

Estudio del efecto paramétrico en aire y de los efectos de interponer una capa de material tras el transductor

Autor: **Ivan Felis Enguix** {email: ivfeen@upv.es}

Directores: **Miquel Ardid Ramírez, Juan Antonio Martínez Mora**

Resumen

En este trabajo se exponen los estudios realizados del efecto paramétrico en el aire, empleando distintos transductores y configuraciones. En concreto, a partir de la emisión de una onda de dos tonos próximos, se analizan las propiedades (directividad, atenuación, distorsión armónica) de la frecuencia diferencia (paramétrica) resultante de la demodulación no lineal del medio, así como el ancho de banda del paramétrico en cada transductor empleado. Los resultados se comparan con los predichos por dos modelos teóricos: Westervelt y KZK en aproximación cuasi-lineal. Además, como nueva línea de investigación respecto a los trabajos sobre el tema, se analiza la influencia de la interposición de una capa de material de agua o glicerina, con distintos espesores, frente al transductor.

Palabras clave: acústica no lineal, efecto paramétrico, audio paramétrico.

Abstract

In this work we present a study of the parametric effect in air using different transducers and configurations. Specifically, we emit a two close tone waves and we analyze the properties (directivity, attenuation, harmonic distortion) of the difference frequency (parametric frequency) resulting from the nonlinear demodulation by the medium. Also we analyze the bandwidth of the parametric frequency for each transducer used. The results are compared with the predictions of two theoretical models: Westervelt and KZK in quasi-linear approximation. Moreover, as a new line of research about this subject, we analyze the influence of an intermediate layer of water or glycerine with different thicknesses in front of the transducer.

Keywords: nonlinear acoustics, parametric array, parametric audio, scattering of sound by sound.

PACS no. 43.25.+y, 43.35.+d

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Hablar de *efecto paramétrico* supone hablar de un campo de la acústica no lineal que ha tenido un gran auge en los últimos 50 años, tanto en sus explicaciones teóricas como en las aplicaciones obtenidas. Éste trabajo pretende exponer y analizar algunas de las consecuencias que forman parte de la fenomenología asociada a dicho efecto; en concreto, se estudian los efectos producidos por la interacción, en el aire, de dos tonos puros de alta frecuencia, concentrándose en las propiedades de la onda con *frecuencia diferencia* o *paramétrica* resultante, fundamento del llamado *array paramétrico*.

En primer lugar, después de una revisión a la bibliografía y contextualización del efecto paramétrico, en el **apartado 2** se exponen sucintamente las bases teóricas del mismo así como dos casos particular que permite acercarnos a los resultados matemáticos y consecuencias físicas asociadas al problema (solución de Westervelt y solución KZK). Una exposición más profunda de los mismos excedería, por distensión, de los objetivos para un trabajo de éstas características. Adicionalmente, dada las particularidades de las medidas (emisión de ultrasonidos y recepción del espectro audible simultáneamente), se ha diseñado un montaje de medición e implementado un software para la automatización y control de los experimentos. En el **apartado 3** se expone la metodología empleada. Los resultados experimentales se han contrastado tanto con los modelos analíticos no lineales comentados, como con simulaciones numéricas del ámbito de la acústica lineal en el software COMSOL Multiphysics 4.0, teniendo en cuenta la geometría concreta de cada experimento, cuyos resultados permiten contrastar claramente los comportamientos no lineales de los lineales. Finalmente, en el **apartado 4** se exponen y comentan los resultados obtenidos de una parte significativa del total de los experimentos realizados para entender el efecto paramétrico en aire.

Además de experimentar con la emisión paramétrica en aire para contrastar los datos obtenidos con las teorías, como aspecto innovador respecto a los trabajos anteriores sobre el audio paramétrico se han realizado medidas disponiendo una capa intermedia de distintos materiales frente al transductor. Con ello, se introduce una nueva línea de investigación que, dados los resultados que se exponen en las **conclusiones**, puede tener su interés para posteriores investigaciones.

Con todo, el objetivo de este Trabajo Fin de Máster del Máster en Ingeniería Acústica de la Escuela Politécnica Superior de Gandia perteneciente a la Universitat Politècnica de València, del cual este texto constituye un resumen, ha sido doble: por una parte asentar parte de los conocimientos adquiridos en el periodo de docencia y, por otra, introducirse en el ámbito de la investigación de fenómenos acústicos en general y de acústica no lineal en particular.

Notación empleada

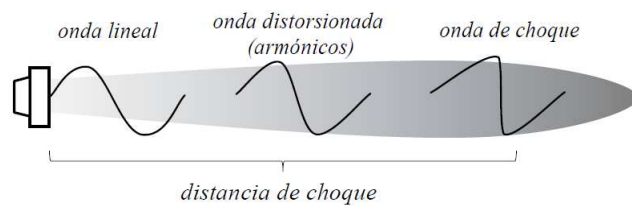
p'	presión acústica en general.	η, ζ	coeficientes de viscosidad de cizalla y de volumen.
p_p, f_p, k_p	amplitud, frecuencia y número de onda de la onda portadora.	C_p, C_v	calor específico a presión y a volumen constante.
p_0, f_i, k_i	amplitud, frecuencia y número de onda de las ondas primarias.	τ	coordenada espacial “viajera”: $\tau = x - c_0 t$, siendo x y t la coordenada espacial y temporal.
ρ_0	densidad del medio.	c_0	velocidad del sonido para pequeñas perturbaciones.
M	número de Mach acústico.	∇_{\perp}	operador laplaciano perpendicular a la dirección de propagación.
β	parámetro de no linealidad: $\beta = \frac{\gamma + 1}{2} = 1 + \frac{B}{2A}$, donde B/A está tabulado.	$E(t)$	modulación envolvente.
θ	representa la disipación: $\theta = \xi + \frac{4}{3}\eta + \kappa \left(\frac{1}{C_v} - \frac{1}{C_p} \right)$	α	coeficiente de absorción característico de la onda primaria.
\mathcal{K}	conductividad térmica.		

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS: EL ARRAY PARAMÉTRICO

2.1 Planteamiento del problema: las 3 distancias características

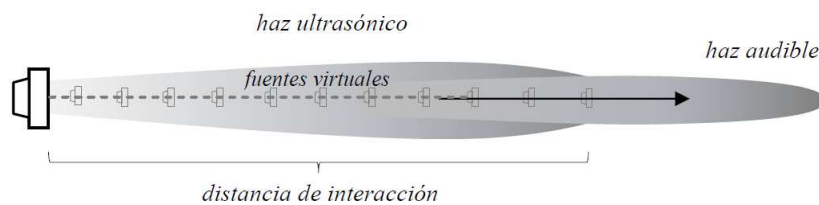
Dado que el efecto paramétrico en estudio es un proceso de propagación y generación de ondas no lineal, para su descripción es necesario tener presente la fenomenología asociada a las siguientes distancias características: la distancia de choque, la distancia de absorción y la distancia de Rayleigh.

- Distancia de choque: cuando una onda armónica de amplitud finita (onda primaria) se propaga, su perfil cambia progresivamente, haciéndose cada vez más abrupto hasta alcanzar una forma en “diente de sierra” cuando la onda recorre la conocida *distancia de choque*. En el dominio de frecuencias, este fenómeno se traduce en la aparición de armónicos o distorsión, de modo que si la onda inicial está compuesta por dos frecuencias f_1 y f_2 , en la propagación aparecerán un conjunto de frecuencias secundarias combinación de éstas: $|n \cdot f_1 \pm m \cdot f_2|$ con n y m enteros [12].



