

MANIPULACIÓN SIN CONTACTO DE PARTÍCULAS UTILIZANDO CAMPOS DE ONDAS ACÚSTICAS

Vargas E., Gómez J.

*Departamento de Electrónica e Informática de la FCyT de la
Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”, PARAGUAY*

e-mail: evargas@uc.edu.py

RESUMEN

El trabajo presenta resultados preliminares de la conformación de campos ultrasónicos para la manipulación de partículas inmersas en fluidos newtonianos. El manipulador ultrasónico utiliza campos de ondas estacionarios para ejercer la fuerza necesaria a fin de capturar y manipular partículas en el aire. Para el efecto, se varía la fase del campo de ondas en una bancada conformada por dos transductores, en la configuración conocida como cavidad resonante, controlados por un sistema hardware y software diseñada para el efecto. Con el manipulador implementado, se ha logrado la separación y la levitación de partículas de poliuretano de entre 1 y 2 mm diámetro.

Palabras Clave: pinza acústica, levitación, campo acústico, potencial de Gor'kov.

INTRODUCCIÓN

En varias áreas de desarrollo e investigación de la ciencia de los materiales, industrias finas, bioquímica, medicina y la industria farmacéutica, para determinados procesos se requiere la manipulación sin contacto de cuerpos relativamente pequeños, sin alterar propiedades físicas o químicas (Drinkwater, 2016). Por lo tanto, la manipulación de partículas a través de campos de radiación acústica se presenta como un método versátil, que a diferencia de métodos electromagnéticos de manipulación, no requiere ninguna preparación electro-química previa del material a ser manipulado. El método puede ser aplicado para una mayor diversidad de partículas, tanto sólidas como líquidas inmersas en fluidos, tales como el aire o el agua.

En 1866, Kundt fue el primero en observar el efecto de las fuerzas acústicas sobre partículas de polvo, utilizando la resonancia del tubo, hoy conocido como el tubo de Kundt (Cahan D., 1990). King realizó el primer estudio teórico detallado de las fuerzas acústicas originado por un campo de onda acústica estacionaria sobre una partícula de polvo, modelada analíticamente como una esfera sólida inmersa en un fluido. En el cálculo de la fuerza de radiación, King se vio obligado a incluir términos de segundo orden para describir la presión ejercida sobre la esfera sólida por la radiación acústica, quedando en evidencia la naturaleza no lineal de este tipo de fuerza (King, 1934). El trabajo analítico de King fue extendido y mejorado independientemente por Yosioka (Yosioka, 1955), Embleton (Embleton, 1956) y Gor'Kov (Gor'Kov, 1962). Este último introdujo un método analítico novedoso y simple para calcular la fuerza de radiación, por lo cual su trabajo se convirtió en la principal referencia para estudiar la dinámica de un cuerpo sujeto a radiación acústica en un fluido no viscoso. En 1999, Marston propuso la

primera configuración de transductores acústicos adecuada para producir vórtices acústicos en una analogía con los vórtices ópticos (Marston, 1999). En el artículo de Volke-Sepulveda de 2008 se extendieron los resultados de Marston, confirmando además de que el momento angular del vórtice acústico es capaz de generar torque sobre un objeto extenso (Volke-Sepulveda, 2008). En el trabajo de Marzo del año 2015, se describen diversos tipos de conformaciones de campos acústicos tales como vórtices, pinzas acústicas y otros, los que permiten la manipulación de partículas en el espacio empleando campos variables (Marzo, 2015).

PRINCIPIOS FÍSICOS

La dinámica de los fluidos se basa en tres principios físicos fundamentales, descritos a continuación.

- *Principio de conservación de la masa:* la masa no es creada ni destruida. Este principio permite la obtención de la ecuación de continuidad que relaciona la densidad del fluido con el campo de velocidad:

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad del fluido y \vec{v} es la velocidad del fluido.

- *Principio de conservación del momento:* la tasa de variación del momento de un elemento del fluido es igual a la fuerza aplicada sobre el mismo. Constituye la segunda ley de Newton y a partir de la misma se obtiene la ecuación de Navier-Stokes, ver Ec. (2), equivalente a tres ecuaciones escalares diferenciales parciales, una para cada dirección espacial.

