

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

**Universidad Autónoma del Estado de Morelos**

**Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería**

Análisis numérico y experimental del  
amplificador ultrasónico de un levitador  
acústico uniaxial

TESIS

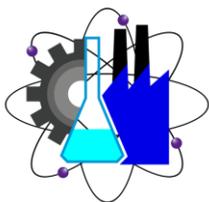
Que para obtener el título de  
**Ingeniero mecánico**

PRESENTA

Carlos Alberto Uribe Zavaleta

ASESOR DE TESIS

Dr. Víctor Ulises Lev Contreras Loera



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

Cuernavaca Morelos, 2021



Análisis numérico y experimental del amplificador  
ultrasónico de un levitador acústico uniaxial



*A todos aquellos que me tuvieron paciencia  
y me acompañaron durante esta travesía.*



## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi asesor, el Dr. Víctor Ulises Lev Contreras Loera, quien con sus conocimientos y habilidades me ayudó a darle forma y sacar a delante este trabajo y me orientó durante todo el trayecto.

También agradezco al Dr. Juan Carlos García Castrejón por su asesoría en lo referente al método de elemento finito, fue de gran apoyo para mí.

Quiero agradecer a al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IA101319 de DGAPA-UNAM por brindar los recursos para la adquisición del equipo y material utilizado en este trabajo.

También quiero expresar mi gratitud hacia el Laboratorio de Óptica Aplicada del Instituto de Ciencias Físicas (ICF) de la UNAM por abrirme las puertas y permitirme desarrollar mi trabajo de tesis en un ambiente de alta calidad.

Finalmente quiero dar gracias a mis familiares, mi madre, mi padre y mi hermano; así como a mis amistades, como la Tuna universitaria de la UAEM, por el apoyo y la paciencia que me tuvieron desde el principio.

De corazón, muchas gracias a todos.



# ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| 1 – INTRODUCCIÓN .....   | 1  |
| 1.1 – HIPÓTESIS .....  | 4  |
| 1.2 – OBJETIVOS .....  | 4  |
| 1.3 – ESTRUCTURA DE LA TESIS .....                             | 5  |
| 2 – AMPLIFICADOR ULTRASÓNICO (MECÁNICO).....                   | 6  |
| 3 – MÉTODOS DE ANÁLISIS NUMÉRICOS .....                        | 13 |
| 3.1 – MÉTODO DE ELEMENTO FINITO .....                          | 13 |
| 3.1.1 – Malla de elementos finitos.....                        | 14 |
| 3.1.2 – Análisis armónico .....                                | 18 |
| 3.1.3 – Software de simulación.....                            | 20 |
| 3.2 – MÉTODO MATRICIAL.....                                    | 25 |
| 3.2.1 – Presión acústica .....                                 | 26 |
| 3.2.2 – Presión acústica punto a punto .....                   | 27 |
| 3.2.3 – Potencial de radiación acústica relativo “ $V$ ” ..... | 29 |
| 3.2.4 – Método matricial para la levitación acústica .....     | 30 |
| 4 – MÉTODOS DE MEDICIÓN EXPERIMENTAL.....                      | 42 |
| 4.1 – SELF-MIXING INTERFEROMETRY (SMI).....                    | 42 |
| 4.2 – DEFLECTOMETRÍA SCHLIEREN .....                           | 44 |
| 5 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....                                | 48 |

|   |    |
|---|----|
| 5.1 – SIMULACIONES .....  | 48 |
| 5.1.1 – Simulación del amplificador ultrasónico .....                         | 48 |
| 5.1.2 – Factor de amplificación .....   | 60 |
| 5.1.3 – Análisis esfuerzo-deformación .....                                   | 70 |
| 5.1.4 – GUI para la simulación del campo de levitación acústica .....         | 74 |
| 5.1.5 – Simulación del potencial de radiación acústica relativo .....         | 80 |
| 5.2 – EXPERIMENTALES .....  | 86 |
| 5.2.1 – Arreglo de la técnica Self-Mixing Interferometry .....                | 87 |
| 5.2.2 – Medición de la amplitud de vibración armónica con SMI .....           | 88 |
| 5.2.3 – Arreglo de la técnica de deflectometría schlieren .....               | 90 |
| 5.2.4 – Visualización del potencial de radiación acústica con schlieren ..... | 91 |
| 6 – CONCLUSIONES .....  | 94 |
| 7 – RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS .....                               | 95 |
| BIBLIOGRAFÍA .....  | 96 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                   |    |                  |    |
|-------------------|----|------------------|----|
| Figura 2.01 ..... | 8  | Figura 5.14..... | 67 |
| Figura 2.02 ..... | 9  | Figura 5.15..... | 68 |
| Figura 3.01 ..... | 16 | Figura 5.16..... | 69 |
| Figura 3.02 ..... | 16 | Figura 5.17..... | 70 |
| Figura 3.03 ..... | 17 | Figura 5.18..... | 71 |
| Figura 3.04 ..... | 22 | Figura 5.19..... | 73 |
| Figura 3.05 ..... | 23 | Figura 5.20..... | 75 |
| Figura 3.06 ..... | 26 | Figura 5.21..... | 76 |
| Figura 3.07 ..... | 28 | Figura 5.22..... | 77 |
| Figura 3.08 ..... | 29 | Figura 5.23..... | 78 |
| Figura 3.09 ..... | 30 | Figura 5.24..... | 78 |
| Figura 3.10 ..... | 32 | Figura 5.25..... | 79 |
| Figura 3.11 ..... | 36 | Figura 5.26..... | 79 |
| Figura 3.12 ..... | 37 | Figura 5.27..... | 80 |
| Figura 3.13 ..... | 37 | Figura 5.28..... | 82 |
| Figura 3.14 ..... | 38 | Figura 5.29..... | 82 |
| Figura 3.15 ..... | 39 | Figura 5.30..... | 82 |
| Figura 3.16 ..... | 40 | Figura 5.31..... | 82 |
| Figura 4.01 ..... | 47 | Figura 5.32..... | 82 |
| Figura 5.01 ..... | 49 | Figura 5.33..... | 83 |
| Figura 5.02 ..... | 50 | Figura 5.34..... | 84 |
| Figura 5.03 ..... | 51 | Figura 5.35..... | 85 |
| Figura 5.04 ..... | 52 | Figura 5.36..... | 86 |
| Figura 5.05 ..... | 53 | Figura 5.37..... | 88 |
| Figura 5.06 ..... | 56 | Figura 5.38..... | 88 |
| Figura 5.07 ..... | 58 | Figura 5.39..... | 89 |
| Figura 5.08 ..... | 59 | Figura 5.40..... | 89 |
| Figura 5.09 ..... | 60 | Figura 5.41..... | 91 |
| Figura 5.10 ..... | 62 | Figura 5.42..... | 91 |
| Figura 5.11 ..... | 64 | Figura 5.43..... | 92 |
| Figura 5.12 ..... | 64 | Figura 5.44..... | 93 |
| Figura 5.13 ..... | 66 |                  |    |



## 1 – Introducción

La levitación se refiere a la acción de mantener un cuerpo, de mayor densidad que el medio donde se encuentra, suspendido de manera estable dentro de un campo gravitatorio. En análisis químicos y en otros procesos como la manufactura de dispositivos semiconductores, la levitación de partículas es utilizada como una técnica de manipulación libre de contacto y de interacciones con superficies o contenedores. Existen diferentes técnicas que se han propuesto para la levitación de partículas, como la técnica de balance electrodinámico (EDB, por sus siglas en inglés), la magnética, la electrostática, la de trampas ópticas, la aerodinámica y la levitación acústica [7].

A diferencia de las otras técnicas, la levitación acústica se caracteriza principalmente por no depender de las propiedades físicas de las partículas a levitar [7]. Esto amplía su campo de aplicación, ya que no solo se restringe a materiales sólidos ni a materiales eléctricamente cargados. Adicionalmente, este tipo de levitación opera con potencias eléctricas menores a la que requieren técnicas como EDB, lo cual es otra ventaja que presenta [2].

El sistema más sencillo de levitación acústica está compuesto por un transductor y un plato reflector alineados sobre un solo eje. Este sistema se conoce como levitador acústico uniaxial: el transductor genera ondas ultrasónicas que se distribuyen a través de un medio (aire) y llegan hasta el plato reflector colocado a una distancia específica para generar ondas estacionarias [2] y que refleja las ondas en dirección al transductor. La levitación se genera justo en los puntos nodales de las ondas estacionarias, donde la presión a su alrededor (antinodos) es suficiente como para contrarrestar la fuerza gravitatoria sobre una partícula. En general, los levitadores acústicos usan un transductor tipo Langevin, formado por dos pares de anillos piezoeléctricos colocados entre dos masas de carga y prensados por un perno central [7].

El transductor es el elemento mecánico más importante del sistema. Desafortunadamente, las ondas que un transductor es capaz de generar tienen una amplitud de onda que es insuficiente en la práctica para muchas aplicaciones como procesos de corte [24] y soldadura ultrasónica [31], incluyendo la levitación acústica de objetos de tamaños en escalas micrométricas o milimétricas. Para solucionar esta desventaja del transductor, se le acopla un amplificador ultrasónico que se encarga de magnificar la amplitud de la onda de salida.

El amplificador ultrasónico resulta ser la pieza con mayor capacidad de optimización del sistema. Al modificar sus parámetros geométricos, propiedades como el factor de amplificación [10] se ven alterados. Se espera que, al modificar la geometría, este factor pueda llegar a un nivel máximo, lo que aumentaría la radiación acústica generada en el levitador, que a su vez le permitiría al sistema operar con una diferencia de potencial eléctrica menor.

Las simulaciones computacionales ayudan al diseño y optimización de sistemas de levitación acústica. Permiten tener una representación *in silico*<sup>1</sup> del comportamiento real del mecanismo, por lo cual son un paso previo de suma utilidad, que evita la necesidad de trabajar a prueba y error en la fabricación de dichos componentes. La caracterización del funcionamiento de las piezas mecánicas de un levitador acústico, así como la simulación del campo donde se produce la levitación acústica no se puede abordar mediante métodos analíticos [11], por lo que se opta por el empleo de métodos numéricos para su análisis [1—15]. Los métodos que se emplean para simular el potencial de radiación acústica de levitadores uniaxiales [3, 7], y que se utilizan en esta tesis, son el método de elemento finito y el método matricial.

---

<sup>1</sup> Del latín «en silicio» material del cual están formados, en su mayoría, los circuitos eléctricos. Significa que es una representación “virtual o computacional” y se emplea, por ejemplo, al hablar de simulaciones.

Con el método de elemento finito se puede realizar un modelado computacional de los componentes mecánicos del sistema para simular su comportamiento en condiciones de operación. Esta es información clave, ya que con este método se puede determinar la forma geométrica, de los componentes, que presenta los mejores valores de amplitud de vibración armónica. De manera análoga, existen instrumentos de medición que pueden censar la vibración de un cuerpo experimentalmente.

Los vibrometros no invasivos, basados en técnicas libres de contacto, como el velocímetro láser de efecto Doppler (LDV por sus siglas en inglés) o aquellos basados en la técnica de interferometría de auto mezclado (SMI por sus siglas en inglés) resultan ser aptos para el análisis sobre piezas de tamaño reducido, como es el caso de los transductores ultrasónicos [1]. Debido a la disponibilidad inmediata de un vibrometro basado en SMI, este fue utilizado para mediciones experimentales en este trabajo de tesis.

Utilizando el método de elemento finito también se pueden determinar propiedades del campo acústico como la presión acústica ejercida en el medio y el potencial de radiación acústica. Sin embargo, el método matricial mencionado fue diseñado para realizar esos cálculos utilizando una cantidad considerablemente menor de recursos computacionales. Esto significa que se obtienen resultados, con la misma calidad de información, en una fracción del tiempo que le tomaría al método de elemento finito.

Por otra parte, existe una técnica óptica capaz de ver los cambios de índice de refracción de ciertos medios transparentes como el aire: la técnica de deflectometría schlieren. Su capacidad para representar cambios del índice de refracción significa, en palabras coloquiales, que es una técnica capaz de “visualizar” el calor y el sonido debido a que tanto la temperatura como la presión inducen un cambio en la densidad del medio, la cual es directamente proporcional al índice de refracción

[29]. La capacidad de observar en tiempo real la distribución de presión resulta altamente útil al momento de comparar de manera experimental las simulaciones realizadas por ordenador de un campo de levitación acústica.