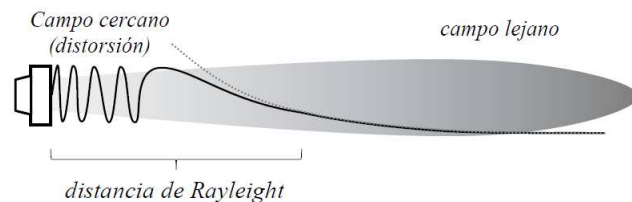
$$L_S = \frac{1}{\beta k M} \quad (1)$$

- Distancia de absorción: a medida que se propaga la onda, cada una de las frecuencias que aparecen en el medio son absorbidas con distinta intensidad por medio, de modo que las frecuencias mayores f_1, f_2, f_1+f_2 decaerán más rápidamente que la frecuencia diferencia $|f_1-f_2|$ y, por tanto, ésta se podrá propagar a mayores distancias. Por ello, el proceso de generación no lineal de nuevas frecuencias está limitado a una distancia respecto al transductor llamada *distancia de interacción* o *longitud de absorción*. Así, este proceso puede ser visualizado como la interacción de un conjunto de fuentes acústicas virtuales (array) contenidas a lo largo de la longitud de absorción [1,10].



$$L_A = \frac{1}{\alpha} \quad (2)$$

- Distancia de Rayleigh: dado que estamos estudiando un fenómeno de emisión, debe tenerse en cuenta el campo cercano del transductor para las frecuencias primarias radiadas, donde la radiación está contenida principalmente en un cilindro de longitud la *distancia de Rayleigh* y de sección la de la superficie del transductor mientras que, en el campo lejano, empieza la divergencia esférica de la radiación y la energía se expande más rápidamente [10].



$$L_R = \frac{ka^2}{2} \quad (3)$$

Teniendo en cuenta el valor de estas tres distancias características para cada problema estudiado, podremos utilizar unos modelos matemáticos u otros para predecir correctamente el campo acústico de las ondas secundarias [8].

2.2 Formulación del problema

Dado que todo el proceso tiene lugar en un medio fluido, el punto de partida serán las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos. A partir de éstas y de una ecuación de estado del medio, tenemos el conjunto de ecuaciones necesario para plantear el problema acústico. Admitiendo que el fenómeno acústico tiene lugar en un medio adiabático, podemos escoger sucesivos términos de dicha ecuación de estado y, combinándola con las anteriores, obtener otro conjunto de ecuaciones particulares que resuelven problemas acústicos no lineales, con distinto rango de validez [9]:

- Ecuación de Westervelt (sin disipación): $\nabla^2 p' - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = -\frac{\beta}{\rho_0 c_0^4} \frac{\partial^2 p'^2}{\partial t^2}$ (4)

- Ecuación de Burgers (con disipación): $\frac{\partial p'}{\partial x} = -\frac{\beta}{\rho_0 c_0^2} p' \frac{\partial p'}{\partial \tau} + \frac{\theta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p'}{\partial \tau^2}$ (5)

- Ecuación de KZK (con disipación y difracción): $\frac{\partial^2 p'}{\partial \tau \partial x} = \frac{\beta}{2\rho_0 c_0^2} \frac{\partial^2 p'^2}{\partial \tau^2} + \frac{\theta}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^3 p'}{\partial \tau^3} + \frac{c_0}{2} \nabla_{\perp}^2 p'$ (6)

2.3 Soluciones aproximadas

Para resolver cualquiera de las anteriores ecuaciones y obtener una expresión para el campo acústico de la frecuencia paramétrica, es necesaria una expresión para la onda primaria que excita al medio. En este texto se consideran dos casos:

- Modulación de amplitud (*self-demodulation*): es un método general para la generación no lineal de una frecuencia audible a partir de frecuencias ultrasónicas [7], que consiste en emitir una onda primaria ultrasónica modulada en amplitud mediante una frecuencia audible, que es demodulada en el medio a través de los efectos no lineales, proceso llamado *auto-demodulación*:

$$p_i(t) = p_p E(t) \sin(2\pi f_p t - k_p x) e^{-\alpha x} \quad (7)$$

donde $E(t)$ es la modulación envolvente, definida por la onda moduladora. Tal y como exponen algunos autores [6], se utiliza la técnica de modulación de *doble banda lateral sin portadora* (DSBAM-SC) con lo que la envolvente toma la forma: $E(t) = mg(t - x/c_0)$, siendo m la profundidad de la modulación y $g(t - x/c_0)$ la señal de audio deseada.

- Interacción no lineal de dos ondas monocromáticas (*scattering of sound by sound*): es una técnica más sencilla, pero relevante por su relación con la teoría del propio Westervelt, que consiste en emitir dos ondas armónicas de frecuencias ultrasónicas dadas, siendo el medio quien hace interaccionarlas no linealmente dando lugar a la aparición de la frecuencia diferencia.

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= p_0 e^{-\alpha x} \cos(2\pi f_1 t - k_1 x) \\ p_2 &= p_0 e^{-\alpha x} \cos(2\pi f_2 t - k_2 x) \end{aligned} \right\} \text{ondas primarias} \rightarrow p_i = p_1 + p_2 \quad (8)$$

Ambas técnicas están relacionadas de modo que la técnica de interacción no lineal de dos ondas monocromáticas es un caso particular del método de modulación de amplitud. Así, desarrollando la suma en (8) obtenemos que la onda primaria del caso particular equivale a una onda portadora cosenoidal de frecuencia $f_+/2 = (f_1 + f_2)/2$, modulada en amplitud por una onda sinusoidal de frecuencia $f_d/2 = (f_1 - f_2)/2$, con el doble de amplitud. Además, se observa que la onda secundaria p_d no corresponde exactamente con la envolvente de la onda primaria p_i y que la amplitud de ésta es el doble de la amplitud de las ondas primarias p_1 y p_2 .

2.4 Solución de la ecuación de Westervelt y de la KZK

A partir de las anteriores tres ecuaciones (4,5,6) podemos obtener distintas expresiones teóricas que describen el efecto paramétrico, cada una con su alcance y limitaciones. En este trabajo se analiza una solución de la ecuación más sencilla de ellas, la ecuación de Westervelt, y de la más compleja, la ecuación KZK. Otras soluciones, partiendo de la ecuación KZK pueden verse en [9,14,15,17].

- Solución a la ecuación de Westervelt, en campo lejano:

$$p_d(r, \theta) = -\frac{S\beta p_0^2 (2\pi)^2 f_d^2 e^{i(2\pi f_d t - k_d r)}}{8\pi\rho_0 c_0^4 r \alpha} \left[\frac{1}{1 + \frac{k_d}{\alpha} \sin^2(\theta/2)} \right] \quad (9)$$

Esta expresión pone de manifiesto que el parámetro f/f_d determina la directividad del paramétrico de modo que cuanto más próxima esté la frecuencia primaria media f y la frecuencia diferencia f_d más estrecha será la directividad de ésta. Además, para una misma relación f/f_d pero mayor absorción del medio es menor la directividad del paramétrico. La siguiente figura muestra la directividad de los paramétricos estudiados en este trabajo según la teoría de Westervelt:

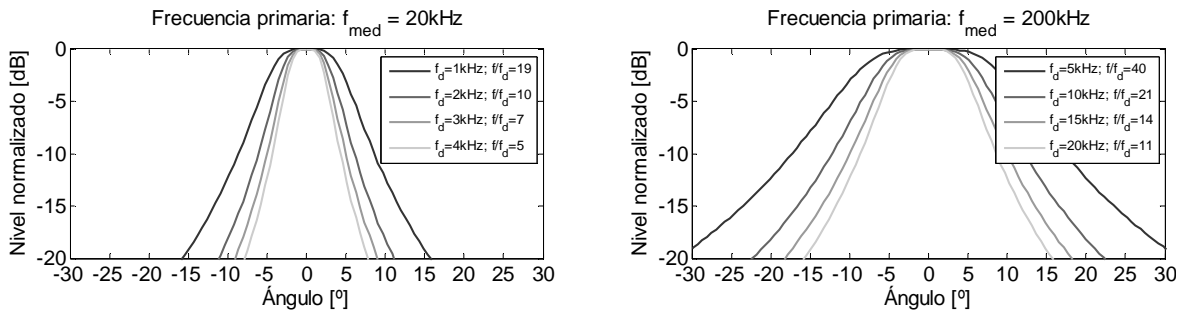


Fig.1. Representación de la directividad del paramétrico según la aproximación de Westervelt.

