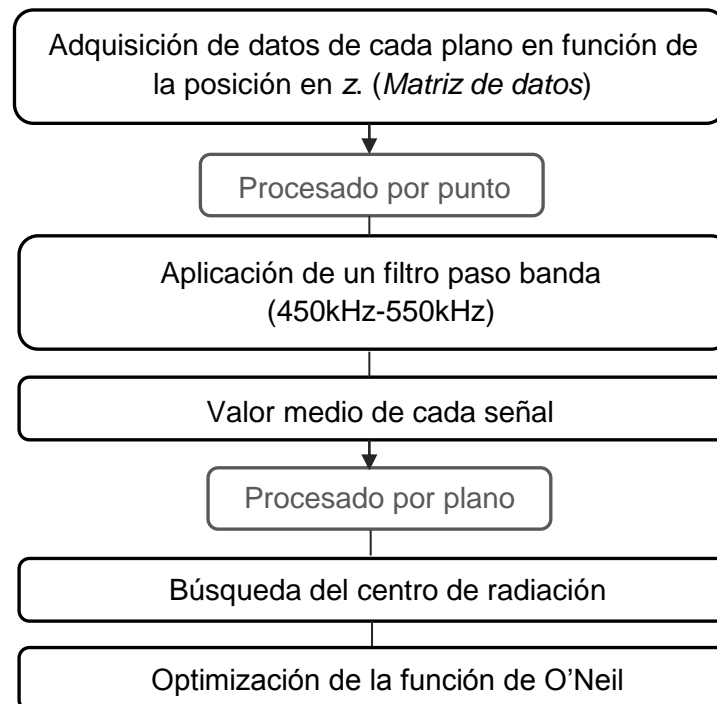


Figura 3.43 Diagrama de bloques del algoritmo de post-procesado.

A continuación se describen cada uno de los pasos empleados en el procesado de los datos.

Como se ha comentado anteriormente, en primer lugar se deben cargar los datos obtenidos de manera experimental para cada plano, en función del eje de desplazamiento z.

Una vez cargados los datos para cada plano, se aplicará un filtro paso banda a las señales correspondientes a cada punto del plano, en la banda de 450 a 550 kHz, con el fin de eliminar el ruido en estas señales y mejorar los resultados obtenidos en los pasos siguientes.

3.6.1 Filtrado punto a punto

El filtro aplicado consiste en un filtro FIR utilizando el método de ventanas.

En este tipo de filtro, para determinar la salida se emplean los valores de las entradas actuales y anteriores. Un filtro de Respuesta al Impulso Finita, de longitud M , entrada $x[n]$ y salida $y[n]$ se describe por la ecuación en diferencias:

$$y[n] = b_0x[n] + b_1x[n-1] + \dots + b_{M-1}x[n-M+1]$$

$$y[n] = \sum_{k=0}^{M-1} b_k x[n-k] \quad (3.3)$$

El orden del filtro viene dado por M , y $\{b_k\}$ es el conjunto de los coeficientes del filtro. De manera alternativa, se puede expresar la salida como la convolución de la entrada con la respuesta al impulso $h[n]$ del filtro, tal y como se muestra a continuación:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{M-1} h[n]x[n-k] \quad (3.4)$$

Para aplicar el método de ventanas, comenzamos con la especificación de la respuesta en frecuencia deseada $H_d(\omega)$ y determinamos la correspondiente respuesta impulsional $h_d[n]$.

Relacionamos $h_d[n]$ con $H_d(\omega)$ mediante la transformada de Fourier:

$$H_d(\omega) = \sum_{n=0}^{\infty} h_d[n]e^{-j\omega n} \quad (3.5)$$

Donde:

$$h_d[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H_d(\omega)e^{j\omega n} d\omega \quad (3.6)$$

Evaluando la expresión anterior, se obtiene $h_d[n]$ a partir de $H_d(\omega)$. En general, $h_d[n]$ será infinita en duración, por lo que para conseguir un filtro FIR de longitud M debemos truncarla por algún método.

El truncamiento de $h_d[n]$ a una longitud M es equivalente a multiplicar $h_d[n]$ por una *ventana rectangular* de duración finita. El truncamiento de $h_d[n]$ a una longitud M cambiará significativamente la respuesta en frecuencia del filtro deseado, apareciendo rizados alrededor de la frecuencia de corte, con lóbulos variables según el orden del filtro. Para minimizar estos efectos no deseados, se emplean ventanas que no contengan discontinuidades abruptas en sus características en el dominio temporal. Mediante este proceso se obtienen respuestas en frecuencias con rizados más bajos en sus características en el dominio de la frecuencia [17].

La ventaja de los filtros FIR es que pueden diseñarse para que presenten *fase lineal*, es decir, a diferencia de los filtros IIR o los filtros analógicos, no introducen

desfases en la señal, por lo que son muy utilizados en este tipo de aplicaciones. Otra ventaja es que siempre son estables. Sin embargo, para unas especificaciones dadas, requieren un mayor número de orden respecto a los filtros IIR, lo que se traduce en un mayor gasto computacional, que puede ser un inconveniente en aplicaciones en tiempo real.

Las características del filtro aplicado son:

- Frecuencias de corte: 450 y 550kHz.
- Orden del filtro: 300
- Tipo de ventana: Hanning.

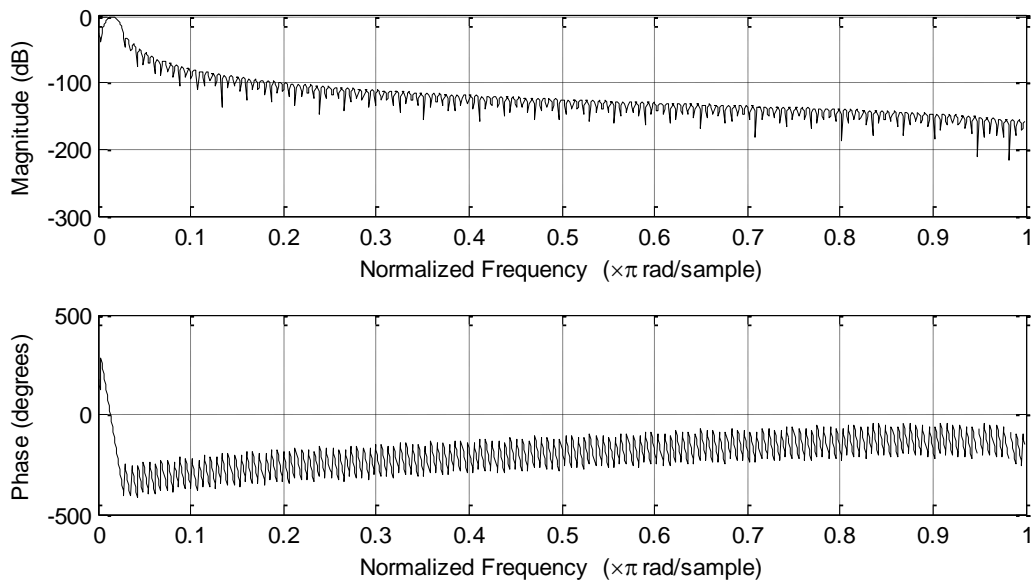


Figura 3.44 Respuesta en frecuencia y fase del filtro aplicado.

En la siguiente figura podemos ver el resultado de aplicar el filtro, mediante la comparación de la señal original y la filtrada.

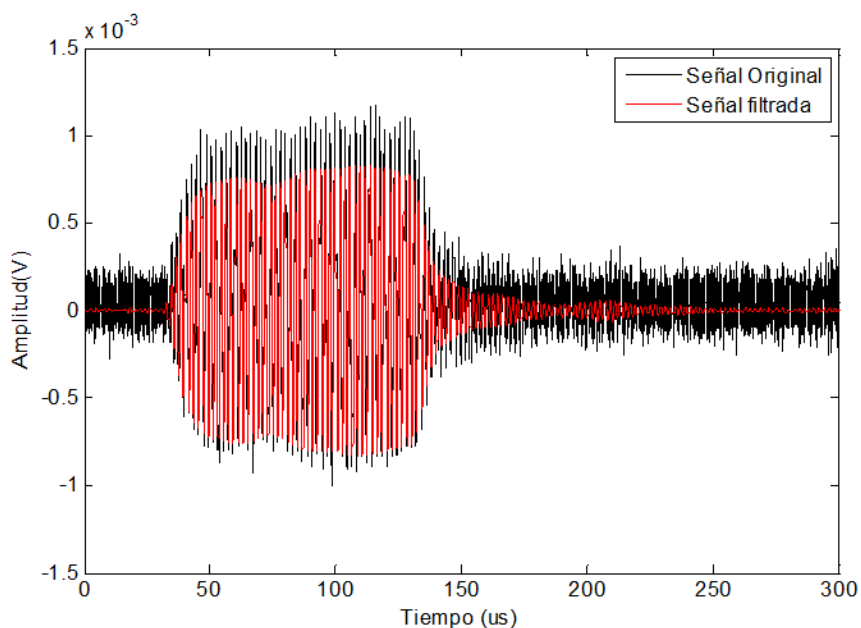


Figura 3.45 Comparación entre señal original y filtrada.

El filtro descrito será aplicado a las señales correspondientes a cada punto del plano. En la siguiente imagen se muestra a modo de ejemplo, el resultado obtenido para el plano $Z=0\text{ mm}$. Se puede observar que se ha conseguido eliminar el ruido de las señales, de manera que los anillos que forman el campo acústico producido por nuestro transductor en cada plano, quedan más definidos. Este proceso se repite para cada plano.

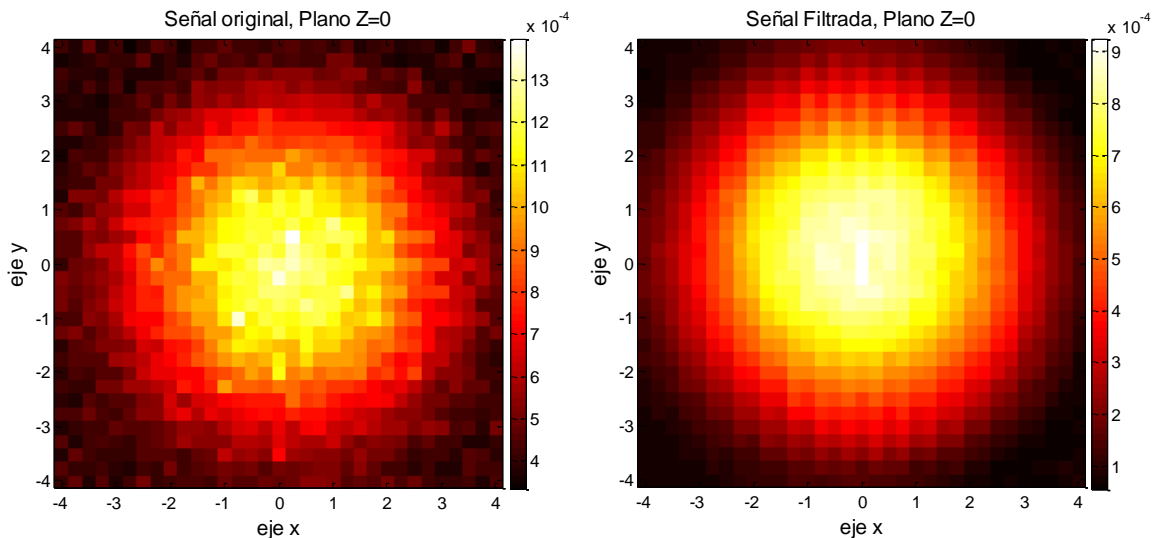


Figura 3.46 Visualización de un plano antes y después de aplicar el filtrado punto a punto.