## 1.1 – Hipótesis

En este trabajo de tesis se simula por computadora el funcionamiento de un levitador acústico que se encuentra en operación. Es posible que al optimizar su diseño mecánico pueda funcionar de una manera más eficaz. El levitador en cuestión cuenta con tres partes físicas de las cuales una es un transductor ultrasónico comercial con un diseño ya estandarizado, por lo que se opta por analizar el resto de las piezas de él, el amplificador ultrasónico y el plato reflector.

## 1.2 – Objetivos

El **objetivo general** de esta tesis es caracterizar el levitador acústico disponible y optimizar su diseño para presentar un segundo sistema de levitación que funcione de manera más eficaz. Como producto secundario se entrega una interfaz gráfica de usuario que sirve para resolver el método matricial con información básica del problema.

Los **objetivos particulares** de la tesis son:

- Utilizar la técnica SMI para caracterizar el comportamiento real del amplificador ultrasónico disponible.
- Utilizar el método de elemento finito para obtener la configuración geométrica del transductor ultrasónico que presente el factor de amplificación con mayor amplitud.
- Utilizar el método matricial para representar la distribución de la presión del campo acústico y encontrar la configuración que la distribuya de la manera más uniforme.

- Utilizar la técnica de deflectometría schlieren para validar de manera visual los resultados obtenidos con el método matricial.

### 1.3 – Estructura de la tesis

En este trabajo se midió de manera experimental la vibración armónica del amplificador de referencia con que se cuenta para poder realizar simulaciones que representen de manera cualitativa y cuantitativa su comportamiento. Posteriormente se modificaron los parámetros geométricos de su diseño para optimizar numéricamente esta pieza. Después se simuló el campo de levitación acústica generada entre la superficie del amplificador y un reflector de manera iterativa para poder optimizar el diseño del plato reflector. Finalmente se hizo una comparación cualitativa experimental de estas simulaciones para corroborar que predigan el comportamiento real del sistema.

En el capítulo 2 se presentan los conceptos teóricos del diseño de un amplificador ultrasónico. En el capítulo 3 se describen los conceptos teóricos de los métodos numéricos empleados en las simulaciones. En el capítulo 4 se discute la teoría general del funcionamiento e implementación de métodos de medición experimental. En el capítulo 5 se presentan y discuten los resultados, tanto numéricos como experimentales de las simulaciones y mediciones realizadas, así como el arreglo experimental para estas últimas. Finalmente, en el capítulo 6 se brindan conclusiones generales y recomendaciones para trabajos futuros.

## 2 – Amplificador ultrasónico (mecánico)

Un amplificador ultrasónico es un dispositivo que magnifica la amplitud de una onda mecánica que se transmite en determinada dirección a través de su cuerpo. Opera bajo el principio que estipula que la amplitud de una onda, a través de un objeto sólido, es directamente proporcional al decremento del área transversal [24, 31]. Por esta razón, el área por donde ingresa la onda es más grande que el área de salida. Existen varios tipos de perfiles de amplificadores ultrasónicos como el cónico, el exponencial, el cilíndrico escalonado, el gaussiano, etc [23]. Sin embargo, como se demuestra en la literatura [24, 30], el perfil cilíndrico escalonado muestra una magnitud de amplificación por lo menos el doble o triple que la presentada por perfiles cónicos o exponenciales, los cuales resultan ser de los más comunes junto con el escalonado.

Existen varios factores que pueden contribuir a mejorar el levitador acústico que se pretende caracterizar de manera virtual en esta tesis. Mejorar el sistema electrónico disminuiría la cantidad de energía que necesita el levitador acústico para operar. Modificar los parámetros geométricos del amplificador es una forma más de optimizar este campo, ya que es posible que existan valores para estos parámetros que transmitan de una mejor manera las ondas mecánicas que generan la presión acústica.

La geometría del reflector que se utiliza en el levitador acústico también puede ser mejorada. Sin embargo, es una pieza estática del sistema, externa al transductor y la manipulación de sus parámetros mecánicos repercute en menor medida que la del amplificador. Por lo tanto, este trabajo se enfoca en el análisis del amplificador ultrasónico, aunque en el apartado del modelado del potencial de radiación acústica (tema 5.1.5) se propone una configuración geométrica del reflector que puede ayudar a mejorar la distribución de las ondas estacionarias.

Cada amplificador ultrasónico se diseña para una situación específica donde los factores relevantes a tomar en consideración son: el material del amplificador, la frecuencia de entrada, el tipo de amplificador y las superficies de entrada y salida. Conociendo estos factores se pueden determinar parámetros como la longitud de resonancia, el factor de amplificación, los puntos nodal y anti nodal, la distribución de la amplitud de vibración y la distribución de esfuerzos a lo largo del perfil del amplificador [23].

Existe una ecuación diferencial parcial [23] que se utiliza para el cálculo de los parámetros antes mencionados. Es una ecuación que se deriva al integrar las fuerzas de elasticidad y de inercia, que actúan sobre un elemento diferencial en equilibrio y su expresión es la siguiente:

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{1}{s} \frac{\partial s \partial u_z}{\partial z \partial z} + \frac{\omega^2}{c^2} u_z = 0 \quad (2.1)$$

Esta es una ecuación generalizada de la propagación de una onda a través de un amplificador, donde  $u_z$  es la amplitud de la vibración en la dirección axial,  $z$  es la posición axial,  $s$  es el área de sección transversal a cualquier valor de  $z$ ,  $\omega$  es la velocidad angular y  $c$  es la velocidad de propagación del sonido. Sin embargo, los amplificadores generalmente se fabrican con metales que tienen una alta resistencia a la fatiga y un bajo número de pérdidas acústicas, por lo que los aspectos más importantes al diseñar un amplificador son la frecuencia de resonancia y la longitud de resonancia [24].

Los amplificadores ultrasónicos se diseñan generalmente con una longitud total equivalente a media longitud de la onda acústica,  $\frac{\lambda}{2}$  [11, 24]. Esto debido a que cada múltiplo de esta longitud se encuentra un valor de amplitud de onda máximo. Por consecuencia, es claro intuir que con este valor siempre se podrán obtener los valores más altos en la amplitud de salida. Además, al ser solo la mitad de  $\lambda$ , las pérdidas de energía causadas por la fricción interna, de las moléculas, del

amplificador serán las mínimas posibles. Este parámetro se puede apreciar con más claridad en la figura 2.01.

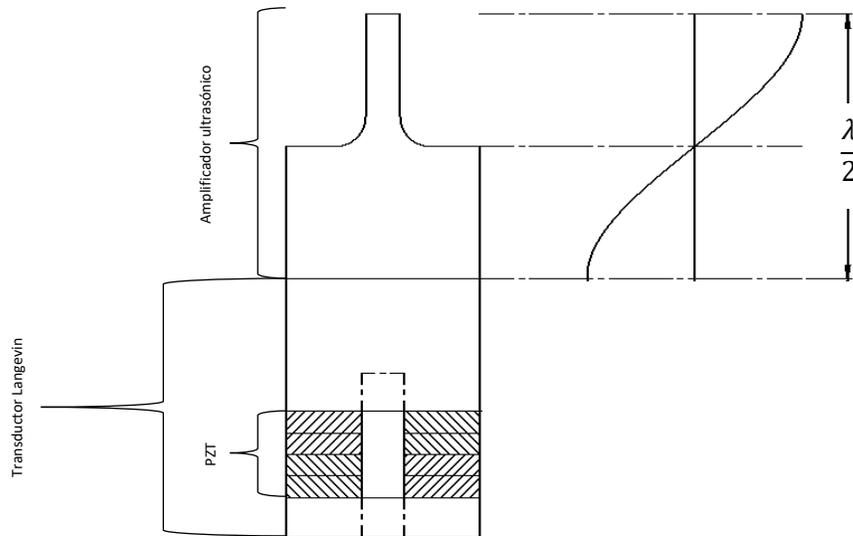


Figura 2.01. Diseño del amplificador a medio lambda.

Un amplificador ultrasónico cilíndrico escalonado cuenta con dos secciones. La primera que es la que recibe la energía de vibración, proveniente de un transductor acoplado a una cara perpendicular al eje axial del amplificador y, la segunda, que es donde se reduce el diámetro de la pieza, generando de este modo, una amplificación de la onda. Esto se puede apreciar mejor con la siguiente ecuación que representa el factor de amplificación:

$$K = \frac{\xi_2}{\xi_1} = \frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad (2.2)$$

Donde  $\xi_1$  y  $\xi_2$  representan la entrada y salida de amplitudes de onda del amplificador, respectivamente. En  $\xi_1$  la amplitud es igual a la que recibe directamente del transductor y  $\xi_2$  es la amplitud de salida, que es la necesaria para generar el campo de levitación.  $S_1$  y  $S_2$  representan las superficies perpendiculares al eje axial del amplificador; es en estas superficies donde se presenta la amplificación de la amplitud de onda, siendo  $S_1$  la superficie que entra en contacto total con el

transductor y  $S_2$  la superficie de donde se obtiene la onda amplificada.  $D_1$  y  $D_2$  son los diámetros del primer y segundo escalón respectivamente. Existe una relación directa entre estas igualdades, por lo que se pueden deducir una a partir de la otra. Estos parámetros se pueden apreciar en la figura 2.02:

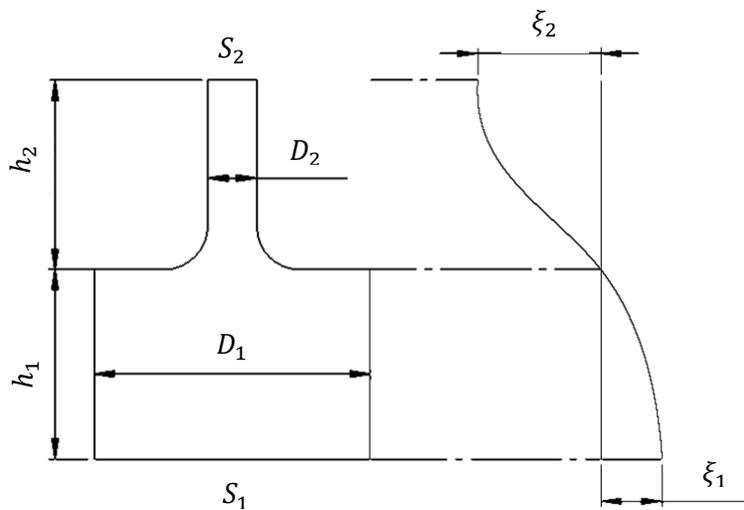


Figura 2.02. Relación del factor de amplificación  $K$ .

De acuerdo con *Merkulov y Kharitonov* [39], el factor de amplificación  $K$ , descrito en la ecuación anterior, se cumple cuando los escalones superior e inferior cumplen con las siguientes condiciones:

$$h_1 = 1.5/\alpha \quad (2.3)$$

$$h_2 = 1.6/\alpha \quad (2.4)$$

Siendo  $h_1$  y  $h_2$  (figura 2.02) las longitudes de los escalones primario y secundario respectivamente.

Donde  $\alpha$  es el número de ondas calculado con la ecuación:

$$\alpha = 2\pi/\lambda \quad (2.5)$$

Otros autores, como M. P. Satpathy [11], recomiendan que los escalones tengan longitudes iguales. El valor que corresponde a cada escalón es por tanto de  $\lambda/4$ , un valor que resulta ser muy próximo al proporcionado por las ecuaciones de  $h_1$  y  $h_2$ , y en el cual el valor de la amplificación  $K$ , descrita por *Merkulov* y *Kharitonov*, se sigue cumpliendo.