- Solución de la ecuación KZK, suponiendo que la no linealidad del medio es pequeña y que la solución en campo lejano se aproxima mediante una solución cuasi-lineal, obtenida de [9] es:

$$p_d(r, \theta) = -\frac{j\beta p_0^2 (2\pi)^2 f_d^2}{4\rho_0 c_0^4 r \alpha} D_W(\theta) D_A(\theta) \exp\left(-\frac{jk_d \tan^2 \theta}{2} r\right) \quad (10)$$

donde:

$$D_A(\theta) = \frac{2J_1(k_d a \tan \theta)}{k_d a \tan \theta} \quad \text{factor de apertura, con } J_1 \text{ la función Bessel de primera especie y orden cero.} \quad (11)$$

$D_W(\theta)$ directividad obtenida según la teoría de Westervelt.

Entonces si se mide en campo lejano del paramétrico la directividad tenderá al factor D_W mientras que para puntos situados en campo cercano la directividad de éste será más ancha y se aproximará al factor de apertura D_A [15]. La siguiente figura muestra la influencia de la directividad de cada uno de éstos términos y la comparación con la directividad de un pistón plano:

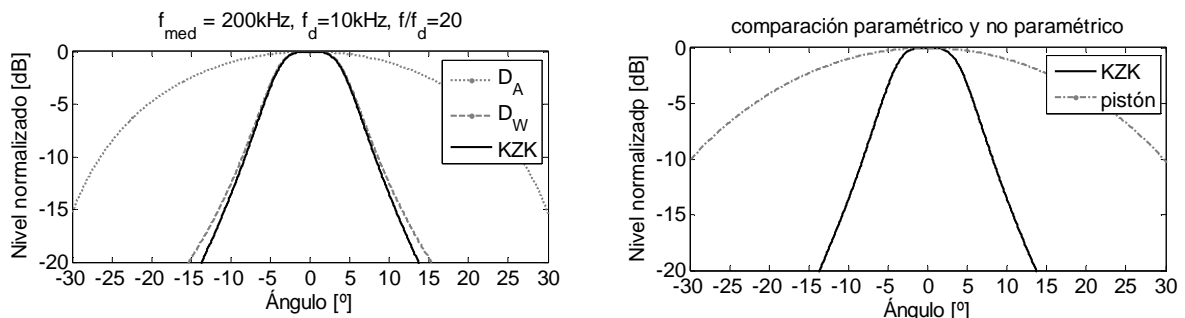


Fig.2. Representación de la directividad del paramétrico según la solución aproximada de la ecuación KZK (izquierda) y contraste con la directividad de un pistón plano (derecha).

3. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA

3.1 Metodología experimental: montaje y conexionado

Para obtener datos experimentales con el fin de contrastarlos con el modelo teórico expuesto en la sección I, ha sido necesaria la implementación de una metodología específica que contemple la posibilidad emitir en el rango de los ultrasonidos y registrar la frecuencia paramétrica así como analizar sus propiedades (directividad, atenuación, ancho de banda, etc.). Todas las medidas se han realizado en el ambiente acústico que ofrece la cámara anecoica de la EPSG. El siguiente esquema ilustra el montaje y conexionado de los distintos equipos utilizados:

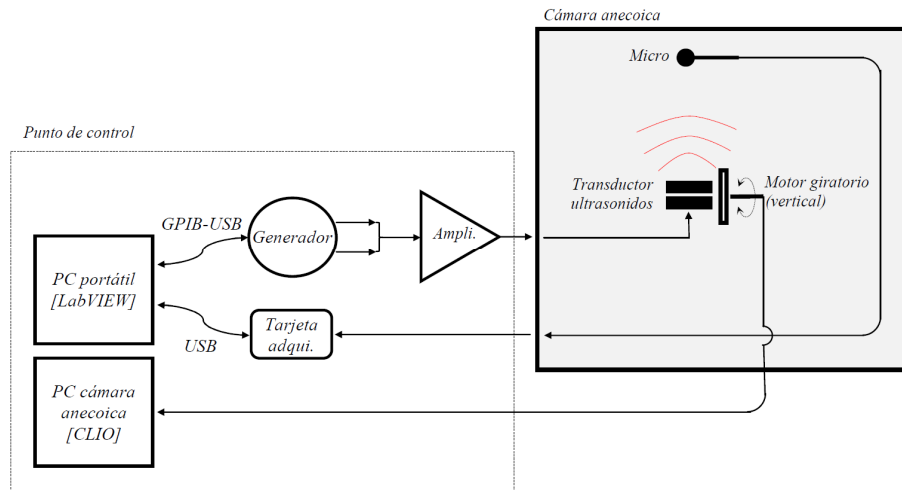


Fig. 3. Esquema del montaje para la realización de las medidas.

3.2 Interior de la cámara: diseño del instrumental de medición

Dado que las medidas se han realizado tanto emitiendo directamente al aire, como a través de un medio intermedio (agua y glicerina), éstas han tenido que efectuarse emitiendo hacia arriba para evitar derrames e inclinación de la superficie del fluido, por lo que ha sido necesario construir un dispositivo para medir la directividad y atenuación en un plano vertical. Este sistema posibilita ubicar el micrófono a distintas distancias del emisor y vincularlo al motor de giro del laboratorio para controlar el ángulo entre el eje de emisión y el micrófono. La siguiente imagen muestra el diseño de dicho instrumento y su ubicación en la cámara anecoica así como las configuraciones de emisión:

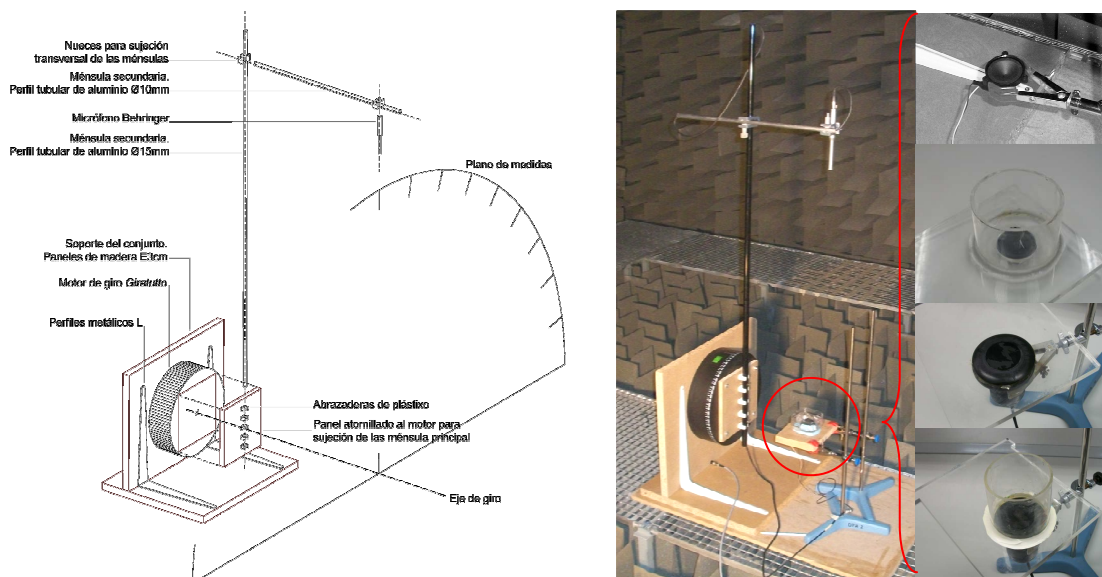


Fig. 4. Axonometría y fotografía del montaje realizado para medir directividad en un plano vertical.

