

Construcción de levitadores acústicos de onda estacionaria empleando arreglos de transductores piezoeléctricos ultrasónicos

Kenia Zamora,¹ Alan Reyes,^{1,2} Ruben D. Muelas-Hurtado,² and Victor Contreras*²

¹Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Av. Universidad s/n 62210, Cuernavaca, México.

²Instituto de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma de México, Cuernavaca 62210, México.

(*Electronic mail: victor@icf.unam.mx)

(Dated: 26 de junio de 2024)

Recientemente la levitación acústica ha tenido avances notorios y sus aplicaciones se han expandido a distintos campos científicos y tecnológicos gracias a la implementación de la tecnología de arreglos en fase. Este documento presenta una guía para la construcción de levitadores acústicos de onda estacionaria basada en arreglos de transductores piezoeléctricos ultrasónicos y material electrónico de bajo costo. La guía está dirigida al sector académico interesado en utilizar levitadores acústicos en sus cursos e investigaciones a niveles de educación superior y de posgrado. La parte introductoria del documento presenta brevemente algunos conceptos básicos asociados a la levitación acústica y la tecnología empleada para la emisión de ultrasonido. La segunda parte del documento describe una serie de pasos necesarios para la construcción del levitador.

I. INTRODUCCIÓN A LA LEVITACIÓN ACÚSTICA

Un levitador acústico es un dispositivo que utiliza sonido para suspender objetos en fluidos como el aire. En estos dispositivos, la levitación se logra a través de ondas acústicas que neutralizan la fuerza de gravedad que nuestro planeta ejerce en objetos de tamaños micrométricos y milimétricos con el fin de atraparlos en posiciones específicas. Esta tecnología comenzó a desarrollarse con fines prácticos partir de los años 70's en el Jet Propulsion Laboratory de la NASA, donde se realizaron investigaciones sobre manipulación de objetos en ambientes de microgravedad.¹ La tecnología sigue en desarrollo y actualmente sus aplicaciones abarcan una amplia gama de temas que van desde la suspensión y manipulación de sustancias para producir reacciones químicas sin el uso de contenedores;² el estudio de propiedades físicas y químicas de líquidos;³⁻⁶ o el desarrollo de pantallas 3D basadas en la holografía acústica.⁷

A. Tipo de ondas empleadas

Los levitadores acústicos operan mediante presiones de radiación acústica asociadas a ondas de intensidades altas que

pueden superar los 120 decibeles (dB). Para evitar daños auditivos, se utilizan ondas de frecuencias asociadas al rango ultrasónico debido a que no son perceptibles por el oído humano (Figura 1). El ultrasonido puede propagarse en el aire y su atenuación es proporcional a la frecuencia de las ondas.⁸ Por ejemplo, el ultrasonido a 200 kHz se atenúa alrededor de 11 veces más que el ultrasonido a 20 kHz bajo condiciones atmosféricas estándar. Por esta razón, para aplicaciones de levitación acústica en aire los levitadores se diseñan con ondas de baja frecuencia ultrasónica, generalmente en el rango de 25 – 100 kHz.⁹

B. Método de levitación acústica

Existen distintos métodos de levitación acústica y se pueden clasificar de acuerdo con el campo de presión acústico que generan. Los métodos pueden ser de: (1) onda estacionaria, (2) campo cercano, (3) campo cercano invertido, (4) campo lejano y (5) campo de un solo haz.¹⁰ Sin embargo, la generación de ondas estacionarias dentro de cavidades uniaxiales es el método de levitación acústica más común y explorado debido a su potencial científico y tecnológico. Los levitadores de onda estacionaria generalmente son cavidades de geometría uniaxial formadas por un emisor y un reflector -o dos emisores que operen a la misma frecuencia- donde las superficies que emiten y reflejan las ondas acústicas están separadas una distancia proporcional a la longitud de onda ultrasónica y a la geometría de las superficies emisoras y reflectoras.

