

## DINÁMICA NO LINEAL DE LAS CAVIDADES ACÚSTICAS Y EFECTO DE LA TEMPERATURA

PACS 43.25.Ba

Alejandro Cebrecos<sup>1</sup>, Isabel Pérez-Arjona<sup>1</sup>, Víctor J. Sánchez-Morcillo, Joan M. Martínez-Mora<sup>1</sup>, Víctor Espinosa<sup>1</sup>, Pedro Alonso<sup>1</sup>, Germán J. de Valcárcel<sup>2</sup> y Florian Huchede<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de las Zonas Costeras, Universitat Politècnica de València. C/ Paranimf nº 1. 46730 Grau de Gandía (Spain).

Tel. +34 962 843 145 Fax: 962 849 309

E-mail: [iparjona@upv.es](mailto:iparjona@upv.es)

<sup>2</sup> Departament d'Òptica, Universitat de València – E.G.  
C/Dr. Moliner 50, 46100 Burjassot (Spain)

### ABSTRACT

We show, both theoretically as experimentally, the spatio-temporal dynamics of acoustic cavities, consisting in two parallel transducers immersed in a fluid, one of them vibrating at frequency  $f$  and the other one fixed, acting as a mirror. The phenomena exhibited by the system are depending mainly on the particular fluid embedding the system, which determines the nonlinearity of the system. We have considered both low (water) and high (glycerin) viscosity fluids. The intrinsic variation of temperature due to the interplay with the acoustic wave and its effects are considered.

### RESUMEN

En este trabajo se estudia, tanto desde el punto experimental como teórico, la dinámica espacio-temporal de las cavidades acústicas, consistentes en dos transductores, uno de ellos fijo y otro vibrando a frecuencia  $f$  sumergidos en un fluido. La naturaleza de los fenómenos que exhibe el sistema se rige principalmente por dicho fluido, que determina la no linealidad que gobierna el sistema. En nuestro caso se han considerado bien fluidos de baja (agua), bien de alta (glicerina) densidad. Se considera en particular la variación intrínseca de la temperatura debida a la onda acústica y sus efectos sobre los parámetros del sistema.

### INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan los principales resultados de la línea de investigación sobre la dinámica de cavidades acústicas desarrollada a lo largo de los últimos años por el Grupo de Investigación de Acústica No Lineal del Campus de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia, así como los temas que continúan desarrollándose en la actualidad, tanto desde el punto de vista del estudio teórico como experimental.

Estas cavidades consisten en dos transductores sólidos y paralelos entre sí sumergidos en un fluido, de forma que uno de ellos está fijo y actúa como espejo y el otro vibra a una

determinada frecuencia  $f$  (Fig.1). El tipo de fluido determina la no linealidad que predomina en el sistema, y por tanto es el responsable del tipo de fenómenos que exhibe el sistema. Nuestro grupo ha estudiado, en particular, dos tipos de estos resonadores, uno de ellos conteniendo un fluido de baja viscosidad (agua) y otro con un fluido de viscosidad alta (glicerina). En el primer caso la no linealidad es de carácter fundamentalmente elástico, dando lugar a la generación paramétrica de subarmónicos en el sistema. En el caso de propagación a través de un fluido viscoso, sin embargo, la no linealidad es de carácter fundamentalmente térmico, y debe considerarse explícitamente la interacción entre los campos acústico y térmico.

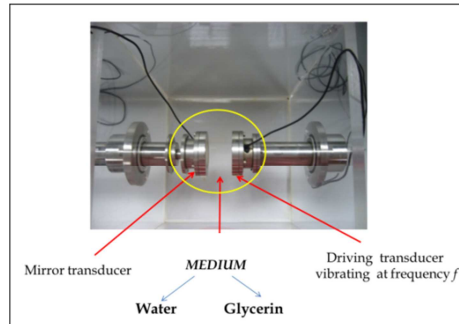


Fig. 1. Resonador acústico.