4. MEDIDAS

4.1 Experimentos emitiendo directamente en aire (Transductor KSN 1005A y P319)

En este punto se exponen los resultados obtenidos de las medidas realizadas con el transductor KSN 1005A (alta frecuencia) y con el transductor P319 (baja frecuencia) emitiendo directamente al aire con distintos pares de frecuencias primarias. Se analiza el ancho de banda, la distorsión armónica, la directividad y la atenuación de la frecuencia diferencia (paramétrico) resultante de emitir con señales compuestas de dos frecuencias (primarias) cercanas a las resonancias de ambos transductores (del orden de 20kHz para el tweeter y del orden de 200kHz para el P319). Además, se compara con los resultados obtenidos de la teoría lineal y los predichos por las teorías del array paramétrico comentadas anteriormente.

Las siguientes imágenes muestran las configuraciones de los experimentos:

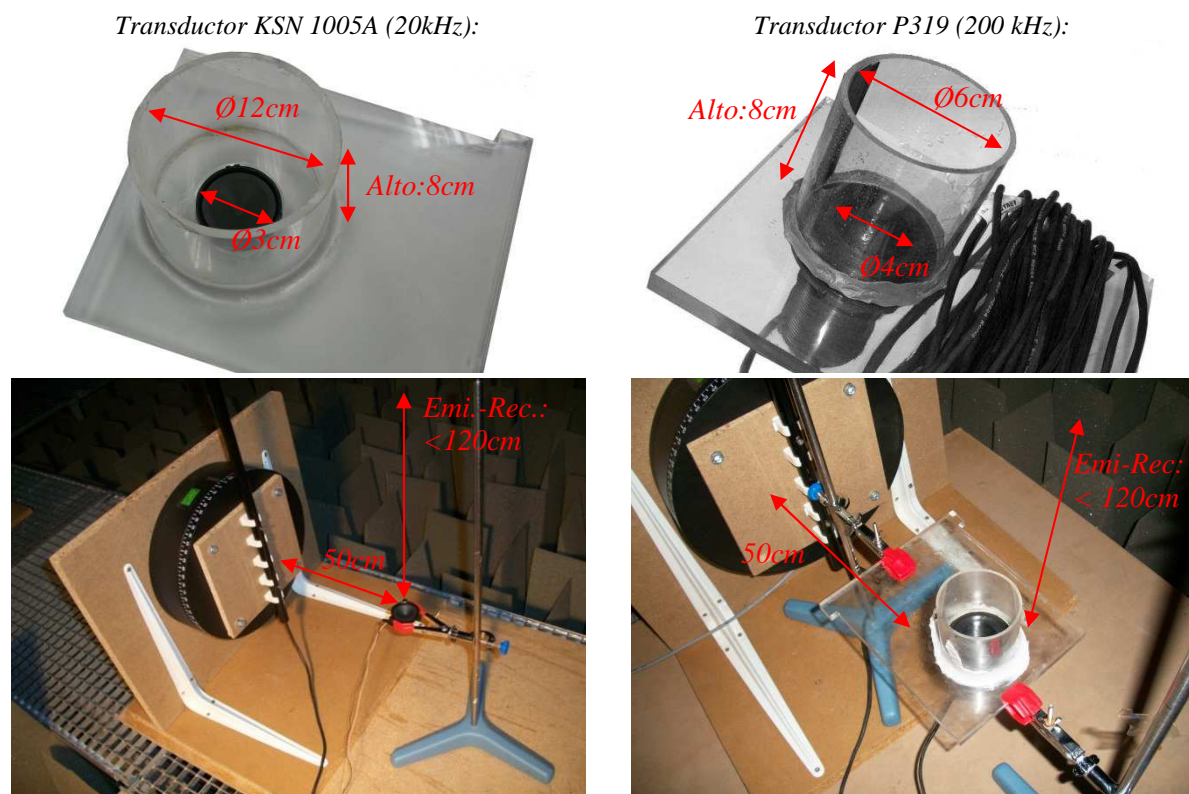


Fig.5. Detalle de los montajes experimentales con los transductores de baja y alta frecuencia.

Aunque se ha medido con tubo y sin tubo, destacamos que el diámetro de los tubos de metacrilato no influye notoriamente en el lóbulo principal del campo acústico generado por los transductores emitiendo en sus frecuencias de resonancia, tal como se ha podido comparar midiendo con y su tubo y mediante simulaciones en régimen lineal.

Respuesta en frecuencia y eficiencia

En las siguientes imágenes, se representa la respuesta en frecuencia de cada transductor utilizado emitiendo con señales de dos frecuencias primarias f_1 (constante) [—] y f_2 (variable) [—] y registrando el nivel de la frecuencia diferencia f_d [—], registrando a 90cm de la emisión. Además se superpone la “forma” de la admitancia eléctrica del transductor [—] para las frecuencias f_2 .

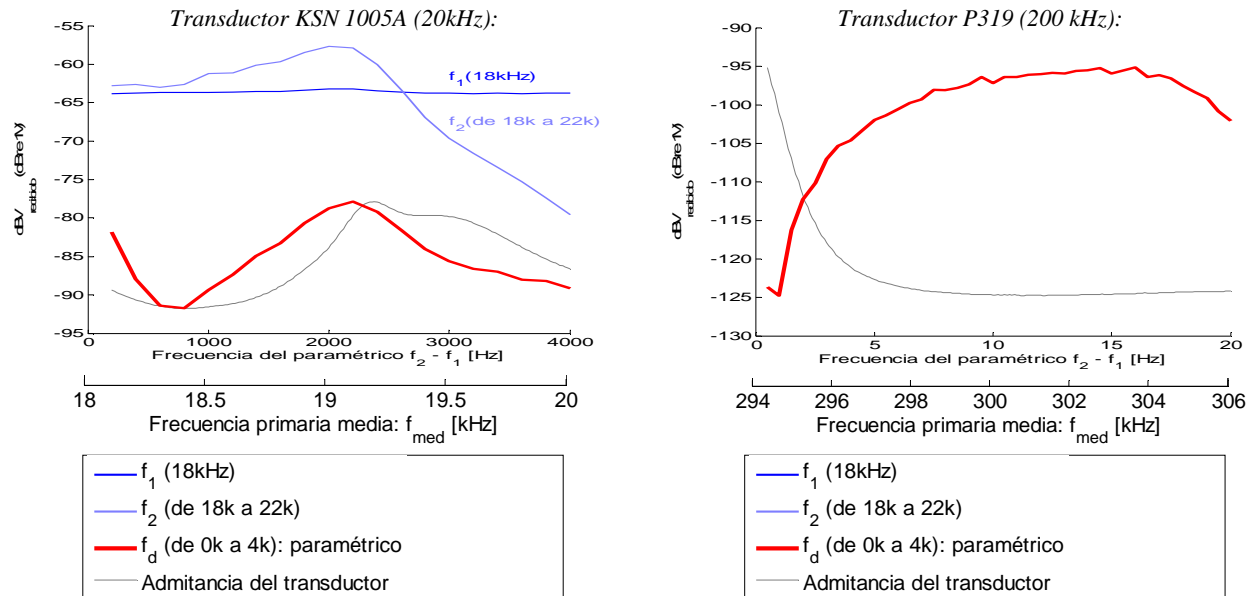


Fig.6. Ancho de banda de los paramétricos para ambos transductores.