C. Ondas estacionarias en cavidades acústicas

Si las superficies de la cavidad son planas, como se ilustra en la Figura 2 (a), la onda estacionaria se forma si la longitud de la cavidad L , es un múltiplo entero n , de media longitud de onda $L = n\lambda/2$ y es relativamente simple ajustar la longitud de la cavidad. El número n representa el modo longitudinal



Figura 1. Ilustración de rangos de frecuencias de ondas acústicas. Para la levitación acústica en aire, generalmente se emplea el rango de 25 – 100 kHz.

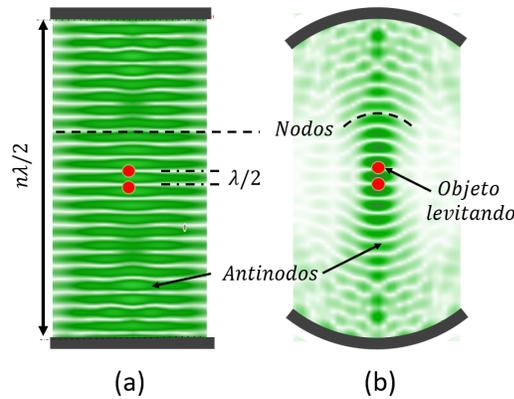


Figura 2. Ilustración 2D de ondas estacionarias producidas por cavidades con dos fronteras emisoras (a) planas y (b) esféricas. El color verde ilustra la presión acústica.

de la cavidad y está asociado a una distribución específica de onda estacionaria. Por ejemplo, el valor de n indica el número de antinodos de la onda estacionaria. En el caso de objetos pequeños comparados con la longitud de onda de la onda acústica, la levitación acústica ocurre en los nodos de la onda estacionaria. Si se construye un levitador con superficies emisoras y reflectoras cóncavas, el campo ultrasónico se enfoca y la presión acústica se concentra radialmente en el centro de la cavidad, como se ilustra en la Figura 1 (b). La configuración cóncava aumenta considerablemente la amplitud de presión en los antinodos centrales, aumentando el equilibrio espacial de los objetos levitados y la capacidad de levitación en términos del peso del objeto. Sin embargo, la longitud de cavidad requerida para producir ondas estacionarias con amplitudes máximas ya no es proporcional a $\lambda/2$ y es más complejo ajustar la cavidad.

D. Transductores ultrasónicos

Es posible generar ultrasonido con diversas tecnologías; sin embargo, los levitadores acústicos de onda estacionaria comúnmente utilizan transductores piezoeléctricos de alta potencia, conocidos como transductores Langevin (TL), como fuentes de emisión ultrasónica. Los TL operan con voltajes de hasta 1000 V y con potencias mayores a los 100 W,¹¹ y se han utilizado para fabricar levitadores capaces de levantar líquidos y sólidos de alta densidad¹², ya que pueden producir fuerzas de atrapamiento del orden de 60-80 mN. Sin embargo, la tendencia de la última década es desarrollar levitadores acústicos que sustituyen los TL por arreglos de múltiples transductores ultrasónicos de baja potencia que se alimentan con voltajes pico menores a 20 V_p (Figura 3). Estos transductores ultrasónicos son construidos a partir de cerámicas piezoeléctricas delgadas, acopladas a una hoja metálica, que vibran como respuesta a una deformación mecánica proporcional al voltaje y frecuencia de una señal eléctrica recibida; y viceversa, producen una señal eléctrica al recibir o detectar una vibración ultrasónica. La vibración es amplificada por un cono metálico aco-

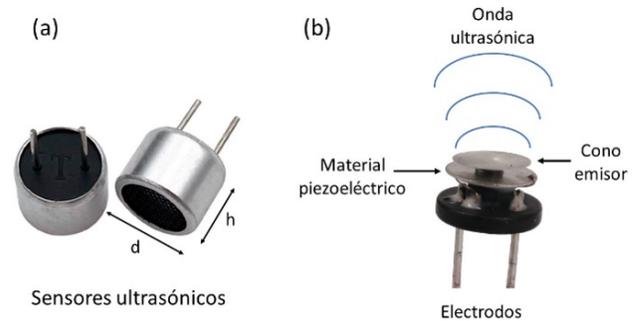


Figura 3. (a) Imágenes de transductores ultrasónicos de carcasa metálica de diámetro $d = 10$ mm y altura $h = 7$ mm. (Manorshi,MSO-A1040H07T). (b) Imagen del transductor sin la carcasa metálica. La onda ultrasónica se genera (y detecta) mediante el amplificador mecánico de forma cónica acoplado al disco formado por una placa de latón acoplada a un material piezoeléctrico.