Si bien la descripción más sencilla de estos resonadores consiste en estudiar únicamente el comportamiento temporal de los mismos, cuando se considera la sección transversal finita de los transductores, la dinámica espacial (y las posibles variaciones del campo a lo largo de la sección transversal) deben considerarse. En este trabajo se muestran tanto los resultados referentes a la dinámica exclusivamente temporal (sobre todo en lo referente al fluido no viscoso) como a la dinámica espacio-temporal (en el caso del resonador conteniendo glicerina).

El trabajo se distribuye en dos grandes secciones, cada una de ellas dedicada a un tipo de cavidad. En cada una de las secciones se muestran los principales resultados obtenidos, las conclusiones y los temas abiertos referentes al estudio de dicho resonador.

## 1. GENERACIÓN PARAMÉTRICA DE ULTRASONIDOS

El desarrollo de efectos paramétricos en acústica requiere de campos relativamente intensos, para lo cual resulta apropiada la utilización de resonadores de alta calidad. Una de las configuraciones más sencillas consiste en dos paredes planas y paralelas, como se muestra en la Fig. 1, que generan ondas estacionarias en el eje de la cavidad. En este mismo sistema se observó la excitación acústica paramétrica por vez primera. Esta excitación se produce cuando la energía suministrada al sistema supera las pérdidas disipativas y se alcanza el umbral de excitación paramétrica de modo que se generan las frecuencias subarmónicas. Estas frecuencias paramétricas suelen aparecer en dobletes ( $f_1$  y  $f_2$ ), de forma que suman la frecuencia de excitación  $f_1+f_2=f$ .

Una descripción teórica, basada en la ecuación de Mathieu, se ha aplicado a la descripción de los fenómenos que muestra el resonador acústico, siendo capaz de predecir el espectro de los subarmónicos y su umbral [1]. Sin embargo, la validez de esta descripción es limitada, ya que por un lado no puede predecir la evolución de los campos más allá del umbral y obvia la evolución de los armónicos superiores. Estos armónicos superiores pueden contrarse añadiendo mecanismos de dispersión externos, tales como burbujas o absorción selectiva en función de la frecuencia.

Nuestro grupo empleó este tipo de aproximación para describir el interferómetro acústico. Sin embargo, el acuerdo con los resultados experimentales era fundamentalmente cualitativo, más que cuantitativo [2]. Analizado los resultados experimentales podían entenderse esta discrepancia como consecuencia de obviar la evolución de los primeros armónicos superiores, que en muchos casos resultan ineludibles. En un trabajo posterior se desarrolló el modelo teórico que tiene en cuenta también la evolución del primer armónico superior de la frecuencia fundamental. El nuevo modelo predecía fenómenos inexistentes en el modelo reducido que se había utilizado anteriormente, tales como la biestabilidad del modo fundamental. Las predicciones del nuevo modelo, así como predicciones ya presentes en el modelo más sencillo tal como la existencia de una inestabilidad de Hopf (pasando de estados estacionarios a dinámicos), se compararon con los resultados obtenidos en el laboratorio, dando lugar a un buen acuerdo entre dichas predicciones y las medidas experimentales (Fig. 2), y por tanto validado la utilización de dicho modelo en lugar del usado con anterioridad.

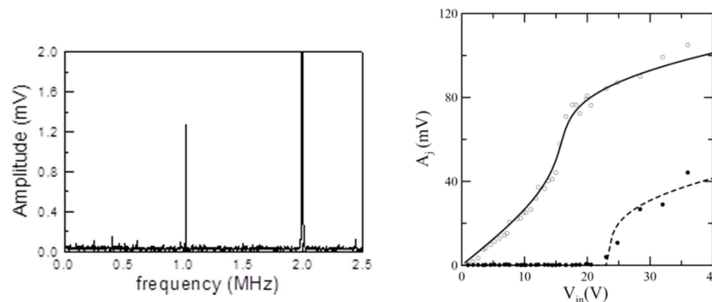


Fig. 2. Contenido espectral y evolución de cada uno de los campos en función de la tensión suministrada al transductor que actúa como fuente. Las líneas representan la predicción el modelo teórico y los puntos las medidas experimentales. Caso degenerado ( $f_1=f_2=f/2$ ) [3].