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\vec{\nabla} p + \eta \nabla^2 \vec{v} + \beta \eta \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) + \vec{F} \quad (2)$$

Donde p es la presión en el fluido, η es la viscosidad y \vec{F} es una fuerza externa tal como la fuerza gravitacional. Cuando el término de la viscosidad se anula, esta ecuación es conocida como ecuación de Euler.

- *Principio de conservación de la energía:* este principio afirma que la energía no es creada ni destruida y es representado por la primera ley de la termodinámica,

$$dE_{Tot} = dE_{interna} + dE_{cinética} + dE_{potencial} = dQ + dW \quad (3)$$

En el lado derecho, ver Ec. (3), Q es la cantidad de calor adicionado al sistema y W es el trabajo hecho sobre el sistema. La energía total del sistema, en lado izquierdo de la “ver Ec. (3)”, incluye la energía interna, la energía cinética y la energía potencial.

$$E_{Total} = \rho e + \frac{1}{2} \rho \vec{v} \cdot \vec{v} - \rho \vec{g} \cdot \vec{r} \quad (4)$$

Aquí e es la energía interna por unidad de masa, \vec{v} la velocidad del elemento de fluido, \vec{g} la aceleración de la gravedad y \vec{r} el vector desplazamiento del elemento de fluido. A partir de estos principios se deducen las expresiones que modelan la conformación tanto de ondas estacionarias como la de los campos variables.

FUERZA DE RADIACIÓN ACÚSTICA

La fuerza de radiación acústica sobre una esfera inmersa en un fluido no viscoso fue calculada por Gor'kov (Gor'Kov, 1962). Se considera la esfera de radio R en presencia de una onda estacionaria, de número de onda k dentro de una cavidad de resonancia. Se asume que la esfera está hecha de un material arbitrario, que tiene un radio mucho menor a la longitud de onda y que existe una interfaz bien definida entre la esfera y el medio fluido. Por lo tanto, el material esférico tiene una compresibilidad β no nula y puede oscilar en torno a su posición debido a las variaciones de presión de la onda acústica, pero no se desplaza. Se desprecia la onda acústica en el interior de la esfera al considerarla como mucho más rígida que el fluido de su entorno. Finalmente, se asume que la esfera se encuentra lejos de cualquier pared para evitar cualquier efecto de viscosidad que pueda generarse en las cercanías de las fronteras. Gor'kov demostró que la fuerza de radiación puede ser expresada como el gradiente de una función escalar, ver Ec. (5).

$$\langle \vec{F} \rangle = -\nabla \langle U \rangle \quad (5)$$

Donde el potencial escalar U puede expresarse por la Ec. (6).

$$\langle U \rangle = 2\pi R^3 \rho_p \left[\frac{\langle p_{in}^2 \rangle}{3c^2 \rho_p^2} f_1 - \frac{\langle v_{in}^2 \rangle}{2} f_2 \right] \quad (6)$$

En su cálculo, Gor'kov consideró la onda acústica como la suma de una onda acústica incidente más una onda esférica dispersada por la partícula esférica, ignorando interacciones con las paredes. Siendo c la velocidad de la onda acústica en el fluido, ρ es la densidad del objeto esférico, p_{in} y v_{in} son los valores de la presión y velocidad en la posición de la esfera sólida respectivamente. Las cantidades f_1 y f_2 tienen las siguientes expresiones:

$$f_1 = 1 - \frac{c^2 \rho}{c_p^2 \rho_p} \text{ y } f_2 = \frac{2(\rho_p - \rho)}{2\rho_p + \rho} \quad (7)$$

Siendo rangos de variación de los factores f_1 y f_2 son:

$$-\infty < f_1 \leq 1 \text{ y } -2 < f_2 \leq 1$$

Según la teoría de Gor'kov, la dirección de la fuerza de radiación acústica depende de la relación entre la densidad del medio y de la partícula. Finalmente, es importante recordar que, a pesar de su atractiva simplicidad para las aplicaciones, el modelo de Gor'kov no cubre los casos de otros tipos de ondas acústicas, las cuales interactúan con objetos en medios viscosos.