Para una primera aproximación del diseño del amplificador ultrasónico, hecho de aluminio, con un módulo de elasticidad de  $\epsilon = 71 \text{ GPa}$  y una densidad de  $\rho = 2.770 \frac{\text{Mg}}{\text{m}^3}$ , con un  $D_1 = 45 \text{ mm}$  y un  $D_2 = 8 \text{ mm}$ , y empleando un transductor tipo Langevin que opera a 41.6 kHz, se realizan los siguientes cálculos con unas ecuaciones que da Satpathy para el cálculo de la longitud de onda:

$$c = \sqrt{\frac{\epsilon}{\rho}} = 5062.78 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (2.6)$$

$$L = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f} = 60.85 \text{ mm} \quad (2.7)$$

$$h_1 = h_2 = \frac{L}{2} = 30.43 \text{ mm} \quad (2.8)$$

y de acuerdo con la ecuación 2.2:

$$K = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 = 31.64$$

Estos parámetros definen al amplificador ultrasónico a analizar donde  $L$  representa la altura o longitud total de la pieza. El propósito de la tesis es obtener un factor de amplificación superior a esta primera aproximación que mejore el potencial de radiación acústica relativo (descrito en el tema 3.2). Existen más variables a tomar en consideración que son de mayor complejidad y que son mencionados en literatura especializada [36] y son relevantes para determinar el valor de  $K$ , como lo pueden ser un radio eliminador de esfuerzos o un tercer escalón que se puede denominar la cabeza del transductor que distribuye la onda de salida sobre un área mayor sin perder el factor

de amplificación obtenido en los primeros dos escalones. El método de elemento finito da resultados bastante cercanos a dichas ecuaciones [3].

El radio eliminador de esfuerzos es un escalón intermedio entre el escalón primario y secundario. Puede considerarse un escalón de tipo exponencial [33] y su función primordial es evitar la fractura por fatiga que se puede generar entre los escalones. Ya que, al generarse un cambio abrupto de área transversal, la pieza es sometida a bastante estrés en un espacio reducido. También proporciona una mejor distribución de los esfuerzos, por lo que contribuye a aumentar la magnitud del factor de amplificación.

Los parámetros geométricos de un transductor relevantes para determinar la presión acústica con el método matricial son dos: la curvatura de la superficie y el corte geométrico de la cara. Estos parámetros son importantes tanto para el transductor (o el amplificador acoplado a él) como para el reflector. En lo que al corte geométrico se refiere, prácticamente no hay restricciones excepto las que impongan los procesos de maquinado. Debido a que la mayoría de los componentes mecánicos de un levitador acústico son de geometría axial (o cilíndrica), por lo general, el corte geométrico está descrito por una circunferencia. También existen piezas que no tengan este tipo de geometría y puede resultar el caso en que se presenten geometrías cuadradas o rectangulares, sin embargo, es más probable encontrar este tipo de cortes en lo que a los reflectores se refieren, debido a que tiene más libertades de diseño pues no están acoplados al transductor que viene con una geometría preestablecida.

Existen casos especiales donde se puedan presentar geometrías con un corte interno también, dependiendo del funcionamiento al que sea sometido el levitador. De la misma forma, pueden presentarse una gran variedad de cortes extravagantes, pero lo que se busca es lograr el nivel óptimo

de levitación, por lo cual, debido a lo largo de los años que se ha estudiado esta técnica [3, 6, 10], cortes de simetría radial son los más utilizados.

Referente a la curvatura de la superficie generalmente se utilizan dos tipos: plano y curvo. El plano se considera como la curvatura de una esfera de radio infinito mientras que para el curvo pueden existir diversos tipos de curvaturas. La más común, y la que presenta este caso de estudio, es la curvatura esférica, es decir, una curvatura definida por una esfera de radio finito.

### 3 – Métodos de análisis numéricos

La representación virtual de un sistema de levitación acústica se puede dividir en dos tipos de análisis. Uno de ellos se encarga de caracterizar el comportamiento de los componentes mecánicos del sistema durante su etapa de operación, mientras que el otro modela la distribución de presión responsable de la levitación acústica.

Ambos análisis se pueden llevar a cabo con el método numérico de elemento finito [7]. Sin embargo, Andrade et al. [3] publicaron un método matricial que simula el potencial de radiación acústica con un mínimo de información. El método matricial es más rápido al consumir menos recursos computacionales y, según el autor, los resultados tienen una calidad equiparable a los resultados obtenidos con elemento finito.

#### 3.1 – Método de elemento finito

Elemento finito es un método numérico que resuelve las ecuaciones diferenciales que caracterizan el comportamiento físico de un cuerpo en un estado de medio continuo [22]. El método se utiliza para solucionar un problema de campo, donde la variable dependiente es gobernada por dichas ecuaciones. El hecho de que exista un conjunto de ecuaciones que gobiernan la variable de campo que es de interés implica que existen soluciones exactas para dicha variable. En muchos casos, aunque exista la solución, no significa que exista un método analítico para obtenerla, por lo que se puede emplear un método numérico para obtener una solución aproximada a la solución real.

El método consiste en discretizar el medio continuo en segmentos para realizar un análisis sobre la interacción de cada sección discretizada (denominada como elemento finito) con las demás cuando este medio cambia de su estado de equilibrio al aplicar sobre él una energía en determinada dirección. La variable de campo, producto del cambio de estado, expresa un tipo de energía (que puede ser equivalente o diferente a la aplicada) y dependiendo del problema que se presente puede

tener varios significados, por ejemplo, esfuerzo, deformación, temperatura, presión, etc. [21]. Para el caso específico que compete a este trabajo, se requiere obtener información de deformaciones a partir de vibraciones forzadas. Por lo tanto, se requiere un análisis armónico para la variable de campo que se desea conocer.

El método se resume en la siguiente serie de pasos consecutivos [20]:

1. Se discretiza el dominio del espacio total en subdominios llamados elementos finitos o elementos, es decir, se crea una malla de elementos. Dependiendo de la cantidad de dimensiones del espacio total, estos elementos adquieren diversas formas geométricas. Para el caso de un espacio tridimensional, estos elementos adquieren formas tetraédricas, cuboidales o elementos con superficies curvas, dependiendo de cuales sean más apropiadas para el problema. Este paso se describe con más detalle en el subtema siguiente.
2. Para cada elemento se debe elegir una aproximación que se ajuste a las ecuaciones que describen el problema. La forma de esta aproximación depende de la geometría del elemento y también del tipo de problema que será tratado.
3. Sustituir la aproximación para formar la matriz de rigidez global. Se resuelve el producto de esta matriz con otra que describe las condiciones de frontera y cargas iniciales para poder obtener resultados globales para cada elemento finito en la matriz [22].

### 3.1.1 – Malla de elementos finitos

El mallado es el proceso en el cual la geometría es espacialmente discretizada en elementos finitos y nodos (y caras para elementos de tres dimensiones). En conjunto con las propiedades del material, es utilizado para representar matemáticamente la rigidez y la distribución de masa de la estructura

en un medio continuo sólido [19]. También se pueden discretizar fluidos. Y aunque el proceso es muy similar, dicho proceso pertenece al método de volumen finito.

Existen dos principales métodos de mallado. Cada uno está enfocado a una forma diferente de analizar el medio continuo. Estos métodos se describen a continuación.

#### 1. Método de crecimiento estructurado

Es un método de discretización volumétrica que, en términos simples, se encarga de repetir la malla de una superficie base. Es un método de mallado en tres dimensiones que discretiza un cuerpo creado a partir de una extrusión [32].

#### 2. Método de mallas no estructuradas

En este método el patrón de conectividad es definido por el contorno del cuerpo, los nodos interiores y la técnica de mallado utilizada. Estas técnicas de mallado se pueden representar en dos grupos. Aquel que parte de una distribución determinada de nodos y solo obtiene una conectividad óptima para que los elementos presenten una buena relación de aspecto. Y aquel en que los nodos, aristas caras y elementos se generan conforme la malla va creciendo, determinando la mejor posición para cada nodo nuevo y su conexión con la malla existente [32].

Una malla deficiente puede dar resultados deficientes, por lo que es importante asegurarse que se tenga un conjunto de elementos finitos eficiente. Por consiguiente, es importante utilizar la técnica de mallado que mejor se ajuste al caso de interés.

Existen tres diferentes técnicas principales de mallado:

#### 1. Triangulación de Delaunay

Esta es una red bidimensional de triángulos conectados convexa (que se puede asemejar al exterior de una circunferencia), figura 3.01, que cumple con la condición de Delaunay. Dicha condición

establece que en el área descrita por la circunferencia circunscrita<sup>2</sup> de cada elemento no debe de haber ningún vértice de otro elemento de la triangulación, aunque sí se admiten sobre la circunferencia en sí [40], figura 3.02. La triangulación puede adaptarse para elementos tridimensionales al cambiar los triángulos por tetraedros que utilicen la esfera circunscrita en lugar de la circunferencia [41].

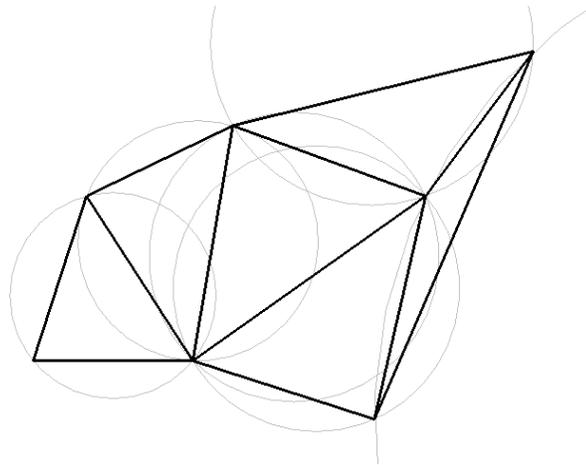


Figura 3.01. Triangulación de Delaunay.

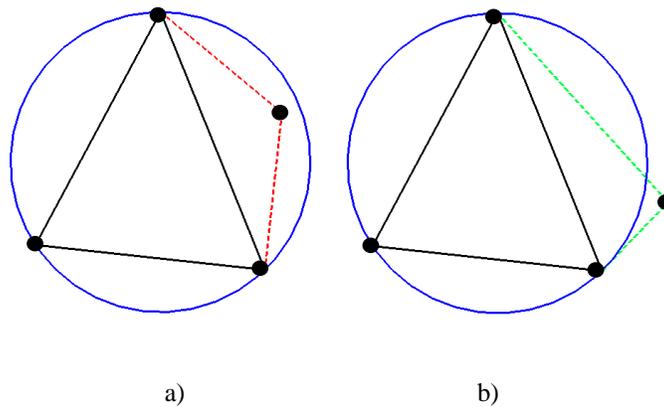


Figura 3.02. Condición de Delaunay. En a) no se cumple la condición de Delaunay ya que el vértice de un triángulo adyacente se encuentra dentro de la circunferencia circunscrita. En b) sí se cumple la condición de Delaunay.

---

<sup>2</sup> La circunferencia circunscrita es una propiedad geométrica de algunos polígonos (denominados polígonos cíclicos). Dicha circunferencia pasa por todos los vértices del polígono y lo contiene en su interior por completo.

## 2. Descomposición de dominios

Esta es la mejor opción de mallado en 3D (aunque también puede ser utilizada en 2D al reducir una dimensión del estudio). Se descomponen los dominios usando una estructura de tipo *octree*<sup>3</sup> como la de la figura 3.03. Esta estructura envuelve el dominio a mallar en un cubo; con la técnica de descomposición de dominios se divide este cubo en cubos más pequeños haciendo bisecciones en cada uno de los ejes del primer cubo. Los cubos que se dividen son los que intersectan el dominio a mallar [41].

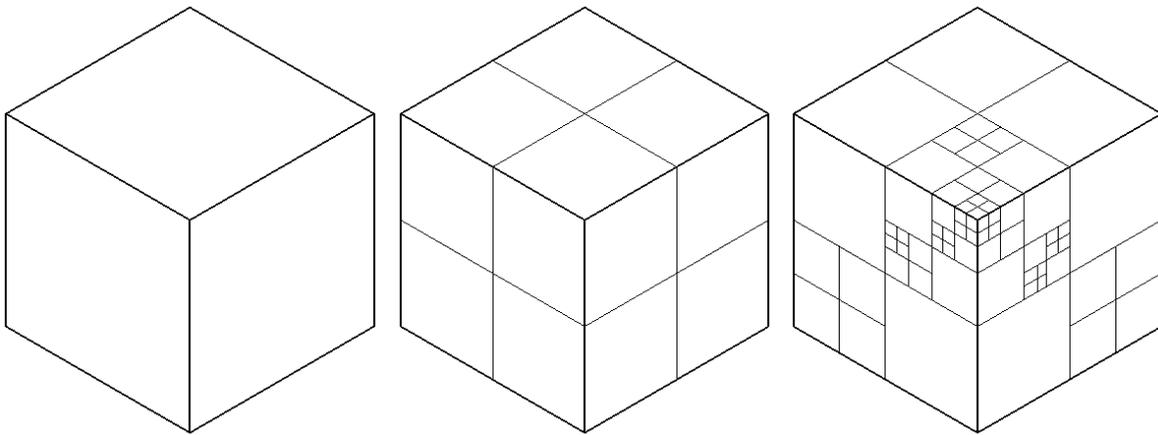


Figura 3.03. Representación de un octree. Un cubo se divide en ocho partes iguales y subsecuentemente, hasta llegar al nivel deseado.