En este trabajo se mostraba también que los diagramas de bifurcación dependen de forma crítica de los valores de un parámetro del sistema la desintonía (la distancia entre uno de los modos de oscilación y la frecuencia propia del sistema que se encuentre más próxima). Los factores que determinan el valor de esta desintonía son, principalmente, la frecuencia del campo fundamental y la temperatura. El efecto de la temperatura y, en particular, su interacción con el campo ultrasónico se ha ignorado en la generación paramétrica en el interior de un resonador con un medio no viscoso. Sin embargo, los resultados experimentales muestran que incluso en condiciones de control de la temperatura del resonador, como las que se muestran en la Fig. 3, las variaciones locales provocadas por el campo acústico modifican la temperatura con variaciones críticas que llegan a ser de hasta un grado. Esto modifica el espectro modal de la cavidad y por tanto también las desintonías y el comportamiento del sistema.

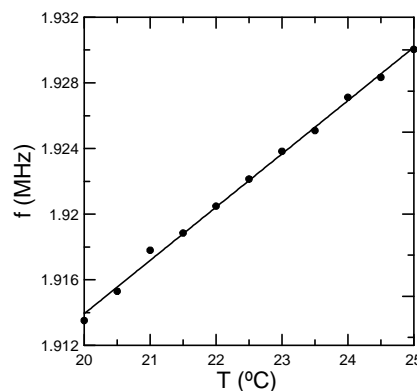


Fig. 3. Variación de la frecuencia del modo fundamental en función de la temperatura interna de la cavidad.

Actualmente se está llevando a cabo este estudio de forma que la relación entre el campo acústico y la variación de la temperatura se consideren en la descripción de la generación paramétrica. Por otro lado, la inestabilidad de Hopf que exhibe el sistema parece indicar que a

niveles de excitación mayores el resonador presentaría un comportamiento caótico, que actualmente aún no ha sido observado. La observación de dicho comportamiento constituye otro de los objetivos abiertos de este trabajo.

La dinámica espacio-temporal de este sistema predice la existencia de estructuras y patrones espaciales no triviales (no homogéneos) que se desarrollan espontáneamente en el sistema [4], tal y como ocurre en las cavidades con medios viscosos descritas en la siguiente sección. Algunas medidas preliminares parecen mostrar que, efectivamente, se desarrollan este tipo de distribuciones espaciales (Fig.4) en el resonador paramétrico, aunque el trabajo está todavía en las primeras fases de su desarrollo.

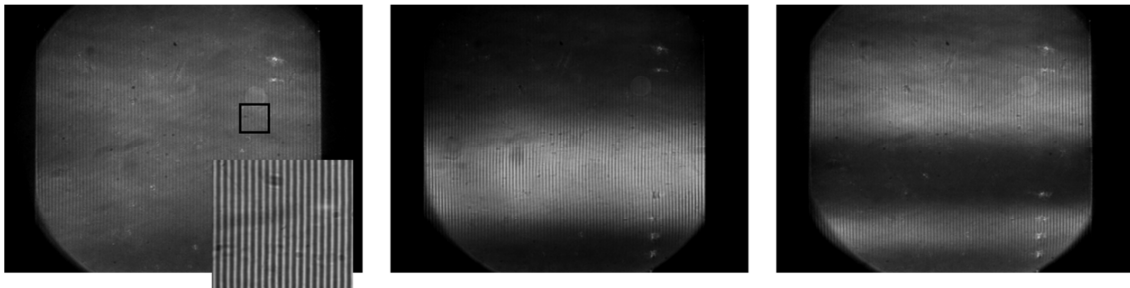


Figura 4. Imágenes obtenidas mediante la técnica de Schlieren para una amplitud fija del campo de excitación y una frecuencia variable. (a) Onda plana por debajo del Umbral y (b),(c) estructuras espaciales que aparecen por encima del umbral de excitación paramétrica.

## 2. AUTOORGANIZACIÓN EN CAVIDADES ACÚSTICAS CON MEDIOS VISCOSOS

El segundo sistema sobre el que se trabaja en el Grupo de Acústica del Campus de Gandía de la Universidad Politécnica de Valencia presenta un gran número de similitudes con el anterior: la estructura del dispositivo es la misma, así como los métodos empleados para su estudio. La diferencia fundamental es que en este caso el fluido que contiene el resonador es un fluido viscoso (en concreto, una disolución de glicerina), lo que cambia completamente el escenario de fenómenos que exhibe el sistema.