DESCRIPCION DE LA PLATAFORMA Y DE LAS GEOMETRÍAS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con dos bancadas experimentales, ver Fig. 1. En la bancada horizontal, transductores ultrasónicos de 50 kHz están enfrentados y separados por una distancia de 10λ ($\lambda = 68$ mm), se asume que las partículas a ser manipuladas serán colocadas sobre un material acrílico, ver Fig. 1 (a). En la bancada vertical, igualmente los transductores están separados por 10λ y, se pretende que las fuerzas de radiación ejercidas sobre las partículas contrarresten el efecto de la gravedad, ver Fig. 1 (b). Para ambas bancadas, se consideran partículas de poliuretano con forma de

esfera rígida sumergida en aire. A partir de los resultados de las simulaciones, se determinó la viabilidad de los experimentos, así como la definición de los componentes hardware a ser utilizada para la conformación de las bancadas.

Los modelos propuestos fueron construidos y simulados con la plataforma Comsol Multiphysics™ (COMSOL Modeling Software, 2015) que es una herramienta de cálculo numérico adecuada para simular los fenómenos que son objeto de estudio en este trabajo. El software permite simulaciones de fenómenos físicos acoplados entre sí, conocidos como multifísicos, que cuenta con los *toolboxes* que contienen el conjunto de ecuaciones predefinidas según la física del estudio, así mismo de la posibilidad de la construcción de geometrías con distintas dimensiones, la aplicación cuenta con una interfaz gráfica para el usuario GUI la que facilita la tarea de posprocesamiento tales como: visualizar, modificar y exportar resultados como tablas, matrices o vectores, para procesarlos con otras aplicaciones.

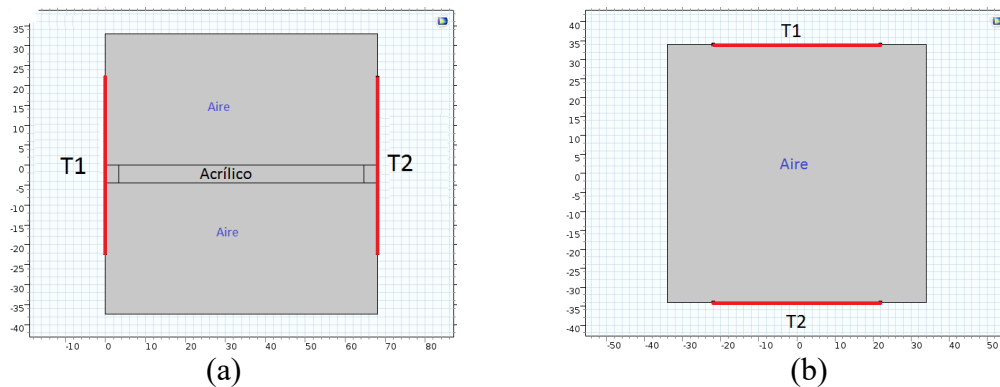


Fig 1. Geometría de las bancadas. (a) Bancada horizontal. (b) Bancada vertical.

CONFORMACIÓN DE LA BANCADA EXPERIMENTAL

Basados en los fundamentos teóricos y los resultados obtenidos a través de simulaciones de las geometrías, a ser presentados más adelante, se diseñó una bancada con transductores de ultrasonidos de 50kHz, controlados por una arquitectura microcontroladora para generar ondas periódicas y controlar la fase de las señales de excitación.

La posición espacial de los nodos en la cavidad resonante, es controlada a través de las fases de las señales de excitación de los emisores, para lo cual las señales deben estar en contrafase. Por sus características técnicas, se seleccionó el microcontrolado PSoC (*Programmable System-on-Chip*) de la compañía Cypress, para la generación de las señales periódicas requeridas para excitar a los transductores. En particular, por la disponibilidad de componentes analógicos y digitales en este dispositivo, lo cual facilita la creación de sistemas empujados mixtos. Además, el entorno de desarrollo integrado posibilita la reconfiguración de la arquitectura con tiempos de desarrollo relativamente cortos (Cypress, 2017). Mediante una interfaz gráfica codificada en el entorno del MatLab™, el usuario indica la modulación de fase enviando comandos a través del puerto serial de una IBM PC compatible al PSoC.