plado a la hoja metálica pegada a la cerámica piezoeléctrica y los dispositivos pueden emplearse como emisores y receptores ultrasónicos. Estos transductores son compactos y pueden ordenarse de múltiples formas para formar levitadores con mayores superficies radiantes y de geometrías más diversas si se comparan con la tecnología de transductores tipo Langevin. Otra ventaja de la tecnología de arreglos de transductores es que permite desarrollar levitadores capaces de manipular a los objetos levitados al transferirles movimiento traslacional o rotacional mediante el control electrónico de la fase de los emisores.¹³

En 2017 se publicó en la literatura científica un levitador acústico conformado por una cavidad concéntrica uniaxial, llamada TinyLev, y conformada por dos arreglos de transductores contrapuestos. En la publicación se describe el diseño y se caracteriza numérica y experimentalmente el desempeño del TinyLev, capaz de levantar en aire objetos con densidades de hasta 6.5 g/cm³. Además, el dispositivo se construye con tecnología simple y de bajo costo, haciéndolo accesible para múltiples aplicaciones, para actividades de investigación y para divulgación científica.

Esta guía se basa principalmente en las instrucciones descritas por el autor del TinyLev en la página web <https://www.instructables.com/Acoustic-Levigator/>, e incluye algunas modificaciones orientadas a mejorar el desempeño de los levitadores de onda estacionaria. Dichas modificaciones permiten, por ejemplo, construir cavidades con la capacidad de levitación del TinyLev utilizando el 50% de los transductores del diseño original.

E. Seguridad

Cada vez estamos más expuestos a ondas ultrasónicas en ambientes urbanos debido al incremento del uso de tecnologías en este rango de sonido como es el caso de alarmas, sensores de proximidad de automóviles, dispositivos médicos y

dentales, etc. Por cuestiones de seguridad, existen guías estándar para regular la exposición al ultrasonido. Para el caso del ultrasonido aerotransportado de baja frecuencia, se recomienda no exceder niveles de presión sonora (SPL) de 145 dB (para 40 kHz) siempre y cuando no existan algún fluido o sustancia que pueda potencialmente acoplar la impedancia en aire a la del cuerpo humano.¹⁴ Si existe la posibilidad de acople de impedancias mediante algún fluido presente en la atmósfera o el oído, este nivel máximo se reduce a 115 dB. Estudios recientes de exposición a emisión ultrasónica a frecuencias de 40 kHz y de intensidades mayores a 120 dB no han mostrado signos de afectación auditiva¹⁵ ni cognitiva.¹⁶

Los transductores ultrasónicos empleados en sistemas de levitación acústica son dispositivos electrónicos “off-the-shelf” o de uso común y se consideran seguros ya que el SPL de un solo sensor es del orden de 115 dB de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Sin embargo, esta situación es distinta cuando se emplean arreglos de transductores, sobre todo si se enfocan. Por ejemplo, si se emplean cientos de transductores de manera que enfoquen eficientemente la emisión ultrasónica, en conjunto pueden llegar a superar los 145 dB (SPL) en la zona de enfoque.¹⁵

En esta guía se proporcionan diseños de levitadores ultrasónicos que emplean un total de 40 transductores, y que pueden alcanzar presiones aproximadas de 164 dB en la zona de enfoque; por lo tanto, se recomienda no operarlos de manera independiente para evitar la interacción directa de las personas con la zona de enfoque. Opere a los arreglos solo como cavidad, la presión decae considerablemente al alejarse del foco. En general, sea responsable en el proceso de construcción de estos dispositivos y en su uso. Supervise en todo momento su funcionamiento cuando se exhiban o utilicen en presencia de niños y público en general.