## 3. Frente de avance

Es un proceso de creación de malla iterativo. La malla comienza a generarse desde la frontera del medio continuo hacia el interior. En cada iteración que realiza avanza una sección denominada frente hasta que no quede ningún frente al cual avanzar. Con los elementos poligonales o poliédricos más simples se crean los elementos internos y se actualiza el frente con los nodos y

---

<sup>3</sup> “*Octree*” es una palabra formada a partir de las palabras *oct* (octante en inglés) y *tree* (árbol en inglés). Normalmente se escribe como *octree* en lugar de *octtree*. Un octree es una estructura en árbol de datos en la cual cada nodo interno se divide exactamente en ocho partes iguales.

aristas (y caras en 3D) generados. Se requieren como parámetros de entrada una discretización del contorno del medio y un tamaño de elemento prescrito, una malla de referencia o una función de densidad en el caso de que se desee una malla no uniforme [27].

El hecho de que existan diferentes técnicas de mallado no significa que cada medio continuo deba restringirse a una sola de ellas. Se puede tener más de una técnica en un mismo medio. El cual se puede seccionar en bloques de topología más simple y dependiendo de ella se puede seleccionar la técnica más adecuada. La metodología que se sigue para esta división se conoce como multibloque. [27].

### 3.1.2 – Análisis armónico

El análisis armónico es utilizado para determinar la respuesta en estado estable de una estructura lineal que opera bajo cargas que varían de manera sinusoidal (armónicamente) respecto al tiempo. Con esta información se puede verificar en qué condiciones el sistema entrará en resonancia y se pueden predecir los resultados de fatiga, desgaste y otros fenómenos que resultan de vibraciones forzadas [19].

Para este tipo de análisis, todas las cargas y las respuestas estructurales varían armónicamente a la misma frecuencia. Las vibraciones transitorias, que ocurren al inicio de la excitación sinusoidal, no se consideran dentro del análisis armónico. Ya que el análisis es de tipo lineal, no linealidades como la plasticidad son ignoradas, incluso si se definen [19].

Se obtienen resultados de cantidades de respuesta a una frecuencia específica. El tipo de respuestas que se pueden obtener son variadas, pero principalmente son valores de desplazamiento (deformación) y esfuerzo. Normalmente, se obtienen gráficas de estas cantidades de respuesta contra la frecuencia, pero también se pueden obtener los resultados de forma puntual.

Hay dos métodos de solución para llevar a cabo un análisis armónico [19]:

### 1. Método de superposición

Este método es una suma factorizada de los modos de vibración, obtenidos por un análisis modal previo, para calcular la respuesta de la estructura. Este método no es aplicable si se necesita definir un desplazamiento inicial (con un valor diferente de cero) como parte del problema, es decir, que se presente un modo de vibración libre. Efectos de estrés previo pueden ser incluidos. Y se permite el amortiguamiento modal (razón de amortiguamiento como función de la frecuencia). La ecuación que describe este método es la siguiente.

$$\mathbf{M}\ddot{\delta} + \mathbf{B}\dot{\delta} + \mathbf{K}\delta = 0 \quad (3.1)$$

Donde  $\mathbf{M}$  es la matriz de masa,  $\mathbf{B}$  es la matriz de amortiguamiento,  $\mathbf{K}$  es la matriz de rigidez,  $\ddot{\delta}$  es el vector de aceleración,  $\dot{\delta}$  es el vector de velocidad y  $\delta$  es el vector de desplazamiento [24].

### 2. Método de integración directa (completo)

Usa un sistema completo de matrices para calcular la respuesta armónica. No hay aproximaciones a la matriz de masa involucradas. Permite matrices no simétricas, las cuales tienen aplicaciones típicas en problemas con rodamientos y problemas acústicos. Este método es el que se utiliza para este trabajo ya que es aplicado a análisis armónicos de estado estable.

Ya que se asume que los materiales del amplificador ultrasónico tienen una baja capacidad de amortiguamiento en aplicaciones dinámicas, la ecuación 3.1 puede reescribirse con  $\mathbf{B} = 0$  y quedaría de la siguiente manera [24]:

$$\mathbf{M}\ddot{\delta} + \mathbf{K}\delta = 0 \quad (3.2)$$

El vector de desplazamiento se puede expresar de la siguiente manera [42]:

$$\delta = d \sin(\omega_{i^{mo}} t) \quad (3.3)$$

Donde  $d$  es el desplazamiento lineal,  $\omega_{i^{mo}}$  es la frecuencia angular natural del  $i^{mo}$  modo de vibración [24] (modo longitudinal [11]) y  $t$  es el tiempo.

La ecuación 3.2 aplica para modos de vibración libre. Para un análisis de vibración en estado estable, esta se puede expresar como:

$$\mathbf{M}\ddot{\delta} + \mathbf{K}\delta = f(t) \quad (3.4)$$

Donde

$$f(t) = \mathbf{F} \sin(\omega_{i^{mo}} t) \quad (3.5)$$

Donde  $\mathbf{F}$  se conoce como matriz de rigidez dinámica [42].

Sustituyendo las ecuaciones 3.3 y 3.5 en la ecuación 3.4, podemos despejar  $d$  para obtener su valor, el cual quedaría de la siguiente manera [42]:

$$d = (\mathbf{K} - \omega_{i^{mo}}^2 \mathbf{M})^{-1} \mathbf{F} \quad (3.6)$$

### 3.1.3 – Software de simulación

Elemento finito es, en pocas palabras, una herramienta muy poderosa que permite modelar el comportamiento real de un medio continuo en un ambiente real de operación. Si bien las ecuaciones que rigen al método pueden resultar ser relativamente sencillas en su modo más puro, al momento de requerir un análisis con una gran cantidad de datos, el método se vuelve complejo. Hacer a mano un análisis complejo de más de mil elementos puede volverse una tarea imposible, por lo que el uso de softwares que resuelvan el método se vuelve la solución perfecta.

En el mercado existen una gran variedad de softwares que utilizan el método de elemento finito para resolver problemas de ingeniería, incluso se puede escribir un código de programación que

resuelva el método. ANSYS® es software utilizado en este trabajo de tesis debido a que ofrece una versión gratuita para estudiantes con las funciones suficientes para desarrollar este trabajo. La plataforma de interfaz gráfica del software, Workbench, resulta ser hasta cierto punto, intuitiva para el usuario. El método se aplica sobre simulaciones de un medio continuo, sometido a condiciones de operación o a las condiciones sobre las que queremos centrar el estudio.

El proceso de simulación consta de cinco etapas, las cuales son las siguientes:

#### 1. Modelado de la geometría

Una geometría CAD (dibujo asistido por computadora, por sus siglas en inglés) es la representación virtual de un elemento o estructura. Para aplicaciones en simulaciones es la base del estudio, donde se aplican las cargas y se genera el dominio para un posterior análisis.

En este estudio se utilizó una geometría en tres dimensiones, que, a pesar de utilizar más recursos computacionales, visualmente muestra los resultados de una manera más fácil de interpretar. También es el tipo de geometría compatible con ANSYS® Workbench.

#### 2. Selección del material

Un material es un conjunto de propiedades mecánicas de un cuerpo, tales como densidad, dureza, elasticidad, etc. La asignación de propiedades mecánicas determina la reacción del elemento finito cuando se cambia su estado de equilibrio. El uso de valores erróneos en las propiedades mecánicas o la asignación de propiedades no aplicables puede llevar a resultados completamente alejados de la realidad.

La asignación de las propiedades mecánicas a un CAD es fundamental para poder crear una simulación. ANSYS® provee un catálogo de materiales estandarizados. También permite la

creación y modificación del material, dependiendo de las propiedades necesarias para la simulación.

### 3. Mallado

Esta etapa del proceso es de las más importantes ya que es donde se crea el dominio donde se llevará a cabo la simulación. Si la topología del medio lo permite, se lleva a cabo el seccionamiento multibloque que se hace de forma semiautomática en Workbench.

Los elementos de malla tridimensional que se pueden crear pueden tener distintas topologías, las cuales pueden variar desde elementos tetraédricos, hexaédricos, así como pirámides y prismas triangulares, por mencionar los más generales. Por la forma geométrica de la pieza optimizada en este trabajo y por la dirección de la transmisión de la energía desde la cara inferior hasta la cara superior del amplificador ultrasónico, figura 3.04, es deseable que se presente una malla uniforme. Los elementos hexaédricos presentan dicha uniformidad para transmitir de manera idónea las ondas acústicas en la dirección transversal de la pieza.

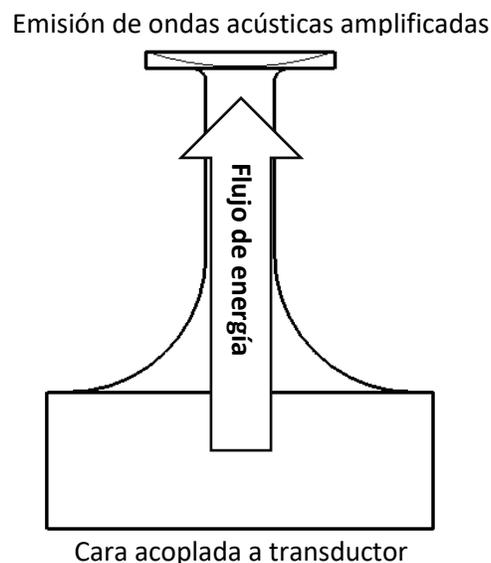


Figura 3.04. Dirección de la transmisión de las ondas acústicas en el cuerpo del amplificador.

Un elemento hexaédrico se obtiene a partir de la técnica de descomposición de dominios. A pesar de que el proceso de mallado se realiza de forma semiautomática, se debe de orientar al programa para que esta técnica sea la predominante en el proceso de discretización del medio. La triangulación de Delaunay resulta idónea para las zonas donde la superficie del amplificador se vuelve excéntrica para la descomposición de dominios. El software determina con un análisis de frente de avance los bloques donde cada técnica puede obtener una mejor calidad de malla.

Un factor importante al momento de realizar un mallado es determinar las regiones más importantes del dominio para concentrar el análisis sobre ellas. Una malla eficiente es la que contiene una mayor cantidad de elementos en las regiones de interés. De este modo, no se gastan recursos computacionales en zonas que no van a aportar información relevante a la solución.

Como se ha dicho, el mallado en Workbench se genera de forma semiautomática. El elemento espacial que se utiliza de manera predominante, en este trabajo de tesis, es el SOLID186 (figura 3.05) que es un elemento de orden superior. El elemento está definido por 20 nodos, teniendo tres grados de libertad traslacional (x, y, z) para cada uno.

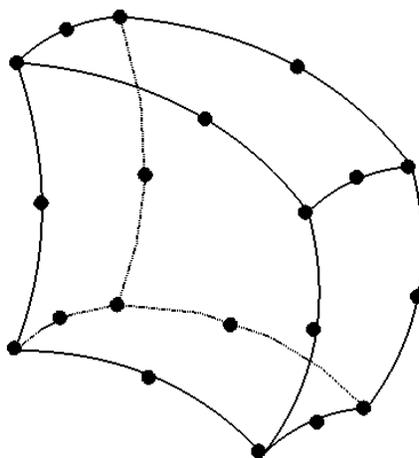


Figura 3.05. SOLID186, elemento de construcción del software ANSYS para la resolución del método de elemento finito de un cuerpo solido tridimensional.

El elemento es compatible con la plasticidad, la hiperelasticidad, la rigidez de la tensión, alta deflexión y una gran capacidad de deformación [19]. Con este elemento, el análisis puede centrar el estudio en la parte más importante del elemento, el cual, en un análisis armónico, es la parte donde se presenta la mayor respuesta al movimiento sinusoidal.