Considerando el volumen de las partículas a ser utilizadas y su densidad, los pesos de las mismas se encuentran en el orden de las centésimas de μN . A partir de las simulaciones, la fuerza de radiación requerida debe estar en el orden de las decimas de μN . Como mencionado previamente, los transductores emiten ondas a una frecuencia de 50kHz , por su potencia de emisión fue seleccionado el transductor AT50 de la empresa Airmar (Airmar 2012), y el driver utilizado para amplificar la señal proveniente del PSoC es el MX-200 de la compañía Piezo-DriveTM (Piezo-Drive 2016). Con este driver, se excitaron hasta los 120V a los transductores piezoeléctricos. Con este voltaje, el AT50 puede producir un campo de presión de aproximadamente 120Pa , suficiente para generar la fuerza requerida. Para acoplar la señal proveniente del PSoC al driver, fue diseñado un circuito de acondicionamiento con amplificadores operacionales para amplificar la señal analógica proveniente del convertidor digital-analógico del PSoC.

Los componentes descritos fueron integrados conforme el esquema que puede apreciarse en la Fig. 2. El control de la fase se realiza a través de la aplicación gráfica utilizando el GUI del MatlabTM, que se ejecuta desde una PC, la cual envía comandos a través del puerto serial, indicando la modulación de fase a ser aplicada a los transductores.

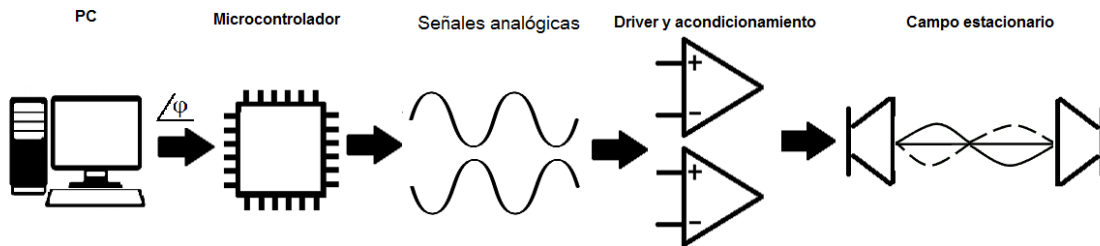
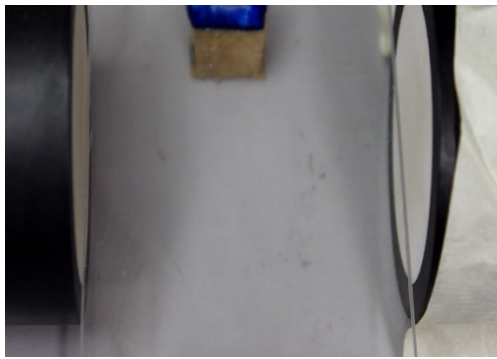


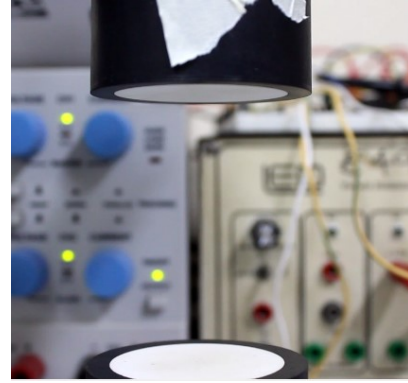
Fig 2. Esquema del sistema conformado para el control del campo acústico estacionario.

DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

Luego de la conformación de las bancadas experimentales, se realizaron algunos experimentos para observar los efectos del campo acústico sobre las partículas de manera a comprobar la teoría, ver Fig. 1. Conforme con las geometrías definidas en la plataforma de simulación, se construyeron dos modelos cuyas implementaciones pueden verse en las fotografías de la Fig. 3 (a) y (b) respectivamente. La distancia de separación entre los dos transductores es de $10\lambda \approx 68\text{mm}$. La bancada horizontal cuenta con una plataforma de material acrílico en medio de los transductores sobre el cual se colocan las partículas a ser manipuladas. En la Fig. 3 (b) puede observarse la bancada vertical.



(a)



(b)

Fig 3. Fotografía de las bancadas experimentales. (a) Bancada horizontal. (b) Bancada vertical.