II. MATERIALES Y EQUIPOS

A. Materiales

- Arduino nano.
- Placa de pruebas (Protoboard) 170p.
- Módulo L298n.
- Cables jumpers (hembra-macho, macho-macho).
- Cable- alambre de cobre 22AWG o 24AWG.
- Transductores 10mm-40 kHz.
- Sockets impresos en 3D.
- Soldadura y pasta para soldar.

B. Equipos

- Osciloscopio.
- Generador de funciones.

- Cautín 30W.
- Caimanes.
- Pinzas.

C. Equipos de protección

- Lentes de seguridad.
- Cubrebocas (para evitar aspirar vapores de soldadura).
- Auriculares aislantes de ruido.
- Extractor de humo de soldadura.

III. SOPORTES 3D PARA ENSAMBLE DE TRANSDUCTORES

Las cavidades ultrasónicas uniaxiales requieren de dos superficies que dan soporte a los emisores. Estas superficies o soportes pueden fabricarse mediante impresión 3D en materiales como ABS, PLA u otros materiales de características mecánicas similares. Sus geometrías usuales son casquetes esféricos que varían de tamaño de acuerdo con el número de transductores utilizados y su empaquetamiento u ordenamiento; por ejemplo, el arreglo puede ser hexagonal¹⁷ o en forma de anillos concéntricos.¹⁸

En la página web del [Laboratorio de óptica y acústica del ICF](#) encontrará los diseños para impresión 3D de los soportes cóncavos de geometría esférica y diseños de la estructura para determinar polaridad de transductores.

A. Impresión de soportes 3D

Si la impresora está calibrada, los transductores pueden ensamblarse a presión en los huecos de 10 mm del soporte de plástico sin necesidad de utilizar adhesivos. Si el diámetro de los agujeros es mayor al de los transductores, utilice algún adhesivo para pegarlos o enrolle un poco de cinta aislante alrededor de la carcasa para aumentar su diámetro y poder ensamblarlos a presión.

B. Preparación de soportes 3D

Previo al montaje de los transductores, limpie los soportes 3D para remover los grumos sobrantes generados por la misma impresora. El objetivo es evitar bordes o imperfecciones en la base del transductor que modifiquen su posición o generen alguna inclinación que modifique la dirección de la señal ultrasónica emitida.

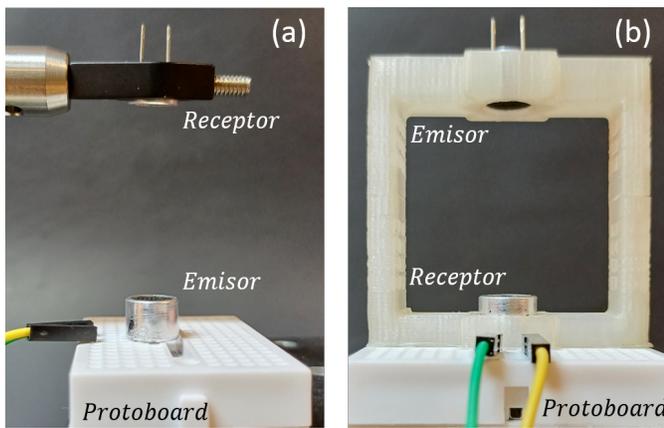


Figura 4. Colocación de transductores para verificación de polaridad. El arreglo consiste en una cavidad formada por un transductor emisor y un transductor receptor, separados una distancia múltiplo de media longitud de onda. (a) Opción 1. (b) Opción 2.

IV. SELECCIÓN DE TRANSDUCTORES

Los transductores comerciales generalmente indican su polaridad; sin embargo, algunas ocasiones dicha polaridad está invertida y se recomienda verificarla si se desea construir un levitador que opere en óptimas condiciones. En caso de no contar con un osciloscopio siga las [instrucciones](#) de verificación de polaridad de A. Marzo y pasar a la sección VI de este documento.