3.6.2 Valor medio de cada punto del plano

Una vez filtrada la forma de onda correspondiente a cada punto del plano, es necesario obtener el máximo de amplitud de cada una para, en pasos posteriores, obtener los máximos de amplitud en el eje.

En primer lugar se localiza la muestra de mayor amplitud de cada forma de onda, y se establecen un umbral superior e inferior, representados por una línea roja y otra azul respectivamente, en las *figuras 3.47* y *3.48*. Para fijar los valores de ambos umbrales, se toma como referencia el valor del máximo de amplitud encontrado, estableciendo el umbral inferior un 30% por debajo de ese valor, y el umbral superior un 5%.

Para encontrar el máximo de cada forma de onda se desarrolla un algoritmo que compara el valor de amplitud de cada muestra, con los de la muestra anterior y posterior a esta, y solo se tendrán en cuenta los máximos encontrados ubicados entre el umbral inferior y superior previamente establecidos, con lo que se elimina aquellas partes de la señal que no aporta información útil, y evita que se produzca una sobreestimación del valor medio de la señal.

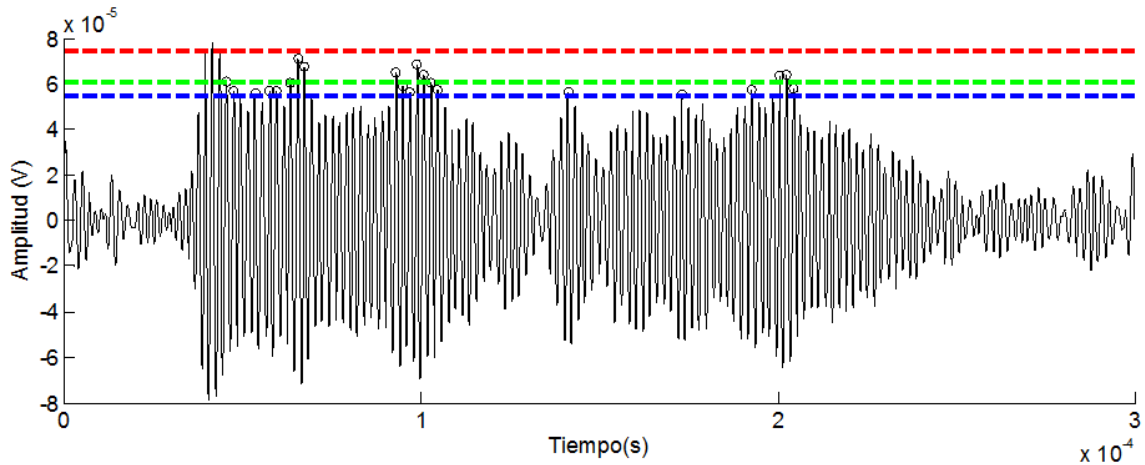


Figura 3.47 Valor medio de un punto del plano $Z=0$ mm, fuera de foco.

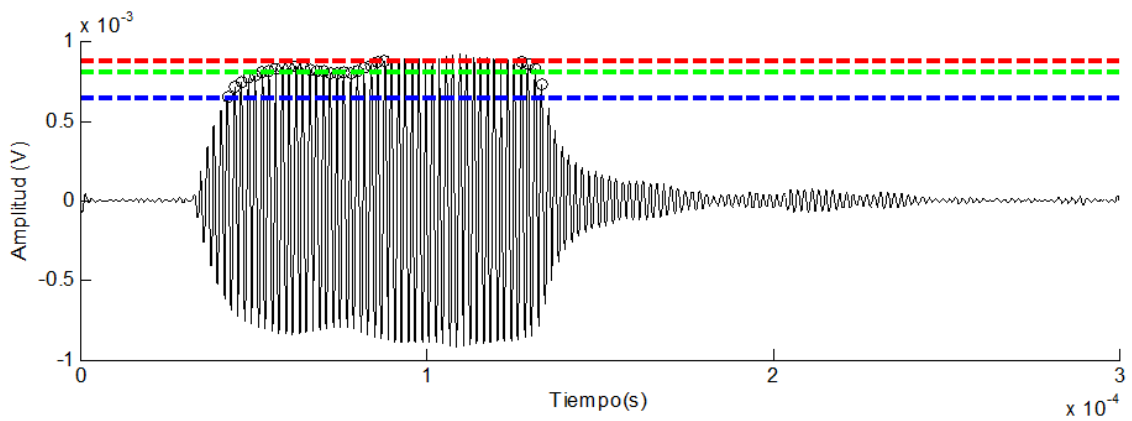


Figura 3.48 Valor medio de un punto del plano $Z=0$ mm, próximo al foco.

Con los valores máximos de cada forma de onda, se obtiene el valor medio de cada punto del plano, representado por una línea verde en las figuras 3.47 y 3.48.

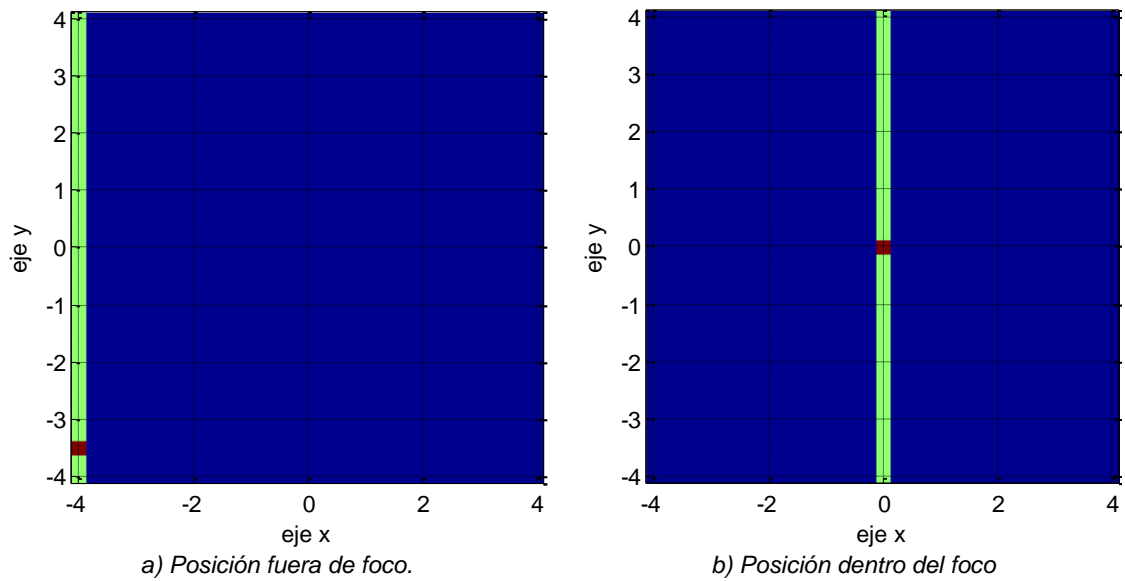


Figura 3.49 Posiciones en el plano de las formas de onda del ejemplo.

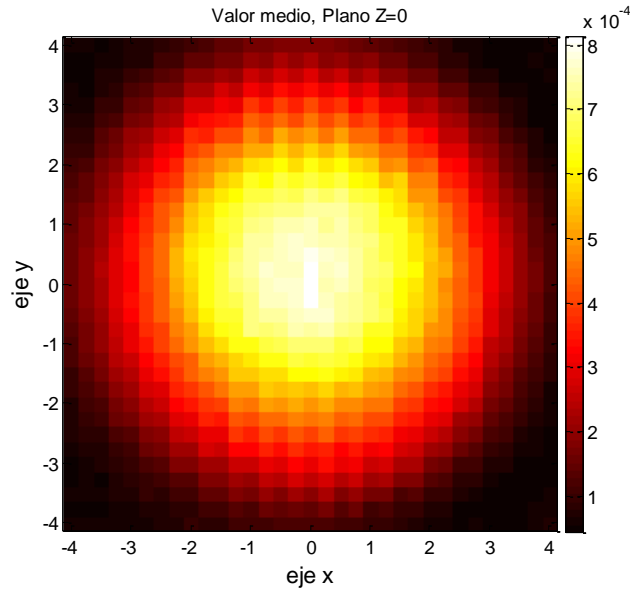


Figura 3.50 Valor medio de cada punto del plano Z=0mm.

3.6.3 Centro de radiación de cada plano

Observando la distribución de la amplitud en un plano (figura 3.51), se aprecia que la variación en el eje y no es lineal, sino que presenta una variación escalonada, que puede deberse al movimiento de los ejes, de lo que depende la posición del hidrófono. Por lo que se realiza una corrección de los datos dentro de la matriz a un polinomio de cuarto orden, de manera que quede bien definida la zona de máxima amplitud y así evitar cometer errores a la hora de encontrar el centro de radiación de cada plano.

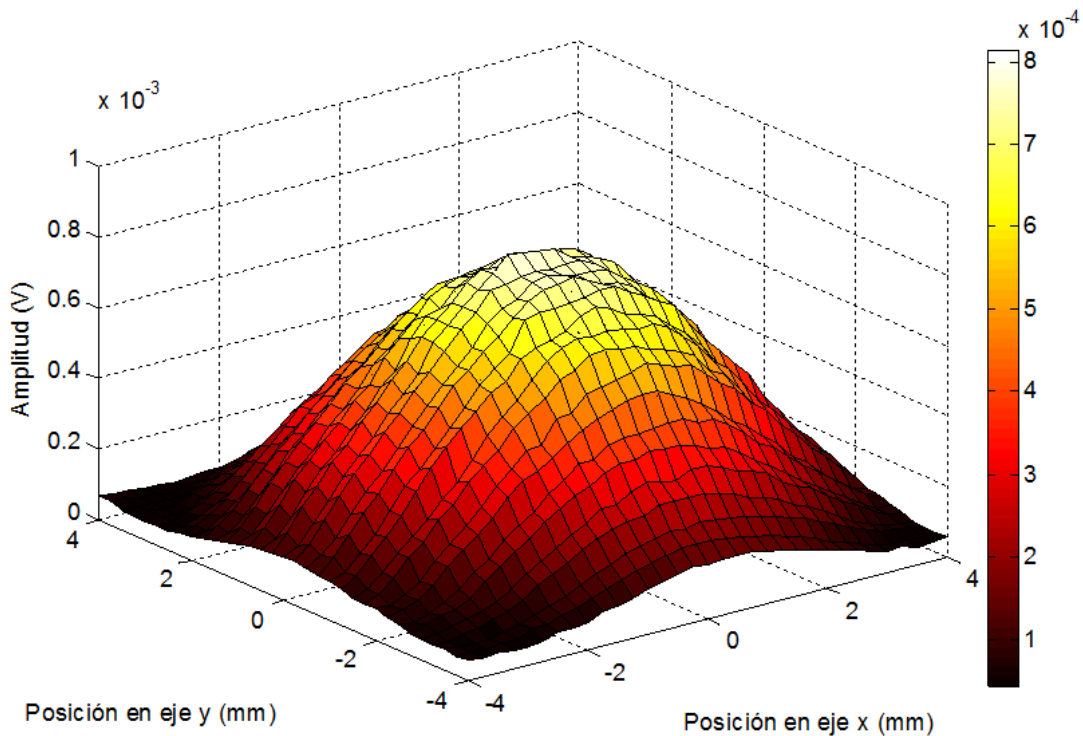


Figura 3.51 Distribución de amplitud en el plano Z=0mm.

