



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Campos Acústicos Generados con un
Transductor Tipo Langevin y Algunas
Aplicaciones.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
FÍSICO

PRESENTA:
JAVIER RODRÍGUEZ SÁNCHEZ

DIRECTOR DE TESIS:
ARTURO OROZCO SANTILLÁN



2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

HOJA DE DATOS DEL JURADO

<p>1. Datos del alumno Rodríguez Sánchez Javier 51 35 04 56 Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Ciencias Física 40204363-0</p>
<p>2. Datos del tutor Dr Arturo Orozco Santillán</p>
<p>3. Datos del sinodal 1 Dr Marcos Ley Koo</p>
<p>4. Datos del sinodal 2 Dra Catalina Elizabeth Stern Forgach</p>
<p>5. Datos del sinodal 3 Dra Karen Volke Sepúlveda</p>
<p>6. Datos del sinodal 4 Dr Iván Santamaría Holek</p>
<p>7. Datos del trabajo escrito Campos Acústicos Generados con un Transductor Tipo Langevin y Algunas Aplicaciones 54 p 2009</p>

DEDICATORIA

Recordando a algún autor podría comenzar mi dedicatoria:

“Pido perdón a los vivos por dedicarle esta tesis a alguien que ya se nos adelantó...”

Y podría seguir, igual que aquél, con excusas:

“Pero esta persona nos a ayudado a muchos a ser más felices...”

Aunque al corregir la dedicatoria yo diría:

“A Jesús Sánchez Crespo, mi abuelo, que de muchas maneras sigue vivo.”

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos los que han hecho posible que me esté titulando; ustedes saben quiénes son.

Quiero agradecerles a mis compañeros; tanto a los que dejé allá en Veracruz, como a los que tengo en esta Universidad.

Quiero agradecer a mi familia; a todos: mis padres, mis hermanos y sus familias.

Quiero agradecerle a tí, Alicia, por que vale la pena correr riesgos.

Quiero agradecerle a mis múltiples profesores que me han formado; de manera muy especial a Arturo Orozco, Catalina Stern, Marcos Ley, Karen Volke e Iván Santamaría. También a Juan Manuel Lozano[†].

Agradezco al proyecto PAPIIT por el apoyo brindado.

Y agradezco a todo aquél que sea por curiosidad o por necesidad le sirva este documento.

ÍNDICE

Resumen.....	1
Introducción.....	2
Ultrasonido.....	2
Usos.....	3
Generación.....	4
Transducción.....	4
Piezoelectricidad.....	5
Transductor Langevin.....	7
Levitación Acústica.....	10
Acoplador.....	12
Disco Radiador.....	13
Espejo Acústico.....	13
Cavidad Resonante.....	13
Objetivo de la Investigación.....	14
Motivación del Trabajo.....	14
1 Simulaciones.....	15
1.1 Programa.....	15
1.2 Acopladores.....	16
1.2.1 Resultados.....	18
1.2.1.1 Cilindro.....	18
1.2.1.2 Cono.....	20
1.2.1.3 Exponencial.....	23
1.2.1.4 Escalonado.....	26
1.3 Análisis.....	28
1.3.1 Desplazamiento.....	29
2 Experimentos.....	32
2.1 Torca.....	32
3 Levitación Acústica.....	39
3.1 Dispositivo Experimental.....	39
3.2 Experimentos.....	41
3.2.1 Cuerpos Levitados.....	42
3.2.2 Variantes.....	44
3.3 Mejoras.....	44
3.4 Aplicaciones.....	45
3.4.1 Física.....	45
3.4.2 Química.....	45
3.4.3 Biología.....	45
4 Bomba Ultrasónica.....	47

4.1 Antecedentes.....	47
4.2 Dispositivo Experimental.....	48
4.3 Experimentos.....	50
4.4 Mejoras.....	50
4.4.1 Flujo.....	50
4.4.2 Presión.....	51
Conclusiones.....	52
Referencias.....	53

RESUMEN

En el trabajo reportado en esta tesis se estudió un transductor de tipo Langevin con una frecuencia de resonancia de 27500 Hz. Se investigaron numéricamente cuatro geometrías de los acopladores que se le pueden adaptar: cilíndrico, cono truncado, exponencial y cilíndrico escalonado.

Se experimentó sobre los efectos de la torca con que se ajusta el transductor en la frecuencia de resonancia. Parece que mientras mayor es la torca, la frecuencia de resonancia y la amplitud aumentan; sin embargo, parece también que hay otros parámetros involucrados en el armado que no se tomaron en cuenta.

Se utilizó este transductor con un acoplador cilíndrico para levitar objetos. Se lograron levitar distintos materiales con el dispositivo utilizado. Tanto sólidos como líquidos e incluso organismos vivos.

Con el mismo transductor, igualmente con el acoplador cilíndrico, se logró implementar una bomba ultrasónica para levantar una columna de agua. Se observó la gran dependencia de la altura de la columna con la inclinación del tubo por el que sube el agua y la separación entre el mismo tubo y la cara radiante del acoplador. Se obtuvo una columna más alta cuando más corta fuera la separación y más vertical se colocara el tubo.

INTRODUCCIÓN

En el trabajo reportado en esta tesis, se buscó un método para obtener campos ultrasónicos lo suficientemente intensos como para ser utilizados en la levitación acústica y la bomba ultrasónica.

En esta introducción, se pone en contexto al trabajo. Contiene una pequeña reseña histórica de los transductores ultrasónicos utilizados y los materiales piezoeléctricos. Se incluye información de los distintos tipos de transductores Langevin, así como de los campos ultrasónicos que se desean generar y algunas maneras que existen para hacerlo.

En el primer capítulo se muestran las simulaciones hechas por computadora para obtener información sobre los distintos acopladores; se obtiene el mayor desplazamiento con el acoplador escalonado.

En el segundo capítulo se exponen los experimentos realizados para conocer la dependencia de la torca con que se enrosca la tuerca que mantiene junto al transductor, con el desempeño del transductor.

El tercer capítulo trata sobre la levitación acústica que se consiguió y los materiales que se levitaron. Tiene también información sobre las mejoras que se le pueden practicar al dispositivo para obtener una mayor eficiencia así como de las aplicaciones que puede tener como recurso tecnológico.

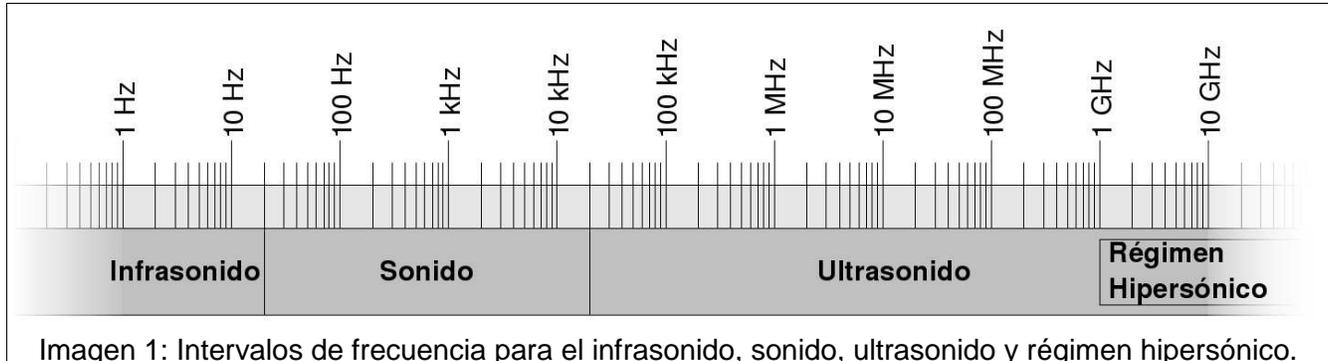
En el cuarto capítulo se comenta la bomba ultrasónica; comenzando con los antecedentes, siguiendo con los experimentos y los resultados obtenidos, para terminar con las posibles mejoras al dispositivo para incrementar su rendimiento.

Posteriormente se encuentran las conclusiones a las que se llegó en este trabajo.

Ultrasonido

Al igual que con la luz para los ojos, los oídos están limitados a percibir sólo un ancho de banda entre todas las frecuencias posibles de ondas de presión. En números redondos, el ser humano puede escuchar sonidos cuyas frecuencias sean superiores a los 20 Hz, pero inferiores a los 20 kHz; este intervalo suele disminuir con la edad, la exposición a ruido intenso y las enfermedades o accidentes. Cuando la frecuencia de la onda está por debajo de este intervalo, se llama infrasonido; si está por arriba, se llama ultrasonido. Se ha vuelto

una convención referirse a las ondas mecánicas con frecuencias mayores a 1 GHz como régimen hipersónico^[1]. Estos intervalos se ilustran en la imagen 1, con escala logarítmica para las frecuencias.



Tanto el sonido, el infrasonido y el ultrasonido son idénticos como fenómenos; la diferencia en sus nombre estriba en lo que somos capaces de percibir con nuestros sentidos.

Los campos ultrasónicos tienen la ventaja de ser altamente colimados, a diferencia de los de frecuencias audibles. Además, aún siendo de alta potencia, no presentan incomodidades auditivas para quien los esté manipulando^[2].

Dos características que han vuelto al ultrasonido muy importante en aplicaciones tecnológicas, son:

1. El hecho de viajar, dependiendo del medio, cientos de miles de veces más lento que la luz, lo que permite detectar la diferencia de caminos recorridos por dos rayos con mayor facilidad.
2. Y la capacidad de atravesar cualquier medio elástico, transparente u opaco a las ondas electromagnéticas^[1]; como vidrio, polímeros, maderas o metales.

Usos

El primero que mencionó algunas aplicaciones no auditivas de los campos sonoros, en sus trabajos publicados, fue Lord Rayleigh en su trabajo "The Theory of Sound", en 1889. En este libro Rayleigh muestra resultados de sus investigaciones en campos sonoros como nebulización de líquidos, relajación molecular, presión acústica, colapso de burbujas y algunos efectos no lineales^[1].

En 1927 Wood y Loomis además de la nebulización de líquidos observaron cavitación. La

cavitación es la generación de burbujas del aire disuelto en el agua, que en presencia de un campo ultrasónico intenso siguen movimientos aleatorios muy violentos. También investigaron algunos efectos del ultrasonido sobre muestras biológicas^[3].

De las primeras aplicaciones del ultrasonido fuera del agua, se pueden mencionar la detección de fallas y la medición del espesor de objetos.

Los campos ultrasónicos hoy en día tienen muchas aplicaciones científicas, industriales, militares y médicas^{[4],[5]}.

Uno de los usos más difundidos de los campos ultrasónicos, es el método de imagen en la medicina; utilizado sobre todo para conocer el estado de una futura persona antes de nacer.

Los campos ultrasónicos que se quieren generar en este trabajo, son con el propósito de ser utilizados principalmente en la levitación de objetos y también en el bombeo de agua.

Generación

Con todas las aplicaciones que se le conocen al ultrasonido, parecería que hay muchas formas de generar estos campos; sin embargo, no es el caso.

Históricamente se han generado ultrasonidos con distintos dispositivos, siendo los más notables la rueda de Savant (1830) que generaba frecuencias de hasta 24 kHz; el silbato de Galton (1876) con frecuencias fundamentales de 3 a 30 kHz, probablemente emitía también ondas más agudas al tener armónicos; y el diapasón de Koenig (1899) que llegaba a los 90 kHz. Ya en el siglo XX, Paul Langevin y otros generaron campos con un transductor basado en un condensador eléctrico, posteriormente reemplazado por un cristal de cuarzo^[1] gracias a sus propiedades piezoeléctricas que se tratarán más adelante.

Hoy en día, la mayoría de los dispositivos generadores de ultrasonido, como el empleado en este trabajo, son piezoeléctricos^[2], siguiendo las enseñanzas de Langevin. Sin embargo, también se puede generar con altavoces de bobina, como los que se utilizan en la vida cotidiana; o con materiales magnetostriictivos, los cuales se deforman en presencia de un campo magnético.

Transducción

Un transductor, en el sentido más general; es un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro; tales como el micrófono, las bombillas o nuestros sentidos.

El trabajo aquí presentado, se refiere al caso particular de convertir una señal eléctrica periódica en una deformación mecánica para transmitir una onda de presión al aire.

Piezoelectricidad

La piezoelectricidad es un fenómeno que relaciona las deformaciones mecánicas y la polarización de algunos materiales. La polarización sucede cuando las cargas positivas y negativas del material se desplazan ligeramente unas con respecto de las otras, con lo que resulta que los extremos opuestos se cargan con signo contrario. Esta carga se puede observar como una diferencia de potencial. La piezoelectricidad se presenta de dos maneras:

Cuando un material elástico se somete a un esfuerzo, se deforma; el efecto piezoeléctrico directo consiste en que, además de deformarse, se polariza.

Si un material es dieléctrico, al estar en presencia de un campo eléctrico se polariza; el efecto piezoeléctrico inverso sucede cuando se polariza y también se deforma.

Matemáticamente esto se describe en las relaciones constitutivas de los piezoeléctricos, de la siguiente manera^{[1],[2],[4]}:

$$S = s^E T + dE \quad (\text{Efecto Directo})$$

$$D = dT + \varepsilon^T E \quad (\text{Efecto Inverso})$$

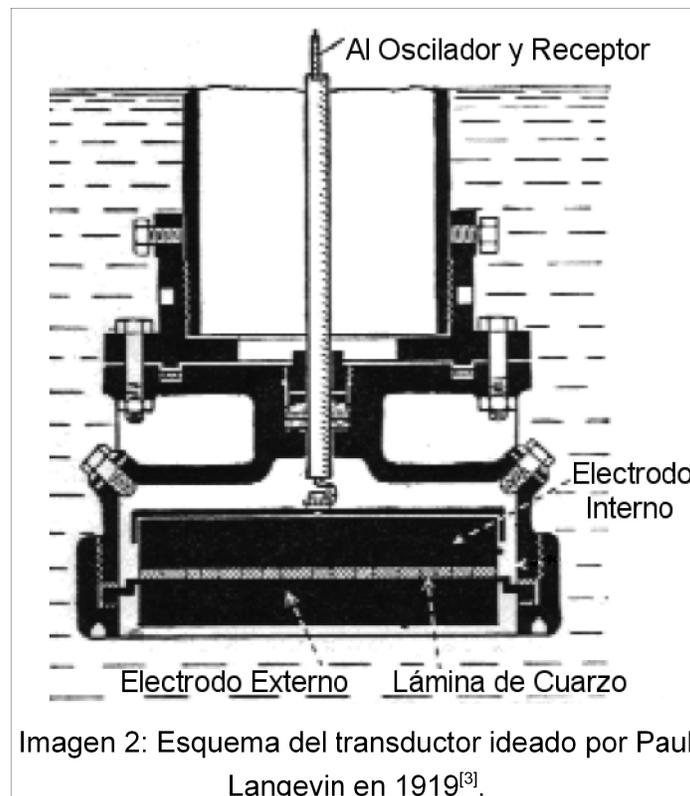
Donde D es el vector de desplazamiento que indica la polarización, T es el esfuerzo, E es el campo eléctrico externo y S es la deformación. Además s^E es la matriz de elasticidad a campo eléctrico constante, ε^T es la matriz dieléctrica con esfuerzo constante y d es la matriz piezoeléctrica.

Un objeto piezoeléctrico, como cualquier cuerpo, tiene una frecuencia natural de resonancia, determinada por sus dimensiones y propiedades elásticas. El hecho de poseer esta frecuencia natural de resonancia le permite ser usado, por ejemplo en los relojes de cuarzo, que aprovechan la oscilación característica de este mineral piezoeléctrico.

La característica de estos materiales de presentar tanto el efecto directo como el inverso, les permite ser utilizados de dos maneras: tanto para generar ondas mecánicas a partir de señales eléctricas, como para captar las vibraciones mecánicas y transformarlas en señales eléctricas. Estas propiedades les permiten a los piezoeléctricos ser el núcleo activo en los transductores ultrasónicos, ya que al aplicarle una señal eléctrica periódica a las caras de un

piezoeléctrico se obtiene una onda mecánica a lo largo del material, proporcional a la señal aplicada.