En el caso del tweeter (izquierda) se observa la relación entre la admitancia eléctrica del transductor para las frecuencias primarias y para las frecuencias paramétricas, obteniendo una amplitud del paramétrico de entre -10 dB y -25 dB respecto al haz primario, lo que equivale a una eficiencia respecto al voltaje de la señal enviada entre 0.0002% al 0.0008%.

En el caso del transductor P319 (derecha) se observa que el paramétrico empieza a ser suficientemente plano a partir de unos 6 kHz, es decir, con una relación $f_d/f_{med}=0.03$, correspondiendo con el tramo donde la impedancia también es plana. Considerando que la ganancia del amplificador es de 50dB, y dado que no se ha medido directamente la presión acústica de las frecuencias primarias, se obtiene una eficiencia del paramétrico respecto al voltaje de la señal enviada amplificada de 0.00001%.

Las siguientes figuras muestran la amplitud del voltaje recibido de la señal paramétrica respecto al voltaje total de la señal enviada:

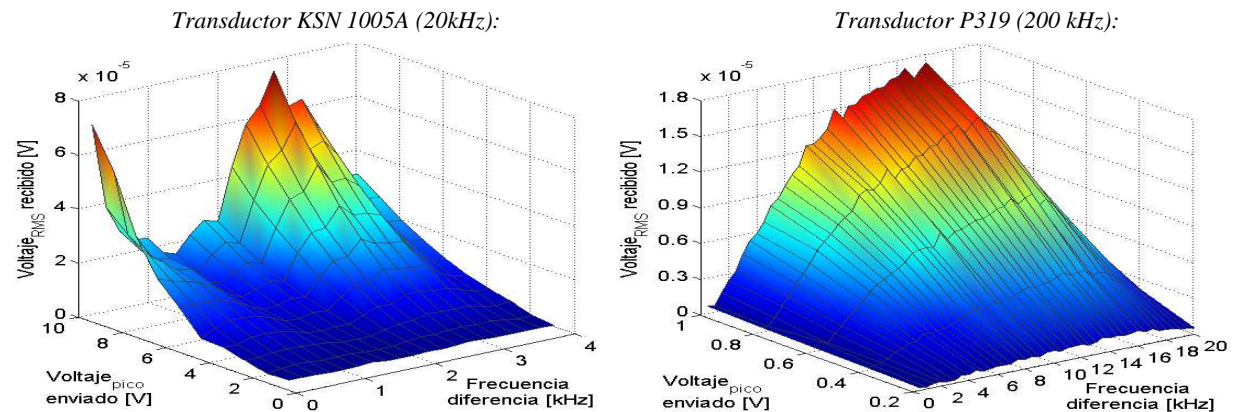


Fig.7. Amplitud del paramétrico recibido frente a distintos voltajes de la señal primaria enviada.

Distorsión y frecuencias secundarias

En las siguientes imágenes, se representa la aparición de las frecuencias armónicas $2 \cdot f_d$, $3 \cdot f_d$ de las frecuencias paramétrica $f_d = f_2 - f_1$ [—], así como de la combinación de frecuencias $f_1 - f_d = 2 \cdot f_1 - f_2$, para cada transductor, y con el mismo rango de frecuencias que el analizado en la página anterior.

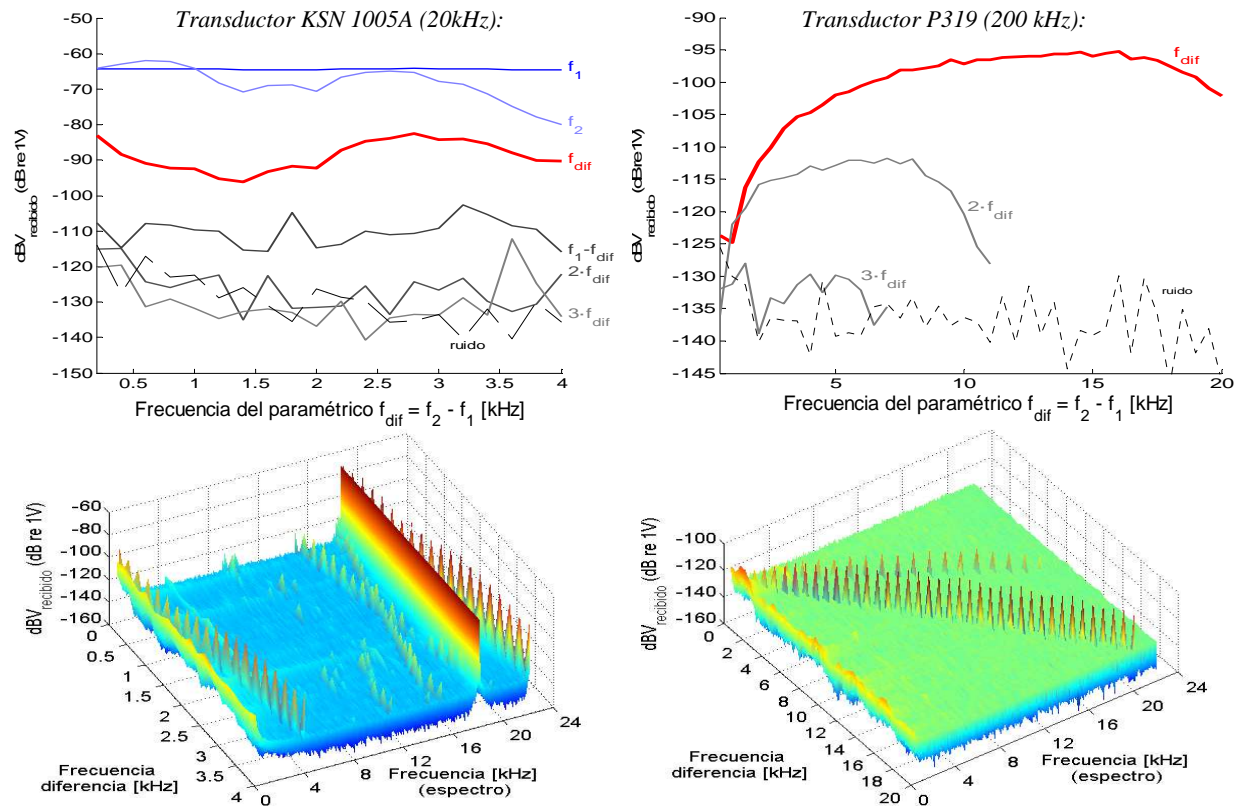


Fig.8. Ancho de banda de los paramétrico y de sus armónicos emitiendo con el transductor.

En ambos casos, se observa que existen frecuencias armónicas del paramétrico $2 \cdot f_d$ aunque de poca amplitud, mientras que las frecuencias combinadas con las primarias $f_1 - f_d$, $f_1 - 2 \cdot f_d$ tienen más influencia, introduciendo éstas la mayor parte de las frecuencias distintas a la frecuencia diferencia en el rango audible $f < f_1$. Este hecho se puede analizar a través de la distorsión armónica total (THD) respecto a la frecuencia diferencia de interés en cada caso, tal como muestran las siguientes imágenes.