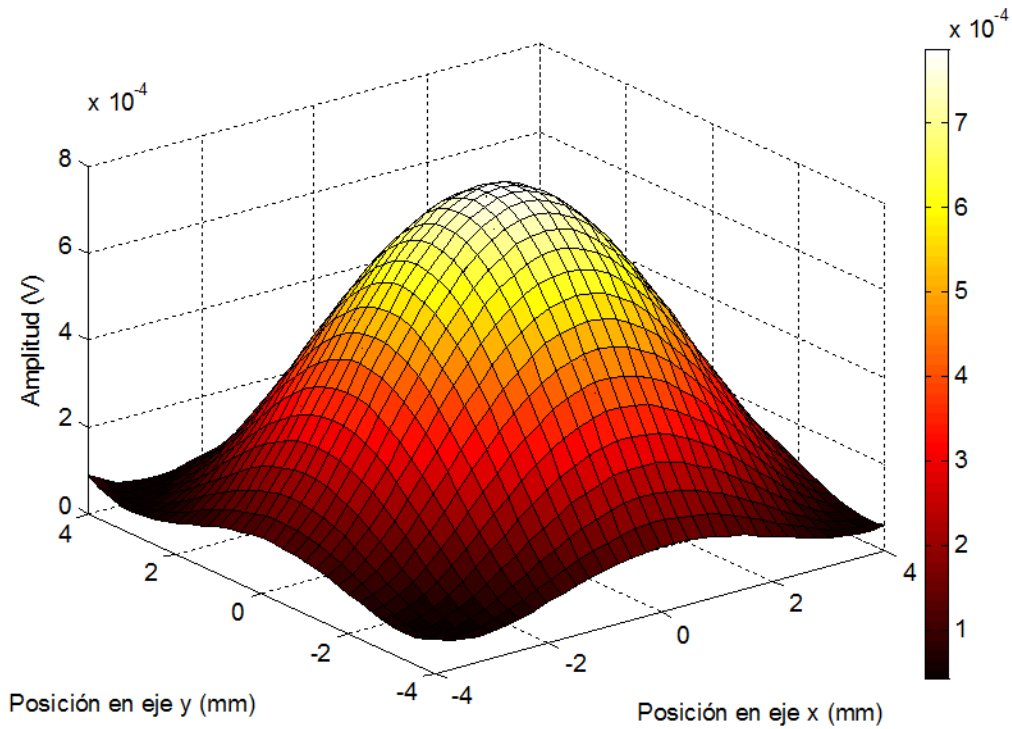


Figura 3.52 Distribución de amplitud tras ajustar datos, para el plano $Z=0\text{mm}$.

Una vez que se han ajustado los datos, se procede a encontrar el centro de radiación de cada plano, buscando la posición tanto en x como en y del máximo de amplitud. Si se representa un corte transversal de ese mismo plano para los valores de x e y y considerados como el centro de radiación, se observa cómo evoluciona la amplitud ante las variaciones en ambas direcciones.

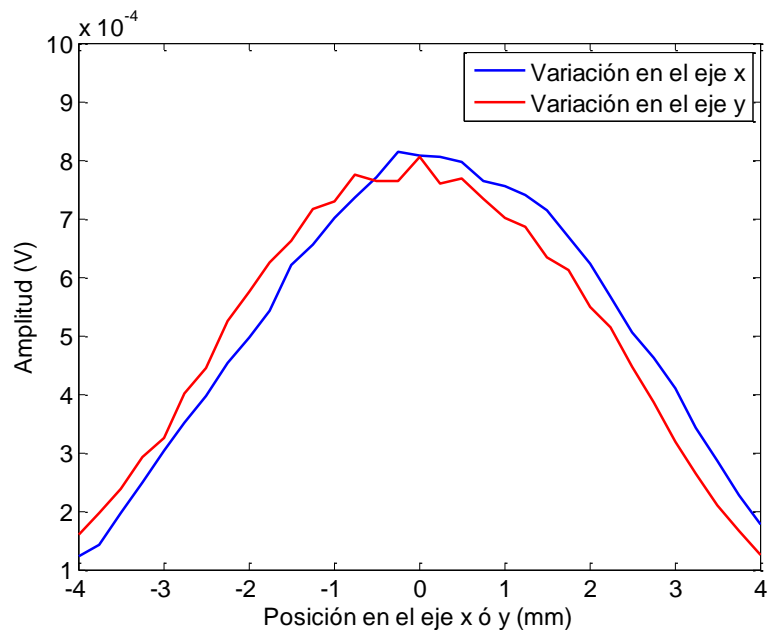


Figura 3.53 Variación de la amplitud en la dirección de los ejes x e y .

En la *figura 3.54* se puede observar el resultado de realizar un ajuste de los datos en cada dirección. En ésta se aprecia como la falta de un ajuste, podría traducirse en un error a la hora de encontrar la posición del máximo de radiación, en este caso en la dirección del eje x .

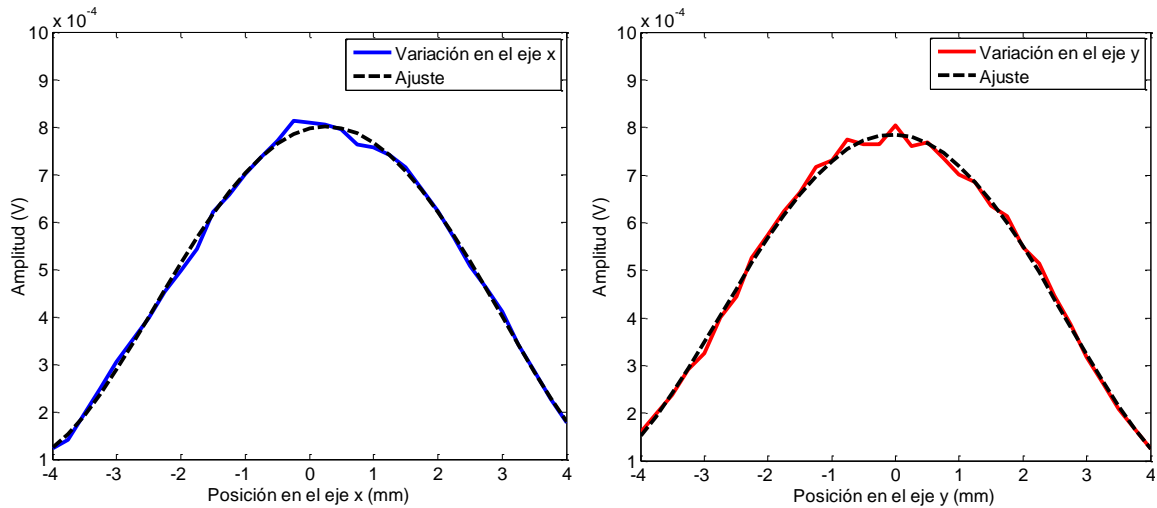


Figura 3.54 Ajuste de los datos

Por último, el valor medio de los máximos de amplitud encontrados en ambas direcciones, será el valor que se tome en pasos posteriores para obtener la distribución de amplitud en el eje axial.

Por tanto, este proceso debe repetirse para cada plano, proporcionando el centro de radiación de cada uno, así como la amplitud máxima.

3.6.4 Velocidad de propagación del medio

Con la información del centro de radiación de cada plano, extraemos la forma de onda para dichas coordenadas y registramos el tiempo de llegada de la señal recibida por el hidrófono.

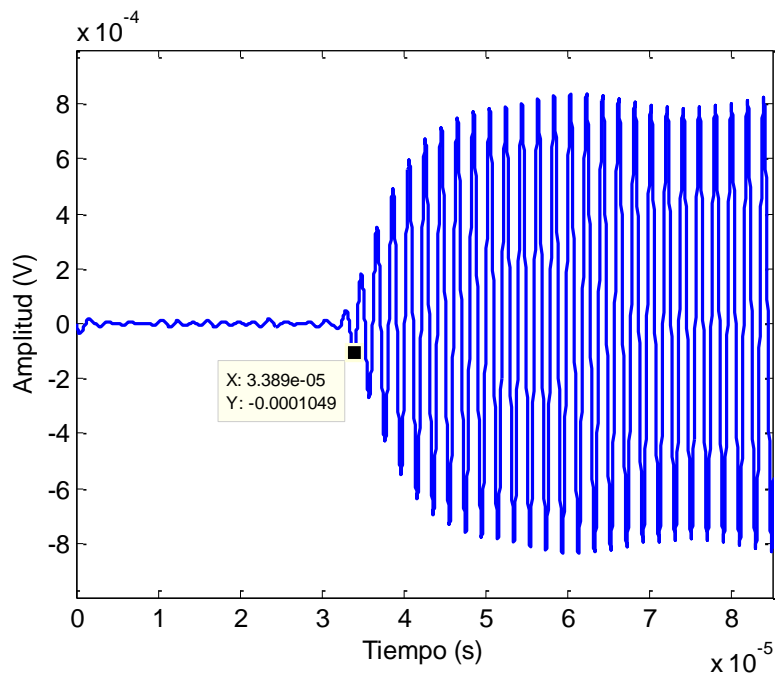


Figura 3.55 Tiempo de vuelo de la forma de onda correspondiente al centro de radiación.

Como vemos en la *figura 3.55*, se obtiene el tiempo de vuelo en el mismo punto de la forma de onda para la posición del centro de radiación para todos los planos. Lo que registramos es el nº de muestras que tarda en llegar la señal al hidrófono una vez

emitida por nuestro transductor, y pasamos este valor a segundos dividiéndolo por la frecuencia de muestreo de 64 MHz.

$$t_{vuelo} = \frac{n^{\circ}muestra}{f_m} \quad (3.7)$$

En la siguiente tabla se muestran los tiempos de vuelo calculados para cada plano, para la posición considerada como centro de radiación en cada uno de ellos, así como el valor medio de amplitud.