El fenómeno de la piezoelectricidad fue descubierto en 1880 por los hermanos Pierre y Jacques Curie. Sin embargo no fue hasta el final de la primera guerra mundial (1919) que Paul Langevin ideó el posible uso de transductores para detectar submarinos. Langevin utilizó inicialmente transductores basados en condensadores eléctricos, que pronto sustituyó por cristales de cuarzo. Sin embargo, el transductor ideado por Langevin, ilustrado en la imagen 2, no estuvo listo sino hasta después del fin de la guerra. Gracias a esta coincidencia, inicialmente fue utilizado entre otras cosas para detectar icebergs, y así evitar tantas catástrofes por hundimiento de barcos.



Los materiales piezoeléctricos fueron descubiertos estudiando la relación entre la piroelectricidad y la simetría de los cristales. Los materiales piroeléctricos pueden generar una carga eléctrica al ser calentados o enfriados, dado el cambio en las dimensiones del dipolo con la temperatura.

Para presentar piezoelectricidad, es necesario que el cristal no presente un centro de simetría. De las 32 geometrías cristalinas, 21 carecen de centro de simetría; de éstas, son 20

las presentes en materiales piezoeléctricos. Diez de estas geometrías forman un grupo que contienen un eje polar, a lo largo del cual se polariza el material^[1].

El primer material piezoeléctrico utilizado fue el cuarzo; posteriormente se utilizó el tartrato de potasio y sodio, conocido como la sal de la Rochelle. El fosfato dihidratado de amonio, el sulfato de litio y el tartrato diamino de etilo fueron utilizados durante la segunda guerra mundial, cuando el cuarzo era ya muy escaso y caro. Se realizaron una serie de estudios en óxidos de bario y de titanio, con lo que se obtuvo el titanato de bario. A partir de este momento empezó un auge por el desarrollo de los materiales cerámicos policristalinos para usarlos como piezoeléctricos. Posteriormente se desarrolló el niobato de plomo y en 1954 el titanato zirconato de plomo o PZT; el cual marcó un hito en este tipo de materiales por la fuerza y estabilidad de sus características piezoeléctricas. Por cerca de 50 años^{[1],[2]}, el PZT, a veces con algunos aditivos, ha sido el material piezocerámico más utilizado para aplicaciones ultrasónicas.

Generalmente los materiales piezocerámicos se originan en reacciones en estado sólido de distintos óxidos con un tratamiento posterior a alta temperatura. En este punto, la cerámica es isotrópica y no presenta todavía la piezoelectricidad, ya que está formada por pequeños dominios cristalinos, es decir por regiones con el eje polar orientado en distintas direcciones. Para volverlo piezoeléctrico, se somete a un campo eléctrico muy intenso, en la dirección que se desea polarizar el material. Este proceso orienta el eje de cada dominio lo más próximo a la dirección del campo, dentro de lo que le permite su estructura cristalina^{[2],[4]}.

Transductor Langevin

Langevin ideó un transductor basado en un cristal de cuarzo entre dos placas de acero para aumentar la amplitud de la onda transmitida y disminuir la frecuencia de resonancia^[3].

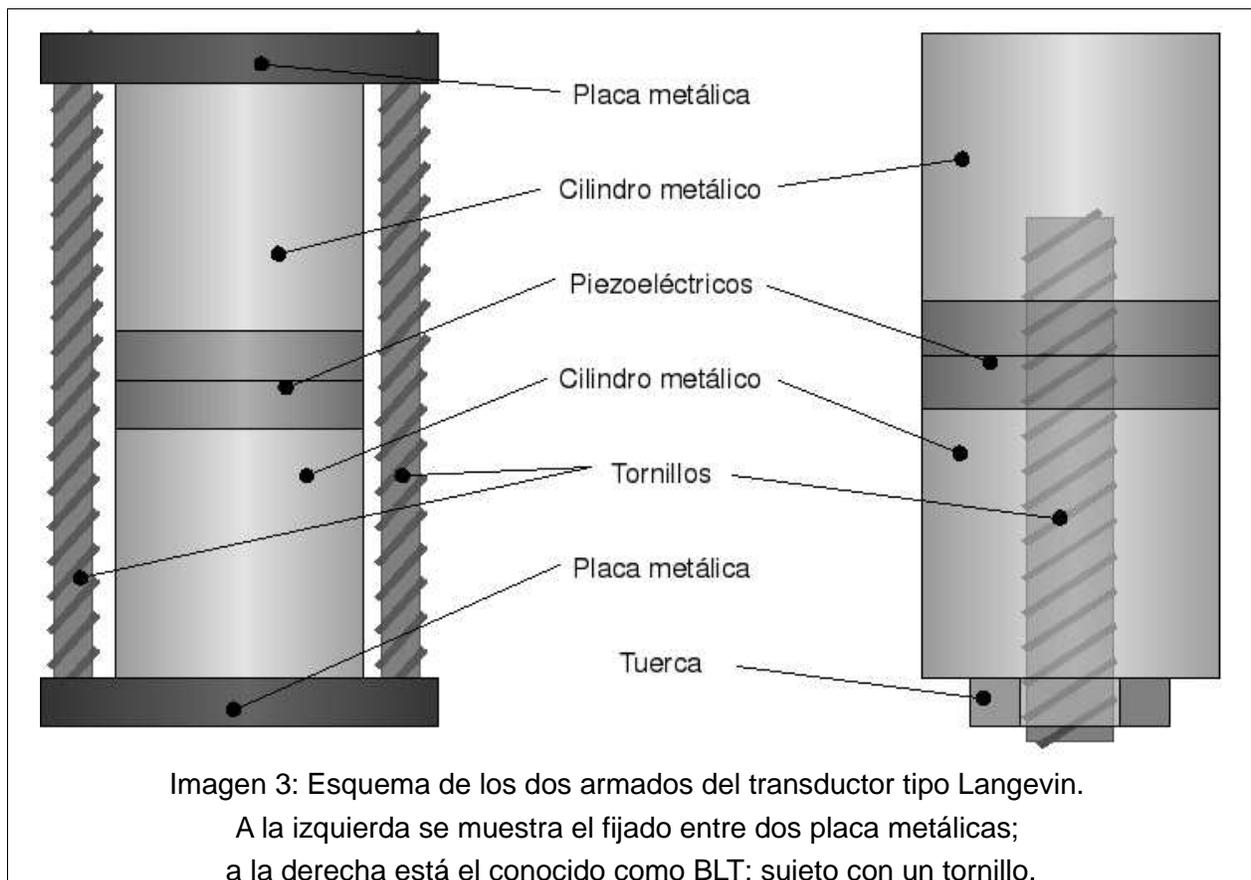
Para llevar a cabo el trabajo descrito en esta tesis, se utilizó un transductor piezoeléctrico del tipo que Langevin ideó; en la literatura se menciona^{[6],[7]} como uno de los más eficientes para generar campos ultrasónicos de alta densidad de energía.

Los transductores tipo Langevin se forman a partir de cierta cantidad de discos piezoeléctricos. Como ya se comentó, Langevin sólo colocó un cristal de cuarzo; hay transductores que utilizan cuatro^{[8],[9]}, seis^[4], ocho o más piezoeléctricos^[10]. Sin embargo, lo más común es colocar sólo dos discos piezoeléctricos polarizados de manera antiparalela.

En los extremos libres de los discos, se colocan cilindros metálicos, los cuales pueden ser

del mismo material y dimensiones.

Como se muestra en la imagen 3, para mantener juntas las partes del transductor, se pueden acomodar las partes entre dos placas metálicas atornilladas^[7]; también se pueden unir por medio de un tornillo que atraviese al dispositivo^{[6],[7],[11],[12],[13],[14]}, al tener uno de los pesos metálicos rosca y el otro extremo fijado con una tuerca. El segundo método es el más usado; a los transductores de este tipo se les suele encontrar abreviados en la literatura como BLT^{[12],[13],[14],[15]} por el inglés “Bolt-clamped Langevin-type Transducer” o transductor de tipo Langevin sujeto con un tornillo.



Con todas estas variables, es normal que existan muchos tipos de transductores Langevin, dependiendo del uso que se le quiera dar. En general suelen ser más largos que anchos, para evitar acoplamiento entre los distintos modos y asegurarse de que sólo oscila en modo longitudinal. Sin embargo, se han fabricado y analizado transductores con anchura comparable e incluso menor que su longitud^[16], justamente para aprovechar los acoplamiento y obtener una mayor amplitud con la misma señal de entrada. Incluso se han

fabricado colocando medios discos polarizados en una dirección y otros en otra para excitar también el modo de flexión^[8].

El transductor que se utilizó en el trabajo que aquí se reporta, tenía dos anillos piezoeléctricos, un peso de aluminio en un lado y un contrapeso de acero en el otro. La frecuencia de resonancia de este transductor era de 27500 Hz. En la imagen 4 se esquematiza el transductor; las flechas indican la dirección de polarización de los piezoeléctricos.

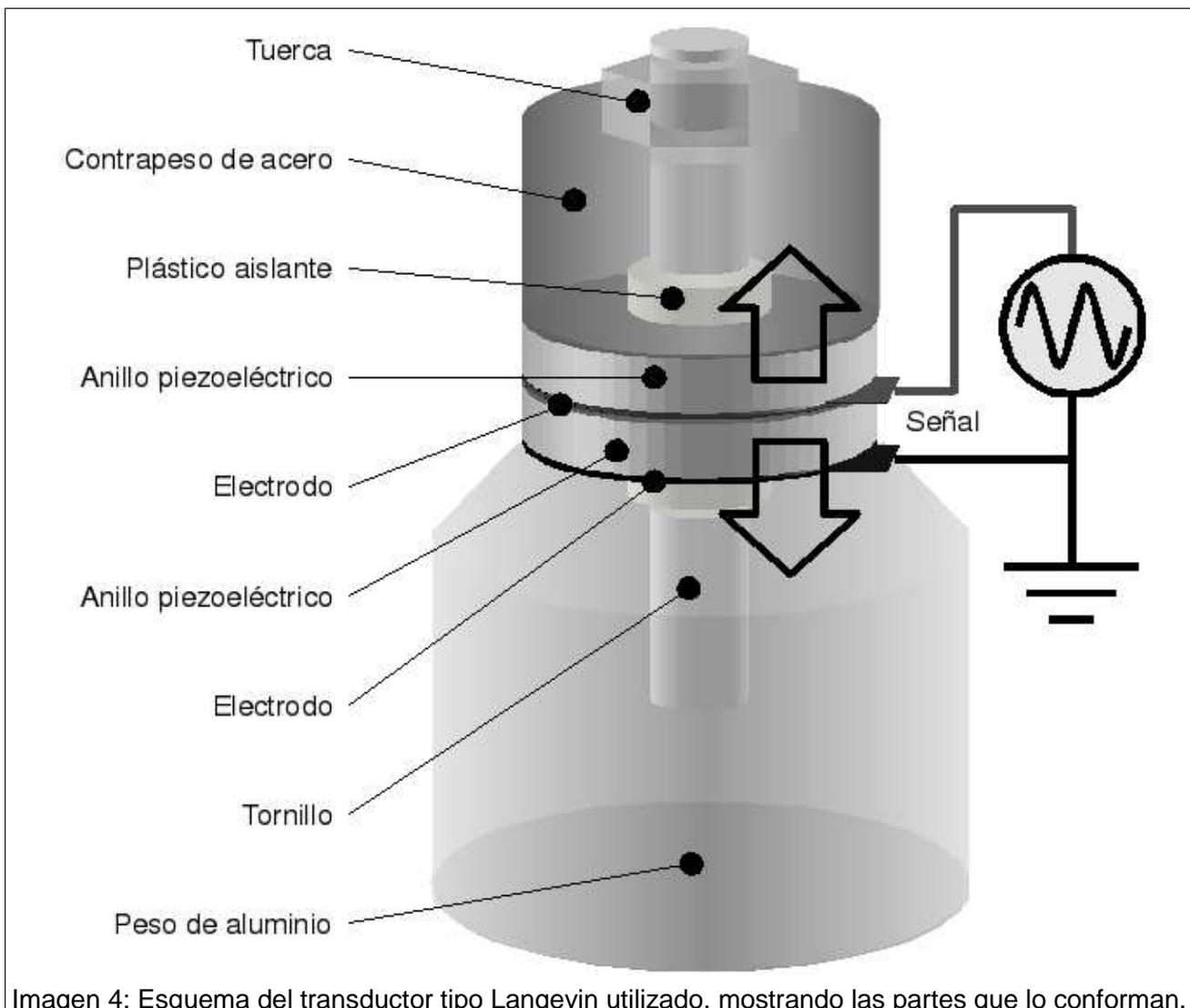
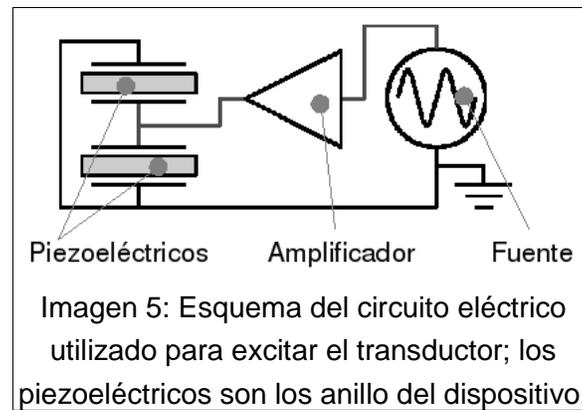


Imagen 4: Esquema del transductor tipo Langevin utilizado, mostrando las partes que lo conforman.

La imagen 5 muestra el esquema eléctrico del circuito con el que se excitan los piezoeléctricos del transductor Langevin. La señal amplificada es alimentada a través del electrodo colocado en la cara que separa a los anillos piezoeléctricos; las caras opuestas

están aterrizadas y ancladas a los contrapesos que se fijan con el tornillo que cierra el circuito; el cual está aislado entre los anillos para no hacer corto.



Al aplicarle una diferencia de potencial variable en el tiempo, los anillos se expanden y se contraen, haciendo que todo el dispositivo oscile en el modo longitudinal.

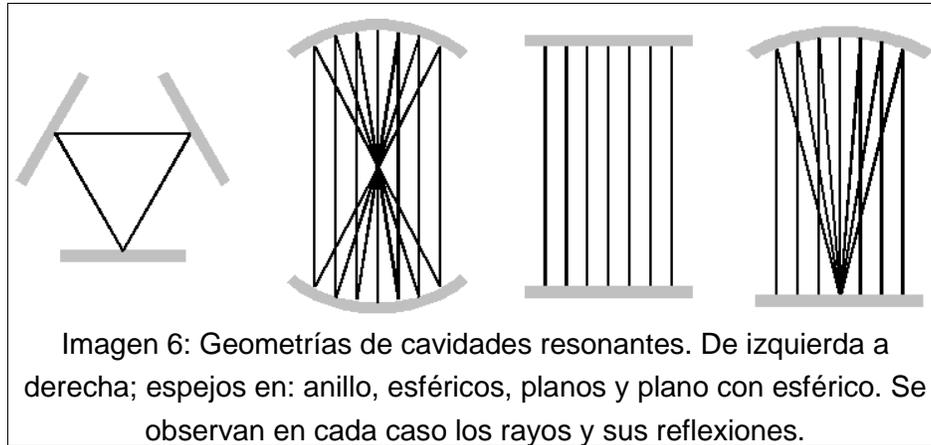
Levitación Acústica

Una de las primeras observaciones de las fuerzas que un campo sonoro puede ejercer sobre los objetos, fue realizada por August Kundt en 1866, al notar cómo se acumulaba el polvo en los nodos de la onda sonora en un tubo resonante; en el llamado tubo de Kundt^[17]. El cual consiste en un tubo transparente horizontal con ambos extremos cerrados, con polvo de corcho; dentro del tubo se coloca polvo de corcho y una varilla concéntrica que sobresale por un extremo, la cual se hace vibrar. De esta manera se genera una onda estacionaria dentro del tubo y el polvo de corcho se concentra sobre el tubo a la altura de los nodos de presión de la onda.

Las fuerzas acústica se deben a la presión de radiación acústica. El primero en estudiar la presión de radiación fue Lord Rayleigh, entre 1902 y 1905, como un complemento acústico de la presión ejercida por ondas electromagnéticas. Al ser un fenómeno muy sutil y no lineal, los investigadores del tema reportaron resultados incompatibles. El asunto debe tratarse con mucho cuidado para obtener respuestas sin ambigüedad^[18].

Otra representación de estas fuerzas, es la levitación acústica. En este caso, las fuerzas acústicas empujan a los objetos hacia los nodos de presión de una onda estacionaria; de manera similar a lo que ocurre en el tubo de Kundt. De esta manera logran que un pequeño objeto levite, oponiéndose incluso a la fuerza de gravedad.