Para generar una distribución de presión uniforme en la cavidad ultrasónica, es importante elegir transductores que emitan señales con amplitud y fase similares. Para obtener una medida relativa de la amplitud y de la fase de cada transductor que se va a utilizar para el levitador, construya un circuito de prueba utilizando dos transductores –un emisor y un receptor–, separándolos una distancia fija de manera que formen una cavidad plana. Siga las siguientes indicaciones:

A. Cavidad para medir amplitud y fase de transductores

■ Opción 1.

Fijar sobre una superficie plana la placa de pruebas (protoboard) y un soporte de sujeción de un transductor, asegurándose que queden fijas para que no cambien su posición durante el proceso y mantener el circuito de prueba bajo las mismas condiciones. En la protoboard se ubican los transductores emisores a los que se les medirá su amplitud y fase relativas. Para ello, se debe incrustar un transductor en la protoboard y conectar dos cables jumper macho-macho en las mismas líneas de continuidad que el transductor. En el soporte de sujeción se posiciona un segundo transductor, que funcionará como receptor, a ≈ 5 cm del transductor emisor. Se debe garantizar que los centros del emisor y receptor sean colineales, formando una cavidad con ambos transductores (Figura 4 (a)).

Colocar un conector BNC tipo T a uno de los canales del generador de funciones y conecte una de las salidas de la T al

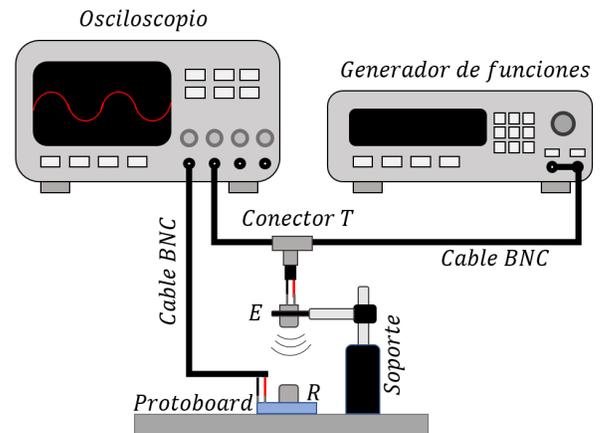


Figura 5. Conexiones eléctricas para verificar la polaridad de los transductores

transductor emisor, y la otra salida a uno de los canales del osciloscopio (Figura 5). Esta conexión permite enviar una onda periódica al transductor emisor y observarla simultáneamente en el osciloscopio como señal de referencia. Conectar el transductor receptor a una de las salidas del cable BNC y la otra salida a uno de los canales del osciloscopio. Encender el osciloscopio y el generador de funciones. Configurar el generador de funciones para emitir una onda senoidal continua de 40kHz con amplitud de 5Vpp. Se pueden usar otras amplitudes menores o mayores de voltaje, sin embargo, tenga presente que este tipo de transductores comerciales suelen operar hasta un rango de voltaje de 20 Vp y la respuesta acústica lineal de estos se obtienen para voltajes menores a $8V_p$. Ajustar finamente la distancia de separación emisor-receptor de manera que maximice (esto pasa cada 9 mm aprox.) la lectura en amplitud en el canal 1 del osciloscopio.

Ajuste las ventanas de tiempo y amplitud del osciloscopio para poder visualizar al menos cinco ciclos de las ondas senoidales del emisor y receptor. En el canal 2 del osciloscopio observará la señal de referencia (emisor). Si ambas señales están en fase (Figura 6 (a)), marque una de las terminales del emisor, por ejemplo, la terminal conectada al positivo.

Intercambie el transductor emisor por cada uno de los transductores que desea verificar. Si algún transductor emisor está colocado con la polaridad invertida, la onda estará invertida 180° respecto a la onda del transductor emisor (Figura 6(b)).

Si la señal está invertida, marque la terminal contraria (negativa, siguiendo el ejemplo), o invierta la conexión del transductor para visualizar la fase correcta y marque la terminal positiva.

■ Opción 2.