#### 4. Determinación de las condiciones de frontera

El ambiente de simulación es un ambiente controlado, por lo que se conocen las ecuaciones diferenciales que rigen el dominio del medio continuo. Como se ha dicho, pueden no existir las soluciones exactas para dichas ecuaciones, pero bajo condiciones específicas se puede conocer el valor de las derivadas que las constituyen. Estas condiciones específicas se conocen como condiciones de frontera o condiciones iniciales [34].

Hay un sinnúmero de ejemplos de condiciones de frontera. Una cara de un elemento tridimensional con los nodos fijos  $\nabla f(x, y, z) = 0$ , con una temperatura específica diferente al resto del cuerpo o una aceleración definida por una ecuación cuadrática son solo unos ejemplos de ello. Definir las condiciones de frontera adecuadas para cada problema es importante para obtener los resultados deseados. Definir condiciones iniciales en exceso o escasez lleva a resultados que se alejan del comportamiento real del elemento a simular. Son valores que se deben conocer antes de iniciar cualquier simulación. Precisar con exactitud estas condiciones es importante para representar con la mayor certeza posible el comportamiento en condiciones reales de manera experimental.

#### 5. Solución

Una vez que las cuatro etapas previas están completas, solo resta resolver el método de elemento finito. Resolver la interacción de un elemento finito con otro no es difícil y se puede hacer de manera manual, pero debido a la gran cantidad de elementos que se pueden presentar en un medio

continuo, resulta ser una labor compleja. Softwares como ANSYS® Workbench, 3DEXPERIENCE® SolidWorks, 3DEXPERIENCE® Catia o COMSOL Multiphysics®, por mencionar algunos, resuelven el método de manera interna en poco tiempo, evitando la necesidad del usuario de involucrarse en el proceso.

Workbench resuelve el método de elemento finito de manera general dentro de ciertos tópicos que maneja. Estos tópicos o sistemas de análisis personalizan el problema a tratar dependiendo del tipo de análisis que se quiera realizar. Por ejemplo, se tienen tópicos de análisis de flujo de fluidos, análisis eléctricos, análisis de dinámica, análisis de estructuras estáticas, análisis de transferencia térmica entre muchos otros.

Ya que se desea saber la respuesta en desplazamiento ante una vibración forzada se debe de trabajar con el sistema de análisis de respuesta armónica. Una vez ingresada la geometría CAD, la librería de materiales a utilizar, la creación de la malla y después de determinar las condiciones de frontera, solo se selecciona el tipo de resultados que se desean obtener y el programa otorgará la información deseada después de resolver el método de elemento finito.

### 3.2 – Método matricial

Con el modelado del campo de levitación acústica se puede determinar la forma del campo del potencial de radiación acústica generado por los componentes mecánicos del sistema. Ya que la forma de este campo depende de la forma geométrica de los componentes, es importante saber cómo afectan los cambios geométricos del amplificador al sistema de levitación. El potencial de radiación acústica relativo [3] determina la distribución de la presión ocasionada por ondas estacionarias donde se ubican los puntos nodales que generan la levitación.

Para determinar el potencial de radiación acústica, primero se deben de obtener algunos datos útiles como la presión acústica de la que depende. También se puede obtener información puntual

de dicha presión para saber qué tantas iteraciones son relevantes para determinar el potencial. Toda esta información se puede obtener con un método matricial especialmente diseñado para resolver el potencial de radiación acústica relativo [3].

### 3.2.1 – Presión acústica

En un medio gaseoso, es el cambio de presión ocasionado por el movimiento de las partículas generado por una onda mecánica, comparado con la presión inicial del sistema, que, en un medio controlado, se asume es estática [43]. Dentro de un campo de presión acústica se generan zonas donde las partículas se concentran (aumenta la densidad y presión del medio) y zonas de rarefacción, es decir, zonas menos saturadas de partículas donde la densidad y presión disminuyen, figura 3.06.

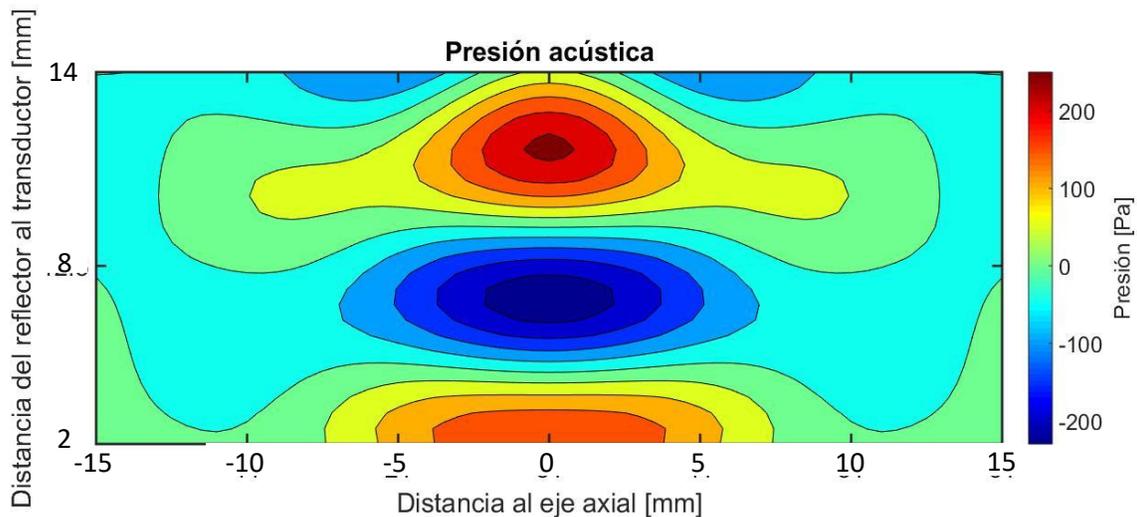


Figura 3.06. Plano bidimensional de una simulación de un campo de presión acústica en el momento de máxima amplitud generado entre un transductor (arriba) y un reflector (abajo). El campo de presión tiene geometría axial por lo que al aplicar una revolución de  $\pi$  radianes mostraría el campo de una manera tridimensional.

### 3.2.2 – Presión acústica punto a punto

El análisis de la presión acústica punto a punto es un dato que sirve para determinar la relevancia de cada iteración<sup>4</sup>. Dependiendo de la configuración geométrica de los componentes mecánicos, la presión acústica disminuirá con mayor o menor intensidad en cada iteración. Cada vez que la onda acústica se ve reflejada pierde intensidad debido a que el sistema no es cerrado y no se refleja por completo la onda. Cierta cantidad de energía se ve reflejada fuera del sistema y se considera como energía perdida. Con la finalidad de optimizar recursos computacionales y el tiempo de análisis mediante el método matricial, la presión acústica punto a punto indica la cantidad de reflexiones que contribuyen de manera significativa. En la configuración transductor-reflector plano-plano ( $T_p$ - $R_p$ ), por ejemplo, después de aproximadamente cinco, la presión acústica pierde tanta intensidad que prácticamente se vuelve nula (figura 3.07), por lo que se puede hacer un análisis en un tiempo significativamente menor que si se consideran 20 ó 30 reflexiones.

---

<sup>4</sup> Una iteración es igual a dos reflexiones. Onda transmitida del transductor al reflector y posteriormente del reflector al transductor, para que posteriormente se repita en una posterior iteración.

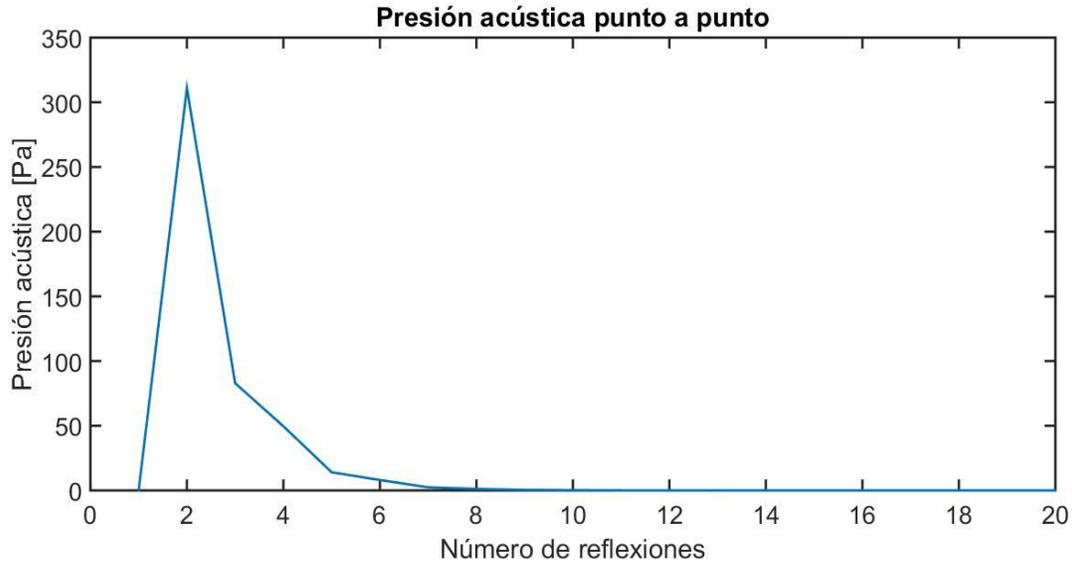


Figura 3.7. Gráfica generada en una simulación con configuración plano-plano con un diámetro de transductor de 10 mm, un diámetro de reflector de 30 mm y una distancia de separación de 22 mm a una frecuencia de vibración de 41 kHz. La primera reflexión se considera como la onda emitida por el transductor.

En otras configuraciones, por ejemplo, en un sistema cóncavo-cóncavo ( $T_c-R_c$ ), y con una distancia entre caras reducida, la presión acústica se mantiene con un valor significativo hasta por 40 reflexiones (figura 3.08) o más. Por lo que para mejores resultados es deseable gastar un poco más de recursos y tiempo computacional. Sin embargo, la acumulación de iteraciones no afecta la distribución de la presión, solo su amplitud. Para un análisis cualitativo se pueden omitir las múltiples reflexiones y mantener un tiempo de procesamiento corto.

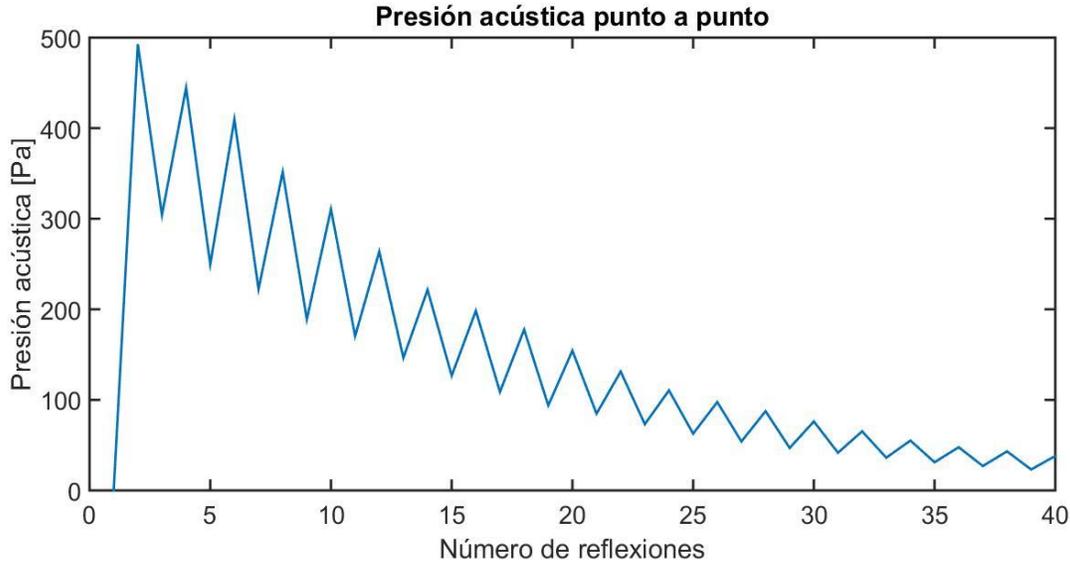


Figura 3.8. Gráfica generada con una configuración cóncavo-cóncavo con un diámetro de transductor de 18 mm, un diámetro de reflector de 30 mm, un radio de curvatura de la cavidad del transductor de 30 mm, un radio de curvatura de la cavidad del reflector de 50 mm y una distancia de separación de 16 mm a una frecuencia de vibración de 41 kHz.