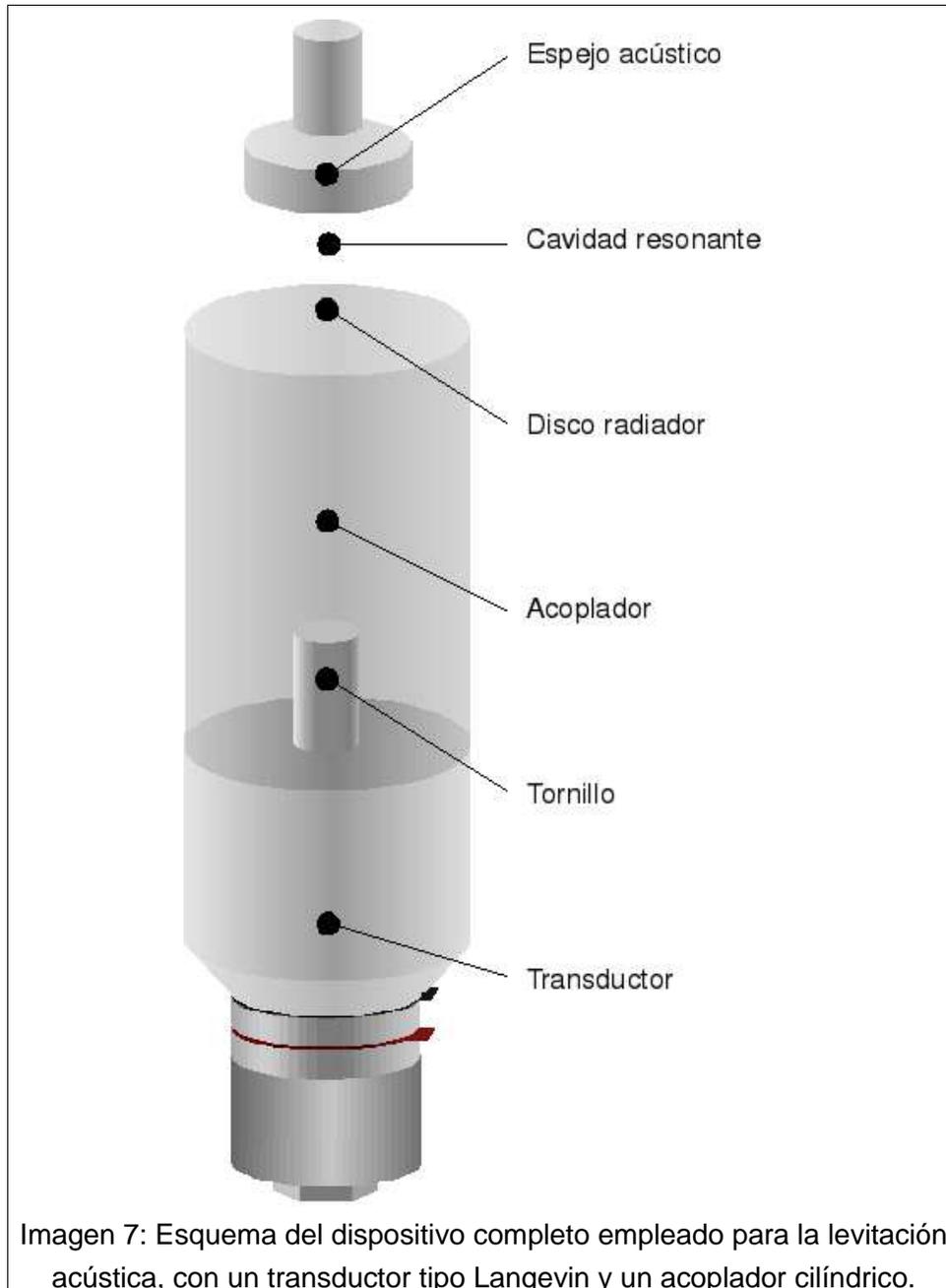
La levitación acústica se obtiene cuando se genera un campo sónico en una cavidad con la geometría adecuada para que escape la menor cantidad de energía. En la imagen 6 se ilustran las reflexiones en algunos tipos de cavidades resonantes^[19].



Para aprovechar al máximo la energía disponible se requiere que, además de la geometría, las dimensiones de la cavidad sean las adecuadas para que exista resonancia, de acuerdo a la longitud de onda con que se esté trabajando.

Aunque tecnológicamente existen otras maneras de levitar objetos, como las pinzas ópticas o la levitación magnética, la variante acústica tiene la ventaja de que puede levitar cualquier tipo de material; no importan sus propiedades magnéticas, eléctricas ni ópticas. Teniendo un campo adecuado, se logra levitar el objeto que sea; no importa si es fluido o sólido; tampoco si tiene alguna simetría.

En la imagen 7 se muestra el dispositivo que se empleó para la levitación acústica; las partes que lo conforman y su función se comentan a continuación.



Acoplador

Esta pieza se anexa al final del transductor Langevin; generalmente se fija con un tornillo que pasa por el eje de simetría. Su finalidad es adaptar el campo del transductor al medio en el que se va a emplear.

El acoplador fue la pieza más estudiada en esta tesis, ya que es la responsable de muchas

características del campo radiado; se buscó que ese campo tuviera la mayor amplitud posible.

De la manera más general, el acoplador se determina por dos características:

1. El área transversal en la parte superior que radia el campo, tanto sus dimensiones como su geometría. En el caso estudiado, el área transversal permaneció circular, y según el caso se redujo el diámetro de 4.5 cm a 1 cm o permaneció en 4.5 cm.
2. El perfil con el que cambia el área transversal, a lo largo del eje. En este caso se utilizaron distintas geometrías en los experimentos; cilíndrico, cónico, exponencial y escalonado, que son las que más se encuentran en la literatura^{[7],[20]}.

Disco Radiador

El disco radiador no es una pieza en sí; sólo es la parte final del acoplador. Cuando el acoplador disminuye el área, suele ser una pequeña terminación de mayor superficie.

Esta parte es utilizada para que el campo tenga un área mayor y sea más estable, de esta manera es más fácil levitar objetos. Se encuentra reportado^[7] que las dimensiones de esta parte son las que tienen mayor impacto en la estabilidad de la levitación acústica; aunque se comenta que es totalmente opcional para la levitación, nadie ha reportado el poder levitar sin disco radiador.

Espejo Acústico

Los espejos acústicos son pequeñas piezas metálicas con una cara plana o cóncava hacia el transductor. La concavidad puede ser esférica, parabólica o hiperbólica. Sin embargo, se ha encontrado que la concavidad esférica es más eficiente para levitar objetos^[21]; además es la más sencilla de manufacturar.

En el trabajo que se reporta, sólo se utilizaron espejos planos o esféricos.

Cavidad Resonante

La cavidad resonante es el espacio contenido entre el disco radiador y el espejo acústico. Es aquí donde se forman las ondas estacionarias y se realiza la levitación.

Dada la gran diferencia de impedancia acústica existente entre el aire y el metal, se puede considerar que el espejo acústico y el disco radiador se comportan como paredes rígidas,

que al llegar a ellos la onda viajera, se regresa hacia la otra superficie. Cuando la dimensión de la cavidad es la adecuada, la onda se refleja con la misma fase de la onda incidente y se obtiene resonancia. La dimensión ideal de la cavidad resonante es un número entero de medias longitudes de onda, dada la velocidad del sonido en el aire y la frecuencia de resonancia del transductor.

Objetivo de la Investigación

El objetivo principal del trabajo que se presenta en esta tesis fue estudiar el funcionamiento del transductor piezoeléctrico de tipo Langevin. También la manera de obtener la mayor cantidad de energía radiada, teniendo un transductor, modificando la torca con que se ajuste el transductor y diseñando el acoplador a partir de simulaciones.

Motivación del Trabajo

La motivación de estudiar la generación de campos ultrasónicos de alta intensidad fue para emplearlos, principalmente, en la levitación de objetos y en el bombeo de agua.

De acuerdo con la información reportada en la literatura sobre el tema, los transductores tipo Langevin son los más adecuados para la levitación acústica^{[7],[22],[23]}. Además, fue el primer transductor reportado que se utilizó para la bomba ultrasónica^{[9],[14]}.

Además de estos usos, los campos que aquí se presentan tienen muchas otras posibles aplicaciones.

1 SIMULACIONES

Una buena parte de las investigaciones que se han llevado a cabo sobre estos transductores ha sido en simulaciones por computadora^{[11],[12],[13],[16],[21],[24]}; normalmente los resultados numéricos se presentan con alguna verificación experimental.

En este capítulo se presentan las simulaciones que se llevaron a cabo en esta tesis para conocer algunas características de los acopladores adaptados al transductor Langevin.

Las simulaciones se realizaron por el método de análisis de elemento finito. Este método numérico es ampliamente utilizado para obtener soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales sobre situaciones reales complejas con condiciones de frontera. Consiste en dividir los objetos involucrados en el problema en pequeños volúmenes y luego resolver las ecuaciones entre estos fragmentos con métodos numéricos sencillos. Estos pequeños volúmenes son los elementos finitos. Al conjunto de los elementos finitos se les suele llamar mallado^[25].

1.1 Programa

Las simulaciones se llevaron a cabo en el programa comercial ANSYS. Este programa es capaz de resolver distintos tipos de problemas físicos; térmicos y mecánicos. Entre los problemas mecánicos, una de las posibilidades que tiene es encontrar los modos normales de vibración de una estructura; es en este sentido que este programa resulta de interés en el trabajo que se presenta.

El uso de este programa se divide en tres grandes fases^[25]:

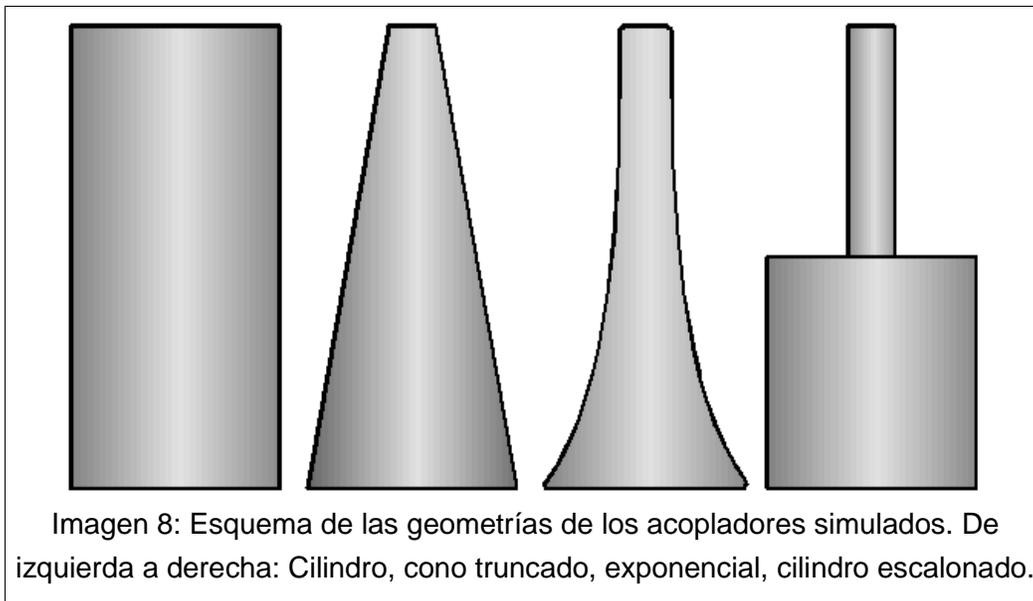
1. **Preproceso.** En la primera fase, se introduce la geometría de los cuerpos en los que se va a realizar el análisis; luego se hace el mallado; es decir se divide en los elementos finitos. Posteriormente se aplican las propiedades elásticas o térmicas de los materiales con que se está trabajando.
2. **Solución.** En la segunda fase se define el tipo de análisis a realizar. Una vez definido el análisis, se da la instrucción de realizar los cálculos; lo cual, dependiendo de la complejidad del análisis a realizar y la capacidad de cómputo disponible, puede tomar desde unos cuantos segundos hasta varias horas.
3. **Postproceso.** La tercera fase es la visualización de los resultados obtenidos. Se

puede obtener información muy diversa de los resultados. Por ejemplo: el desplazamiento en cada coordenada, la frecuencia de cada modo; tanto en tablas o gráficas como en animaciones.

Es importante la visualización de los datos obtenidos, porque permite conocer cuál es el modo buscado. En este caso sólo resultan de interés los modos longitudinales fundamentales; es decir, el de menor frecuencia de aquéllos en los que el movimiento sea mayormente paralelo al eje de simetría.

1.2 Acopladores

Se simularon acopladores con las cuatro geometrías que más se encuentran en la literatura, comentadas en la introducción. Los perfiles de estos acopladores se muestran en la imagen 8; posteriormente se fabricaron en aluminio: Cilindro, cono truncado, exponencial y escalonado.



Lo más importante que se buscó obtener en los acopladores simulados, fue que la frecuencia de resonancia de su primer modo longitudinal se aproximara lo más posible a 27500 Hz, para que coincidiera con la del transductor Langevin al cual iban a ser anexados.

También se buscó, en los casos en los que se pudieran obtener distintos acopladores con la misma geometría y la misma frecuencia, que la amplificación fuera máxima. Esta amplificación está dada por el cociente de la amplitud de desplazamiento en la cara de

menor área entre la amplitud de desplazamiento en la cara opuesta. El programa da el resultado del desplazamiento en unidades arbitrarias, ya que depende de la amplitud con que se excite el modo; sin embargo, las unidades utilizadas no interesan, ya que al hacer el cociente se cancelan y se obtiene un valor adimensional. Dada la simetría, el acoplador cilíndrico siempre tiene un factor de amplificación igual a uno.

El radio mayor de los acopladores, estaba determinado por la cara del transductor en la cual iban a ser ajustados; en este caso es de 2.25 cm. Para los tres acopladores que varían su radio transversal a lo largo de su eje, se definió el radio menor en 0.5 cm. Aunque el cono también se simuló con distintos radios menores.

Cada acoplador tiene por lo menos otro parámetro para que su modo longitudinal fundamental se ajuste a la frecuencia buscada: la longitud total. Para obtenerla, se fue ajustando a partir de la mitad de la longitud de onda en el aluminio, dada la frecuencia. Si la frecuencia obtenida para el modo buscado era menor que la que se quería, se hacía más largo el acoplador; y a la inversa, si la frecuencia era mayor, se tenía que hacer más corto.

Además, el exponencial depende del factor de decaimiento exponencial; en la imagen 9 se ilustran distintos acopladores exponenciales con distinto factor exponencial y todos los demás parámetros idénticos. El escalonado depende también de la posición del cambio de diámetro; en la imagen 10 se muestran algunos esquemas de acopladores escalonado con todos los parámetros iguales salvo la posición del cambio de diámetro.

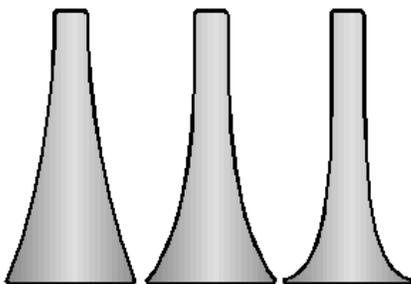


Imagen 9: Acopladores exponenciales con distinto factor de decaimiento exponencial.

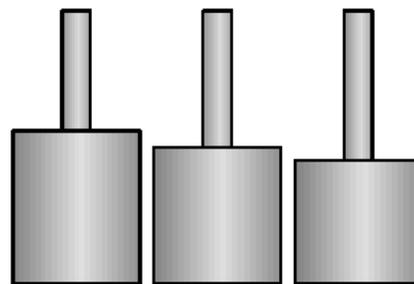


Imagen 10: Acopladores escalonados con el cambio de diámetro en distinta posición.

Para determinar tanto el factor exponencial como la posición del cambio de diámetro, se buscó que la amplificación fuera lo mayor posible.

Para llevar a cabo las simulaciones, se le deben proporcionar al programa algunas propiedades elásticas del material con que se está trabajando; como los acopladores están fabricados en aluminio, los datos que se introdujeron en el programa ANSYS son los

siguientes:

$$\text{Densidad} = \rho = 2700 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Módulo de Young} = E = 70 \text{ GPa}$$

$$\text{Razón de Poisson} = \nu = 0.35$$

El módulo de Young es un parámetro elástico definido como el cociente de la tensión aplicada sobre un cuerpo en cierta dirección entre la deformación que sufre en esa dirección. La razón de Poisson es el negativo del cociente de la deformación en la dirección de la tensión entre la deformación en la dirección perpendicular.