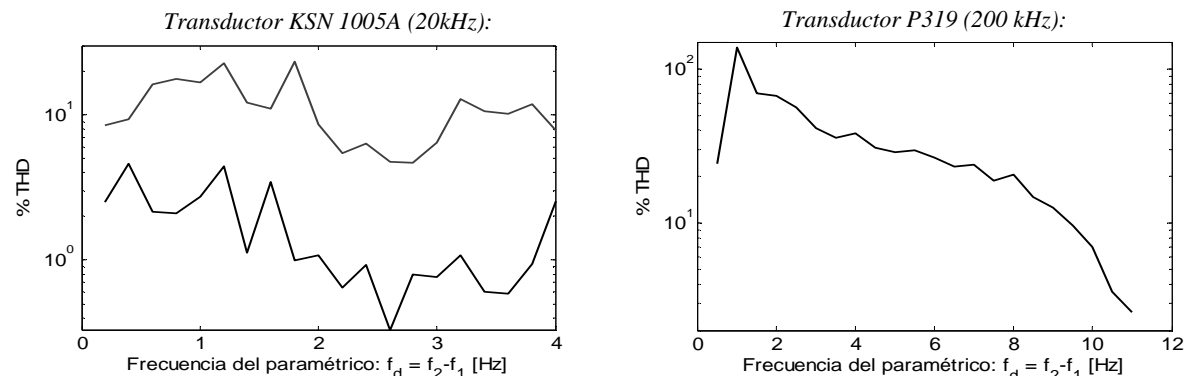


Fig.9. THD de los paramétricos.

En el caso del tweeter (izquierda) se observa que la THD es de 10% aproximadamente, para todas las frecuencias medidas; mientras que en el caso del transductor P319 (derecha) se observa que la THD es crítica para frecuencias inferiores a 2kHz y disminuye monótonamente para mayores frecuencias del paramétrico.

Directividad

En las siguientes imágenes, se representa la directividad registrada para la frecuencia diferencia $f_d=1\text{ kHz}$, 3 kHz , 10 kHz y 15 kHz [•••] emitiendo con ambos transductores con distintos pares de frecuencias primarias f_1 [•••] y f_2 [•••]. Además, se muestran los resultados teóricos de la directividad del paramétrico según la aproximación de Westervelt [—] y el factor de apertura [—].

Transductor KSN 1005A (20kHz):

Transductor P319 (200 kHz):

$f_d=1\text{ kHz}$, $f_1=18\text{ kHz}$, $f_2=19\text{ kHz}$

$f_d=3\text{ kHz}$, $f_1=18\text{ kHz}$, $f_2=21\text{ kHz}$

$f_d=10\text{ kHz}$, $f_1=197\text{ kHz}$, $f_2=207\text{ kHz}$

$f_d=15\text{ kHz}$, $f_1=197\text{ kHz}$, $f_2=212\text{ kHz}$

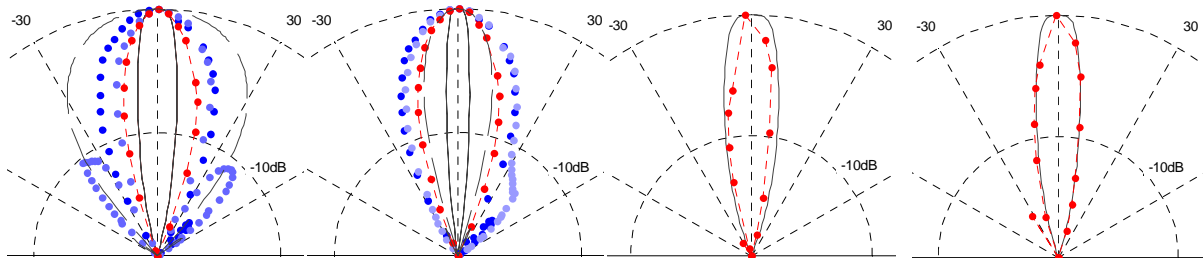


Fig.10. Directividad de los paramétrico de 1kHz, 3kHz, 10kHz y 15kHz.

En el caso del KSN, la directividad del paramétrico es tan estrecha como la de las frecuencias primarias, aunque no tanto como la prevista por Westervelt (no es aplicable en medidas en campo cercano). Además, para mayor frecuencia del paramétrico, éste se aproxima más al factor de apertura. En el caso del transductor P913 se observa que los datos experimentales sí se ajustan bastante bien a la directividad obtenida según la teoría de Westervelt dado que, aunque rigurosamente no estamos en campo lejano ($L_{abs}=1,45m$), las frecuencias primarias han sufrido gran absorción con lo que el paramétrico ya está casi formado y empieza a ser aplicable la aproximación de campo lejano.

Atenuación

A continuación, se representa la atenuación registrada para las frecuencias diferencia $f_d=1\text{ kHz}$, 3 kHz , 10 kHz y 15 kHz [•••] así como de las frecuencias primarias medidas [•••, •••] y simuladas [—, —], y la atenuación del paramétrico según la aproximación de Westervelt [—].

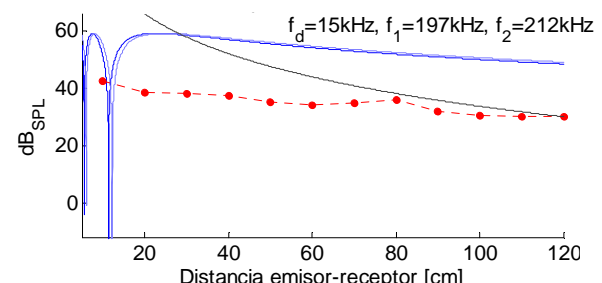
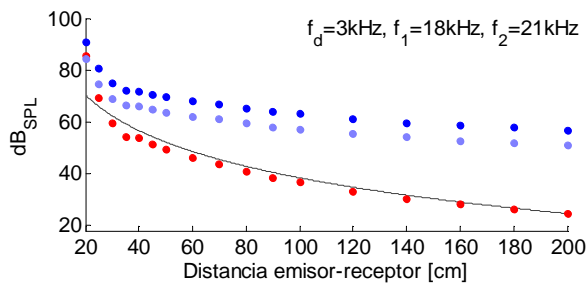
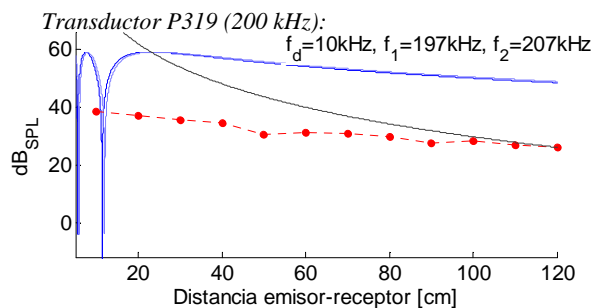
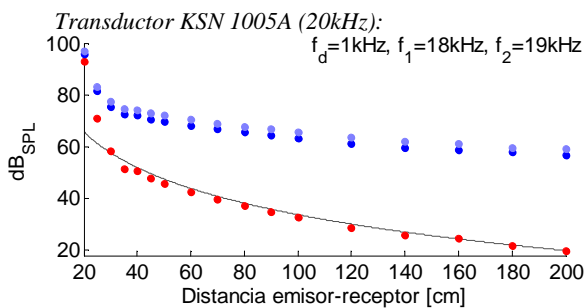


Fig.11. Atenuación de los paramétrico de 1kHz, 3kHz, 10kHz y 15kHz.

Para el KSN el paramétrico decae inicialmente más rápidamente que las frecuencias primarias, es decir, no se observa una atenuación menor dado que estamos midiendo en campo cercano del paramétrico ($L_{abs}=29m$) y éste tiende a estabilizarse a mayores distancias. Además, existe cierta influencia del campo cercano del transductor ($L_{Ray}\approx 20cm$). Con el P319 la frecuencia diferencia decae aproximadamente igual que las frecuencias primarias simuladas, y tiende a comportarse como la prevista por Westervelt cuando estamos cerca del campo lejano del paramétrico ($L_{abs}=1,45m$).