Imprimir el diseño proporcionado y montar los transductores de acuerdo con el diagrama ilustrado en la Figura 4 (b). Siga las instrucciones de conexión eléctrica descritas en la opción 1. Se recomienda montar la estructura sobre una protoboard para asegurar su estabilidad, manteniendo fijo al transductor receptor y garantizar la reproducibilidad en las mediciones pa-

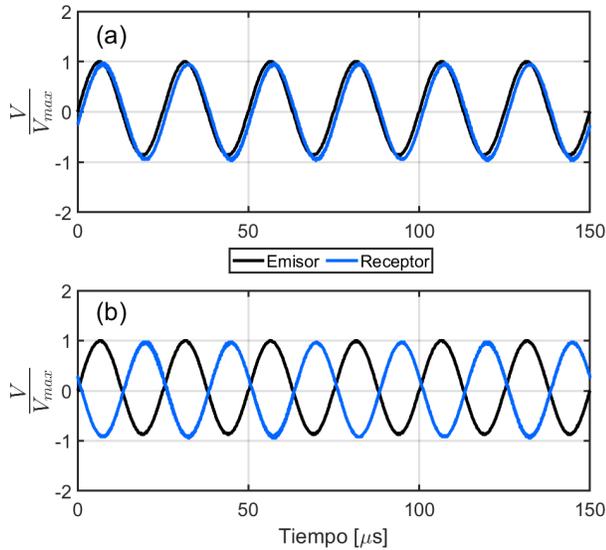


Figura 6. Forma de onda de las señales de voltaje eléctrico medidas en el emisor y receptor. (a) Señales en fase y (b) desfase cercano a 180° .

ra todos los transductores que se caracterizan. Es muy importante que el transductor receptor se mantenga fijo durante todo el proceso de medición y no cambie su posición. Un error de 0.5 mm entre la distancia de separación de los transductores equivale a un error de fase de 20° .

B. Clasificación de transductores

Conforme a los datos adquiridos en el osciloscopio, clasifique los transductores considerando su amplitud (V_{pp}) y su desfase respecto de la señal de referencia (fase relativa). Generalmente, las características de los transductores varían entre lotes de producción dependiendo de la marca, pero los transductores de un mismo lote/marca son similares. Un análisis estadístico es recomendable cuando se caracterizan cientos de transductores.^{19,20}

Elegir los transductores con las características más parecidas posibles permitirá conformar una onda estacionaria más uniforme, y consecuentemente un levitador con una mejor capacidad de levitación.

V. ENSAMBLE DE TRANSDUCTORES

- Coloque cada uno de los transductores en el casquete esférico, considerando la polaridad marcada en cada uno de los transductores de manera que le simplifique el proceso de soldar. Por ejemplo, coloque los transductores con la terminal (pin) positiva hacia el exterior como se ilustra en la Figura 7. Añadir un poco de pegamento en caso de que el transductor no quede fijo en el socket. El pegamento no debe dejar residuos o grumos que

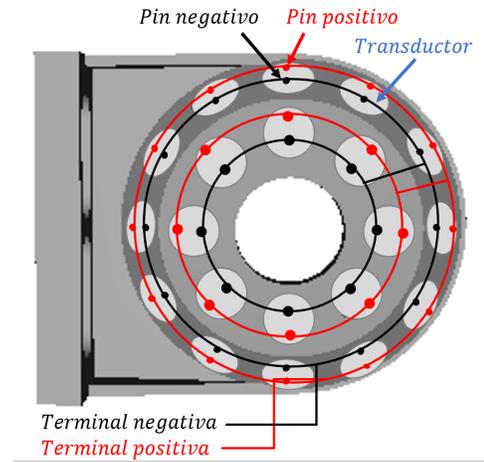


Figura 7. Vista exterior del casquete esférico con los transductores ensamblados y conectados a dos terminales eléctricas.

Arduino	Módulo L298n
A0	IN1
A1	IN2
A2	IN3
A3	IN4

Cuadro I. Conexión de pines entre el Arduino Nano y el módulo de puente H L298n

provocuen desalineación de los transductores.

- Proceda a soldar en paralelo a todos los transductores del arreglo empleando un cable alambre para todas las terminales positivas, y un cable para todas las terminales negativas, de manera que sólo queden dos cables por cada casquete esférico. Asegúrese que no haya ningún corto circuito.