1.2.1 Resultados

1.2.1.1 Cilindro

El cilindro, por sus características geométricas, en su modo longitudinal fundamental oscila como media longitud de onda: Tiene un plano nodal de desplazamiento en el plano de simetría perpendicular al eje, y conforme se aleja de ese plano, la amplitud del desplazamiento se incrementa.

Para obtener la longitud a la cual el cilindro, en el modo longitudinal fundamental, oscila en la frecuencia que se desea obtener^[20], se calcula la mitad de la longitud de onda, dada la velocidad del sonido en el aluminio; la cual, dependiendo de la aleación está cerca de los 5000 m/s. Una manera de obtener la velocidad del sonido en un medio es a partir de los datos de la elasticidad del material; para el caso de ondas longitudinales en un cilindro, se obtiene de la siguiente manera:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{70 \times 10^9 \text{ Pa}}{2700 \text{ kg/m}^3}} = 5091 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad [26]$$

Donde c es la velocidad del sonido en el medio, E es el módulo de Young y ρ es la densidad.

A partir de este dato, se calcula la mitad de la longitud de onda:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{50910 \text{ m/s}}{27500 \text{ Hz}} = 0.1851 \text{ m} \Rightarrow \frac{\lambda}{2} = \frac{18.55 \text{ cm}}{2} = 9.26 \text{ cm}$$

Aquí, λ es la longitud de onda y ν es la frecuencia.

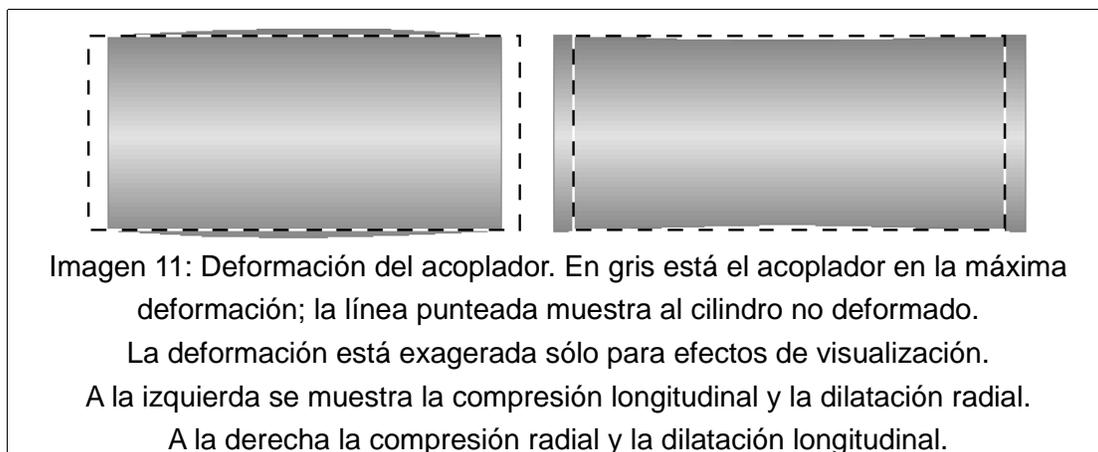
A partir de este dato se hicieron simulaciones con distintas longitudes cercanas a los 9 cm para el acoplador cilíndrico. Se obtuvo lo siguiente:

Acoplador Cilíndrico		
Longitud [cm]	Frecuencia [Hz]	Diferencia [%]
9.05	27568	0.25
9.07	27508	0.03
9.10	27423	0.28

Tabla 1: Frecuencia obtenida para distintas longitudes del acoplador cilíndrico. Se muestra también la diferencia porcentual con la frecuencia buscada de 27500 Hz. El radio del acoplador permanece fijo en 2.25 cm.

Los datos de la tabla 1 indican que la longitud del cilindro debe ser de 9.07 cm para conseguir una frecuencia un 0.03% distinta de los 27500 Hz. Pero ninguno de los simulados se aleja por más de 0.28%.

Los resultados obtenidos para la longitud del cilindro son ligeramente distintos a los calculados anteriormente; esta diferencia se puede deber a que la ecuación presentada para obtener la velocidad de las ondas longitudinales en un cilindro elástico, considera: que el movimiento es estrictamente en una sola dimensión y que las dimensiones radiales son mucho más pequeñas que las longitudinales. De los resultados de los cálculos del programa, se observa que la vibración, aunque en mucha menor medida, también ocurre en la dirección radial como se ilustra en la imagen 11.



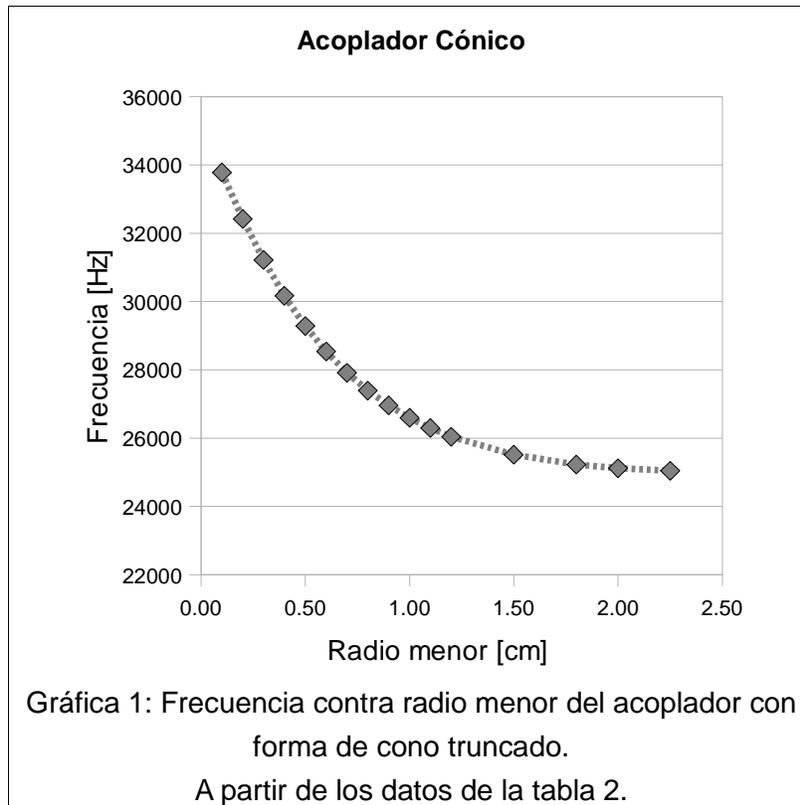
Como es de esperarse, el factor de amplificación de este acoplador es igual a uno.

1.2.1.2 Cono

Para el acoplador cónico se hicieron dos juegos de simulaciones. En la primera parte se fue variando el radio menor manteniendo la longitud fija.

Acoplador Cónico	
Radio menor [cm]	Frecuencia [Hz]
0.10	33781
0.20	32421
0.30	31218
0.40	30167
0.50	29282
0.60	28538
0.70	27914
0.80	27394
0.90	26959
1.00	26596
1.10	26294
1.20	26042
1.50	25517
1.80	25228
2.00	25120
2.25	25045

Tabla 2: Frecuencias obtenidas para distintos valores del radio menor de un cono truncado. El radio mayor permanece en 2.25 cm y la longitud en 10 cm.

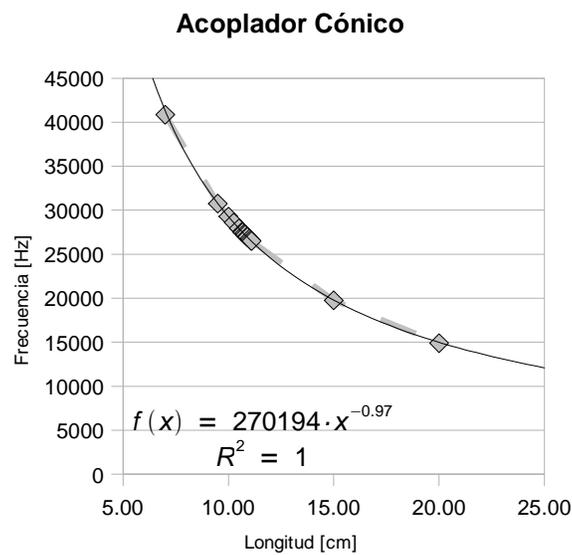


De los datos de la tabla 2 y la gráfica 1 se observa que la dependencia de la frecuencia con el radio menor es bastante importante. Esto se nota más cuando el radio en cuestión es más pequeño que 1 cm; donde la frecuencia se incrementa notablemente mientras disminuye el radio. Cuando el radio menor es mayor que 1 cm, la frecuencia varía apenas un 4%; conservándose prácticamente igual que si fuera un cilindro. Cuando el radio menor está en el mayor valor; 2.25 cm, ambos radios son iguales, es decir, se trata de un cilindro.

En la segunda parte se mantuvo fijo el radio menor, cambiando la longitud.

Acoplador Cónico	
Longitud [cm]	Frecuencia [Hz]
7.00	40848
9.50	30750
10.00	29281
10.25	28598
10.50	27944
10.65	27566
10.67	27516
10.68	27499
10.75	27320
10.80	27198
10.88	27005
10.90	26958
11.00	26771
11.05	26605
11.10	26489
15.00	19760
20.00	14882

Tabla 3: Frecuencias para el cono truncado para distintos valores de la longitud. El radio mayor está en 2.25 cm y el menor en 0.5 cm.



Gráfica 2: Frecuencia vs. longitud del acoplador cónico. De de la tabla 3. Se muestra la línea de tendencia y su ecuación.

En la tabla 3 y la gráfica 2 se muestra como varía la frecuencia, teniendo ambos radios fijos, al cambiar la longitud del cono. Se observa un comportamiento parecido a una relación de proporción inversa entre las variables. Al hacer un ajuste con la línea de tendencia mostrada en la misma gráfica, se obtiene la siguiente ecuación:

$$v(x) = 270194 \cdot x^{-0.97}$$

Con un valor de ajuste de R^2 igual a 1.

Como los radios se habían decidido anteriormente, en 2.25 cm y 0.5 cm, el cono que interesaba fabricar, para ajustar la frecuencia en 27500 Hz, es el de longitud igual a 10.68 cm.

Como los diámetros estaban decididos anteriormente, y sólo se ajustó la longitud para obtener la frecuencia, el factor de amplificación no se tomó en cuenta, pero sí se midió. Para el cono que mejor ajusta la frecuencia, se obtuvo una amplificación de 3.21.

1.2.1.3 Exponencial

El perfil del acoplador exponencial corresponde a la siguiente fórmula:

$$y = B + A \cdot e^{-\gamma \cdot x}$$

Donde y es el radio del acoplador para la posición x a lo largo del eje de simetría x ; γ es el factor de decaimiento exponencial. A y B son constantes que se fijan para cada caso de la siguiente manera:

$$A = \left(\frac{R-r}{1-e^{-\gamma \cdot L}} \right) \quad B = R-A$$

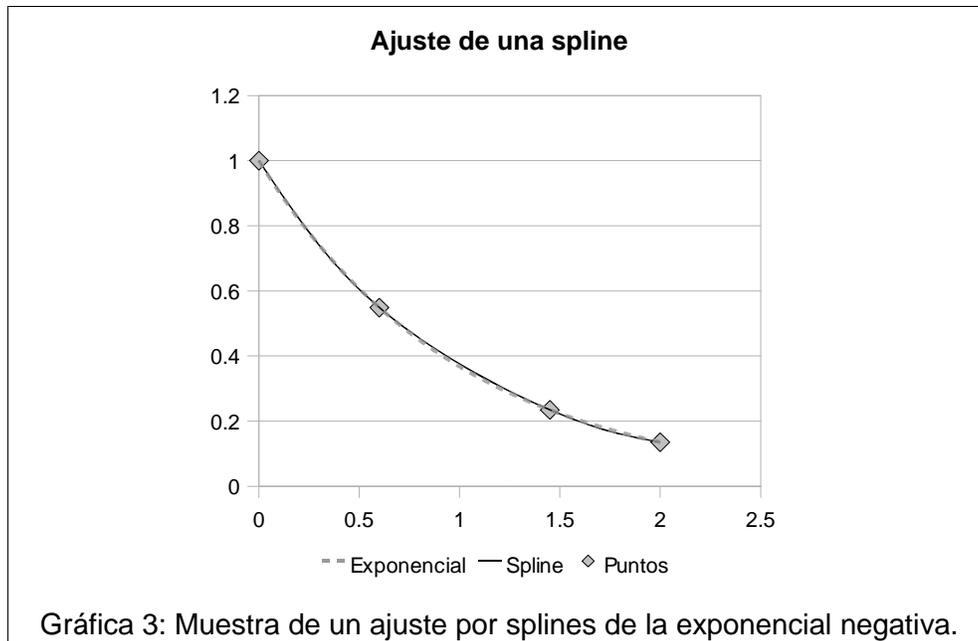
En este caso R es el radio mayor del acoplador, igual a 2.25 cm; r es el radio menor, con un valor de 0.5 cm y L es la longitud total del acoplador, que se fija en 10 cm. A partir de estos datos se obtiene:

$$y(0) = (R-A) + A \cdot e^0 = R-A + A = R$$

$$y(L) = (R-A) + A \cdot e^{-\gamma \cdot L} = R - A \cdot (1 - e^{-\gamma \cdot L}) = R - \left(\frac{R-r}{1 - e^{-\gamma \cdot L}} \right) \cdot (1 - e^{-\gamma \cdot L}) = R - (R-r) = r$$

Al generar la geometría en el programa, se introdujeron veinte puntos equidistantes sobre el

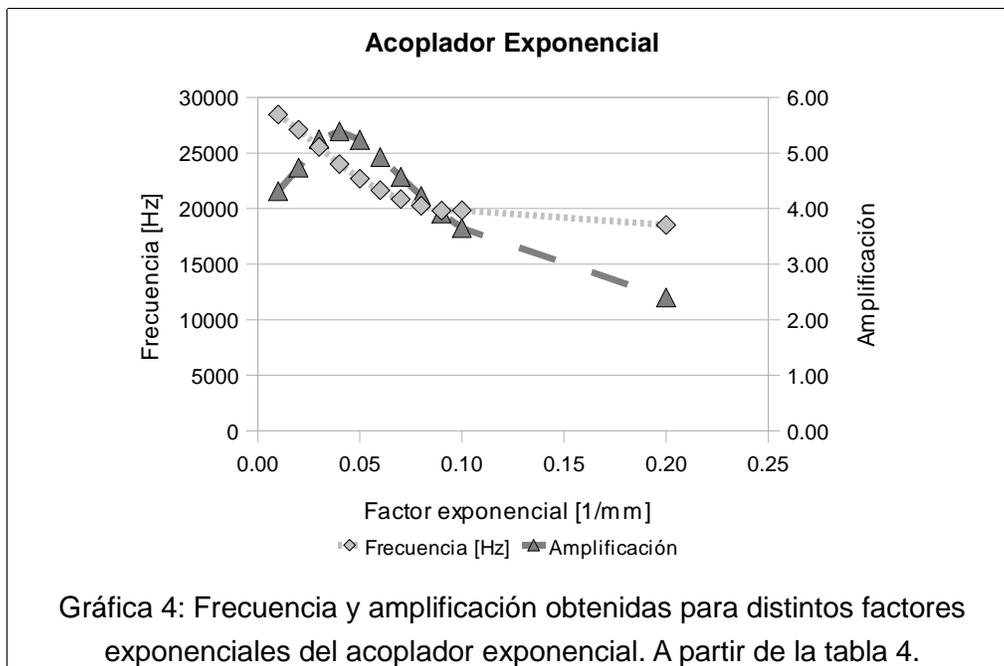
eje, entre los cuales se aproximaba el perfil exponencial por medio de splines; los splines son interpolaciones a trozos de curvas a partir de polinomios de bajo grado; suelen dar aproximaciones muy cercanas a las curvas reales. Por su facilidad de cálculo y su alta precisión, son ampliamente utilizadas tanto en diseño asistido por computadora, como en análisis numérico. En la gráfica 3 se muestra un ajuste a la función e^{-x} con una spline trazada a partir sólo de los cuatro puntos mostrados.