EXPERIMENTO DE SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS

El propósito de este experimento es observar la posibilidad de separar partículas por tamaño utilizando la interacción con el campo y contrastarlo con los resultados esperados por simulación, a ser realizada con la bancada horizontal.

De acuerdo a la Ec. (6), la fuerza de Gor'kov, i.e. la fuerza de radiación promedio sobre la partícula, es proporcional al cubo de su radio, con lo cual es posible actuar sobre partículas de diferentes tamaños de manera diferenciada. En la Fig. 4, puede observarse el campo de presión acústica obtenido por simulación con el Comsol.

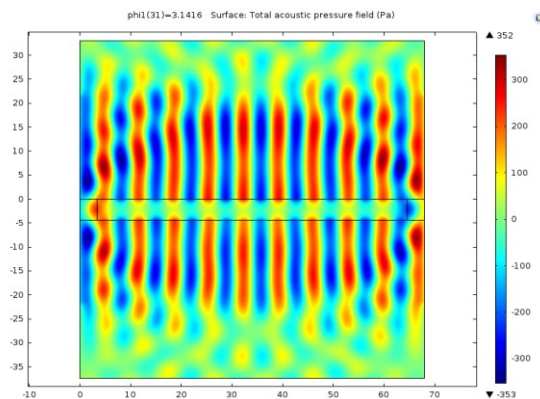


Fig 4. Campo acústico de presión obtenido con el Comsol para la bancada horizontal.

Para la comprobación experimental, se utilizaron partículas de poliuretano de densidad $\rho = 22 \text{ kg/m}^3$. Sobre el acrílico y bajo la interacción del campo estacionario, se dispusieron manualmente dos partículas de 1 y 2 mm en el nodo $\frac{9}{2}\lambda \approx 31 \text{ mm}$ en la cavidad resonante, estando las partículas inicialmente alineadas hasta el instante t_0 , ver Fig. 5 (a). Seguidamente, por medio de la plataforma, se efectuó una variación lineal de la fase en forma de rampa, hasta completar $\Delta\phi = 360^\circ$, con una duración de 400 ms. Esta variación origina un reacomodo del campo y una interacción a su paso con las partículas. Debido a que la fuerza de radiación es proporcional al cubo del radio de la partícula, la fuerza resultante sobre la partícula de 2 mm es aproximadamente 8 veces mayor que en la de 1 mm, por lo que la partícula de 2mm es arrastrada y se separa hasta estabilizarse en torno a la posición del nodo $\frac{7}{2}\lambda \approx 24.1 \text{ mm}$ para un instante t_1 , ver Fig. 5 (b).

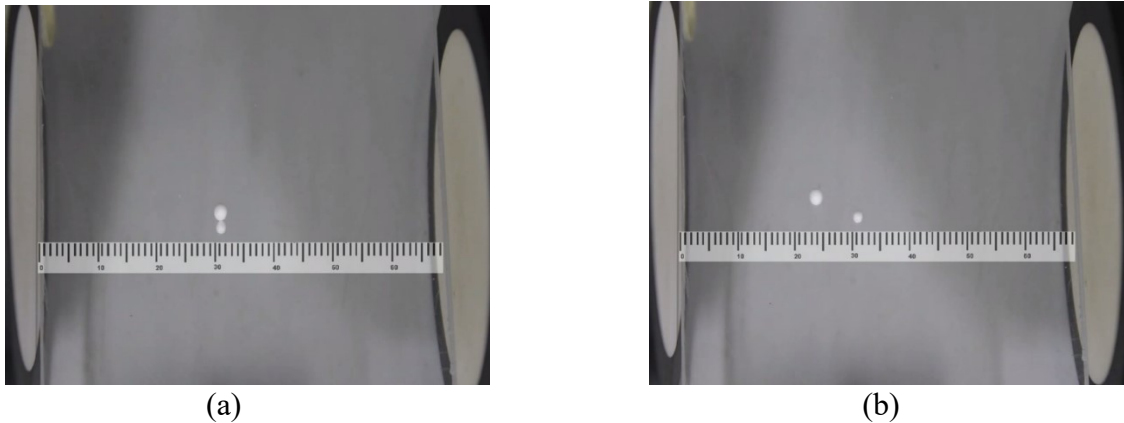


Fig 5. Experimento de separación de partículas. (a) Partículas de 1mm y 2mm en el instante t_0 . (b) Partículas de 1mm y 2mm en un instante t_1 , posterior a producir una variación de fase de $\Delta\phi = 360^\circ$ en forma de rampa.