4.3 Emitiendo con material intermedio (transductor P319)

En estos experimentos, se dispone un espesor variable de material frente al transductor. Según los comentarios del punto anterior, partimos de que las paredes del recipiente no influyen decisivamente en la directividad de las frecuencias primarias. Los materiales intermedios utilizados han sido agua destilada y glicerina, con espesores entre 15 mm y 60 mm en pasos de 5 mm. La configuración de estas medidas es similar a las anteriores. En la fotografía mostramos uno de los montajes emitiendo con 2 cm de glicerina.

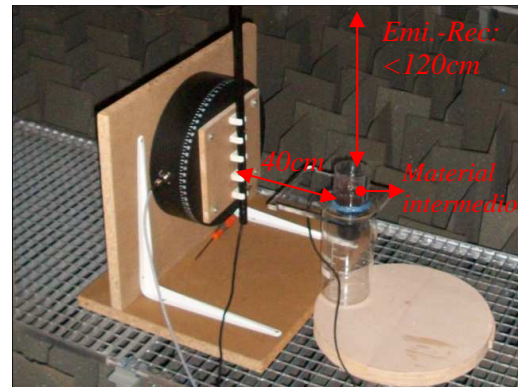


Fig.12. Montaje con material intermedio.

Respuesta en frecuencia, eficiencia y distorsión

Se analiza la respuesta en frecuencia del transductor emitiendo con dos frecuencias: f_1 de 197 kHz y f_2 de 197.1 kHz hasta 207 kHz; con distintos espesores de agua [—] y de glicerina [—] frente al transductor, registrando el nivel de la frecuencia diferencia f_d de 100 Hz hasta 20 kHz, así como de las frecuencias armónicas de esta $2 \cdot f_d$ y $3 \cdot f_d$, normalizados respecto a las amplitudes de dichas frecuencias registradas sin material intermedio, obtenemos:

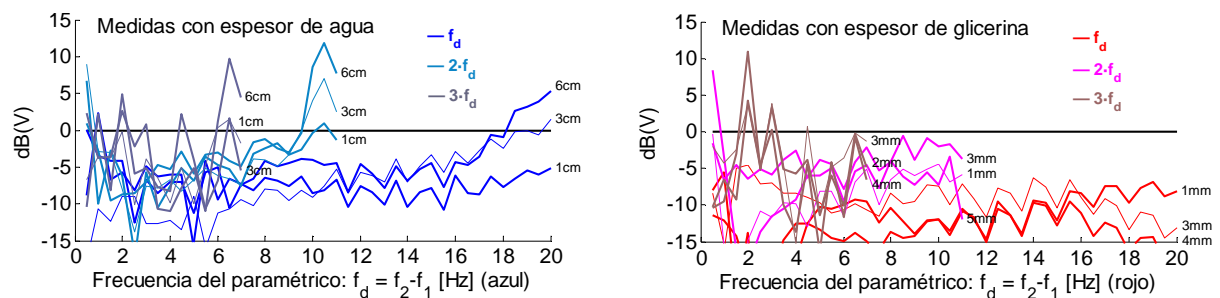


Fig.13. Ancho de banda normalizado del paramétrico y sus armónicos.

En todos los casos aparece un rizado frecuencial, relacionado con el espesor del material intermedio. Mientras que al emitir con glicerina la eficiencia del paramétrico es, en general, menor que con agua (mayor absorción), para ciertos espesores de agua (>40 mm) la amplitud del paramétrico registrado es mayor que la misma emitida directamente al aire; este efecto puede ser debido tanto a que la adaptación de impedancias es mejor (el transductor P319 está diseñado para trabajar en agua), como a que se produce un acople entre las frecuencias emitidas, la paramétrica y el espesor de la capa intermedia. Además, existen frecuencias (6.5 kHz y 10.5 kHz) del paramétrico en agua para el que sus armónicos tienen mucha más amplitud que los correspondientes emitidas sin material intermedio.

A pesar de que la eficiencia global del paramétrico es menor al interponer una capa de material, mediante un análisis de la distorsión armónica total (THD) se observa que ésta se reduce para algunas frecuencias como consecuencia de interponer una capa de material:

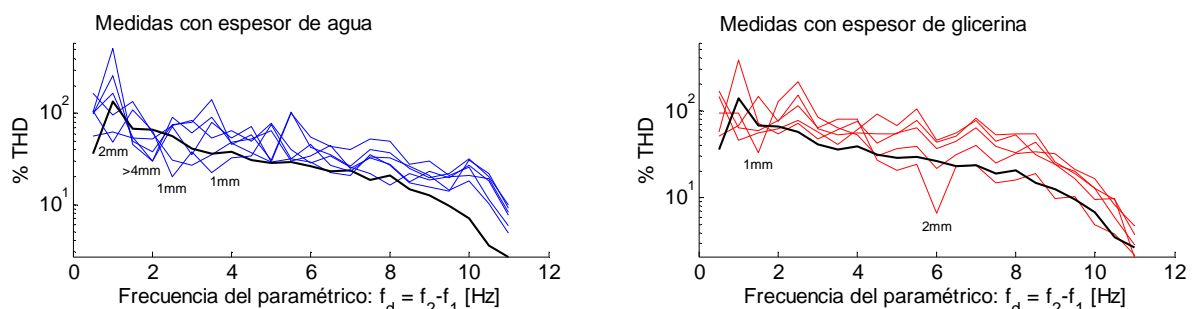


Fig.14. Distorsión armónica total del paramétrico.

Directividad

Se representa la directividad registrada para la frecuencia diferencia $f_d=10\text{ kHz}$ y 20 kHz [•••] emitiendo con las frecuencias primarias $f_1=197\text{ kHz}$ y $f_2=207\text{ kHz}$, 217 kHz , con un espesor de 1.5 cm de agua y glicerina y de 5cm de glicerina, midiendo a 90 cm. También se muestran la directividad esperada según la teoría no lineal de Westervelt [—].

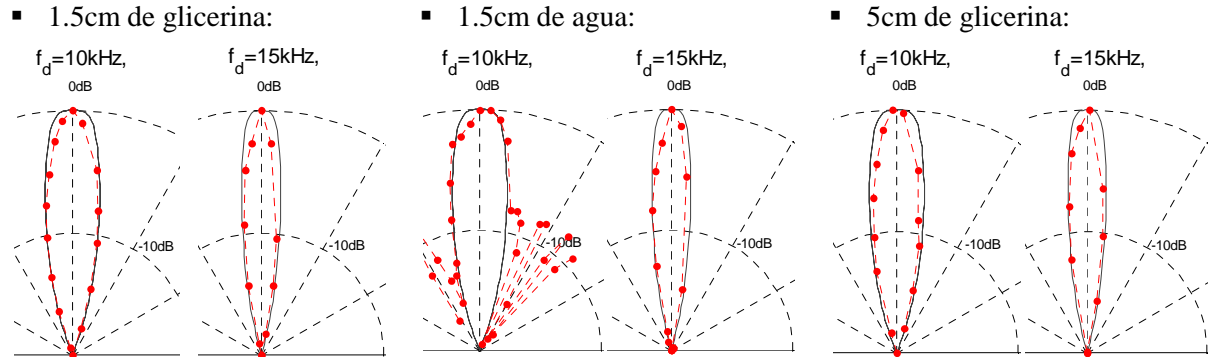


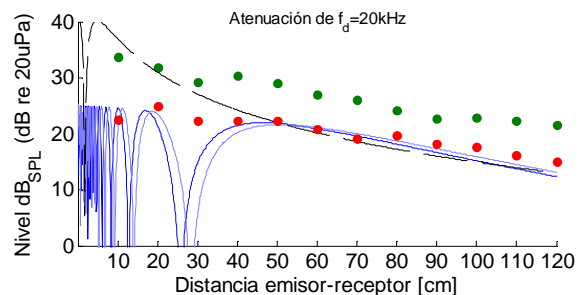
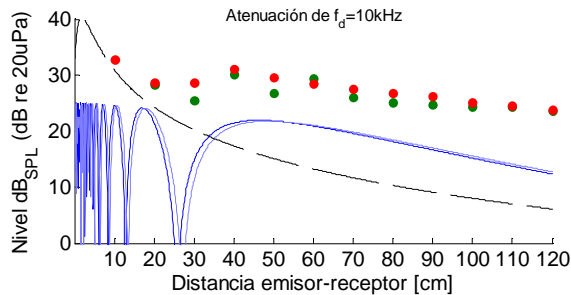
Fig.15. Directividad de paramétrico de 10kHz y 20kHz con material intermedio.