Fijando los radios menor y mayor, en 0.05 y 2.25 cm respectivamente, e igualmente que en el caso del cono, la longitud del acoplador en 10 cm; en este caso se fue variando la constante de decaimiento.

Acoplador Exponencial		
γ [mm ⁻¹]	Frecuencia [Hz]	Amplificación
0.01	28467	4.32
0.02	27111	4.74
0.03	25547	5.25
0.04	24015	5.39
0.05	22696	5.24
0.06	21647	4.93
0.07	20848	4.57
0.08	20252	4.23
0.09	19810	3.92
0.10	19845	3.65
0.20	18533	2.40

Tabla 4: Frecuencia y factor de amplificación obtenidos para los acopladores exponenciales, variando la constante de decaimiento. Radio mayor en 2.25 cm, radio menor en 0.5 cm, longitud en 10 cm.



La tabla 4 muestra las distintas frecuencias y amplificaciones que se obtienen para los acopladores exponenciales; en la gráfica 4 se ilustran estos resultados. Se observa que la frecuencia decrece cuando aumenta el valor de γ ; pasando por la frecuencia de interés. Como se puede observar en la gráfica, la amplificación tiene un máximo para la constante de decaimiento igual a 0.04 mm⁻¹.

Ya que lo que se desea es generar campos de la mayor intensidad posible, en este punto nos interesa más maximizar la amplificación que hacer coincidir la frecuencia; la frecuencia se puede ajustar al cambiar la variable que resta determinar; la longitud total.

El ajuste de la longitud se hace redimensionando el acoplador, a partir del anterior con la constante de decaimiento de 0.04 mm^{-1} . De esta manera, la fórmula para obtener el radio como función de la posición a lo largo del eje del acoplador sería:

$$y = B + A \cdot \exp\left(-\gamma \cdot \left(\frac{10}{D}\right) \cdot x\right)$$

Donde A y B están calculadas a partir de la longitud inicial de 10 cm y D es la nueva longitud del acoplador en centímetros. El valor de γ está fijo en 0.04 mm^{-1} .

Al variar la longitud, se busca que ajuste la frecuencia a los 27500 Hz del transductor Langevin.

Acoplador Exponencial		
Longitud [cm]	Frecuencia [Hz]	Diferencia %
9.000	26625	3.18
8.710	27488	0.04
8.704	27507	0.03
8.700	27519	0.07

Tabla 5: Frecuencias obtenidas para distintas longitudes del acoplador exponencial redimensionado; el factor exponencial está en 0.04 mm^{-1} en todos los casos. También se muestra la diferencia porcentual con la frecuencia del transductor.

Como se puede observar en la tabla 5, la longitud que mejor ajusta es de 8.704 cm. La resolución que se requiere para fabricar el acoplador de esa dimensión lo más exacta posible, no es muy práctica. Sin embargo, al ver los datos cercanos, de 8.710 cm y 8.700 cm, los cuales están alejados menos que una parte por mil, se concluye que cualquiera de estas tres longitudes es aceptable para acoplarlo al transductor.

Después de hacer el ajuste de la longitud, se obtuvo un factor de amplificación de 5.49 para el acoplador de 8.704 cm.

1.2.1.4 Escalonado

El acoplador escalonado está considerado^{[7],[20]} como el más eficiente para generar campos de alta intensidad. Se menciona que este acoplador oscila de igual manera que el cilíndrico;

como media longitud de onda^{[6],[7]}, como si cada parte de distinto diámetro oscilara como un cuarto de longitud de onda, y se tuviera un plano nodal de desplazamiento en la mitad del acoplador, donde cambia el diámetro. Las simulaciones de este cilindro, comenzaron con una longitud de 9 cm, para ajustarla hacia donde hiciera falta. El cambio de diámetro o escalón permaneció a la mitad del acoplador. A continuación se muestran los datos obtenidos.

Acoplador Escalonado		
Longitud [cm]	Frecuencia [Hz]	Diferencia %
9.00	25741	6.4
8.40	27425	0.27
8.38	27488	0.04
8.37	27551	0.27
8.20	28036	1.95

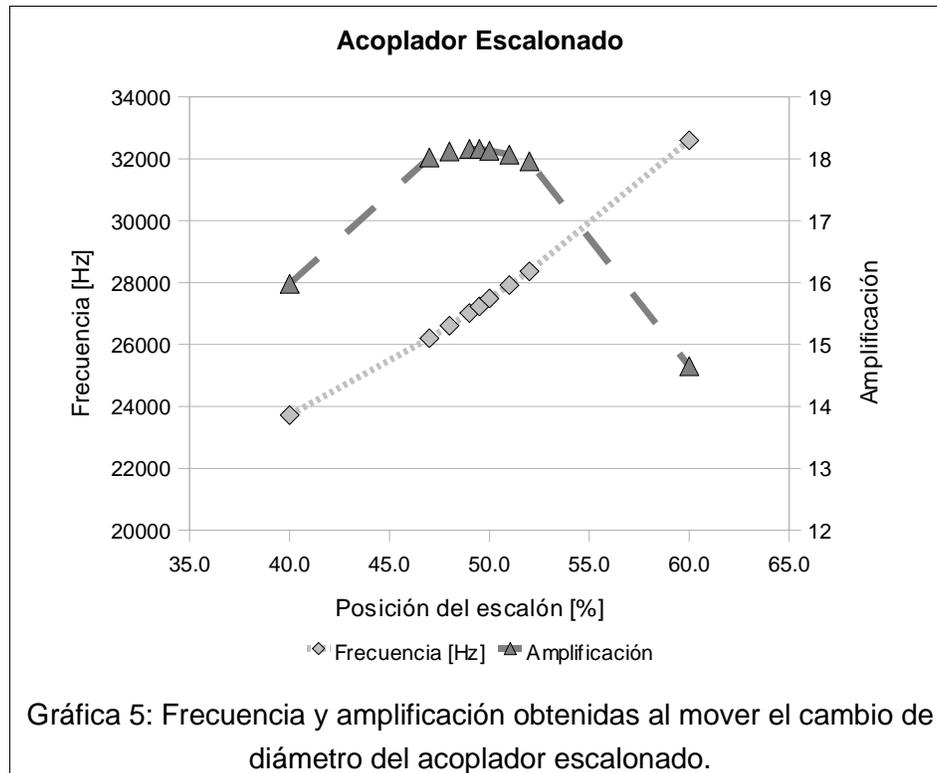
Tabla 6: Frecuencia de resonancia obtenida para distintas longitudes del acoplador escalonado. También se muestra la diferencia porcentual con la frecuencia del transductor.

De la tabla 6 se observa que la longitud más adecuada es de 8.38 cm.

También se observó el cambio de la frecuencia del primer modo longitudinal y del poder de amplificación cuando el escalón se desplaza ligeramente de la mitad del acoplador. La longitud se mantuvo en el valor más adecuado para la frecuencia buscada, de 8.38 cm. La amplificación, igual que en el caso del exponencial, se obtuvo con el cociente de los desplazamientos en los extremos de la pieza.

Acoplador Escalonado		
Posición %	Frecuencia [Hz]	Amplificación
40.0	23722	15.98
47.0	26199	18.02
48.0	26605	18.12
49.0	27021	18.16
49.5	27231	18.16
50.0	27488	18.13
51.0	27918	18.07
52.0	28366	17.96
60.0	32595	14.65

Tabla 7: Frecuencia y amplificación para el acoplador escalonado, moviendo el escalón de la mitad. La longitud total del acoplador es de 8.38 cm.



La posición relativa del escalón está medida desde la parte de mayor radio, donde se junta con el transductor. De la tabla 7 y la gráfica 5, se puede observar que la variación de la frecuencia es prácticamente lineal, obteniendo valores muy distintos. También, al fijarse en la amplificación, se observa un máximo cerca del 49%. La diferencia de la amplificación con el escalón en la mitad, es mínima.

1.3 Análisis

Al comparar los resultados obtenidos a partir de las simulaciones para los distintos acopladores se observan las siguientes situaciones:

1. Primero que la longitud para todos ellos es distinta; en la tabla 8 se muestra este dato para las cuatro geometrías. Esto parece indicar que la manera de vibrar de todos es diferente. Por las simetrías de cada figura, sólo puede ser que el cilíndrico oscile como media longitud de onda.

Acoplador	Longitud [cm]	Frecuencia [Hz]
Cilindro	9.07	27508
Cono	10.68	27499
Exponencial	8.71	27488
Escalón	8.38	27488

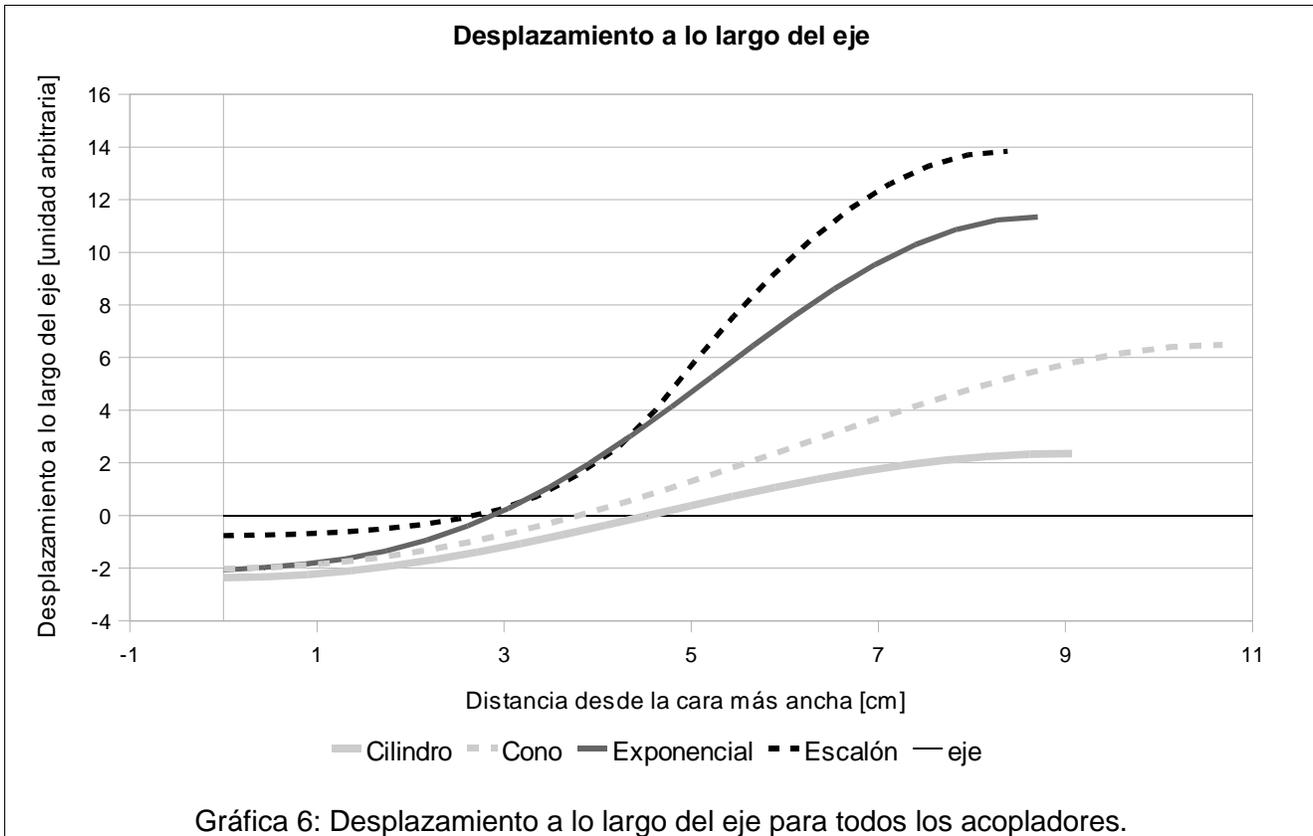
Tabla 8: Longitud obtenida en las simulaciones para cada acoplador para obtener la frecuencia indicada.

2. De estas diferencias de longitud, también llama la atención el hecho de que el cono es el más largo de todos, más de un centímetro mayor que el cilindro. El exponencial, es el más parecido al cilindro en dimensiones, siendo más pequeño por menos en medio centímetro; aunque este dato podría variar dependiendo de la constante de decaimiento exponencial. La longitud del escalonado se separa notablemente de la del cilíndrico, cerca de un centímetro; en este caso se podría variar al colocar el escalón en otra posición.

Llama la atención la diferencia de las dimensiones del acoplador escalonado con los 9 cm aproximados del cilindro. Además, en los 9 cm, la frecuencia es 1759 Hz más baja que la buscada. Dado este resultado, al ser idénticas las propiedades elásticas, la manera de oscilar de este acoplador no puede ser como la media longitud de onda de un cilindro.

1.3.1 Desplazamiento

Para comprender un poco más la manera de oscilar de los distintos acopladores, se puede observar el desplazamiento a lo largo del eje. En la siguiente gráfica se ilustra esta información.



La gráfica 6 muestra el desplazamiento a lo largo del eje. La razón por la cual cada curva termina a distinta distancia es justamente porque cada acoplador tiene una longitud distinta, como se hace notar más arriba. Además se observa que se desplaza mucho menos la parte más masiva de todos menos el cilíndrico al ser simétrico con el plano nodal de desplazamiento, es decir el plano donde no hay movimiento longitudinal.

A partir de estos datos, también se puede obtener la posición del plano nodal para cada acoplador, esto se muestra en la tabla 9.

Acoplador	Longitud Total [cm]	Posición del Plano Nodal	
		Absoluta [cm]	Relativa [%]
Cilindro	9.07	4.54	50
Cono	10.68	3.74	35
Exponencial	8.71	2.85	33
Escalón	8.38	2.65	32

Tabla 9: Posición absoluta y relativa del plano nodal del primer modo longitudinal de los cuatro acopladores.

Otro dato que se obtiene a partir de la misma gráfica 6, es el poder de amplificación de los acopladores, el cual se muestra a continuación:

Factor de Amplificación	
Cilindro	1.00
Cono	3.21
Exponencial	5.49
Escalón	18.13

Tabla 10: Comparativa de la amplificación del desplazamiento de los distintos acopladores.

La tabla 10 contiene información muy relevante para obtener los campos de mayor densidad de energía: el cilindro, como es de esperarse, no amplifica el desplazamiento, el cono y el exponencial amplifican más del triple y el quíntuple respectivamente. Pero el acoplador escalonado amplifica el desplazamiento en dieciocho veces; de las geometrías analizadas, por mucho, es la más eficiente desde este punto de vista.

Sin embargo, en la literatura se encuentra^{[6],[20]} que el poder de amplificación de un acoplador escalonado es igual al cociente entre las áreas; en este caso sería:

$$Amplificación = \frac{áreamayor}{áreamenor} = \frac{\pi \cdot R^2}{\pi \cdot r^2} = \left(\frac{R}{r}\right)^2 = \left(\frac{2.25\text{ cm}}{0.5\text{ cm}}\right)^2 = 4.5^2 = 20.25$$

Algo más de un 10% mayor que lo obtenido en las simulaciones; esta diferencia puede deberse a que en realidad el movimiento no es únicamente longitudinal.

2 EXPERIMENTOS

2.1 Torca

Se realizaron una serie de experimentos para observar los cambios en la respuesta del transductor Langevin con respecto a la torca con que fuera ajustada la tuerca que ensambla las partes del transductor.

La torca se midió con una llave dinamométrica o torquímetro. Para utilizar esta llave, primero se determina la torca con que se quiere ajustar la tuerca; al enroscar la tuerca, emite un pequeño chasquido al llegar a la torca deseada.

Una vez ajustado el transductor con la torca determinada, se midió la amplitud y las frecuencias de resonancia con un analizador de doble canal marca Brüel & Kjær con número de modelo 2034; se aprovechó el generador de señales integrado en el analizador para alimentar el transductor con ruido blanco.

Torca = 30.5 N·m	
Frecuencia [Hz]	Amplitud [mV]
24834	2.66
24965	3.17
25009	3.27
25578	4.58
25600	4.64
25621	4.03
35050	0.67
46775	0.61
48735	0.95

Tabla 11: Frecuencias de resonancia y amplitudes obtenidas para el transductor Langevin armado con una torca de 30.5 N·m aplicada sobre la tuerca.