En estos fluidos el medio absorbe las componentes de alta frecuencia, y por tanto la evolución de los campos se puede describir considerando una composición monocromática del campo. La velocidad del sonido,  $c$ , en los medios viscosos depende significativamente de la temperatura, donde  $c=c_0(1-\sigma T')$ , donde  $c_0$  es la velocidad del sonido a temperatura ambiente,  $T'$  la variación de la temperatura en el medio respecto del equilibrio a causa de la interacción con la onda ultrasónica, y  $\sigma$  es el parámetro de no linealidad térmica. La propagación del sonido en este medio se ha descrito como un sistema de ecuaciones acopladas entre la desviación de la presión  $p'$  ( $p'$  es la desviación de la presión respecto de la de equilibrio) i la de la temperatura  $T'$  [5]. Los fenómenos de autoenfoque i autotransparencia se han descrito mediante estas ecuaciones [5], que también se han empleado para describir la dinámica temporal de los resonadores acústicos conteniendo este tipo de medios [6].

A causa del papel fundamental de la temperatura en este sistema, resulta imprescindible contar con un sistema de control de temperatura, que permita estabilizarla. Esto se consigue empleando un dispositivo refrigerador como el que se muestra en la Fig. 5. Además, para poder ignorar las consecuencias de la convección térmica, que pueden modificar la distribución espacial del campo en el interior del resonador, el montaje experimental se dispone con el eje del resonador orientado en dirección vertical (Fig. 5).

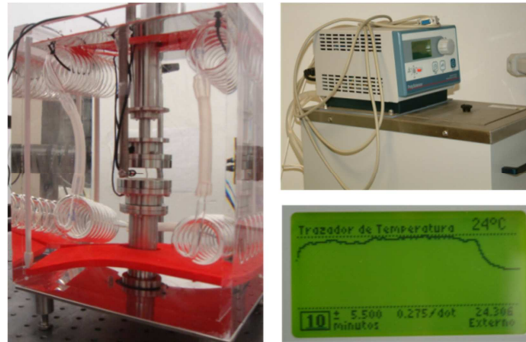


Fig.5. Izquierda, resonador acústico conteniendo un fluido viscoso en disposición vertical. Los espirales de vidrio forman parte del sistema refrigerador (derecha).

En los estudios previos [6] realizados sobre esta cavidad se ha descrito, con un buen acuerdo teoría-experimento, la existencia de dinámica temporal no trivial. Sin embargo, este estudio se limitaba al caso en el que el sistema puede considerarse básicamente unidimensional, es decir, con una sección transversal considerablemente menor que la distancia que existe entre las paredes del resonador. Cuando esto no es así, tienen que considerarse los efectos espaciales que provienen de la difracción del campo ultrasónico y de la difusión de la temperatura.

Nuestra línea de trabajo ha desarrollado precisamente este tipo de condiciones de trabajo. Se ha descrito teóricamente [7] esta cavidad teniendo en cuenta explícitamente la distribución espacial de los campos y se ha comprobado el acuerdo con los resultados obtenidos en el experimento [8]. De hecho, incluso alguno de los resultados de explicación dudosa obtenidos en [6] encuentran una explicación más sencilla a la luz de la descripción espacio-temporal

El sistema presenta soluciones espaciales no triviales, mostrando la existencia tanto de patrones espaciales extensos (Fig.6) como estructuras localizadas en el espacio (Fig.7), siendo éste el primer caso de formación espontánea de patrones en acústica de la que tenemos constancia.