Posición z	Posición x	Posición y	Amplitud (mV)	Nº Muestras	Tiempo de vuelo (µs)
-10	18	17	0.642	1768	27.63
-9	18	17	0.674	1804	28.19
-8	18	17	0.709	1851	28.92
-7	18	17	0.744	1889	29.52
-6	18	17	0.756	1931	30.17
-5	17	17	0.794	1967	30.73
-4	17	17	0.762	2007	31.36
-3	17	17	0.770	2047	31.98
-2	17	18	0.767	2090	32.66
-1	17	18	0.776	2129	33.27
0	17	18	0.793	2170	33.91
1	17	18	0.777	2211	34.55
2	17	18	0.770	2251	35.17
3	17	18	0.783	2291	35.80
4	17	18	0.758	2332	36.44
5	17	18	0.742	2372	37.06
6	17	19	0.741	2412	37.69
7	17	19	0.721	2455	38.36
8	17	19	0.712	2494	38.97
9	17	19	0.697	2537	39.64
10	17	19	0.674	2578	40.28

Tabla 3.2. Tiempo de vuelo para el centro de radiación de cada plano.

Como sabemos, la velocidad de propagación en el agua es aproximadamente 1500 m/s para una temperatura de 20°C. La expresión (3.8) proporciona el valor de la velocidad de propagación del sonido en agua destilada, válida para temperaturas comprendidas entre 0°C y 100°C [15,18].

$$c(P, t) = 1402.7 + 488t - 482t^2 + 135t^3 + (15.9 + 2.8t + 2.4t^2) \left(\frac{P_G}{100} \right) \quad (3.8)$$

Donde c es la velocidad del sonido medido en m/s, $t=T/100$, siendo T la temperatura en grados Celsius, y P_G la presión de gauge (presión por encima de la presión atmosférica) expresada en bares, donde un valor igual a 0 bar indica una presión de equilibrio de 1.01325 bar (1atm).

Partiendo de la ecuación de una recta:

$$y = mx + c \quad (3.9)$$

A partir del tiempo de vuelo para la posición del centro de radiación de cada plano, y teniendo en cuenta que entre planos existe un desplazamiento de 1mm,

podemos hallar la velocidad de propagación real en el medio, que se corresponde con el valor de la pendiente m .

Por tanto, la pendiente de la curva de la *figura 3.56* proporciona un valor de velocidad de propagación en el medio de aproximadamente 1582 m/s.

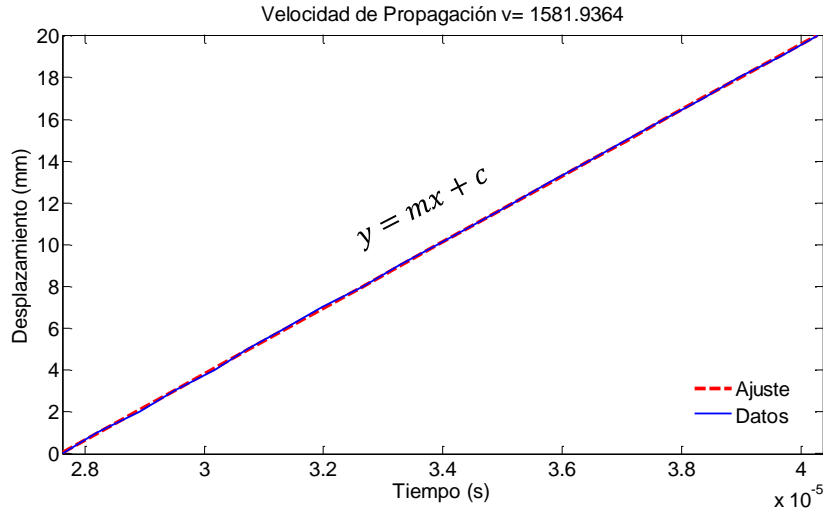


Figura 3.56 Velocidad de propagación en el medio.

Evaluando el polinomio del ajuste anterior para $t=0$, podemos saber dónde se encuentra ubicado el transductor, y la posición real de cada plano respecto a este.

Por lo tanto, para el instante $t=0$, la posición del transductor vendrá dado por la constante c . Si en el eje z teníamos un vector desplazamientos que iba de -10 a 10 mm (posiciones relativas), tomaremos como referencia la posición obtenida del transductor, y a ese valor, le sumaremos el vector desplazamientos para obtener las posiciones reales de cada plano que se muestran en la *figura 3.57*.

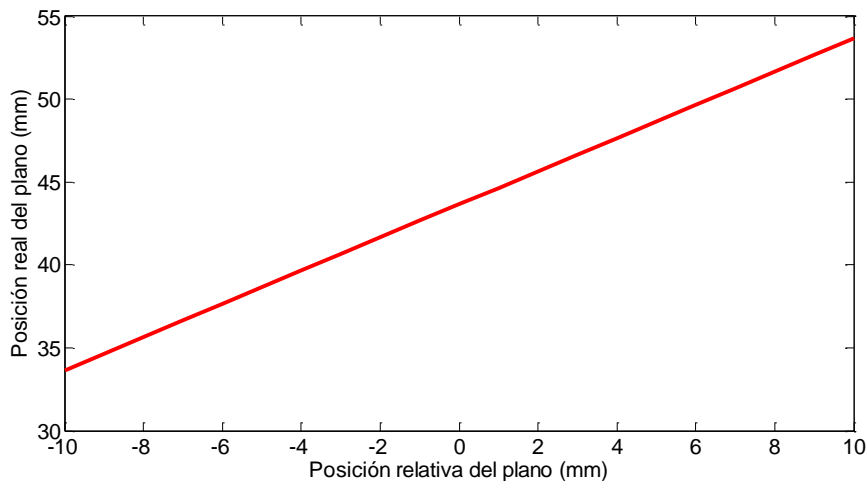


Figura 3.57 Posición real de cada plano respecto al transductor

3.6.5 Fase de optimización

El último paso consiste en aplicar un algoritmo de optimización que nos permita averiguar los valores de los parámetros reales de apertura y radio de curvatura del transductor una vez construido, de manera que al sustituir dichos valores en la expresión analítica de O'Neil (3.10) vista en el apartado de *fundamentos teóricos*, la

distribución de amplitud resultante sea la que más se ajuste a la obtenida a partir de los datos experimentales (valores de posiciones reales de cada plano y amplitud máxima).

$$|p(\tilde{z})| = 2p_o \left| \frac{1}{1-\tilde{z}} \sin\left(\frac{\pi N_F}{2} \cdot \frac{1-\tilde{z}}{\tilde{z}}\right) \right| \quad (3.10)$$

Como el número de Fresnel (N_F) depende de la longitud de onda, y esta a su vez de la velocidad de propagación en el medio, debemos sustituir este último valor por el obtenido en el apartado 3.6.4.

El algoritmo de optimización partirá con unos valores iniciales de apertura y radio de curvatura, que se corresponden con los valores iniciales de la cerámica simple, previa a su construcción.

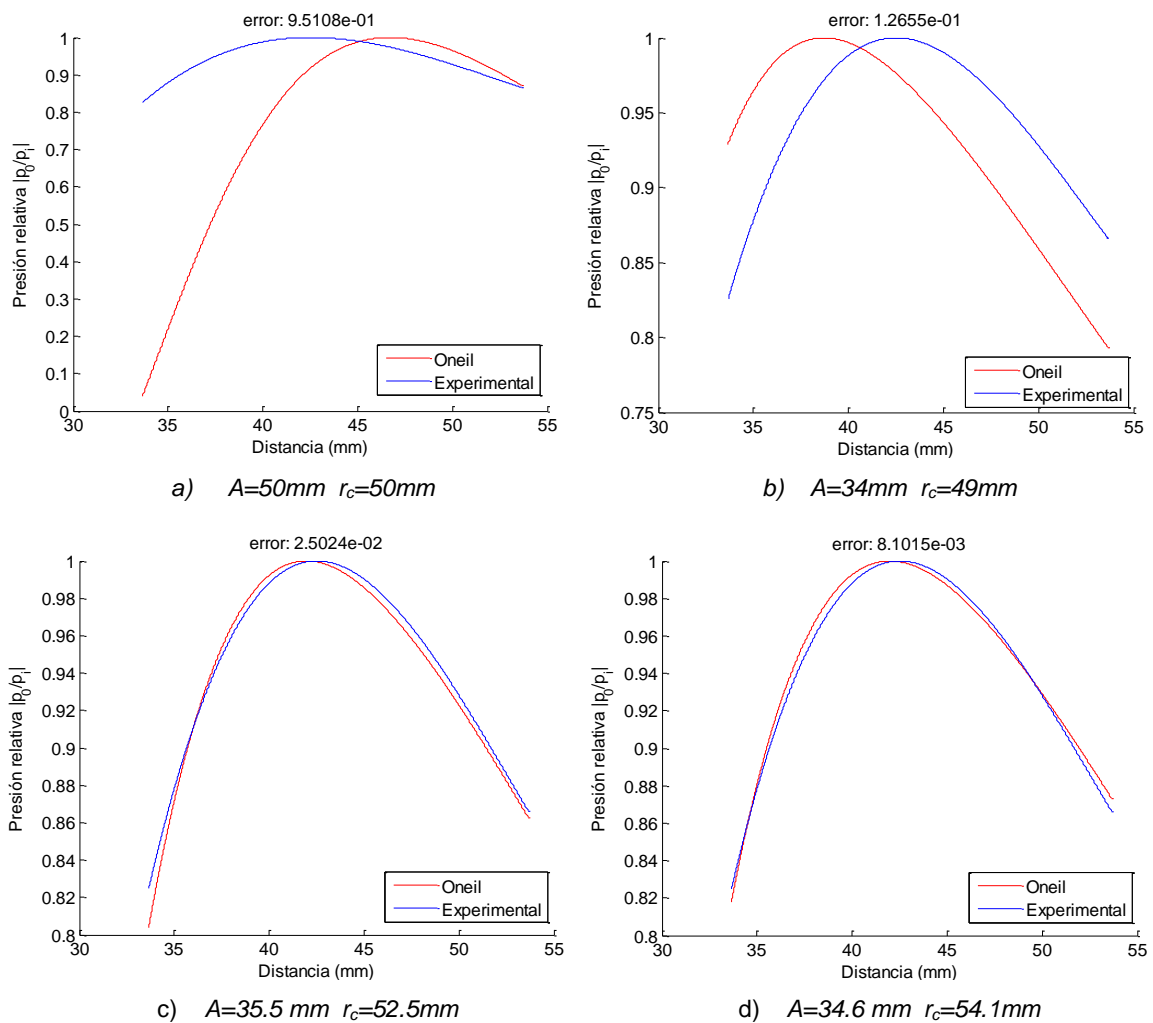


Figura 3.58 Ajuste de los datos experimentales en función de la apertura y el radio de curvatura.