Torca = 37.3 N·m	
Frecuencia [Hz]	Amplitud [mV]
25140	6.01
25250	6.47
25293	6.62
25315	6.59
26321	4.21
26343	4.18
26387	4.27
26803	3.54
26825	3.94
26825	3.36
31943	1.19
41196	1.13
48262	1.04
49290	3.45

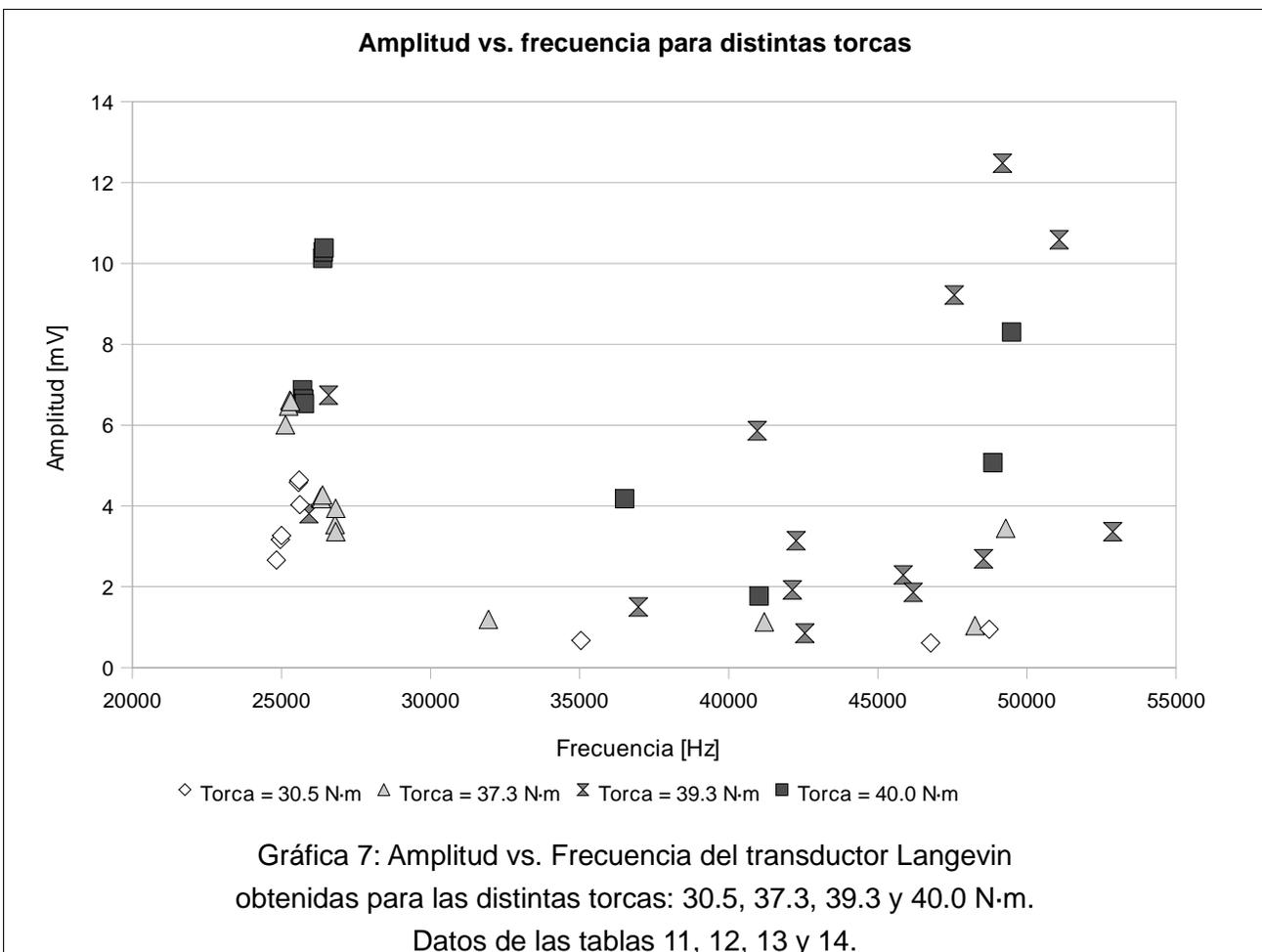
Tabla 12: Frecuencias de resonancia y amplitudes obtenidas para el transductor Langevin armado con una torca de 37.3 N·m aplicada sobre la tuerca.

Torca = 39.3 N·m	
Frecuencia [Hz]	Amplitud [mV]
25928	3.81
26584	6.74
36975	1.5
40956	5.86
42137	1.92
42265	3.14
42553	0.85
45856	2.29
46184	1.86
47562	9.22
48546	2.69
49181	12.48
51084	10.59

Tabla 13: Frecuencias de resonancia y amplitudes obtenidas para el transductor Langevin armado con una torca de 39.3 N·m aplicada sobre la tuerca.

Torca = 40.0 N·m	
Frecuencia [Hz]	Amplitud [mV]
25709	6.87
25753	6.65
25775	6.53
26387	10.13
26409	10.28
26431	10.38
36515	4.18
41021	1.77
48853	5.07
49487	8.3

Tabla 14: Frecuencias de resonancia y amplitudes obtenidas para el transductor Langevin armado con una torca de 40.0 N·m aplicada sobre la tuerca.



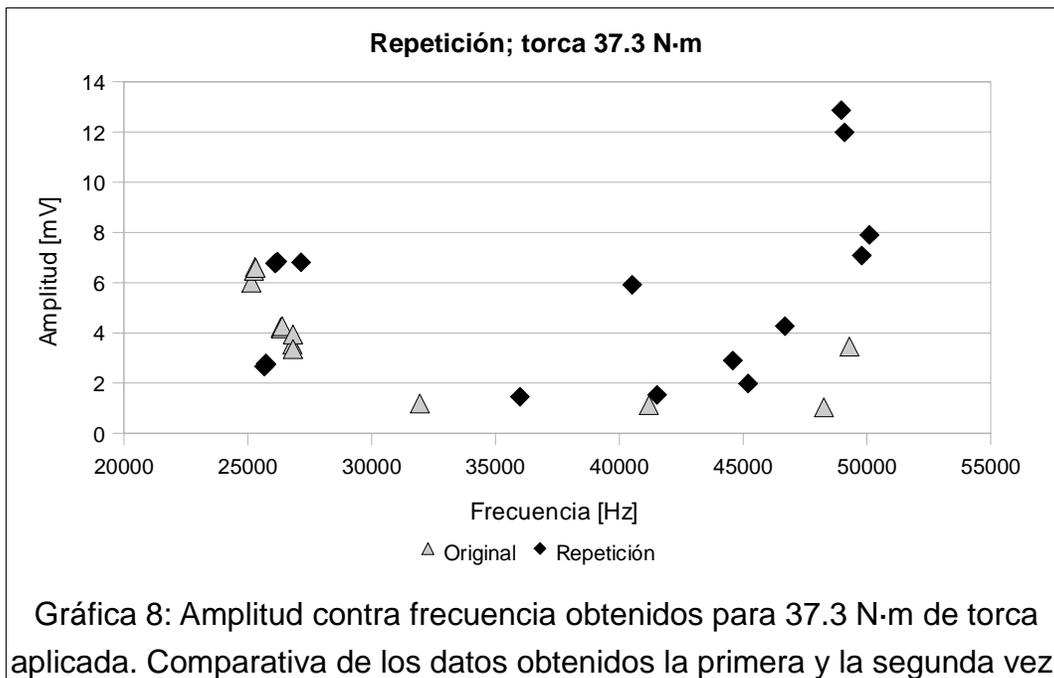
De los datos mostrados en las tablas 11, 12, 13 y 14, ilustrados en la gráfica 7, no se observa ninguna dependencia clara, ni de las frecuencias que ocurren, ni de la amplitud que se obtiene para cada caso. Para intentar aclarar esta información, se repitió lo anterior con dos torcas: 37.3 y 39.3 N·m.

Torca = 37.3 N·m	
Frecuencia [Hz]	Amplitud [mV]
25665	2.66
25731	2.78
25753	2.75
26103	6.77
26190	6.84
27146	6.81
35990	1.46
40518	5.92
41525	1.53
44587	2.9
45200	1.98
46687	4.27
48962	12.87
49093	11.99
49793	7.08
50100	7.9

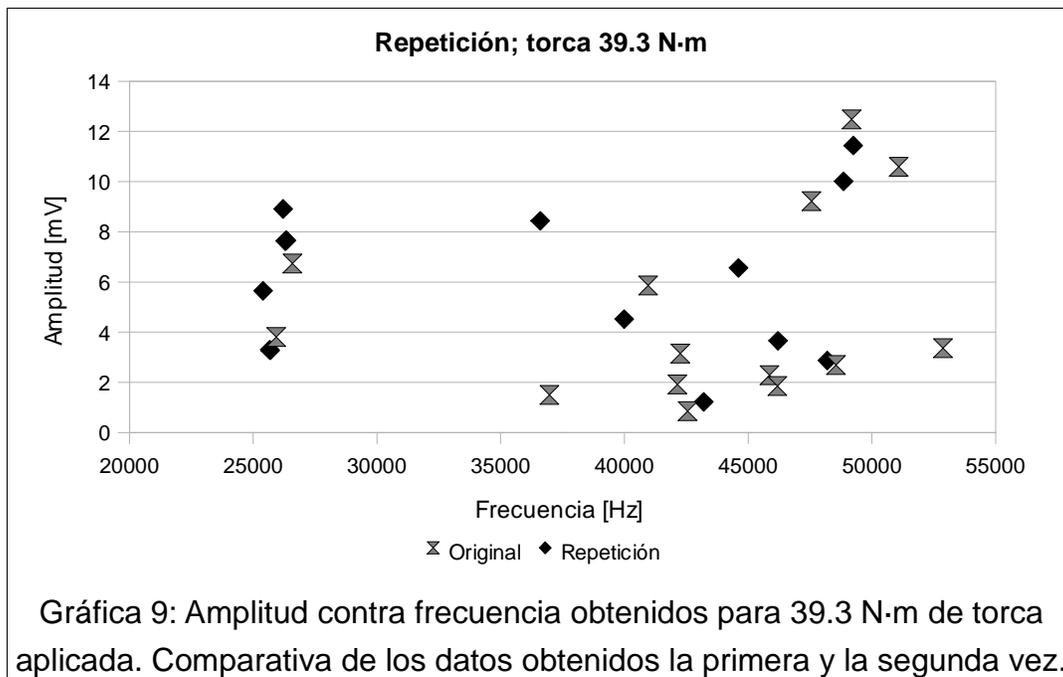
Tabla 15: Repetición de los datos de amplitud y frecuencia con 37.3 N·m de torca.

Torca = 39.3 N·m	
Frecuencia [Hz]	Amplitud [mV]
25403	5.65
25673	3.3
25687	3.27
26212	8.91
26300	7.63
26321	7.66
26343	7.66
36603	8.44
39993	4.52
43209	1.22
44609	6.56
46206	3.66
48196	2.87
48853	10.01
49246	11.44

Tabla 16: Repetición de los datos de amplitud y frecuencia con 39.3 N·m de torca.



Gráfica 8: Amplitud contra frecuencia obtenidos para 37.3 N·m de torca aplicada. Comparativa de los datos obtenidos la primera y la segunda vez.



Al comparar los datos de las tablas 12 y 15, que se representan en la gráfica 8, donde se muestran los datos obtenidos para la torca de 37.3 N·m, se observa que no parece ser muy reproducible el experimento. Lo mismo sucede con los datos de las tablas 13 y 16, representados en la gráfica 9, para la torca de 39.3 N·m.

A partir de los distintos datos obtenidos de amplitud y frecuencia, parece existir una tendencia no muy clara; en las frecuencias cercanas a los 25 kHz; estos datos se muestran a continuación:

3 LEVITACIÓN ACÚSTICA

El campo generado con el transductor de tipo Langevin con el acoplador cilíndrico fue principalmente utilizado para la levitación acústica. Esto con el fin de conocer de manera cualitativa algunas propiedades del campo generado y observar una aplicación con usos posibles muy variados.

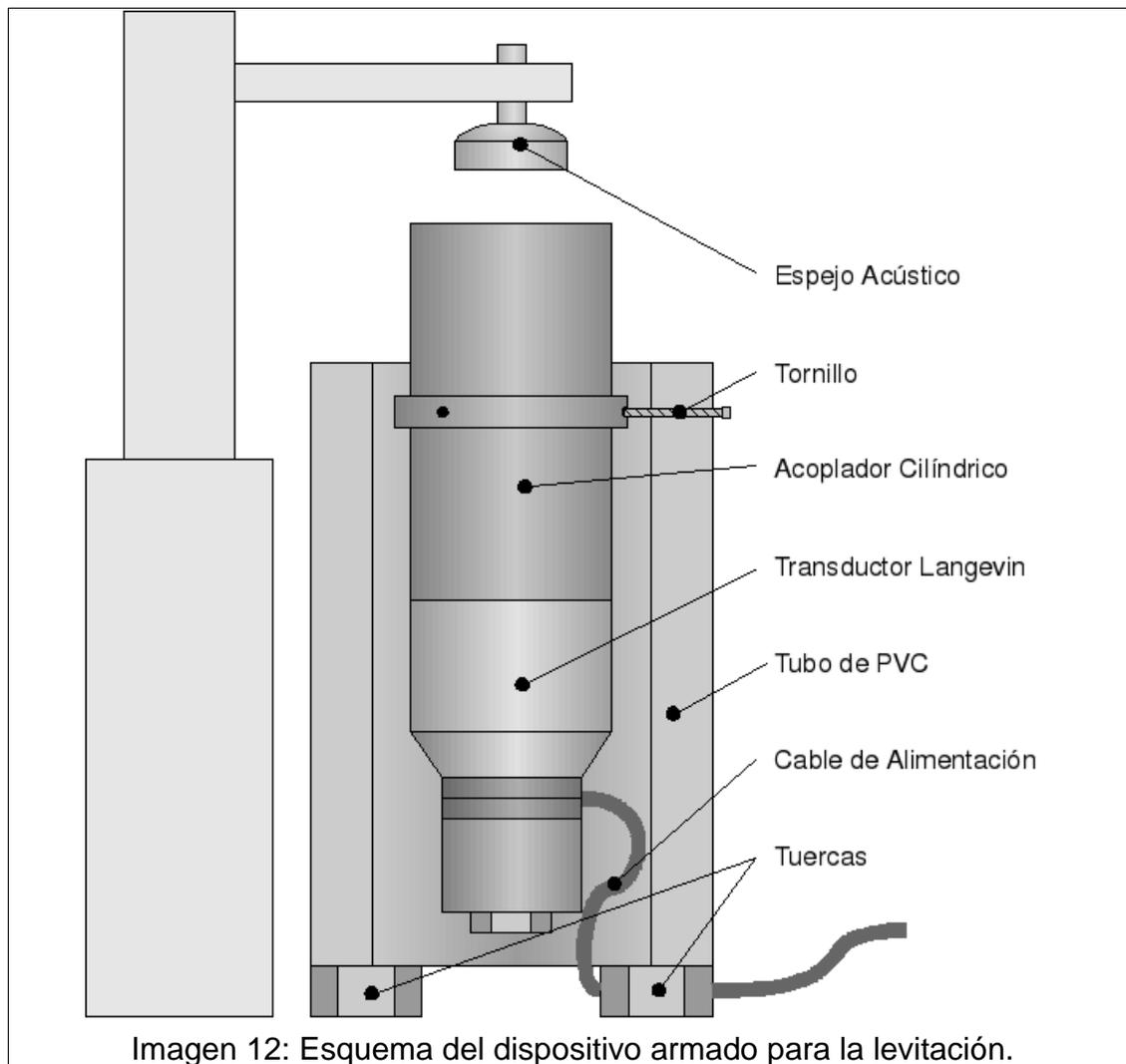
Lo más importante para lograr la levitación acústica es un dispositivo para generar el campo sonoro.

El dispositivo usado para la levitación acústica fue el mostrado en la imagen 7. Este tiene un transductor piezoeléctrico de tipo Langevin, con una frecuencia de resonancia de de 27500 Hz, y un acoplador cilíndrico.

Una vez que se cuenta con el dispositivo adecuado, el parámetro más importante que determina la posibilidad de levitar objetos, es la cavidad resonante. Esta cavidad está delimitada por el mismo dispositivo que radia el campo y por el espejo acústico. Las dimensiones de la cavidad dependen de la posición relativa entre la cara del acoplador que radia el campo y el espejo acústico.