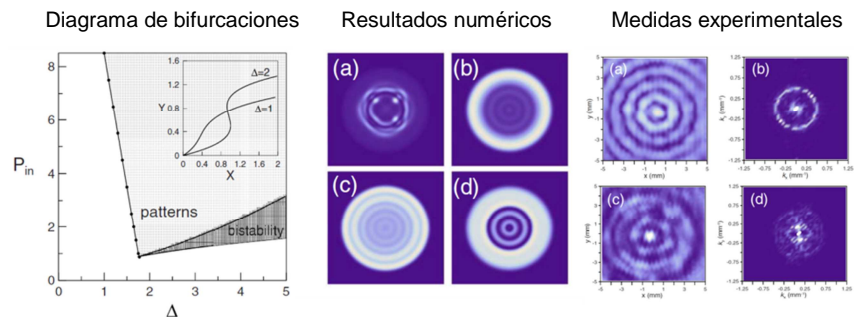


Fig. 6. Diagrama de existencia de soluciones y bifurcaciones obtenido analíticamente (izquierda). Resultados de la simulación numérica mostrando la distribución del campo acústico en la sección transversal del resonador (centro). A la derecha, distribución espacial de la presión en el plano transversal del resonador (a, c) y sus espectros (b, d). [8].

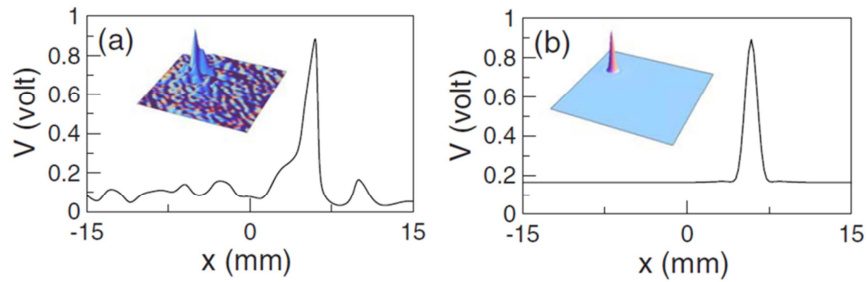


Fig. 7. Estructuras localizadas en el plano transversal del resonador termoacústico. (a) Medida experimental y (b) simulación numérica. El recuadro muestra la sección transversal completa, la gráfica representa un corte de la estructura localizada a lo largo de esta sección [8].

Este tipo de estructuras, en cualquier caso, se forman para valores moderados de la tensión suministrada al transductor fuente. Para valores mayores de la excitación el sistema parece presentar indicios de fenómenos como la turbulencia acústica y comportamientos parecidos a los sistemas excitables.

- [1] L. Adler and M. A. Breazeale, Excitation of subharmonics in a resonant ultrasonic wave system, *Naturwiss.* 55, 385–385 (1968).
- [2] N. Yen, Experimental investigation of subharmonic generation in an acoustic interferometer, *J. Acoust. Soc. Am.* 57, 1357–1362 (1975).
- [3] I. Pérez-Arjona, V. J. Sánchez-Morcillo, and V. Espinosa, Bistable and dynamic states of parametrically excited ultrasound in a fluid-filled interferometer, *J. Acoust. Soc. Am.* 125, 3555, (2009).
- [4] V.J. Sánchez-Morcillo, Spontaneous pattern formation in an acoustical resonator, *JASA* 115, 111-119 (2004). I. Pérez-Arjona and V.J. Sánchez-Morcillo, Pattern formation in parametric sound generation, *Phys. Rev. E*, 72, 066202 (2005).
- [5] F. V. Bunkin, Yu. A. Kravtsov, and G. A. Lyskhov, Acoustic analogues of nonlinear-optics phenomena, *Sov. Phys. Usp.* 29, 607–619 (1986).
- [6] G. A. Lyakhov, A. K. Proskuryakov, O. V. Umnova, and K. F. Shipilov, Nonlinear oscillation regimes in an acoustic resonator, *Acoust. Phys.*, 39, 158 (1993).
- [7] I. Pérez-Arjona, V.J. Sánchez-Morcillo and G.J. de Valcárcel, Ultrasonic cavity solitons, *Europh. Lett.* 82, 10002 (2008).
- [8] V.J. Sánchez-Morcillo, J. Martínez-Mora, I. Pérez-Arjona, V. Espinosa and P. Alonso, Self-organization of ultrasound in viscous fluid, *Europhys. Lett.* 92, 10003 (2010).