En la figura 3.58 se observa la reducción del error cometido a medida que los datos experimentales se ajustan más a la solución analítica de O’Neil. En la siguiente figura podemos ver la variación del error relativo cometido durante todo el proceso de optimización, hasta alcanzar unos valores muy próximos a 0. Esto nos permite validar el ajuste realizado.

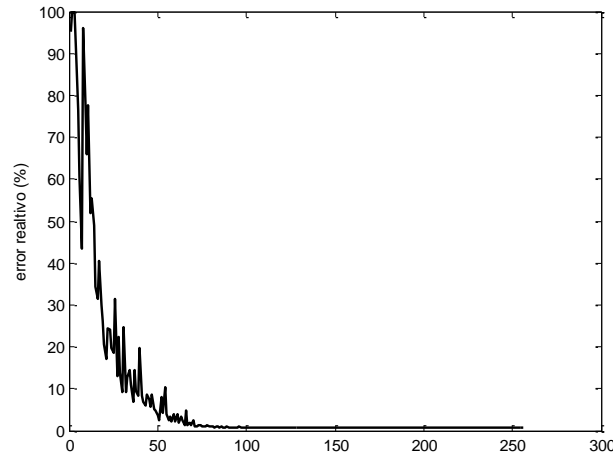


Figura 3.59 Variación del error relativo durante el proceso de optimización.

4 RESULTADOS

4.1 CAMPO ACÚSTICO FOCALIZADO

La caracterización del transductor consiste en el análisis del campo acústico generado por éste. Esto permite conocer los parámetros reales tras su construcción, tales como la apertura y el radio de curvatura efectivos, la posición del foco geométrico y la posición del máximo de presión en el eje axial.

Los valores reales de dichos parámetros se obtienen haciendo uso del algoritmo de optimización descrito anteriormente, que, partiendo de unos valores iniciales de apertura y radio de curvatura correspondientes a las dimensiones de la cerámica previas a la construcción del transductor (ambos de 50 mm), irá variando dichos valores dentro de la expresión analítica de O'Neil, hasta que el resultado se ajuste lo más posible a los datos experimentales. A partir de ese momento, representando la distribución de la presión en el eje axial, podremos averiguar tanto la posición del máximo, así como el desplazamiento producido respecto al foco geométrico.

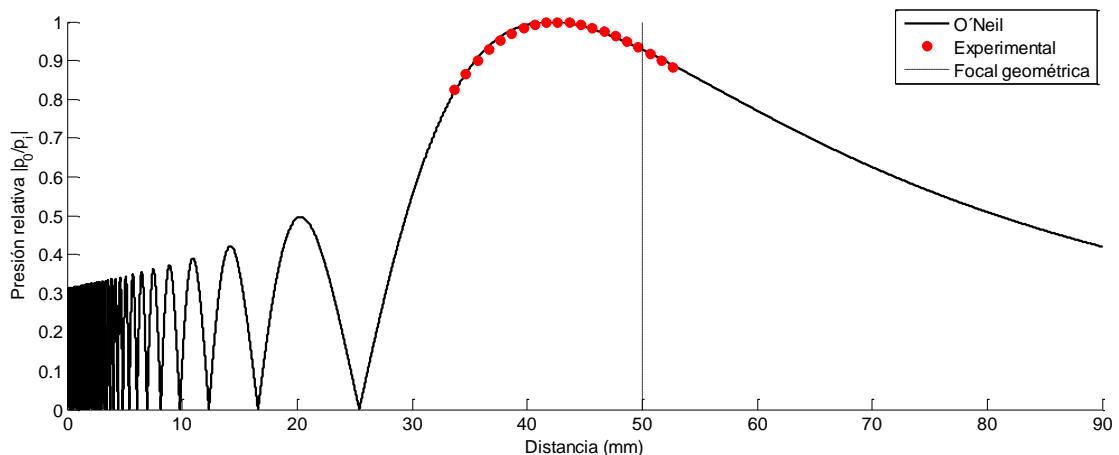


Figura 4.1 Ajuste de la curva de O'Neil a los datos experimentales.

En la *tabla 4.1* se muestra los valores de apertura y radio de curvatura del transductor, proporcionados por el algoritmo de optimización tras el ajuste de la

solución analítica de O'Neil a los datos experimentales, frente a los datos proporcionados por el fabricante (*Real*).

	Real	O'Neil
Apertura (mm)	50	34.6
Radio de curvatura (mm)	50	54.1

Tabla 4.1 Valores de apertura y radio de curvatura efectivos (O'Neil) frente a los valores reales.

Según este ajuste, la apertura del transductor se ha reducido 15.4 mm y el radio de curvatura ha aumentado en 4.1 mm. Además, la posición del máximo se ubica en 42.5 mm respecto de la posición del transductor, y se encuentra desplazado 11.6 mm del foco geométrico (54.1mm).

Otros datos que podemos extraer del ajuste anterior son la longitud y anchura de la zona focal. Como se vio en el apartado 2.2, la longitud de esta zona es la distancia entre los puntos situados a ambos lados del foco, cuya amplitud se encuentra 6dB por debajo del máximo. Si sustituimos en la expresión 2.2 los valores de apertura y radio de curvatura dados por el fabricante, y los obtenidos mediante el ajuste, existe una diferencia en los resultados, ya que estos parámetros han variado durante el proceso de construcción.

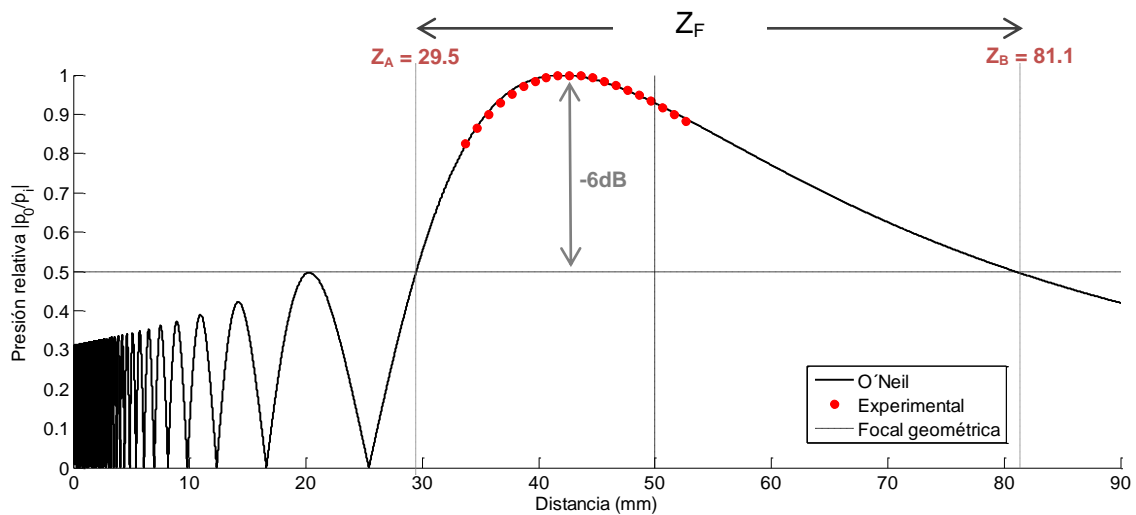


Figura 4.2 Longitud de la zona focal Z_F a -6dB.

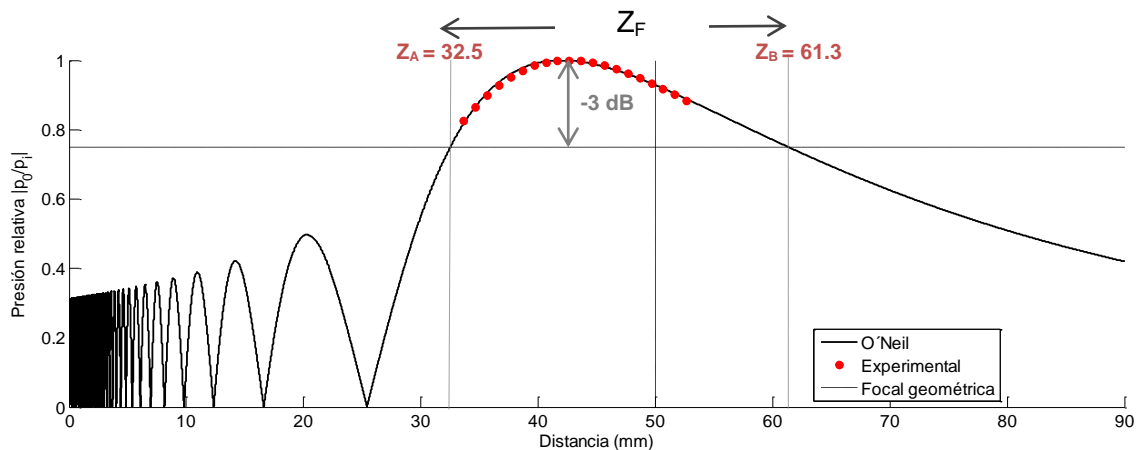


Figura 4.3 Longitud de la zona focal Z_F a -3dB.

La longitud de la zona focal es, por tanto, de 46.2 mm si utilizamos los valores efectivos de apertura y radio de curvatura, este valor dista mucho del resultado obtenido utilizando los valores reales dados por el fabricante. También se aprecia una diferencia con los resultados obtenidos a partir de la gráfica de la *figura 4.2*, de la que se extrae una longitud de 51.6 mm.

	Real	O'Neil
Zona Focal (mm)	21.4	52±5

Tabla 4.2 Longitud de la zona focal.

Para obtener la anchura del foco, se seguirá el siguiente procedimiento. Se tomarán los planos comprendidos entre los dos extremos de la zona focal (caída a -6dB del máximo de amplitud), y se registrará el valor del ancho del contorno para el anillo a -6dB. Una vez obtenido el valor para cada plano, se extrae el valor medio.