3.1 Dispositivo Experimental

Para montar el dispositivo, el acoplador cilíndrico se fabricó con una pestaña a la mitad, ya que, en su primer modo longitudinal, ahí tiene un plano nodal de desplazamiento. En un cilindro hueco de policloruro de vinilo (PVC) se realizaron tres perforaciones por las que se hizo pasar un tornillo para sujetar el acoplador vertical. El transductor estaba atornillado al acoplador, hacia abajo, al cual se le alimentaba la señal por medio de unos cables que pasaban por debajo del cilindro de PVC, el cual se colocó sobre cuatro tuercas grandes para que pasaran los cables de alimentación. Este armado se muestra en la imagen 12.



Para ajustar la posición del espejo acústico, se utilizó un juego de tres tornillos micrométricos colocados uno en cada eje, para moverlo sutilmente.

Se debe tener mucho cuidado en el acoplamiento de las distintas piezas que generan el campo ultrasónico, ya que puede haber pequeños golpeteos que se perciben como zumbidos muy agudos, e indican que los componentes están en desgaste. Para eliminar estos zumbidos, fue necesario verificar que las piezas estuvieran bien ajustadas y que el transductor estuviera fijo. En ocasiones fue necesario volver a armar el transductor o enroscar mejor el acoplador.

3.2 Experimentos

Para levitar objetos, ya que se tiene el campo ultrasónico, se coloca un objeto dentro de la cavidad resonante; ya sea sobre el transductor o cerca de algún nodo de presión; y se ajusta la posición del espejo hasta que se sostenga el objeto en el aire. Donde sea puesto el objeto que se quiere levitar; en cuanto la cavidad tenga la dimensión adecuada, las fuerzas acústicas lo colocan en el nodo de presión más cercano. En realidad, en el laboratorio, los objetos levitan un poco por debajo del nodo de presión, ya que la fuerza de gravedad recorre ligeramente el punto de equilibrio^[27].

Es recomendable levitar primero objetos más fáciles para encontrar la posición ideal del espejo acústico. Un objeto fácil de levitar suele ser de baja densidad y que no se quede pegado al transductor o a las pinzas con que se coloca.

Para levitar líquidos, se pueden colocar con una jeringa con aguja en un nodo de presión o también sobre el mismo transductor. Cuando se pone la gota sobre el transductor, por la misma vibración, el líquido se nebuliza; de la nube generada, se condensan las gotitas en los nodos de presión.

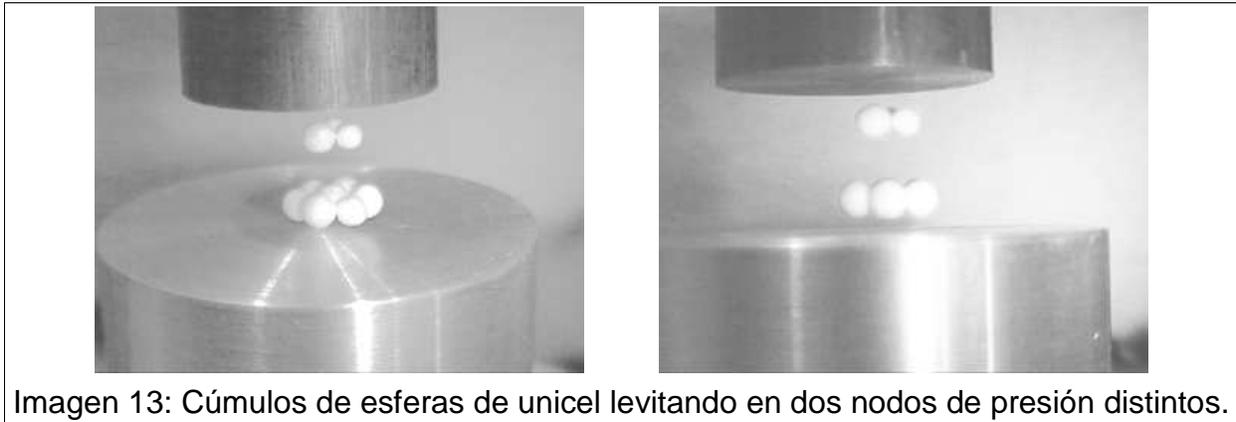
Cuando se levitan gotas de líquidos, se necesita ajustar el tamaño de la cavidad resonante para que la gota sea lo más esférica posible. En general esto se logra cuando la cavidad es un poco mayor que un número entero de medias longitudes de onda, para que el nodo se vuelva más difuso. Si la cavidad se hace más pequeña, la gota se aplana hasta formar un disco delgado. Si se sigue reduciendo el tamaño de la cavidad, la gota explota.

Tanto al levitar objetos sólidos como líquidos, se pueden presentar vibraciones tanto horizontales como verticales que suelen ser indicaciones de inestabilidad. Las oscilaciones verticales suelen indicar que la cavidad resonante es un poco mayor o menor que lo ideal; mientras las oscilaciones horizontales; pueden deberse a que el espejo no está paralelo al transductor.

Además de oscilaciones, se pueden presentar giros sobre el eje vertical de los objetos o sobre un eje fuera de ellos. También al levitar los papeles de oro, en algunas ocasiones se escucha un zumbido debido a vibraciones del papel.

De la onda estacionaria, todos los nodos de presión presentes son útiles para levitar objetos. Después de colocar el primer objeto, se pueden seguir añadiendo otros en el mismo o en otro nodo; en la imagen 13 se muestran dos cúmulos de esferas de unicel levitando en distintos nodos de presión. Sin embargo, cada objeto introducido modifica al campo, por lo

que se puede requerir ajustar de nuevo la posición del espejo acústico.



Una de las observaciones más notables al estar levitando objetos, es la susceptibilidad del campo a la presencia de otros objetos, ya sea levitando o no. Por ejemplo, al colocar una pelotita de unicel en un antinodo, hace que sea más fácil colocar otra en otro antinodo o colocarla junto a la primera. También al acercar las pinzas se modifica el campo, haciendo que lo que esté levitando se acerque a la pinza; sin embargo, también puede suceder que al acercar la pinza, todos los objetos que estén levitando, se caigan.

3.2.1 Cuerpos Levitados

Con el dispositivo armado, se han logrado levitar objetos sólidos y líquidos; incluso seres vivos.

Entre los materiales sólidos que se levitaron se encuentran papel de oro, pequeñas esferas de poliestireno expandido (unicel), tubitos de plástico y pedazos de yeso y madera sin simetría. En la imagen 13 se mostró el unicel levitado; en la imagen 14 se muestra un pedazo de yeso.

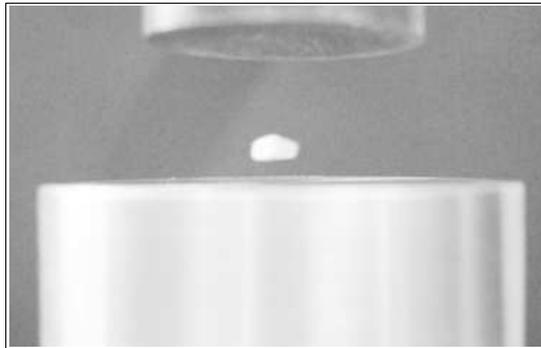


Imagen 14: Pedazo de yeso levitando

En lo que respecta a los líquidos están gotitas de alcohol etílico, agua y una solución de sosa cáustica en agua. En algunas ocasiones, sólo con el objeto de obtener una mejor visualización, se disolvían colorantes en los líquidos. En la imagen 15 se muestran dos gotas levitando.

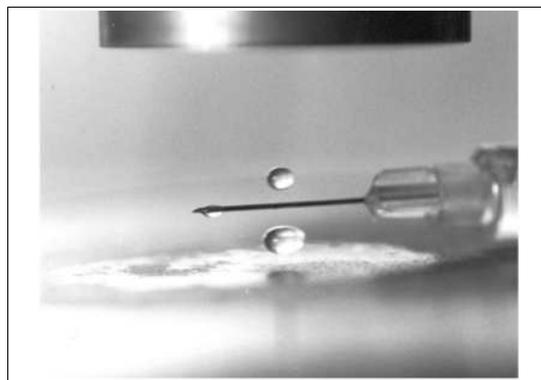
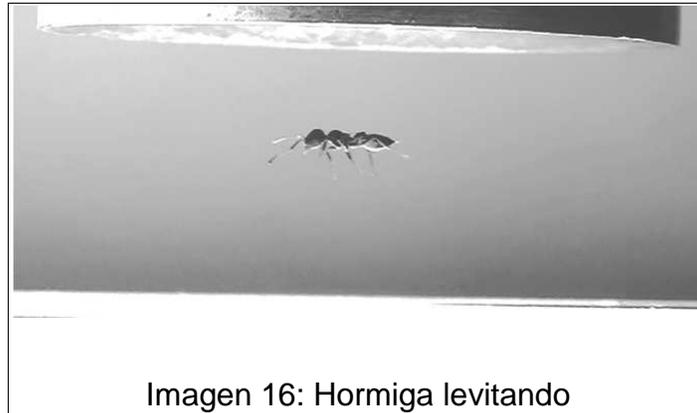


Imagen 15: Gotas líquidas levitando

Por la parte de los seres vivos, se levitaron, sobre todo, hormigas; aunque en una ocasión se logró capturar un mosquito. Se observó que la levitación de la hormiga era más estable cuando se encontraba con las patas hacia arriba, aunque sí era posible colocarla en la posición normal y que permaneciera así, como se muestra en la imagen. También cabe hacer notar que las hormigas no parecían afectadas por los campos ultrasónicos; una vez terminada su levitación, se comportaban aparentemente de igual manera que antes.



3.2.2 Variantes

Aprovechando el conocimiento adquirido a partir de los resultados de las simulaciones, se intentaron levitar objetos con el acoplador escalonado en lugar del cilíndrico. Sin embargo, aunque se observó que los objetos se movían con más fuerza hacia el nodo, no logró sostenerse nada más que pequeñas gotas de líquido; más pequeñas de lo que se había conseguido levitar con el acoplador cilíndrico.

3.3 Mejoras

En las referencias^[12] se encuentra que es muy difícil levitar objetos acústicamente sin el disco radiador, ya que el campo resulta demasiado enfocado y la mayor parte de la energía se concentra en espacios más pequeños que los objetos que se quieren levitar. Entonces, una de las primeras mejoras que se ocurre es justamente adaptarle discos radiadores al acoplador escalonado para ver mejor sus posibilidades aplicado a la levitación. De hecho, también se encuentra^{[6],[23],[28]} que se pueden realizar discos radiadores con geometrías particulares para incrementar la intensidad del campo, al aprovechar el modo flexional de resonancia del disco.

El motivo de querer realizar la levitación con el acoplador escalonado, es porque con él se obtiene el mayor desplazamiento en la cara radiante; con esto se puede aumentar la densidad de energía radiada por el dispositivo. Se espera que de esta manera se puedan levitar objetos de mayor densidad.

3.4 Aplicaciones

3.4.1 Física

La levitación acústica es interesante para la física desde muchos puntos de vista, más allá de las aplicaciones.

Como esta tesis lo ejemplifica, uno de los intereses es el mismo fenómeno físico y todo el conocimiento que se puede generar desde distintas perspectivas: la electrónica, la mecánica y la mecánica de fluidos, la acústica, las simulaciones y la física computacional.

Otras aplicaciones pueden ser: el estudio espectral de sustancias sin el ruido introducido por los recipientes, o sin tener que cambiar de recipiente para cada intervalo de frecuencias.

También se pueden estudiar materiales en temperaturas extremas que pudieran dañar a los recipientes e inclusive se puede calentar o enfriar una muestra mientras se encuentra suspendida, lo cual se puede utilizar para dar forma a una pieza en cierto campo acústico mientras se solidifica. De esta manera se utiliza para la creación de microprocesadores al crear esferas perfectas de materiales fundidos y depositando algunas sustancias en lugares muy específicos.

Otro fenómeno presente cuando hay campos ultrasónicos en líquidos, es el de la sonoluminiscencia; en el cual una burbuja gaseosa se colapsa rápidamente creando un plasma que emite luz.

3.4.2 Química

Para esta rama, la levitación acústica resulta muy interesante para hacer reacciones entre distintas sustancias levitadas con alto grado de pureza, ya que se evita de nuevo el uso de contenedores, que en muchos casos lleva a impurezas o incluso al deterioro de los mismos recipientes si alguna sustancia involucrada en la reacción resulta corrosiva. Igualmente, se pueden observar reacciones en amplios rangos de temperaturas. También se puede observar cómo reacciona alguna sustancia en un ambiente controlado.

3.4.3 Biología

Un interés que presenta la levitación acústica para la biología, es el estudio de pequeños individuos o colonias en situaciones controladas; además de poder conocer las reacciones

de estos seres a estos campos ultrasónicos, lo cual podría tener aplicaciones médicas. Además de la posibilidad de crear fármacos sin sustancias no deseadas.

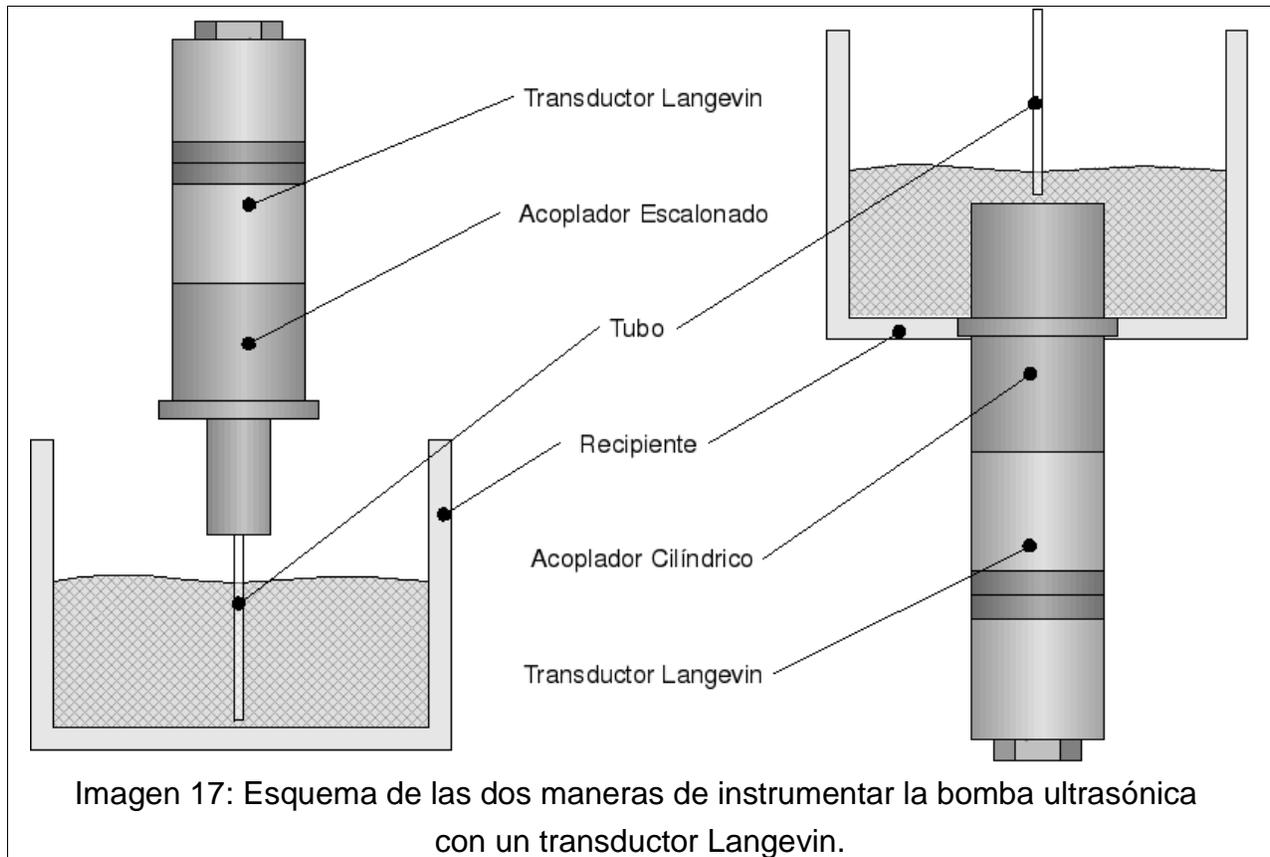
4 BOMBA ULTRASÓNICA

Otro fenómeno que se conoce y se estudió sobre las fuerzas acústicas generadas con transductores piezoeléctricos de tipo Langevin, es el bombeo de un líquido por un tubo delgado^{[13],[16],[17],[29]}.