Basados en la relación de la fuerza de interacción acústica con el diámetro de la partícula expresada por la fórmula de Gor'kov, se comprobó que es posible desplazar una partícula de mayor tamaño por medio de la modulación de fase del campo en una cavidad resonante.

LEVITACIÓN

A partir de los resultados de la sección anterior, los cuales nos permitieron una mejor comprensión de los fenómenos producidos por los campos estacionarios sobre las partículas, se diseñó el experimento para vencer la fuerza de la gravedad mediante la interacción del campo acústico. Para el efecto, se dispuso la bancada verticalmente sin el acrílico de soporte. La levitación acústica es posible mediante la conformación de un campo estacionario, el cual produce la fuerza suficiente para cancelar el peso de la partícula. Mediante simulaciones numéricas, se determinó la potencia necesaria para excitar a los transductores y producir la fuerza requerida para levitar una o varias partículas, además de desplazarla verticalmente a través de la modulación de fase. En las imágenes de la Fig. 6 pueden verse los resultados obtenidos por simulación. En la Fig. 6 (a) puede apreciarse un corte transversal del campo acústico de presión en función a la altura, con los nodos y antinodos característicos de la cavidad resonante. En la Fig. 6 (b), pueden observarse las posiciones finales, de una simulación temporal, de siete partículas inicialmente posicionadas fuera de los nodos. Debido a la relación de densidad medio-partícula, las mismas son arrastradas hacia los nodos del campo.

Esta bancada no cuenta con un material que cancele el peso de la partícula, por lo tanto observamos que el campo acústico es capaz de cancelar el peso de la partícula, además de producir desplazamientos a lo largo del eje vertical. Los parámetros utilizados son los mismos que el de la bancada horizontal.

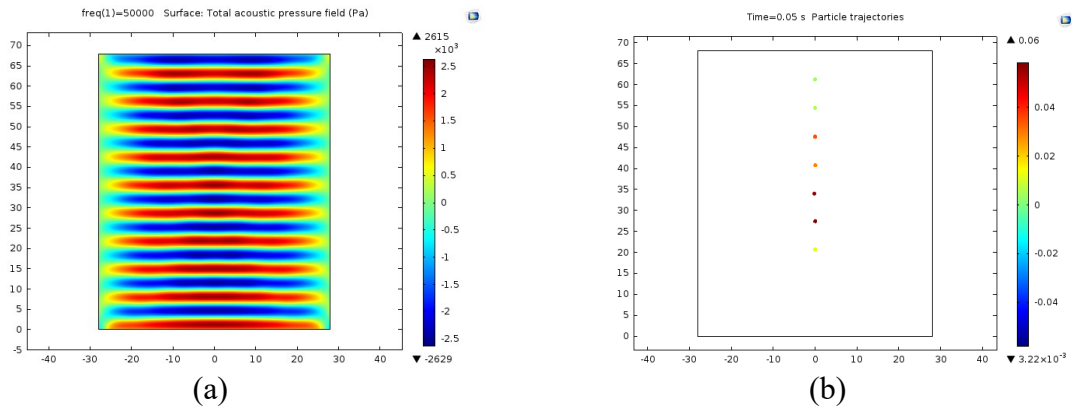
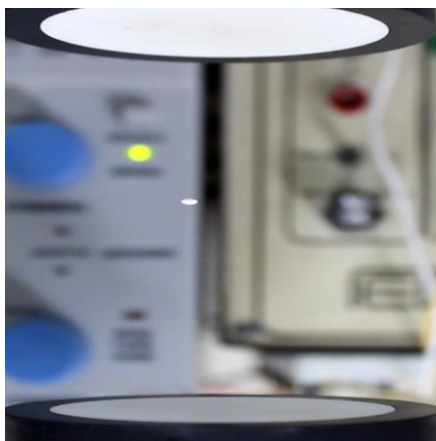