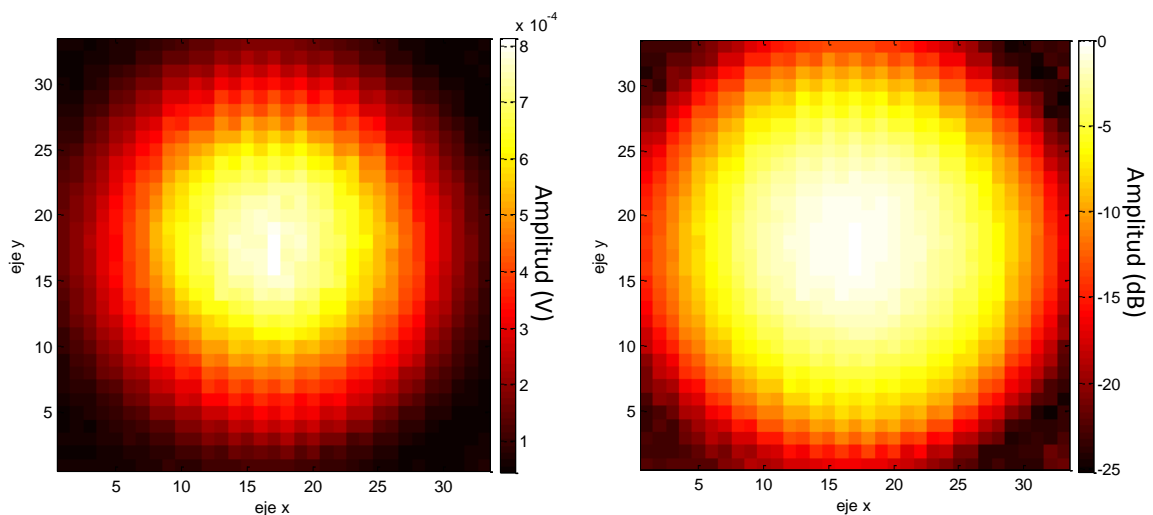


Figura 4.4 Conversión de los valores de amplitud del plano Z=0 a dB.

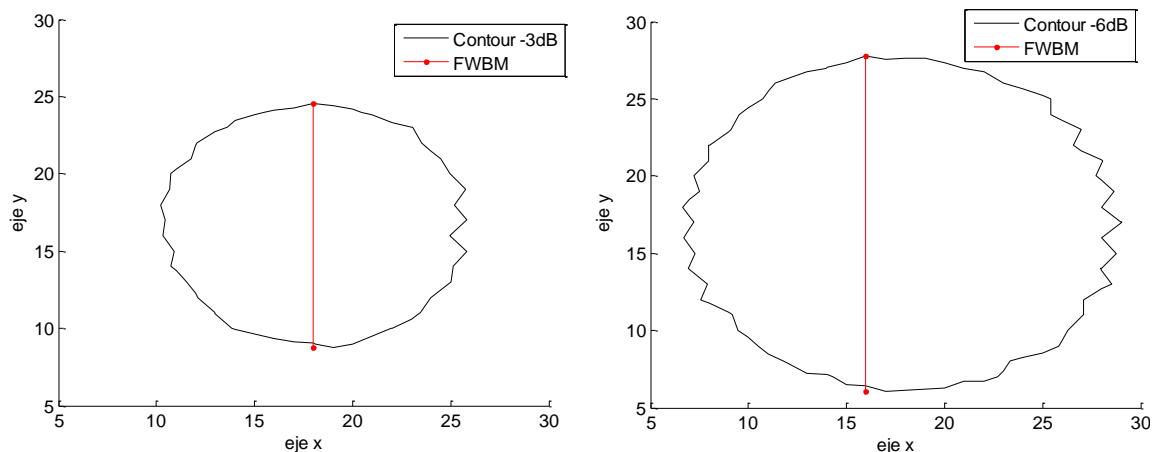


Figura 4.5 Anchura del foco a -3 y -6 dB del máximo.

En este caso también se presentan los valores del ancho del foco a -3 y a -6dB.

	-3dB	-6dB
Anchura del foco (mm)	4.1	5.6

Tabla 4.3 Anchura del foco

5 CONCLUSIONES

Un momento clave durante el proceso de construcción del transductor, es aquel en el que se fija la cerámica al tubo de PVC utilizando una capa lo más fina posible de material adherente y sellador. El objetivo de utilizar este material, es que la cerámica permanezca apoyada sobre la hendidura del tubo, sin que quede rígidamente sujeta a este. Un exceso a la hora de administrar este material, puede causar un cambio de comportamiento de la cerámica, evitando que esta vibre a ciertas frecuencias al ser excitada. Otro paso decisivo en el comportamiento final del transductor es aquel en el cual se deposita una capa de epoxy conductor permitiendo el contacto eléctrico entre la cara superior de la cerámica y la carcasa exterior de acero inoxidable.

Por tanto, la precisión con la que se realicen estos dos pasos será decisiva en el comportamiento del transductor, y en que éste cumpla las características inicialmente propuestas para la aplicación a la que irá destinado.

El hecho de que la cerámica quede rígidamente sellada por su contorno tanto al tubo de PVC como a la carcasa exterior, no solo repercute en la respuesta eléctrica, sino que, como hemos podido observar en el apartado de *Resultados*, también produce una variación en los parámetros de apertura y radio de curvatura efectivos, que distan bastante, especialmente la apertura, de los valores reales de la cerámica.

Esta variación se traduce en un desplazamiento de la posición del foco geométrico (relacionado con el radio de curvatura), así como de la posición del máximo de presión y la longitud de la zona focal.

Por lo tanto, considerando que el haz producido por un transductor focalizado es de tipo gaussiano, el hecho de fijar rígidamente el contorno de la cerámica a la estructura del transductor produce una reducción de la apertura efectiva que equivale a estrechar la campana del perfil del haz, hasta llegar a convertirse en un único rayo.

Para simular el efecto producido, se hará uso de la expresión de una distribución gaussiana:

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (5.1)$$

Donde el parámetro a representa la altura de la campana, centrada en el punto c y σ determina el ancho de la misma.

Por tanto, al variar el parámetro σ en la *expresión 5.1*, estaremos simulando la modificación sufrida en el perfil del haz al reducir la apertura efectiva. Esto nos permitirá comprender la distribución en el eje axial que presenta nuestro transductor, y el desplazamiento producido del máximo de presión respecto de la posición del foco geométrico. Este desplazamiento se conoce como *shift lineal* [5].

La *figura 5.1* muestra la distribución de presión en el eje axial simulando la reducción de la apertura efectiva del transductor. Como se puede observar, a medida que se reduce el valor de la anchura de la campana, y por tanto, de la apertura efectiva, se produce un desplazamiento hacia la superficie del transductor del máximo de presión, alejándose así del foco geométrico.

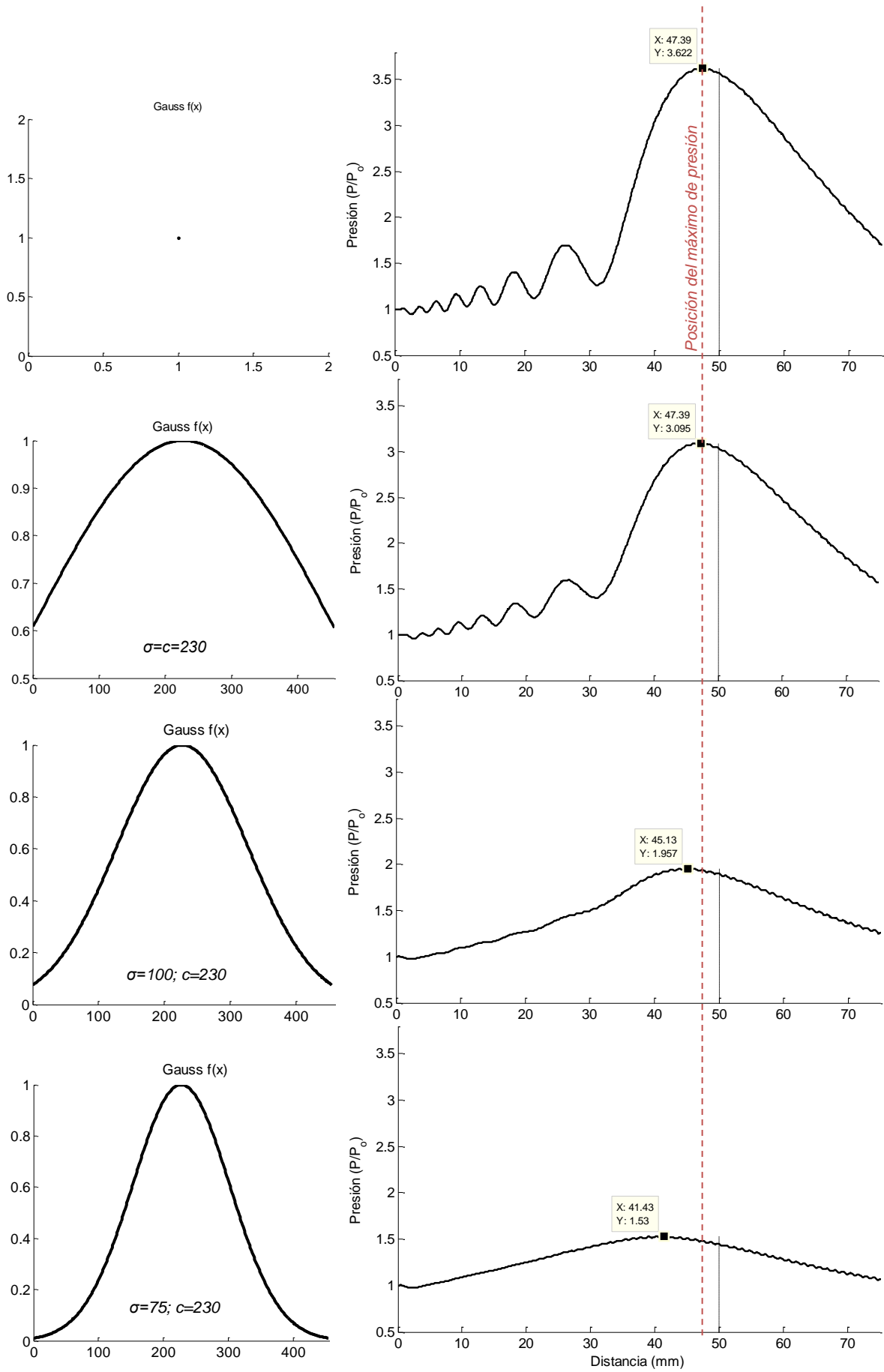


Figura 5.1 Variación de la posición del máximo de presión en función del valor σ .