### 3.2.3 – Potencial de radiación acústica relativo “ $\tilde{V}$ ”

El potencial de radiación acústica<sup>5</sup> en el aire es la energía potencial que tiene la presión acústica para empujar un cuerpo y mantenerlo suspendido. Esta radiación puede ser suficiente para generar la presión necesaria que sea capaz de contrarrestar la interacción gravitatoria que se ejerce sobre un objeto de mayor densidad que el medio.

Cuando se trabaja con cuerpos<sup>6</sup> de un tamaño menor a media longitud de onda, siempre y cuando cumplan con la teoría de Gor’kov [1, 39], se puede trabajar con un potencial de radiación acústico que sea independiente del tamaño del cuerpo, denominado como potencial de radiación acústica relativo “ $\tilde{V}$ ”. Este potencial es el que define la forma del campo de levitación acústica, ya que

<sup>5</sup> Se entiende por radiación acústica a la transmisión de energía a través de ondas acústicas (mecánicas).

<sup>6</sup> Para simplificar los cálculos analíticos, los autores representaron el cuerpo como una esfera perfecta.

muestra la radiación presente por unidad de volumen, figura 3.09. La levitación de una pequeña esfera, o de un objeto similar, se puede generar entre las zonas de mayor y menor potencial de radiación acústica relativo dado que ahí es empujado por unas y atraído por las otras, respectivamente.

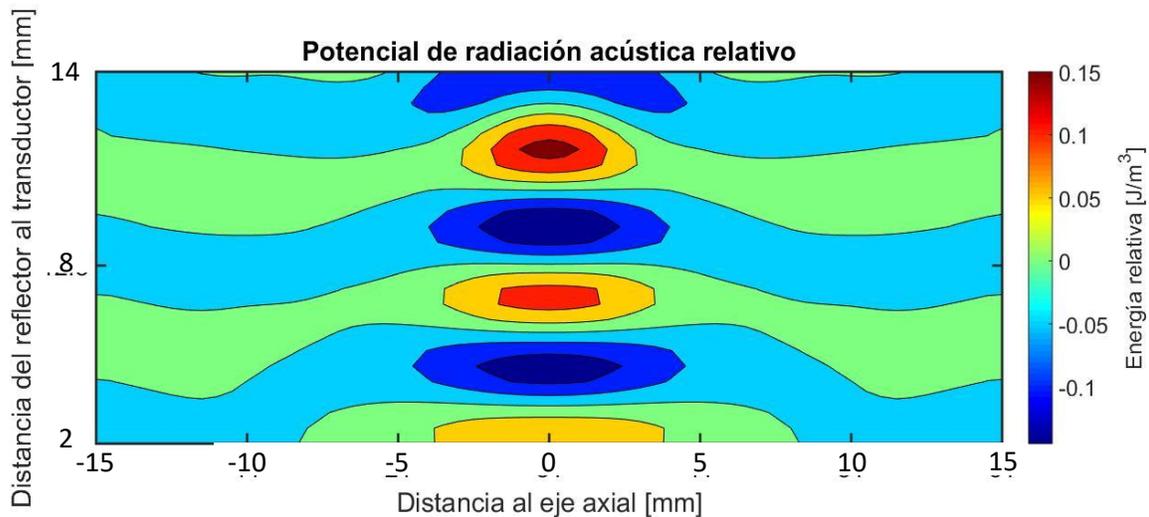


Figura 3.09. Gráfica de  $\tilde{V}$ . Los parámetros utilizados fueron diámetro de transductor de 18 mm, un diámetro de reflector de 30 mm, un radio de curvatura de la cavidad del transductor de 30 mm, un radio de curvatura de la cavidad del reflector de 50 mm y una distancia de separación de 16 mm a una frecuencia de vibración de 41 kHz.

### 3.2.4 – Método matricial para la levitación acústica

El método matricial fue creado para la simulación computacional del campo de levitación acústica de una esfera pequeña en un medio gaseoso dentro del sistema de un levitador acústico compuesto por una cantidad indefinida de transductores y reflectores, al que llamaré simplemente “método matricial para la levitación acústica.” Es un método propuesto por Marco A. B. Andrade y colaboradores, pensado para reducir el tiempo computacional consumido por métodos numéricos como el de elemento finito que resuelvan este caso en específico. Se basa en empleo de matrices

de transferencia monocromáticas<sup>7</sup> para determinar el potencial de radiación acústica que actúa sobre una esfera en la región comprendida entre las superficies de uno [o varios transductores y reflectores] [3].

Para calcular este potencial, primero es necesario determinar el campo de presión acústica en la región que se encuentra entre las superficies clave de los componentes mecánicos. Este campo de presión puede ser determinado al resolver la integral de Rayleigh [3]. Se puede resolver esta integral de una forma numérica, discretizando las superficies relevantes, de los transductores y reflectores involucrados en el sistema, en celdas de un área reducida.

Las superficies de transductor se discretizan en  $N$  celdas, mientras que aquellas del reflector se discretizan en  $I$  celdas. Por lo tanto, las celdas discretizadas de la superficie del transductor son denominadas como  $S_n$ , mientras que las celdas que pertenecen a la superficie del reflector son  $S_i$ . Para este caso, los sufijos  $n$  e  $i$ , corresponden al número de celda de las caras de transductor y reflector, respectivamente.

El área de análisis que es una superficie plana con componentes horizontal y vertical, tomando como sistema de referencia, las superficies de algún transductor y reflector, también se discretiza. Esta área se divide en  $M$  celdas (figura 3.10), donde el número de celdas es expresado como  $m$ . La distancia entre las celdas  $S_n$  y  $S_i$  está denotada como  $r_{in}$ . La distancia entre las celdas  $S_n$  y  $m$  es  $r_{nm}$ , mientras que la distancia entre las celdas  $S_i$  y  $m$  es  $r_{im}$ .

---

<sup>7</sup> Matrices de transferencia con solo una variable como información. En este caso, la variable es la amplitud de vibración.

### Mallas de superficies

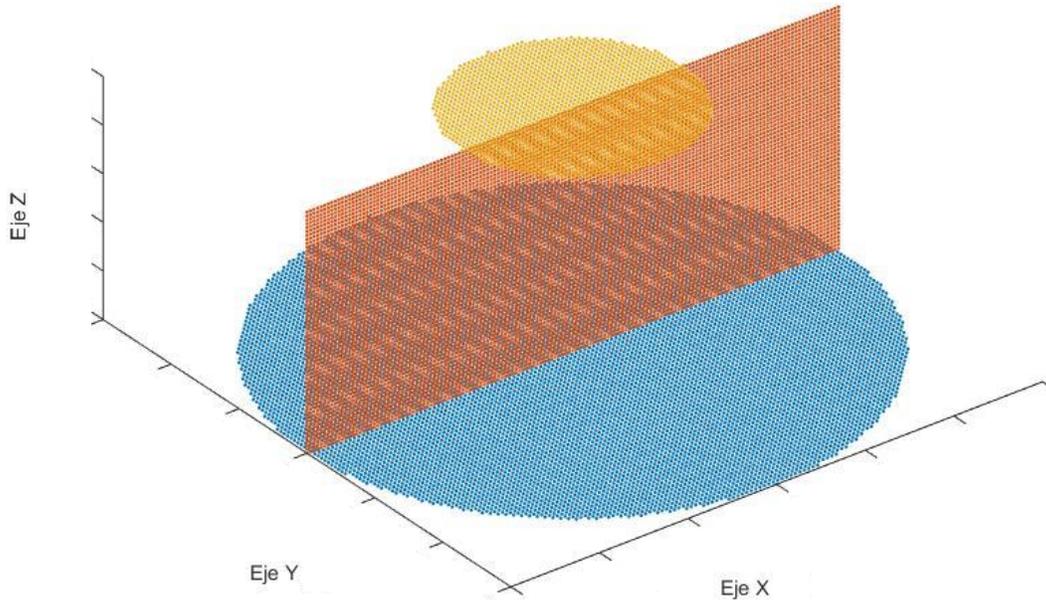


Figura 3.10. Representación gráfica de la discretización de las celdas  $N$  (amarillo),  $I$  (azul) y  $M$  (rojo). Las celdas en conjunto forman mallas que representan la superficie del transductor, reflector y la región de estudio, respectivamente.

Teniendo en consideración que toda la superficie del transductor vibra armónicamente<sup>8</sup>, el desplazamiento de cada celda  $S_n$  será representado por la amplitud compleja  $\mathbf{U}_n$ . El módulo de  $\mathbf{U}_n$  representa la amplitud de vibración armónica, mientras que su fase representa la fase de excitación de cada celda. Cada celda  $S_n$  transmite información mecánica, es decir, que su comportamiento afecta mediante ondas mecánicas, al sistema en que se encuentra, el cual es en este caso, el campo de presión acústica. Por tanto, existe una interacción entre  $S_n$  y  $S_i$  y entre  $S_n$  y

---

<sup>8</sup> Validaciones mediante el método de elemento finito demuestran que la superficie del amplificador no vibra de manera uniforme. Se considera este comportamiento como válido para este método para acelerar el análisis computacional. Se toma el promedio del rango de valores de amplitud de vibración que se calcula mediante el método elemento finito.

$M$ . La función del reflector es la de reflejar las ondas provenientes del transductor que lleguen hasta su superficie, estas ondas reflejadas también producirán una interacción entre  $S_i$  y  $S_n$ , así como entre  $S_i$  y  $M$ . Todo este complejo sistema de transferencia de ondas se puede describir mediante cuatro matrices de transferencia, las cuales son:  $\mathbf{T}^{(TR)}$  (para la interacción de  $S_n$  a  $S_i$ ),  $\mathbf{T}^{(TM)}$  (para la interacción de  $S_n$  a  $M$ ),  $\mathbf{T}^{(RT)}$  (para la interacción de  $S_i$  a  $S_n$ ) y  $\mathbf{T}^{(RM)}$  (para la interacción de  $S_i$  a  $M$ ). Estas matrices se descomponen desde la ecuación 3.7 hasta la 3.10:

$$\mathbf{T}^{(TR)} = \frac{S_n * e^{-jkr_{in}}}{r_{in}} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{T}^{(TM)} = \frac{S_n * e^{-jkr_{nm}}}{r_{nm}} \quad (3.8)$$

$$\mathbf{T}^{(RT)} = \frac{S_i * e^{-jkr_{in}}}{r_{in}} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{T}^{(RM)} = \frac{S_i * e^{-jkr_{im}}}{r_{im}} \quad (3.10)$$

Donde  $k = \omega/c$  y  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$  es la frecuencia angular y  $c$  es la velocidad de propagación de la onda. El segundo termino de cada ecuación describe la propagación de una onda esférica, por lo que podemos comprender que el fenómeno de levitación acústica se presenta dentro de un sistema tridimensional, a pesar de que, la región de análisis es estudiada en 2D. Esto se debe principalmente a que la región de principal interés se encuentra centrada entre los ejes geométricos de los componentes del levitador, siempre y cuando sea uniaxial.

Dentro de un levitador acústico uniaxial, la región de estudio en 2D puede describir el comportamiento tridimensional si se le aplica una revolución de  $\pi$  radianes sobre su eje  $z$ . Para geometrías o configuraciones diferentes, el análisis sigue siendo igualmente aplicable, teniendo en consideración que solo mostrará un plano interno del campo. Definir la posición del plano de

estudio es sencillo, por lo que en configuraciones que no tengan simetría axial, se pueden emplear la cantidad de planos que sean necesarios para tener la información suficiente del sistema.