En general se observa que para sendos espesores y materiales, la directividad del paramétrico es semejante y que se aproxima bastante fielmente a la aproximación de Westervelt considerando que se está emitiendo directamente al aire, es más, resultan directividades algo más estrechas (-1dB/-2dB) que las previstas por este modelo.

Atenuación

Se representa la atenuación para la misma configuración que con la directividad, así como los resultados obtenidos de la simulación de éstas frecuencias emitidas directamente con el transductor al aire [---], y como de las frecuencias primarias correspondientes [—, —].

- 1.5 cm de glicerina [•••] y 1.5 cm de agua [•••]:



- 5cm de glicerina [•••]:

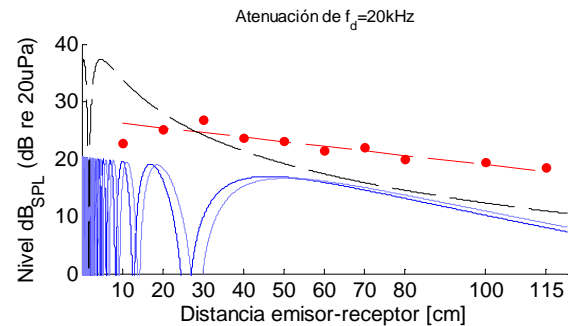
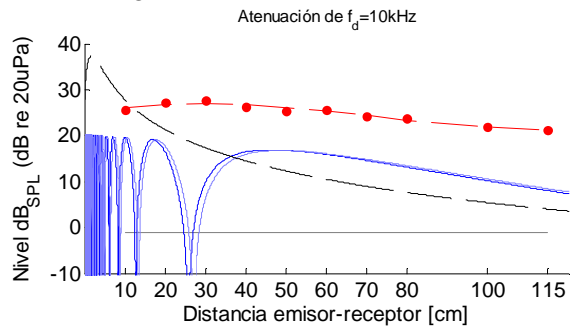


Fig.16. Atenuación de paramétrico de 2kHz, 10kHz, 15kHz y 20kHz con material intermedio.

Se observa que, aunque el nivel del paramétrico es ligeramente inferior que emitiendo directamente al aire, la atenuación del mismo es menor que emitiendo directamente al aire.

5. CONCLUSIONES

Respecto a las características del *paramétrico emitiendo al aire* con distintos transductores: La **eficiencia** del paramétrico en voltaje es, aproximadamente, para el tweeter (frec.prim. \approx 20kHz) del 0.0005% y, para el P319 (frec.prim. \approx 200kHz) del 0.00001%, variando considerablemente con la relación entre la frecuencia de trabajo óptima del transductor (del orden de las frecuencias primarias) y la frecuencia del paramétrico deseada. La **directividad** de los paramétricos medidos es aproximada a la de las frecuencias primarias y, en todo caso, mucho más estrecha que la correspondiente a una frecuencia igual a la paramétrica pero emitida directamente por los transductores. La **atenuación** del paramétrico depende notablemente de las condiciones de medida así como de la relación entre campo cercano del paramétrico (L_{abs}) y campo cercano del transductor (L_{Ray}), con niveles elevados en campo cercano fruto de distorsiones y acercándose a la atenuación de las primarias para campo lejano.

Características del *paramétrico emitiendo al aire con material intermedio* frente al transductor: La **eficiencia** del paramétrico es, en general, inferior a la conseguida sin material intermedio. No obstante, para ciertos espesores de agua, el paramétrico a altas frecuencias (>18 kHz) es superior al generado sin material. Éste efecto se mejora ajustando la no linealidad del material, la absorción de las frecuencias primarias, el espesor del material y la adaptación acústica de impedancias. La **distorsión** de la frecuencia diferencia aumenta en general al disponer un material frente al transductor pero existen espesores tanto de agua como de glicerina para los que la THD disminuye notablemente sobre todo para paramétricos de baja frecuencia (< 5 kHz). Además, se observa que algunos armónicos superiores del paramétrico que aumentan su amplitud notablemente al aumentar el espesor de material. Estos efectos puede ser interesante para aplicaciones donde se quiera controlar la distorsión en cierto rango de frecuencias. La **directividad** del paramétrico así como la **atenuación** no varía notablemente emitiendo al introducir un material intermedio, es decir, depende básicamente de la relación f_{med}/f_d .

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P.J.Westervelt, *Parametric Acoustic Array*. JASA 35(5), 1963.
- [2] T.G.Muir & J.G.Willette, *Parametric acoustic transmitting arrays*. JASA 52(1), 1972.
- [3] H.O.Berktay & D.J.Leahy, *Farfield performance of parametric transmitters*. JASA 55(3), 1974.
- [4] M.B.Bennett & D.T.Blackstock, *Parametric Array in air*. JASA 37(3), 1975.
- [5] R.H.Mellen & M.B.Moffett, *Model for parametric acoustic sources*, JASA 61, 1977.
- [6] M.Yoneyama & J.Fujimoto, *The audio Spotlight*. JASA 73(5), 1983.
- [7] P.Cervenka & P.Alai, *Fourier formalism for describing nonlinear self-demodulation of a primary narrow ultrasonic beam*. JASA 88(1), 1990.
- [8] T.D.Kite, J.T.Post & M.F.Hamilton *Parametric array in air: distortion reduction by preprocessing*. JASA 103(2), 1998.
- [9] M.Hamilton, D. Blackstock. *Nonlinear acoustics*. New York: Academic Press, 1998.
- [10] L.E.Kinsler, *Fundamentals of acoustics*. 4ed, John Wiley & Sons, Inc., 2000, pp.478-483.
- [11] L.Kopp, D.Cano, E.Dubois, L.Wang, B.Smith, & F.W.Coates, *Potential performance of parametric communications*. IEEE Journal of oceanographic engineering, vol. 25, nº 3, 2000.
- [12] J.F.Pompei, *Sound from ultrasound: The parametric array as an audible sound source*. Tesis Doctoral, MIT, 2002.
- [13] Yongrae Roh y Changho Moon, *Design and fabrication of an ultrasonic speaker with thickness mode piezoceramic transducers*. Sensors and Actuators A 99, 2002.
- [14] Jun Yang, Woon-Seng Gana, Khim-Sia Tan & Meng-Hwa Er, *Acoustic beamforming of a parametric speaker comprising ultrasonic transducers*. Sensors and Actuators A 125, 2005
- [15] Hyeong Sick Ju & Yang-Hann Kim, *Near-field characteristics of the parametric loudspeaker using ultrasonic transducers*. Applied Acoustics 71, 2010.
- [16] Ee-Leng Tan, Peifeng Ji y Woon-Seng Gan, *On preprocessing techniques for bandlimited parametric loudspeakers*. Applied Acoustics 71, 2010.
- [17] Peifeng Ji, et al., *A Comparative Analysis of Preprocessing Methods for the Parametric Loudspeaker Based on the Khokhlov-Zabolotskaya-Kuznetsov Equation for Speech Reproduction*. IEEE Transactions on audio, speech, and language processing, 19(4), 2011.