VI. CONEXIONES DE LA ESTRUCTURA DEL LEVITADOR

- Conectar el Arduino a la computadora y cargar en el Arduino el código Levitador.ino obtenido de: <https://www.instructables.com/Acoustic-Levigator/>. Recuerde que para cargar el código necesita tener instalado el Arduino IDE en la computadora. El software se puede descargar de <https://www.arduino.cc/en/software>.
- Conectar el pin D10 al D11 del Arduino.
- Conectar los pines del módulo de puente H L298n a los pines analógicos del Arduino como se indica en la Tabla I.
- Conectar el GND de Arduino al del módulo de puente H L298n.

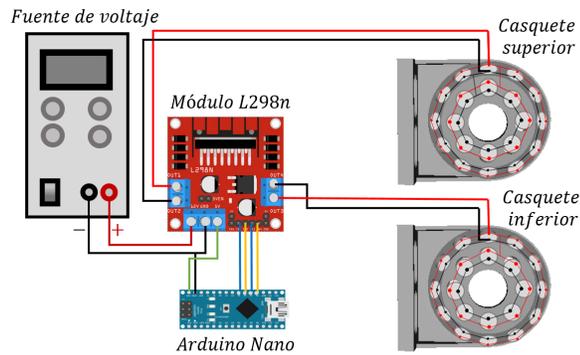


Figura 8. Diagrama de conexiones eléctricas del levitador acústico.

- Conectar el pin de entrada/salida de +5V del módulo L298n a la entrada de voltaje (Vin) del Arduino, esto será para alimentar el levitador con una sola fuente de alimentación. Asegúrese que el jumper regulador del módulo L298n esté activado (este jumper está cercano a los pines Vin y GND del módulo).
- Conectar los arreglos al módulo L298n de la siguiente forma: cables positivos al OUT1 y OUT3, y cables negativos a OUT2 y OUT4 (o viceversa: negativos al OUT1 y OUT3 y positivos al OUT2 y OUT4).

VII. PRUEBA DE LEVITACIÓN

Verifique que al realizar las respectivas conexiones eléctricas como se describió y alimentar el módulo L298n con un voltaje dc de 7 V, el levitador sea capaz de levantar gotas de agua. Es necesario ajustar la longitud de la cavidad hasta proporcionar la mayor presión acústica. Si mantiene una gota levitada mientras ajusta la cavidad, a mayor presión, más se deforma la gota de esferoide a elipsoide.

Siguiendo las conexiones eléctricas presentadas en la Figura 8, los transductores de ambos casquetes tienen la misma polarización y están en fase generando una onda estacionaria focalizada con un antinodo en el centro de la cavidad.²¹ Si la polaridad de uno de los casquetes esféricos se intercambia, se produce un desfase de π entre las ondas emitidas por los arreglos, dando como resultado una onda estacionaria focalizada con un nodo en el centro de la cavidad. La longitud de cavidad es diferente para ambas configuraciones de fase.

VIII. AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de DGAPA-UNAM mediante el proyecto IT101023. Ruben D.M.H agradece a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la UNAM por el otorgamiento de la beca posdoctoral UNAM ICF/D/75/2022.