Una vez que se tienen definidos los términos, se puede calcular un vector que defina el comportamiento del campo de la presión acústica  $P$ , el cual se muestra a continuación.

$$\begin{aligned}
 P = & \left(\frac{\omega\rho c}{\lambda}\right) \left(\frac{j}{\lambda}\right)^0 \mathbf{T}^{(TM)} \mathbf{U}_n + \left(\frac{\omega\rho c}{\lambda}\right) \left(\frac{j}{\lambda}\right) \mathbf{T}^{(RM)} \mathbf{T}^{(TR)} \mathbf{U}_n + \dots \quad (3.11) \\
 & \left(\frac{\omega\rho c}{\lambda}\right) \left(\frac{j}{\lambda}\right)^2 \mathbf{T}^{(TM)} \mathbf{T}^{(RT)} \mathbf{T}^{(TR)} \mathbf{U}_n + \left(\frac{\omega\rho c}{\lambda}\right) \left(\frac{j}{\lambda}\right)^3 \mathbf{T}^{(RM)} \mathbf{T}^{(TR)} \mathbf{T}^{(RT)} \mathbf{T}^{(TR)} \mathbf{U}_n + \dots \\
 & \left(\frac{\omega\rho c}{\lambda}\right) \left(\frac{j}{\lambda}\right)^4 \mathbf{T}^{(TM)} \mathbf{T}^{(RT)} \mathbf{T}^{(TR)} \mathbf{T}^{(RT)} \mathbf{T}^{(TR)} \mathbf{U}_n + \dots
 \end{aligned}$$

Donde  $\rho$  es la densidad del medio de propagación y  $\lambda$  es la amplitud de la onda. Como se puede observar en la ecuación, la presión es dependiente del número de reflexiones que existan en el sistema. Se puede hacer un análisis con un número indeterminado de reflexiones, pero utilizando la información que se obtiene de la presión punto a punto, el cálculo se delimita a un número finito de iteraciones. Se debe de considerar cada reflexión que se genera desde que la onda sale del transductor y llega hasta el área de análisis.

Con esta información se puede obtener el potencial de radiación acústica  $V$ . Que de acuerdo con la teoría de Gor'kov, cuando actúa sobre una pequeña esfera de radio  $R$ , se describe de la siguiente manera

$$V = 2\pi R^3 \left( \frac{\overline{p^2}}{3\rho c^2} - \frac{\overline{\rho \dot{u}^2}}{2} \right) \quad (3.12)$$

donde  $\overline{p^2}$  y  $\overline{\dot{u}^2}$  son las amplitudes cuadradas de la presión y la velocidad respectivamente. El valor de  $\dot{u}$  lo obtenemos del gradiente del potencial de velocidad  $\phi$  (que a su vez podemos obtener del campo de presión) como se aprecia a continuación.

$$\dot{u} = \nabla\phi \quad (3.13)$$

$$\phi = -\frac{p}{j\omega\rho} \quad (3.14)$$

Finalmente se puede obtener el potencial de radiación acústica independiente del radio de la esfera [3]. Denominado potencial de radiación acústica relativo  $\tilde{V}$ , el cual se obtiene con la siguiente ecuación

$$\tilde{V} = \frac{V}{2\pi R^3} \quad (3.15)$$

Se debe de tener en cuenta que este potencial se determina en un instante de tiempo determinado, por lo que lo podemos considerar una representación estática del potencial que oscila armónicamente. Modificando  $\omega$  se modifica el instante de tiempo en que se determina el potencial. Es deseable que se calcule cuando dicho potencial está en su máximo mayor o máximo menor que ocurre cada  $\pi$  radianes.

Dependiendo de la cantidad y la forma de las superficies que generan el campo de levitación, se pueden presentar diferentes configuraciones. Estas configuraciones se pueden dividir en tres grandes grupos, los cuales son los siguientes.

1. Un transductor, un reflector

Tomando en cuenta únicamente el parámetro de la curvatura de la superficie, para el caso de un levitador acústico que tenga solo un transductor y un reflector, se pueden presentar las siguientes tres configuraciones:

- Plano-plano

Es la configuración más sencilla de un transductor. Dos caras planas, opuestas entre sí. En el método matricial, el nivel de convergencia es el más alto, debido a la alta disipación de la radiación

acústica, por lo que se necesita un número pequeño de iteraciones para llevar a un resultado altamente significativo. Aproximadamente cinco iteraciones son suficientes. Esta configuración la podemos apreciar en la figura 3.11:



Figura 3.11. Configuración plano-plano para las superficies del transductor y el reflector.

- Plano-cóncavo

En esta configuración, una de las dos superficies, ya sea la del transductor o la del reflector es plana, mientras que la otra presentará una curvatura. La curvatura disminuye el nivel de convergencia, debido a que focaliza la radiación acústica, por lo que más iteraciones son necesarias para llegar a un resultado satisfactorio. Esta configuración es mostrada a continuación en la figura 3.12.



Figura 3.12. Configuración plano-cóncavo para las superficies del transductor y reflector.

- Cóncavo-cóncavo

Es la configuración más compleja de un sistema de levitación uniaxial, figura 3.13. Debido a que la disipación de la radiación acústica es bastante pequeña en comparación con las configuraciones mencionadas anteriormente, la convergencia de las mismas es remarcadamente más pequeña, requiriéndose en ciertos casos hasta 20 iteraciones o más. Debido a limitaciones del método, dependiendo de la proximidad entre las superficies, se puede presentar una divergencia que no representa el comportamiento real [2].

Esta es la configuración que presenta una mejor focalización y los niveles más altos del potencial de radiación acústica relativo, debido a la gran capacidad de retención de la radiación acústica, por lo que de las tres es la configuración óptima.

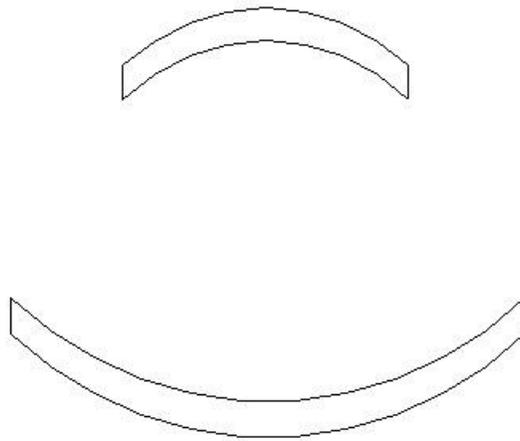


Figura 3.13. Configuración cóncavo-cóncavo para las superficies del transductor y reflector.

Ahora, tomando en consideración el corte geométrico, el número de configuraciones aumenta. Se encuentran geometrías que resultan no ser tan comunes en la práctica, debido al hecho de que geometrías no radiales presentan una amplitud de vibración que no se puede considerar uniforme. Análisis con el método de elemento finito demuestran que geometrías especiales presentan una

mayor amplitud de vibración armónica en el centro geométrico de la superficie y un nivel mínimo en los bordes más alejados.

## 2. Geometrías especiales

Por lo general, se suelen emplear levitadores de simetría axial, pero, existen casos donde la aplicación de un sistema de levitación que esté fuera de eje o que presente cierto grado de inclinación [6, 8] es deseable, figura 3.14. En el caso particular del problema que trata el trabajo de esta tesis, este tipo de configuración se tomó en consideración para ser implementado, figura 3.15. En este ejemplo comparativo la malla de la región de estudio está centrada en el origen X (0), con un ancho de 40 mm y una altura de 14 mm. La superficie del transductor se encuentra a una altura de 18 mm y una distancia del origen Y (0) de 20 mm, con un diámetro de 20 mm, una inclinación de  $50^\circ$  y un radio de curvatura de 35 mm. El reflector se encuentra a una distancia del origen Y de 20 mm en dirección opuesta al transductor, con un diámetro de 40 mm, un ángulo de inclinación de  $30^\circ$  y un radio de curvatura de 70 mm.

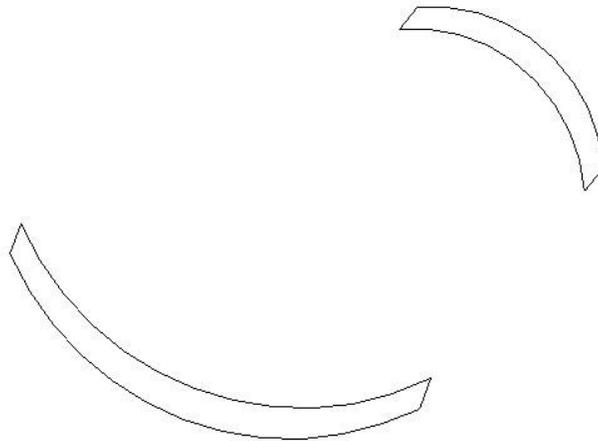


Figura 3.14. Configuración cóncono-cóncono fuera de eje para las superficies de un transductor y reflector.

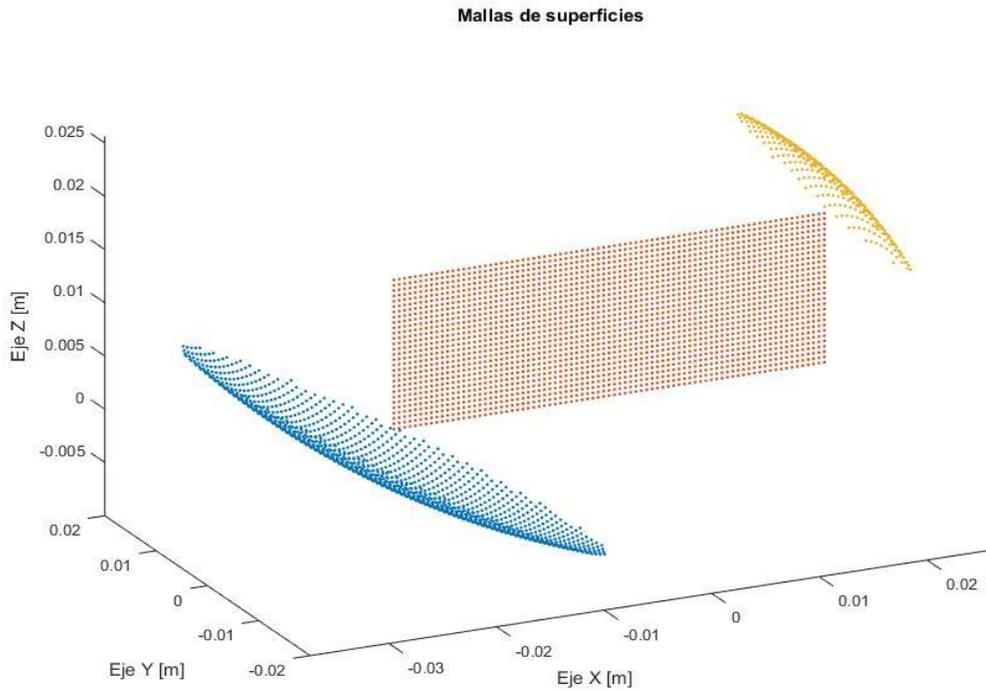
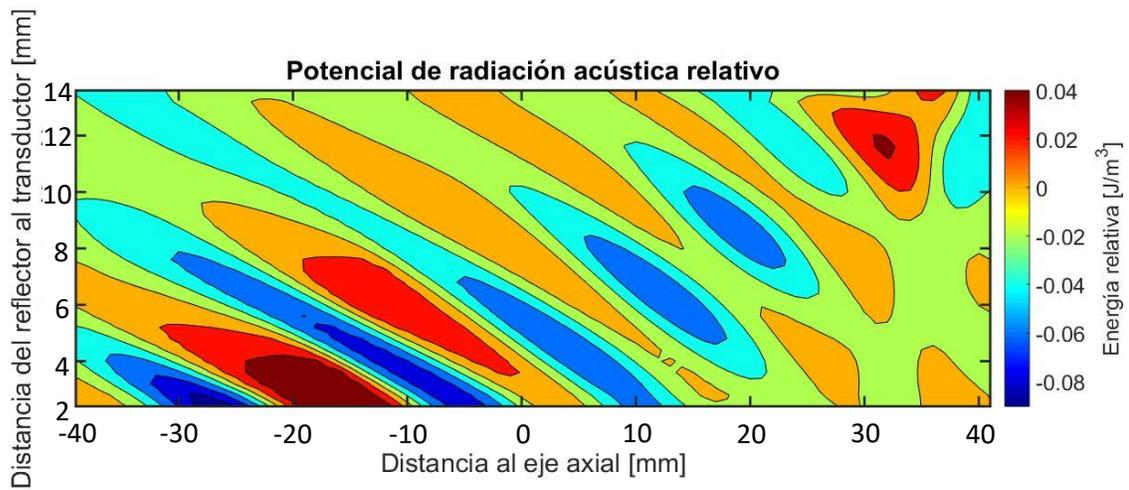
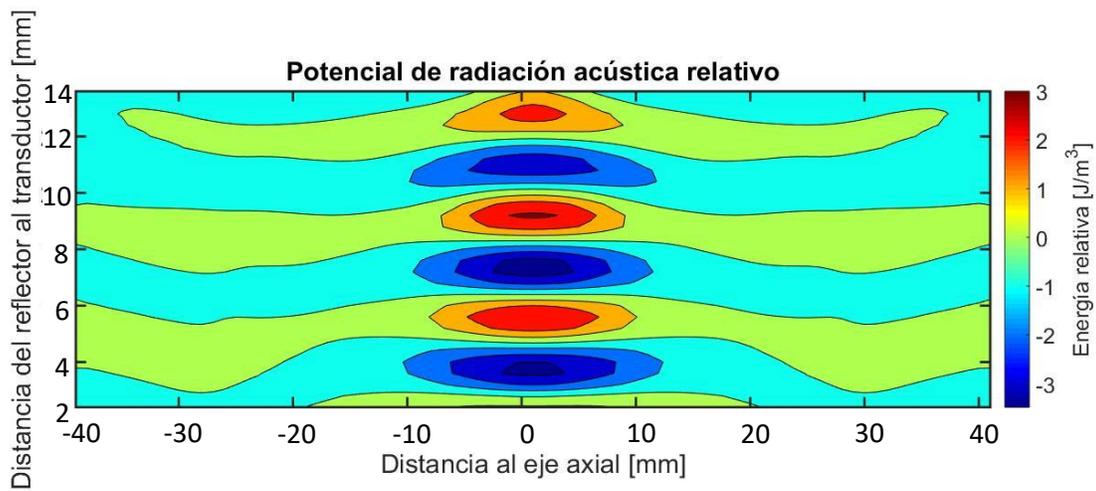


Figura 3.15. Configuración cóncavo-cóncavo fuera de eje y malla de la región de estudio.