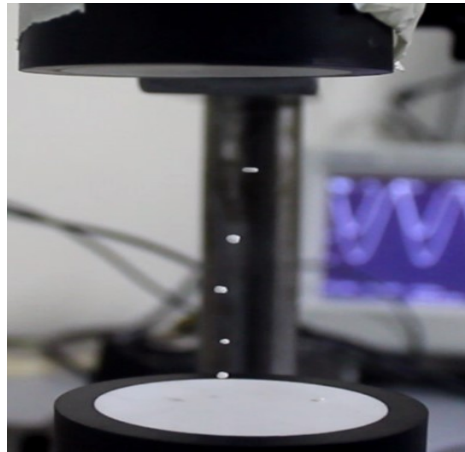
Fig 6. Levitación de partículas. (a) Campo acústico de presión. (b) Ubicación de las partículas sometidas al campo.

En el experimento y, bajo la interacción del campo acústico estacionario, se dispuso manualmente una partícula, la cual quedó atrapada en un nodo del campo, ver Fig. 7 (a).

Por medio de la plataforma, se efectuó una variación lineal de la fase en forma de rampa, hasta completar $\Delta\phi = 360^\circ$, con una duración de 400 ms. Con este procedimiento, fue posible desplazar la partícula a lo largo del eje vertical en pasos de $\pm\lambda/2$, i.e. en los nodos del campo estacionario. Seguidamente, fueron ubicadas más partículas, una a una. A medida el número de partículas iba en incremento, pudo observarse la distorsión del campo, ocasionada por la interacción entre las partículas y el campo, fenómeno que no pudo modelarse con la herramienta de simulación, ver Fig. 7 (b).



(a)



(b)

Fig 7. Levitación de partículas. (a) Interacción con una partícula. (b) Interacción con varias partículas, puede observarse la distorsión del campo producida por la interacción entre las partículas.

Pudo constatarse además, que las partículas en el espacio no se ubican precisamente una encima de la otra, pero esta discrepancia nos permitió concluir que cada nodo de presión es un plano en el cual la partícula queda alojada.

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

El objeto de este trabajo fue el estudio de la interacción de ondas acústicas con partículas inmersas en fluidos newtonianos, con vistas al diseño e implementación de una bancada experimental para la manipulación de partículas utilizando campos acústicos. A ese respecto, se ha realizado una comprobación experimental sobre partículas de poliuretano de que la fuerza de radiación acústica es proporcional al radio de la partícula, con lo cual resulta viable la separación de partículas de diferentes tamaños por medio de la variación de fase. Para la bancada vertical, se han realizado simulaciones numéricas para levitar y desplazar partículas a favor y en contra del campo gravitatorio.

TRABAJOS FUTUROS

Se ha corroborado que mediante la modulación de fase es posible controlar el movimiento de partículas en un eje. Lo cual sirve de motivación para trabajos actualmente emprendidos. Esto es, experimentar con arreglos de transductores, tal como como propuesto en (Marzo, A et al, 2015). Esto permitiría el control de más grados de libertad del manipulador. Estas experiencias se encuentran en fase de simulación a fin de determinar los rangos de operación. A modo de avance, en la Fig. 8 (a), puede observarse la geometría de una bancada de 64 transductores dispuestas en una matriz cuadrada. En la Fig. 8 (b) se presenta el campo de presión obtenido por medio de una determinada codificación de fase para que el manipulador opere como una pinza acústica.