4.1 Antecedentes

Se encuentran dos maneras de hacer esta bomba; ambas ilustradas en la imagen 17. En la primera, el mismo tubo por el que se hace subir la columna de agua se pone a vibrar. La parte superior del tubo está pegada a la cara que radia de un acoplador escalonado ajustado a un transductor Langevin^{[13],[16]}.

La segunda manera de hacer la bomba ultrasónica, se hace con el transductor colocado con la cara radiante hacia arriba; en este caso con un acoplador cilíndrico. El depósito de agua se coloca coincidiendo su base con el nodo de desplazamiento del acoplador^{[16],[17],[29]}.

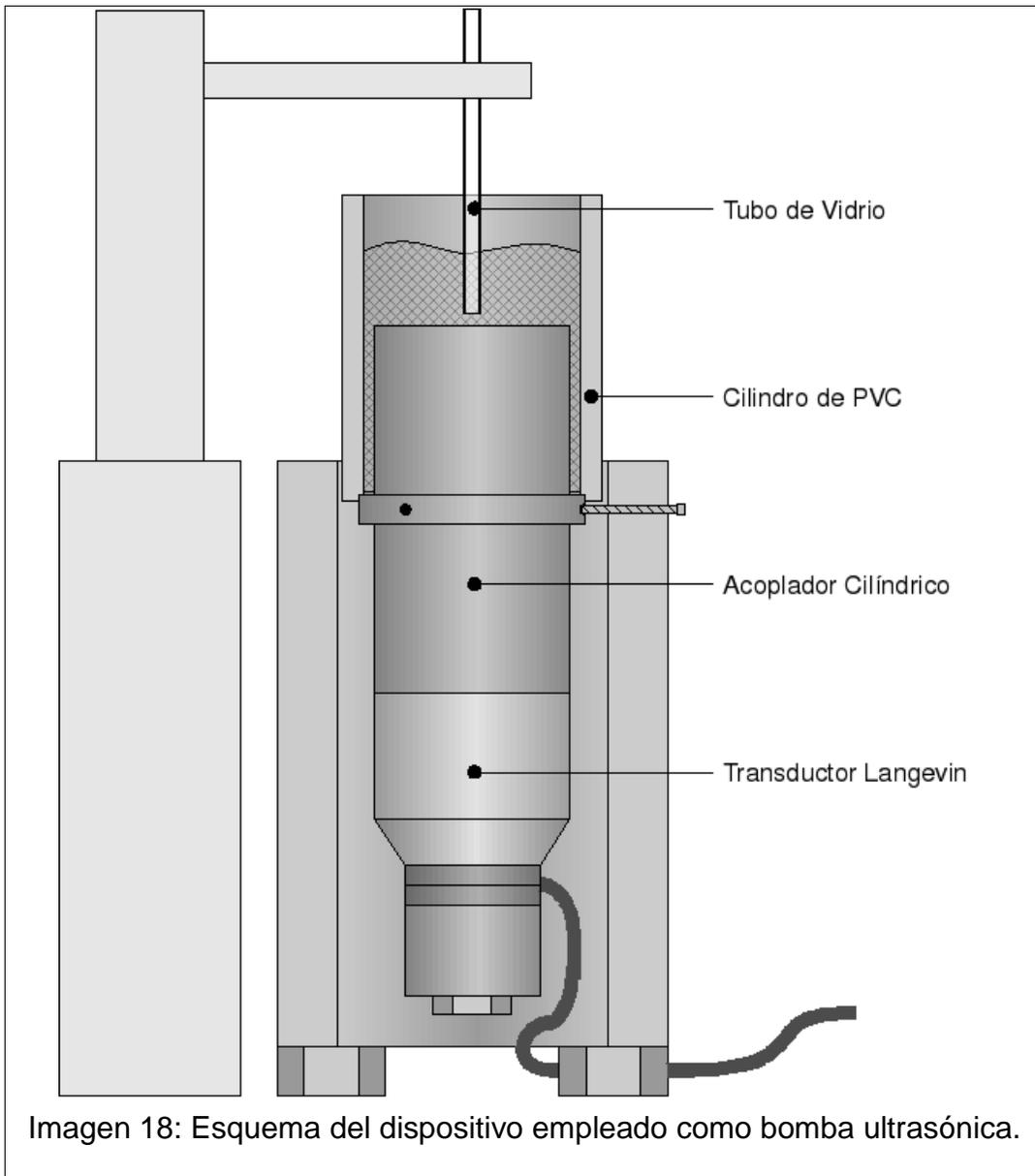


4.2 Dispositivo Experimental

En este trabajo, se utilizó la segunda manera descrita de hacer la bomba ultrasónica.

La bomba ultrasónica aquí descrita se realizó con un transductor Langevin con un acoplador cilíndrico. El transductor se colocó de igual manera que para la levitación descrita con anterioridad; es decir, sobre el tubo de PVC.

Para contener el líquido bombeado, se ajustó otro cilindro, también de PVC, con dimensiones tales que entrara el acoplador, pero no la pestaña. Se rebajó el tubo por la parte interna para que la pestaña se introdujera un par de milímetros. Este tubo se adhirió a la pestaña del acoplador con resina epóxica; de esta manera, el mismo acoplador cierra el depósito del agua. La imagen 18 muestra un esquema del dispositivo utilizado.



Se colocó un tubo delgado de vidrio sostenido con unas pinzas que se sostuvieron con el juego de tornillos micrométricos con que se sostuvo el espejo acústico para la levitación. Este tubo se ajustó perpendicular a la cara radiante del acoplador. Se encuentra en las referencias^{[13],[16],[17],[29]} que mientras más cerca esté el tubo del acoplador, mayores son la presión y el flujo obtenidos. Por esto, el tubo se coloca lo más cercano posible al acoplador, sin que las vibraciones lo golpeen.

4.3 Experimentos

Al encender el generador de señales y el amplificador, se debe ajustar con cautela la potencia; mientras más potencia, más presión se genera en la bomba, pero tiene un punto en contra: cuando la potencia es muy alta, se presenta cavitación en el agua. La cavitación disipa la mayor parte de la energía disponible y la restante no es suficiente para levantar la columna de líquido.

Una vez controlada la potencia, si es necesario se mueve ligeramente la posición del tubo para lograr la mayor presión de la bomba. Se observó que la presión obtenida con la bomba es muy susceptible posición y la inclinación del tubo.

La presión hidrostática de la columna de agua; resultado del producto de la densidad del agua por la aceleración de la gravedad por la altura de la columna; es la presión obtenida con la bomba. En este caso se obtuvo una columna de 80 cm de altura, que indica una presión de 7.8 kPa.

Además de la presión, se puede obtener también el flujo de la bomba. Para medir este flujo, se colocó un tubo de vidrio doblado para que el agua escurriera hacia un vaso de precipitado graduado. Al tomar el tiempo que tarda en llenarse el vaso hasta cierta marca, se obtiene la cantidad de líquido que ha fluido en ese tiempo. El flujo que se obtuvo de esta manera fue de 0.7 ml/s; o lo que es lo mismo 42 ml/min.

En los artículos consultados, la presión que se obtiene es desde 8 kPa hasta 25 kPa, el valor reportado en este trabajo está cerca del menor valor encontrado. En lo que respecta al flujo, en las referencias se obtienen flujos desde ocho mililitros por minuto hasta del orden de 150 ml/min. El flujo de este trabajo está dentro del intervalo encontrado en los artículos.

4.4 Mejoras

Las mejoras que se encuentran en las referencias están enfocadas para optimizar uno de los dos datos obtenidos; la presión y el flujo.

4.4.1 Flujo

Para obtener mayores flujos, con un dispositivo como el empleado en este trabajo, se puede aumentar el número de tubos; está reportado^[17] que el flujo total aumenta linealmente con el número de tubos; de manera que en cada tubo se obtiene el mismo flujo. En el mismo

trabajo, se reporta que otra manera de mejorar el flujo es variando los diámetros del tubo por el que se levanta la columna de agua; se comenta que la mejor proporción entre los diámetros es 2:3; además de hacer mediciones con tubos distintos, todos con esta proporción, para compararlos; obteniendo un mayor flujo con el diámetro interior de 3.5 mm y el exterior de 5 mm. Sin embargo, cualquier resultado observado en las referencias, no necesariamente es válido para el trabajo aquí reportado; ya que las frecuencias utilizadas son distintas y las dimensiones óptimas pueden depender de ello. Además se podría observar si la con utilización del acoplador escalonado se obtiene un mayor flujo al ser mayor el desplazamiento.

4.4.2 Presión

Para aumentar la presión obtenida con esta bomba, se pueden manipular distintos parámetros. Igualmente que con el flujo, la presión depende de los diámetros interior y exterior del tubo por el que se bombea el agua^{[16],[29]}. Otro parámetro es el desplazamiento máximo de la superficie vibrante, mientras mayor es el desplazamiento, mayor es la presión. Igual que para el flujo, estos datos pueden depender de la frecuencia utilizada y por tanto, no ser válidos para el trabajo que aquí se reporta. Aunque se encuentra^[29] que ni la frecuencia ni el material de el tubo parecen tener mucho impacto en la presión obtenida. Igual que para el flujo, se podría experimentar con el acoplador escalonado.

CONCLUSIONES

Se utilizó un transductor Langevin con una frecuencia de resonancia de 27500 Hz; se simularon cuatro geometrías para el acoplador; cilindro, cono, exponencial y escalonado. Aunque se encuentra reportado^{[6],[12]} que el escalonado debe oscilar de igual manera que el cilindro, se concluye que no es el caso ya que resultaron de distinta longitud. También se encontró el factor de amplificación para cada acoplador; en la tabla 17 se muestra este factor y la longitud de los distintos acopladores.

	Factor de Amplificación	Longitud [cm]
Cilindro	1.00	9.07
Cono	3.21	10.68
Exponencial	5.49	8.704
Escalón	18.13	8.37

Tabla 17: Comparativa de la amplificación y la longitud de los distintos acopladores.

De los experimentos realizados sobre la torca con que se ajusta el transductor Langevin, se puede comentar que, aunque en el intervalo cercano a la frecuencia de interés; entre 24500 y 27500 Hz, se observa una tendencia a aumentar la frecuencia y la amplitud con la torca. Sin embargo parece que existen otros factores involucrados en el momento de armar el dispositivo, que no se tomaron en cuenta; esto se vuelve más evidente al ver la poca reproducibilidad de los datos en las frecuencias mayores.

Con el dispositivo instrumentado, se logró levitar objetos de distintos materiales; tanto sólidos como líquidos; incluso organismos vivos. Igualmente se consiguió bombear agua por un tubo, con un flujo de 0.7 ml/s y una presión de 7.8 kPa.

REFERENCIAS

- [1] Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves.
J. David N. **Cheeke**.
CRC Press. 2002.
- [2] Transductores Ultrasónicos de Potencia.
Juan A. **Gallego** Juárez.
Red Iberoamericana de Tecnologías Ultrasónicas.
- [3] Piezoelectricity, its history and applications.
Warren P. **Mason**.
Journal of the Acoustical Society of America 70(6), Diciembre 1981.
- [4] Piezoelectric ceramics and ultrasonic transducers.
J. A. **Gallego** Juárez.
Journal of Physics E: Scientific Instruments 1989.
- [5] Study on the high power air-coupled ultrasonic compound transducer.
Shuyu **Lin**.
Ultrasonics 44. 2006.
- [6] An ultrasonic transducer for high power applications in gases.
J. A. **Gallego** Juárez, G. Rodríguez Corral, L. Gaete Garreton.
Ultrasonics 78. 1978
- [24] Load characteristics of high power sandwich piezoelectric ultrasonic transducers.
Shuyu **Lin**.
Ultrasonics 43. 2004.
- [8] Study on the Langevin piezoelectric ceramic ultrasonic transducer of longitudinal-flexural composite vibrational mode.
Shuyu **Lin**.
Ultrasonics 44. 2006
- [16] FEA and experimental characterization of Langevin transducers with comparable longitudinal and lateral dimensions.
Antonio **Iula**, Daniele Cerro, Massimo Pappalardo.
2004 IEEE Ultrasonics Symposium. 2004
- [11] Design and construction of a bolt-clamped Langevin transducer.
E. **Moreno**, P. Acevedo, M. Fuentes, L. Borroto. M. E. Villafuerte, L. Leija.
2nd International Conference on Electrical Electronics Engineering. 2005.
- [12] Screw pitch effects on the performance of bolt-clamped Langevin-type transducers.
Kazunari **Adachi**, Toru Takahashi, Hiroshi Hasegawa.
Journal of the Acoustical Society of America 116(3), Septiembre 2004.
- [7] Design and implementation of an efficient acoustically levitated drop reactor for in stillo measurements.
Christopher R. **Field**, Alexander Scheeline.
Review of Scientific Instruments 78, 125102 2007.
- [9] An Ultrasonic Suction Pump With No Physically Moving Parts
Cheol-Ho **Yun**, Takeshi Hasegawa, Kentaro Nakamura, Sadayuki Ueha
Japanese Journal of Applied Physics, Vol 43. 2004. 2864.
- [10] Characterization of multilayered piezoelectric ceramics for high power transducers.
B. **Dubus**, G. Haw, C. Granger, O. Ledez.
Ultrasonics 40. 2002.
- [13] Elastic contact problem of the piezoelectric material in the structure of a bolt-clamped Langevin-type transducer.
Kazunari **Adachi**, Masaharu Tsuji, Hiroshi Kato.
Journal of the Acoustical Society of America 105(3), Marzo 1999.
- [14] Characteristics of Ultrasonic Suction Pump Without Moving Parts
Takeshi **Hasegawa**, James Friend, Kentaro Nakamura, Sadayuki Ueha

- Japanese Journal of Applied Physics, Vol 44. 4658. 2005.
- [15] Improvement in the Flow Rate of a Miniature Ultrasonic Suction Pump
Takeshi **Hasegawa**, Daisuke Koyama, Kentaro Nakamura, Sadayuki Ueha
Japanese Journal of Applied Physics, Vol 46. 4931. 2007.
- [17] Acoustic radiation potential on a sphere in plane, cylindrical, and spherical standing wave fields.
M. **Barmatz**, P. Collas.
Journal of the Acoustical Society of America 77(3), Marzo 1985.
- [18] Nonlinear Acoustics.
Mark F. **Hamilton** David T. Blackstock
Cap. 6: **Radiation** Pressure and Acoustic Levitation.
T. G. **Wang**, C. P. Lee.
Academic Press. 1998.
- [19] Fundamentals of Photonics.
Bahaa E. A. **Saleh**, Malvin Carl Teich.
Ed. Wiley.
- [20] Ultrasonics: Fundamentals, Technology, Applications, Second Edition, Revised and Expanded.
D. **Ensminger**.
CRC Press, (1988).
- [21] Dependence of acoustic levitation capabilities on geometric parameters.
W. J. **Xie**, B. Wei.
Physical Review E 66, 026605 (2002).
- [22] Ultrasonic Levitation for Liquid Droplet.
Tetsuro **Otsuka**, Tomoo Nakane.
Japanese Journal of Applied Physics, Vol 41. 2002.
- [23] Phenomena, theory and applications of near-field acoustic levitation.
Ueha **Sadayuki**
Revista de Acústica Vol. XXXIII
- [25] The Finite Element Method and Applications with ANSYS.
Erdogan **Madenci**, et. al.
Springer, 2006
- [26] Teoría de la Elasticidad
Lev Davidovich **Landau**, Evgeny Mikhailovich Lifshitz.
Vol. 7 Curso de Física Teórica.
Ed. Reverté, 1ª ed. 1982 2ª reimp. 2002.
- [27] Acoustic levitation in presence of gravity.
P. **Collas**, M. Barmatz, C. Shipley.
Journal of the Acoustical Society of America 186(2), Agosto 1989.
- [28] Ultrasonic Levitation by Stepped Circular Vibrating Plate
Tetsuro **Otsuka**, Kazutaka Higuchi, Koichiro Seya.
Japanese Journal of Applied Physics, Vol 29. Supplement 29-1. 1990.
- [29] Modeling and Performance Evaluation of an Ultrasonic Suction Pump
Takeshi **Hasegawa**, Daisuke Koyama, Kentaro Nakamura, Sadayuki Ueha
Japanese Journal of Applied Physics, Vol 47. 4248. 2008.