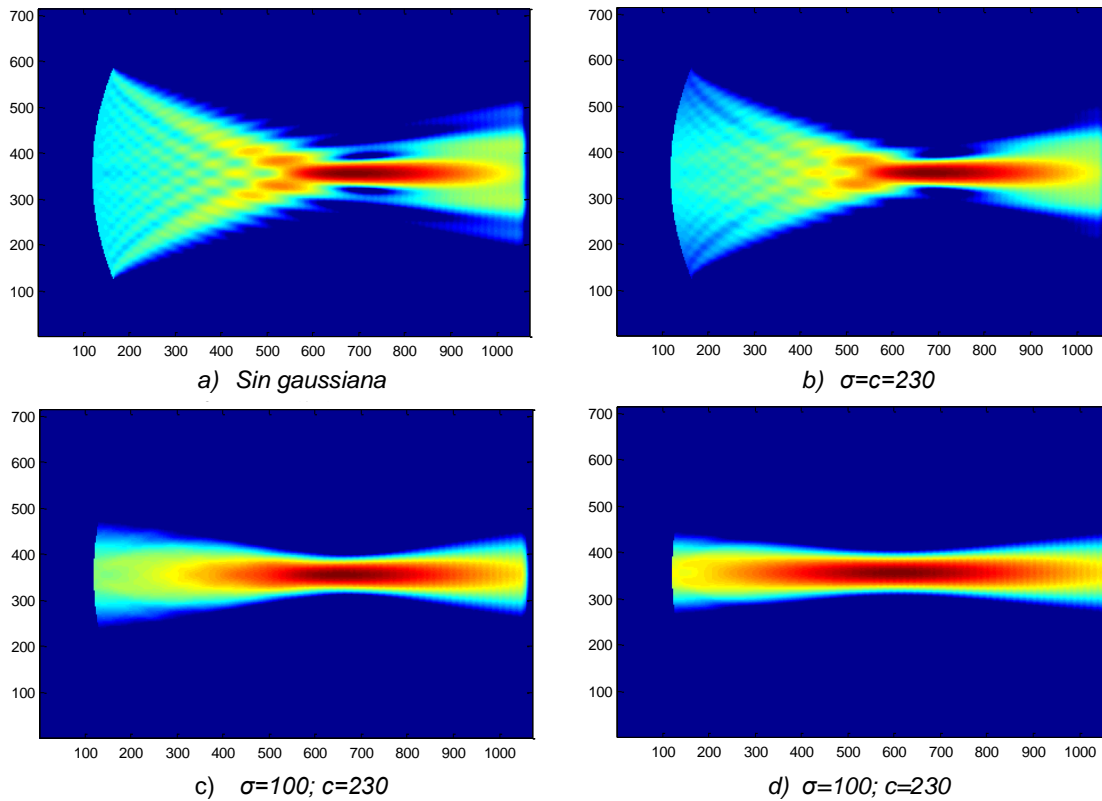


Figura 5.2 Variación del haz ultrasónico a medida que se estrecha la campana
(Código FDTD cedido por Pablo C. Iglesias).

El fenómeno ocurrido en la *figura 5.2* también nos permite explicar el aumento de la zona focal (zona de máxima presión), que, como se puede apreciar en la figura, a medida que el haz se aproxima a un rayo, esta zona tiende a extenderse.

En el *apartado 2.2* mencionamos el efecto que produce el fenómeno de difracción sobre el desplazamiento de la zona focal, y por tanto, del máximo de presión respecto del foco geométrico, para un transductor plano no focalizado. En este caso, aunque el transductor bajo estudio es esférico y focalizado, debemos considerar la posibilidad de que se produzca el fenómeno de difracción en los bordes de la carcasa exterior que rodean la cerámica, y que esta sea otra de las causas del *shift* producido entre ambas posiciones.

Por tanto, que un transductor cumpla unas especificaciones concretas, no sólo depende de la elección de la cerámica y los materiales adecuados, sino que además se debe prever los posibles efectos de difracción con los bordes del cuerpo del transductor, así como los relacionados con la manipulación de los materiales durante el proceso de construcción, ya que en algunas aplicaciones que requieran de una gran precisión, una pequeña desviación del foco podría ser crucial.

Por último, se puede decir que se han cumplido los objetivos de este trabajo, ya que el transductor construido cumple con las especificaciones requeridas para la aplicación a la que estará destinado.

6 LÍNEAS FUTURAS

En el transcurso de este trabajo se ha evaluado el comportamiento del transductor en régimen lineal. Como línea futura se podría ampliar dicho estudio para alta potencia, y así cuantificar el shift producido cuando se trabaja en régimen no lineal.

Además, este transductor será utilizado en investigaciones relacionadas con las técnicas de apertura de la barrera hematoencefálica en primates, para el estudio de las variaciones producidas en la posición focal, por efecto de la propagación del haz a través del cráneo del espécimen bajo estudio (*Macaca Mulatta* o mono Rhesus).

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.M. Pascual-Garvi, F. González-Llanos, R. Prieto-Arribas, S. Cerdán, J.M. Roda. *La barrera hematoencefálica: desarrollo de una estructura que permite la heterogeneidad funcional del sistema nervioso central*. REV NEUROL, vol. 38 (6), pags.: 565-581, 2004
- [2] T. Deffieux y Elisa E. Konofagou. *Numerical Study of a Simple Transcranial Focused Ultrasound System Applied to Blood-Brain Barrier Opening*. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 57, no. 12, December 2010.
- [3] P. C. Iglesias. *Estudio paramétrico de la propagación transcraneal de un haz ultrasónico para la apertura de la barrera hematoencefálica*. Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
- [4] K. A. Fowler, F.H.C. Hotchkiss, T.V. Yamartino, and T. Nelligan. *Important Characteristics of Sound Fields of Ultrasonic Transducers*. Versión web editada y actualizada, 2012.
- [5] Silvia Adrián Martínez. *Caracterización de Haces Ultrasónicas Focalizados de Alto Número de Fresnel*. Universidad Politécnica de Valencia, 2009.
- [6] N. G. Salido. *Análisis Numérico de Parámetros de Calidad en Haces Focalizados*. Universidad Politécnica de Valencia, 2010.
- [7] D. Cathingol, O. A. Sapozhnikov y J. Zhang. *Lamb waves in piezoelectric focused radiator as a reason for discrepancy between O'Neil formula and experiment*. J. Acoust. Soc. Am. vol. 101, pág.: 1286, 1997.
- [8] H. T. O'Neil. *Theory of focusing radiators*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 21, nº 5, Septiembre 1949.
- [9] B. G. Lucas and T. G. Muir, "The field of a focusing source", The Journal of the Acoustical Society of America 72, 1289-1296 (1982).
- [10] W. H. Carter. *Focal shift and concept of effective Fresnel number for a Gaussian laser beam*. Applied optics vol. 21, no. 11, June 1982.
- [11] Y. N. Makov, V. Espinosa, V. J. Sánchez-Morcillo, J. Ramis, F. Camarena. *Strong on-axis focal shift and its nonlinear variation in low-Fresnel-number ultrasound beams*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 119, no. 6, 2006
- [12] G. Kossoff. *Design of narrow-beamwidth transducers*. The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 35, nº 6, Junio 1963.
- [13] C. R. Hill, J. C. Bamber y G. R. ter Haar. *Physical Principles of Medical Ultrasonics*. Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2005.
- [14] C. Rubio, O. Marrero. *Fabricación de Transductores Ultrasónicos para Equipos automatizados de inspección de líneas de Tuberías*. The Open Access NDT Database, 2010.
- [15] L. E. Kinsler, A. R. Frey, Alan B. Coppens y James V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, Ed. John Wiley & Sons, 4ª Edición, 2000.
- [16] M. Postema. *Fundamentals of Medical Ultrasonics*. Spon press, 2011.
- [17] M. D. Gonzalez y A. M. Airabella. *Comparación de filtros FIR de fase lineal, por Método Óptimo y de Ventanas*.

- [18] J. Aparicio, E. García; A. Jiménez, F. Álvarez y J. Ureña. *Modelos de Propagación de Señales Acústicas en Entornos Subacuáticos (I)*. Gigatronic, Mayo 2010.

PÁGINAS WEB:

- [19] Olympus: <http://www.olympus-ims.com>
[20] Müller Instruments: <http://www.mueller-instruments.com>
[21] National Instruments: <http://spain.ni.com>
[22] Wayner Kerr Electronics: <http://www.waynekerrtest.com>

ANEXO. CÓDIGO DE POSTPROCESADO

A continuación se adjunta parte del código utilizado para el procesamiento de los datos experimentales.

```
%%-----%%
% CARGA los datos en una matriz 3D
% Se guarda la información de la forma de onda (amplitud y tiempo)
% para cada punto del plano Z (en función de las posiciones x e y).
%%-----%%

Clc
clear all
close all

%contadores
ctX=1;
ctY=1;

%Muestreo
fs=64d6;
tcaptura=300d-6;

XX = -4:.25:4;
YY = -4:.25:4;

%variables dimensiones
nx=length(XX);
ny=length(YY);
nz=fs*tcaptura;

P=zeros(nz,nx,ny);
t=zeros(nz,1);

cnt=0;
for yy = 1:length(YY)

    for xx= 1 :length(XX)

        disp(['all_FUS/Z=-10.0; x=' sprintf('%0.1f', XX(xx) ) '; y='
        sprintf('%0.1f', YY(yy) ) '.lvm'])
        c=load(['all_FUS/Z=-10.0; x=' sprintf('%0.1f', XX(xx) ) '; y='
        sprintf('%0.1f', YY(yy) ) '.lvm']);
        P(1:nz,ctX,ctY)=c(1:nz,2);
        % disp(['DONE ' num2str( cnt / (fy-iy) / (fx-ix) *100 ) ' %' ]);
        ctX=ctX+1;
        cnt = cnt+1;
    end
    ctX=1;
    ctY=ctY+1;
end

t(1:nz)=c(1:nz,1);
save('Planos/Z_-10.mat');
```

```

%% representación planos
x=-4:.25:4;
plano = zeros(size(P,2),size(P,3));
for ii = 1 : size(P,2)
    for jj=1: size(P,3)
        plano(ii,jj) = max( P(:,ii,jj) );
    end
end

figure
set(gcf, 'Color', [1 1 1])
imagesc(x,x,plano);axis xy image; colormap(hot);
xlabel('eje x','FontSize', 12); ylabel('eje y','FontSize', 12);
title('Señal original, Plano Z=0','FontSize', 12);
% axis([-4 4 -4 4])

%%-----%%
% Filtrado de cada plano, punto a punto
% Se filtra cada forma de onda correspondiente a una posición en x e y
% dentro del plano.
%%-----%%

clc
clear all
close all

load('planos/Z_0.mat');

%contadores
ctX=1;
ctY=1;

N=300; %orden del filtro

%Parámetros del filtro pasobanda
fs=64d6;
f1= 450d3/(fs/2);
f2= 550d3/(fs/2);
fn=[f1 f2];
b = fir1(N,fn,'bandpass', hanning(N+1));
figure;
freqz(b,1,1024)
F=zeros(nz,nx,ny);
x=(1:nz)./fs.*1d6;
%filtrado punto a punto de un plano
for ii=1:size(P,2)
    for jj=1:size(P,3)
        sprintf(['x: %d y: %d'],ii ,jj)
        output = filtfilt(b,1,P(:,ii,jj));
        F(1:nz,ctX,ctY)=output;
        ctX=ctX+1;
    %
    % figure;
    % set(gcf, 'Color', [1 1 1]);
    % subplot(211); plot(x,P(:,ii,jj),'-k'); xlabel('Tiempo (us)');
    % ylabel('Amplitud(V)');title('Señal Original')
    % subplot(212); plot(x,output,'b'); xlabel('Tiempo (us)'); %
    % ylabel('Amplitud(V)'); title('Señal Filtrada')
    % %
    % plot(x,P(:,ii,jj),'-k'); xlabel('Tiempo (us)');
    % %
    % ylabel('Amplitud(V)');
    % %
    % hold on
    % %
    % plot(x,output,'r');