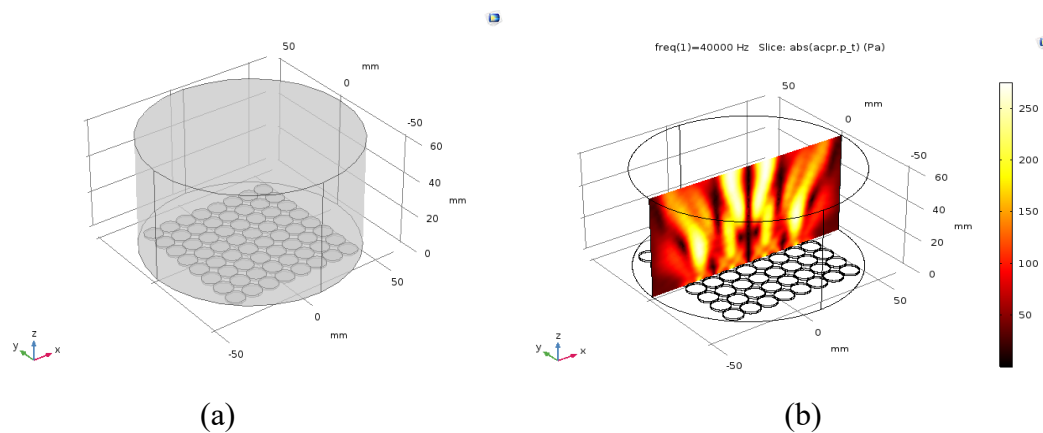


Fig 8. Bancada de 64 transductores. (a) Geometría de la bancada. (b) Campo acústico obtenido con el Comsol mediante una codificación de fase determinada.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se encuentra enmarcado en el proyecto denominado “Manipulación y transporte de partículas sin contacto en medios fluidos utilizando campos de ondas mecánicas - 14-INV-195”, financiado por el Consejo Nacional de Ciencias y Tecnologías CONACYT del Paraguay.

REFERENCIAS

Airmar, “50 kHz AIRDUCER Ultrasonic Transducer” AT50 datasheet, rev Jul 2012.

- Andrade, M. A., Skotis, G. D., Ritchie, S., Cumming, D. R., Riehle, M. O., & Bernassau, A. L. Contactless Acoustic Manipulation and Sorting of Particles by Dynamic Acoustic Fields. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control* 2016; 63(10), 1593-1600.
- Bruus, H. Acoustofluidics 7: The acoustic radiation force on small particles. *Lab on a Chip*, 2012, 12(6), 1014-1021.
- Cahan, D. From dust figures to the kinetic theory of gases: August Kundt and the changing nature of experimental physics in the 1860s and 1870s. *Annals of science* 1990; 47(2), 151-172.
- COMSOL Modeling Software. COMSOL.com. Comsol, Inc. Retrieved 20 November 2015. "Advanced Simulation Library". Avtech
- Cypress Semicoductors, "PsoC 5LP: CY8C58LP Family" PsoC 5LP datasheet, Apr. 2017.
- Doinikov, A. A. Acoustic radiation pressure on a compressible sphere in a viscous fluid. *Journal of Fluid Mechanics* 1994; 267, 1-22.
- Drinkwater, B. W. Dynamic-field devices for the ultrasonic manipulation of microparticles. *Lab on a Chip* 2016; 16(13), 2360-2375.
- Embleton, T. F. W. The radiation force on a spherical obstacle in a cylindrical sound field. *Canadian Journal of Physics* 1956; 34(3), 276-287.
- Gao, L., Zheng, H., Ma, Q., Tu, J., & Zhang, D. Linear phase distribution of acoustical vortices. *Journal of Applied Physics* 2014; 116(2), 024905.
- Gor'Kov, L. P. On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid. In *Soviet Physics Doklady* 1962; (Vol. 6, p. 773).
- Hefner, B. T., & Marston, P. L. An acoustical helicoidal wave transducer with applications for the alignment of ultrasonic and underwater systems. *The Journal of the Acoustical Society of America* 1999; 106(6), 3313-3316.
- Karpul, D., Tapson, J., Rapson, M., Jongens, A., & Cohen, G. Limiting factors in acoustic separation of carbon particles in air. *The Journal of the Acoustical Society of America* 2010; 127(4), 2153-2158.
- King, L. V. On the acoustic radiation pressure on spheres. In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 1934; (Vol. 147, No. 861, pp. 212-240). The Royal Society.
- Marzo, A., Seah, S. A., Drinkwater, B. W., Sahoo, D. R., Long, B., & Subramanian, S. Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nature communications* 2015; 6.
- Piezo Drive, "MX200 200V 1A piezo Driver" MX200 datasheet. rev Oct. 2016.
- Volke-Sepúlveda, K., Santillán, A. O., & Boullosa, R. R. Transfer of angular momentum to matter from acoustical vortices in free space. *Physical review letters* 2008; 100(2), 024302.
- Yosioka, K., & Kawasima, Y. Acoustic radiation pressure on a compressible sphere. *Acta Acustica united with Acustica* 1955; 5(3), 167-173.