REFERENCIAS

1. T. WANG, M. SAFFREN, and D. ELLEMAN, "Acoustic chamber for weightless positioning," in *12th Aerospace Sciences Meeting*, <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.1974-155>.
2. F. J. S. Doerr, L. J. Burns, B. Lee, J. Hinds, R. L. Davis-Harrison, S. A. Frank, and A. J. Florence, "Peptide isolation via spray drying: Particle formation, process design and implementation for the production of spray dried glucagon," *Pharmaceutical Research* **37**, 255 (2020).
3. V. Contreras, R. Valencia, J. Peralta, H. Sobral, M. Meneses-Nava, and H. Martinez, "Chemical elemental analysis of single acoustic-levitated water droplets by laser-induced breakdown spectroscopy," *Opt. Lett.* **43**, 2260–2263 (2018).
4. R. Tuckermann, L. Puskar, M. Zavabeti, R. Sekine, and D. McNaughton, "Chemical analysis of acoustically levitated drops by raman spectroscopy," *Analytical and Bioanalytical Chemistry* **394**, 1433–1441 (2009).
5. Y. Tian, R. G. Holt, and R. E. Apfel, "A new method for measuring liquid surface tension with acoustic levitation," *Review of Scientific Instruments* **66**, 3349–3354 (1995), https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-pdf/66/5/3349/19200790/3349_1_online.pdf.
6. E. Trinh, P. Marston, and J. Robey, "Acoustic measurement of the surface tension of levitated drops," *Journal of Colloid and Interface Science* **124**, 95–103 (1988).
7. R. Hirayama, D. M. Plasencia, N. Masuda, and S. Subramanian, "A volumetric display for visual, tactile and audio presentation using acoustic trapping," *Nature* **575**, 320–323 (2019).
8. R. Kapoor, S. Ramasamy, A. Gardi, R. V. Schyndel, and R. Sabatini, "Acoustic sensors for air and surface navigation applications," *Sensors* **18** (2018), 10.3390/s18020499.
9. Tec5, "Levitorator, contactless sample positioning," (2022), <https://tec5.com/en/products/levitorator/>.
10. M. A. Andrade, N. Pérez, and J. C. Adamowski, "Review of progress in acoustic levitation," *Brazilian Journal of Physics* **48**, 190–213 (2018).
11. R. H. Morris, E. R. Dye, P. Docker, and M. I. Newton, "Beyond the Langevin horn: Transducer arrays for the acoustic levitation of liquid drops," *Physics of Fluids* **31**, 101301 (2019), https://pubs.aip.org/aip/pof/article-pdf/doi/10.1063/1.5117335/15951298/101301_1_online.pdf.
12. W. Xie, C. Cao, Y. Lü, and B. Wei, "Levitation of iridium and liquid mercury by ultrasound," *Phys. Rev. Lett.* **89**, 104304 (2002).
13. A. Marzo, S. A. Seah, B. W. Drinkwater, D. R. Sahoo, B. Long, and S. Subramanian, "Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects," *Nature Communications* **6**, 8661 (2015).
14. *Airborne ultrasonic standards for hearing protection* (2008).
15. A. D. Battista, "The effect of 40 khz ultrasonic noise exposure on human hearing," in *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics: Integrating 4th EAA Euroregio 2019*, 13, Vol. 9, pp. 4783–4788.
16. A. Di Battista, A. Price, R. Malkin, B. W. Drinkwater, P. Kuberka, and C. Jarrold, "The effects of high-intensity 40 khz ultrasound on cognitive function," *Applied Acoustics* **200**, 109051 (2022).
17. A. Marzo, A. Barnes, and B. W. Drinkwater, "TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator," *Rev. Sci. Instrum.* **88**, 085105 (2017).
18. V. Contreras and A. Marzo, "Adjusting single-axis acoustic levitators in real time using rainbow schlieren deflectometry," *Review of Scientific Instruments* **92**, 015107 (2021), https://pubs.aip.org/aip/rsi/article-pdf/doi/10.1063/5.0013347/14881932/015107_1_online.pdf.
19. R. D. Muelas-Hurtado and V. Contreras, "Levitadores ultrasónicos de arreglos en fase: estudio opto-electroacústico de cavidades con geometría plana y esférica," in *XXXVII Congreso de Instrumentación SOMI*, 1, Vol. 9, pp. 1–14.
20. H. R. D. Muelas, J. Pazos-Ospina, and J. L. Ealo, "A non-expensive massive transducer array to generate helical wavefronts in air," *Physics Procedia* **70**, 932–935 (2015), proceedings of the 2015 ICU International Congress on Ultrasonics, Metz, France.
21. V. Contreras and K. Volke-Sepúlveda, "Enhanced standing-wave acoustic levitation using high-order transverse modes in phased array ultrasonic cavities," *Ultrasonics* **138**, 107230 (2024).