```

```
% %          hold off
% %          legend( 'Señal Original','Señal filtrada');
%          pause

          end
          ctX=1;
          ctY=ctY+1;
        end
save('filtrado/filZ_0.mat');

%% representación planos filtrados
x=-4:.25:4;
for ii = 1 : size(F,2)
    for jj=1: size(F,3)
        colors(ii,jj) = max( F(:,ii,jj) );
    end
end

figure,
set(gcf,'Color',[1 1 1])
imagesc(x,x, colors' );axis xy image;colormap(hot);
xlabel ('eje x','FontSize', 12); ylabel('eje y','FontSize', 12);
title ('Señal Filtrada, Plano Z=0','FontSize', 12);

%%-----%%
% Script que encuentra los máximos de cada señal, punto a punto
%%-----%%

clc
clear all
close all

%cargar plano filtrado
disp('start filtrado')
load('filtrado/filZ_0.mat');
disp('FIN filtrado')

%%
%recortar t=1us la señal al principio y final
fs=64d6;
tcaptura=300d-6;
nz=tcaptura*fs;
sup=1d-6*fs; %número de muestras a suprimir

%umbrales máximo y mínimo
% pmax=1;

%variables dimensiones
nx=size(F,2);
ny=size(F,3);
nz=tcaptura*fs;
nz2=size(F,1)-sup*2;
p=zeros(nz2,1);
vm=zeros(nz2,1);
pp=zeros(nx,ny);
% vmax=zeros(nz2,1);
vm2 = zeros(1,size(F,1));
%buscar los máximos de cada punto, y hacer una media de la señal
%%
disp('start')
```

```

kk = zeros(nx,ny) ;
for ii=1:nx
    for jj=1:ny

%         disp()
        pmax=max(F(sup:nz-sup-1,ii,jj));
        up=pmax-0.05*pmax;
        low=pmax-0.3*pmax;

        for kk = sup+1:size(F,1) -sup -1

            if ( (F(kk,ii,jj)<up) && (F(kk-1,ii,jj)>low) ) && ...
                ( F(kk,ii,jj)>F(kk-1,ii,jj) && F(kk,ii,jj)>F(kk+1,ii,jj) )
                vm2(kk)=F(kk,ii,jj);
            end

%         disp(['it: ' num2str(kk)])
        end

        md=mean( vm2(vm2(:)>0) );
        pp(ii,jj)=md; %plano con el valor medio de cada punto.

% Representación
        figure(2);
        x=-4:.25:4;
        kk(ii,:) = 1 ;
        kk(ii,jj) = 2 ;
        imagesc(x,x,kk') ; axis xy image ; grid on
        xlabel ('eje x'); ylabel('eje y');
        kk(ii,:) = 0 ;

        f = find(vm2(:)>0);
        figure(1),
        set(gcf,'Color',[1 1 1]);
        hold on
            plot(t, F(:,ii,jj),'k')
            plot( t( vm2(:)>0 ) , vm2(vm2(:)>0) , 'ko')
            plot([0 t(end)], [up up], 'r--')
            plot([0 t(end)], [low low], 'b--')
            plot([0 t(end)], [md md], 'g--')
            xlabel('Tiempo(s)');ylabel('Amplitud (V)');
        hold off

%         pause
        cla
        vm2(:)=0 ;
    end
end
save('medias/midZ_0.mat','pp');

% representación planos con valores medios
x=-4:.25:4;
figure,
set(gcf,'Color',[1 1 1]);
imagesc(x,x, pp' );axis xy image; colormap(hot);
xlabel ('eje x','FontSize', 12); ylabel('eje y','FontSize', 12);
title ('Valor medio, Plano Z=0');

```

```

%%-----%%
% Centro: Encuentra el centro de radiación de cada plano
%%-----%%

clc
clear all
close all

load('medias/midZ_0.mat');
nx=size(pp,1);
ny=size(pp,2);
xx=-4:.25:4;
yy=-4:.25:4;

set(gcf,'Color',[1 1 1]);
surf(xx,yy,pp); colormap(hot);%shading flat %efecto de sombreado
distinto
xlabel('Posición en eje x (mm)'); ylabel('Posición en eje y (mm)');
zlabel('Amplitud (V)');

row=zeros(1,nx);
columns=zeros(ny,1);
ant=0;
N=4; %orden del polinomio

for ii=1:nx
    [pol1,S1]=polyfit(xx,pp(ii,:),N);
    f1 = polyval(pol1,xx);
    ap(ii,:)=f1;
end
for jj=1:ny
    [pol2,S2]=polyfit(yy',ap(:,jj),N);
    f2 = polyval(pol2,yy');
    ap(:,jj)=f2;
end
%save('Ajustes/aZ_10.mat','ap');
for ii=1:nx
    for jj=1:ny
        c=xcorr(ap(ii,:),ap(:,jj));
        % disp(['x: ' num2str(ii) ' y: ' num2str(jj) ])
        if sum(c)>ant
            pos=[ii,jj];
            ant=sum(c);
        end
        % pause
    end
end
end
%% plottter
x = linspace(-4,4,33) ;
% figure, plot ( x, pp(pos(1),:) , 'r' )
% hold on
% plot(x,pp(:,pos(2)))

%% Ajuste
N=4; %orden del polinomio
[pol1,S1]=polyfit(xx,pp(pos(1),:),N);
f1 = polyval(pol1,xx);
R_21=1 - S1.normr^2 / norm((pp(pos(1),:) - mean(pp(pos(1),:))) ^2
[pol2,S2]=polyfit(yy',pp(:,pos(2)),N);

```

```
f2=polyval(pol2,yy');
R_22=1 - S2.normr^2 / norm((pp(:,pos(2))) - mean(pp(:,pos(2)))) ^2

max=[max(f1) max(f2)]
med=mean(max)

figure(2),
set(gcf,'Color',[1 1 1]);
surf(xx,yy,ap ); colormap(hot);%,shading flat %efecto de sombreado
distinto
xlabel('Posición en eje x (mm)'); ylabel('Posición en eje y (mm)');
zlabel('Amplitud (V)');

%%-----%%
% Posición real: cálculo de la velocidad de propagación real en el
% medio, y a partir de esta de la posición real de cada plano en el
% eje z, y de la posición absoluta respecto al transductor
%%-----%%

ts=load('tiempo.txt');
A=load('Amplitud.txt');
x=(0:length(ts)-1).*0.001;
[P,S]=polyfit(ts,x',1);
f=polyval(P,ts);
R_2 = 1 - S.normr^2 / norm(x - mean(x))^2;
xx=-10:10;
Ereal=xx.*1e-3+abs(P(2));

save('Ereal.mat','Ereal');
%% Representación
figure(2),
set(gcf,'Color',[1 1 1]);
plot(ts, 1000.*f,'--red')
hold on
plot (ts,1000.*x ,'b' );
title(['Velocidad de Propagación v= ' num2str(P(1))]);
xlabel('Tiempo (s)');ylabel('Desplazamiento (mm)');
legend('Ajuste','Datos')
hold off

%% Representación del ajuste de posiciones
figure(3),
set(gcf,'Color',[1 1 1]);
plot(-10:10, Ereal*1e3 ,'r')
xlabel('Posición relativa del plano (mm)'); ylabel('Posición real del
plano (mm)');
```

```

function Err = funONeil( x0 )
%%-----%%
% funONeil: Expresión analítica de O'Neil
% Esta función permite hallar los valores de apertura y radio de
% curvatura que más se ajusten según la curva de O'Neil a los datos
% experimentales
%-----%%

% % clear
% % close all
% % x0= [50e-3 50e-3];

%% loads
A = load('Amplitud.txt');
A = A; ./max(A);
load('Ereal.mat');
% param = [50e-3 ; 50e-3] ;
lam=1582/507e3;
Nf=(x0(1)/2)^2/lam/x0(2); %n° de fresnell
L=0:1e-6:90e-3;
Po=1;
zg=L/x0(2);
Pz=2*Po*abs((1./(1-zg)).*sin((pi*Nf/2)*((1-zg)./zg)));
Pz = Pz; ./max(Pz);

%Limitación en espacio de la curva de ONeil
aaa=find(L(:)>Ereal(1));
bbb = find(L(:)<Ereal(end));

pos = [ aaa(1), bbb(end) ]
Poneil=Pz(pos(1):pos(2));
Loneil=L(pos(1):pos(2));

ps=find(isnan(Poneil));
if ~isempty(ps)
    Poneil(ps)= (Poneil(ps-1) + Poneil(ps+1) ) /2 ;
end

%% Ajuste
N=4; %orden del polinomio
[pol2,S2]=polyfit(Ereal',A,3);
ajsExpe=polyval(pol2,Loneil); % ajsExpe -> ajuste experimentals
R_22=1 - S2.normmr^2 / norm((A) - mean(A) ) ^2 ;
M=max(ajsExpe)
pR=Loneil( ajsExpe(:)==M ) *1e3

%% Obtener la diferencia entre curva teórica y curva real

% normalizamos
ajsExpe = ajsExpe./max(ajsExpe);
Poneil = Poneil./max(Poneil);
Err= max( abs( (Poneil-ajsExpe)./ajsExpe) ) ;

Pz = Pz./max(Pz);

%% representaciones
% %
% % figure(1);
% % plot(L.*1e3, Pz./(max(Pz)));

```



```
% % hold on
% % plot(Ereal.*1e3,A./(max(A)), 'r');
% % %% Representación del ajuste
% % figure(2),
% % set(gcf, 'Color', [1 1 1]);
% % plot(xx.*1e3, yy, '--red')
% % hold on
% % plot (xx.*1e3, yy , 'g' )
% % hold off
% % figure(3)
% % set(gcf, 'Color', [1 1 1]);
% % plot(xx.*1e3, f2, '--r')
% % hold on
% % plot ( Ereal.*1e3, A , 'g' )
% hold off

figure(4)
cla
    set(gcf, 'Color', [1 1 1]);
    hold on
    plot(Loneil.*1e3, Poneil, 'red')
    plot(Loneil.*1e3, ajsExpe, 'b')
    hold off
    title(['error: ' sprintf('%0.4d' , Err)])
    ylabel ('Presión relativa |p_0/p_i|'); xlabel('Distancia (mm)');
    legend('Oneil', 'Experimental')
    %% Representación final

    figure(5)
    cla
    set(gcf, 'Color', [1 1 1]);
    hold on
    plot(L.*1e3, Pz, 'k-', 'linewidth', 1.5)
    h=plot(Loneil(1:1000:end).*1e3, ajsExpe(1:1000:end), 'ro')
    set(h, 'markerfacecolor', 'r');
    plot([50 50], [0 max(Pz) ], 'k--')
%     plot([pR pR], [0 max(Pz) ], 'r--', 'linewidth', 0.1);
    xlabel('Distancia (mm)'); ylabel ('Presión relativa |p_0/p_i|');
    legend('O'Neil', 'Experimental', 'Focal geométrica')
    hold off

save('Vajustes.mat', 'Pz', 'ajsExpe', 'Loneil');
```