Al analizar este tipo de configuración mediante el método matricial, se ha podido visualizar que el potencial de radiación acústica relativo es menor que el producido por aquella de simetría radial, figura 3.16. Por lo que, a pesar de ser una configuración posible, no se tomará en cuenta para el análisis de esta tesis.



a)



b)

Figura 3.16. Comparación entre una configuración fuera de eje en a) contra una con simetría axial en b). El potencial en a) se obtuvo con la configuración de la geometría de la figura anterior mientras que el potencial en b) se obtuvo manteniendo los mismos parámetros geométricos, pero con una simetría axial. Se puede apreciar que la energía relativa en simetría axial tiene dos órdenes de magnitud más que en el que se encuentra fuera de eje.

El campo de levitación también rompe su simetría y al trabajar con partículas lo suficientemente pequeñas, la estabilidad de la partícula disminuye. Por lo tanto, existe un umbral de operación más pequeño, cuando el tamaño de la partícula levitada se torna relevante.

### 3. Más de un transductor y/o reflector

A lo largo de la literatura, se han aplicado más de un transductor para diferentes aplicaciones. Claros ejemplos de esto son [8] donde el Dr. Andrade y su equipo utilizaron tres transductores para lograr levitar un objeto de gran volumen [8] y el TinyLev [38], un dispositivo capaz de levitar acústicamente objetos mientras que el sistema en conjunto tiene un alto grado de libertad si se manipulan los transductores individualmente. Otro caso es el descrito en la referencia [3], donde se presenta un sistema de dos transductores dispuestos de forma céntrica sobre el centro geométrico de la superficie del reflector, el cual se presenta con un corte rectangular, para reflejar un porcentaje más significativo de las ondas producidas por ambos transductores.

En estos casos, el empleo de un reflector pasa a un segundo plano, pues bien, se puede prescindir de él, al dejar que la esfera (de un diámetro superior a  $\lambda/2$ ) actúe como el reflector o que un alto número de transductores hagan innecesario el empleo de uno. En el caso de que sea utilizado, la cantidad de transductores será mayor que la de reflectores, ya que uno de gran superficie basta para los transductores que se lleguen a utilizar.

#### 4 – Métodos de medición experimental

Las simulaciones computacionales que recrean comportamientos físicos de un sistema son una excelente herramienta para procesos de diseño, optimización, análisis de fallas, entre otros. Pero sin un modelo experimental que valide los resultados obtenidos, no se les puede otorgar la confianza necesaria. Para corroborar la efectividad de las simulaciones es necesario que de manera experimental se haga el análisis correspondiente que demuestre que tanto se aproximan al comportamiento real las simulaciones.

En este trabajo en concreto, se cuentan con análisis numéricos que determinan la vibración de un cuerpo y la distribución de la presión en un campo de ondas estacionarias. Para el primer estudio se necesita hacer la medición con un vibrometro, mientras que para el segundo se necesita la capacidad de poder visualizar el cambio en la densidad del aire.

##### 4.1 – Self-Mixing Interferometry (SMI)

Existen dos tipos de técnicas para medir la vibración de cuerpos sólidos: técnicas de contacto y técnicas de no-contacto. Las técnicas de contacto se consideran invasivas (como las que emplean acelerómetros o termopares) y son una gran opción para medir objetos masivos en comparación con los instrumentos de medición, ya que se acoplan al objetivo. En el caso del transductor, o el amplificador ultrasónico, dichas técnicas no son recomendables ya que pueden perturbar la medición de manera considerable [1].

Las técnicas de no-contacto realizan mediciones de manera discreta, por lo que no suelen alterar las propiedades mecánicas del cuerpo a analizar. La interferometría<sup>9</sup> de auto mezclado, mejor conocida por su nombre en inglés *Self-Mixing Interferometry* (SMI), es una técnica de medición

---

<sup>9</sup> Técnica que consiste en la combinación de ondas electromagnéticas provenientes de diversas fuentes aplicando el principio de superposición para tener una mayor resolución de imagen.

libre de contacto. Es utilizada para hacer mediciones sobre la velocidad, distancia, desplazamiento y cambio del índice de refracción del medio de propagación de la luz [1]. Las técnicas interferométricas miden desplazamientos armónicos con resoluciones de media longitud de onda, por lo que SMI es ideal para la medición experimental del amplificador.

De manera resumida, SMI es una técnica interferométrica donde se modula la amplitud (AM) y la frecuencia (FM) de la radiación de un láser cuando parte de su haz es reflejado desde un objetivo en movimiento de vuelta en la cavidad de emisión del láser. Las modulaciones AM y FM ocurren debido a que el objeto en movimiento induce un corrimiento en la frecuencia (efecto Doppler) del haz reflejado, y al “mezclarse” con la luz dentro de la cavidad laser, se genera la interferencia. Gracias a esta interferencia se puede determinar la velocidad de vibración del cuerpo que causó la reflexión del haz de luz. Con la información de la velocidad se pueden obtener, a su vez, valores para la aceleración y el desplazamiento [1].

Generalmente la señal AM se mide directamente de la potencia de salida del láser recolectada de un detector trasero ya incluido en la unidad de diodo láser [1]. La señal FM no puede medirse directamente ya que las modulaciones se generan en magnitudes de frecuencias de grado óptico [1], sin embargo, existen las técnicas de filtrado de bordes<sup>10</sup> que se utilizan para demodular las señales FM-SMI. Esta variante de la técnica, conocida como interferometría de auto mezclado mejorada (ESMI por sus siglas en inglés), demodula la señal FM en modulación de intensidad (IM) utilizando filtros de borde (como la rejilla de volumen de Bragg) que se basan en las propiedades ópticas de la luz. La detección de la señal de ESMI depende en mayor medida de la inclinación del borde del filtro y, entre más pronunciado sea el borde, mayor será la señal [1].

---

<sup>10</sup> Técnicas que se utilizan para destacar u ocultar información selecta de una imagen. Son empleadas para pulir señales que varían respecto al tiempo.

Ya que la vibración armónica es un comportamiento sinusoidal, el cambio de fase del que dependen las modulaciones es el tiempo entre dos franjas (o ciclos) de señal SMI y depende de la siguiente ecuación:

$$\varphi(t)_{SMI} = 2k_{láser}s_{láser} \quad (4.1)$$

donde  $k_{láser} = 2\pi/\lambda_{láser}$ ,  $\lambda_{láser}$  es la longitud de onda del láser y  $s_{láser}$  es el desplazamiento del objetivo analizado. La resolución de la amplitud de desplazamiento es dependiente de la longitud de onda del láser ya que dicha amplitud es equivalente a la mitad de  $\lambda_{láser}$  para la señal SMI [1]. Dado que la amplitud de desplazamiento del amplificador es proporcional al voltaje aplicado al transductor, entre mayor sea ese voltaje, mayor será el número de franjas de señal en SMI.

#### 4.2 – Deflectometría schlieren

Es una técnica que permite visualizar, en tiempo real, cambios pequeños en el índice de refracción de un medio gaseoso, como el aire. Adicionalmente, también se puede visualizar la difracción de la luz que rodea cuerpos sólidos, fenómeno conocido como difracción de bordes [28]. El funcionamiento básico de esta técnica es bastante simple: Un espejo telescópico<sup>11</sup> [28—30], colecta toda la luz posible de una fuente de luz puntual continua, la cual puede ser estroboscópica<sup>12</sup> bajo ciertos casos particulares [29, 30], que esté próxima a su centro de curvatura y la refleja en un punto simétricamente correspondiente. En este punto se coloca un cuerpo que bloquee una porción de la luz proyectada. Un receptor (una persona o cámara) colecta la información visual de la luz que no fue bloqueada por el cuerpo y de cualquier objeto que se encuentre entre la superficie reflectante y el receptor. Si a lo largo del camino óptico la luz es perturbada o desviada por alguna

---

<sup>11</sup> Es un espejo con la superficie curva esférica. El radio de curvatura es igual al doble de la longitud de la distancia focal. El nombre se le acuña debido a que suelen utilizarse en telescopios.

<sup>12</sup> Es una fuente de luz pulsante. La calibración de la frecuencia de las pulsaciones depende del arreglo experimental.

heterogeneidad en el aire o medio, la proyección será desplazada de su trayecto original. Por lo cual, parte de la luz que estaba siendo bloqueada por el cuerpo alcanzará al receptor. Esta acción crea una ilusión de aumento de brillo en la región donde es causada la perturbación en un sistema schlieren monocromático. La cantidad de brillo corresponde a la magnitud del gradiente de densidad del medio que ocasiona el fenómeno de deflexión [29]. Entre mayor sea el brillo, mayor será el valor absoluto este gradiente.

También se puede visualizar la difracción de la luz alrededor de los objetos. Esto ocurre en un ambiente de escasa iluminación, donde un cuerpo situado frente al espejo se muestra oscuro y contorneado por una delgada y brillante línea de luz [28]. La luz proveniente de una fuente puntual es difractada por los bordes del cuerpo desde la perspectiva del observador.

Un rayo de luz puede ser desviado en cualquier ángulo de inclinación en un plano XY perpendicular a su trayecto. Es habitual encontrar en la literatura, por ejemplo [28, 30], arreglos de la técnica óptica schlieren donde el cuerpo que se encarga de bloquear los rayos de luz bloquee la mitad del plano de visualización. Normalmente es el borde filoso de una navaja que se orienta, en su mayoría, en la parte inferior de forma horizontal. El inconveniente con este tipo de cuerpo es que bloquea el 50% del espacio hacia donde los haces de luz pueden dirigirse al ser reflejados de su trayecto original, de tal modo que la información visual de los rayos de luz que se dirijan a la mitad bloqueada se pierde. Sin embargo, debido a que solo se utiliza esta técnica con fines visualmente comparativos, esta configuración tradicional de schlieren es suficiente.

La capacidad de esta técnica de detectar los cambios en el índice de refracción de un medio gaseoso es de gran utilidad en este trabajo de tesis. La técnica de deflectometría schlieren es una herramienta que permite la visualización del potencial de radiación acústica relativo, con lo que se puede comparar de manera experimental el comportamiento de los resultados que predicen las

simulaciones. La manera en que se puede visualizar este potencial es colocando el levitador acústico entre el cuerpo que bloquea la luz proyectada y la superficie reflectante curva. El cambio de densidad del aire, que se produce principalmente en las crestas y valles de la onda, produce cambios en el índice de refracción, los cuales perturban el trayecto de los rayos de luz que son reflejados en la superficie reflectante.

Esta técnica óptica se puede realizar mediante dos configuraciones, la más común que emplea un espejo y otra que utiliza dos.<sup>13</sup> A pesar de que la configuración de dos espejos presenta algunas ventajas respecto a la configuración de un espejo, como lo pueden ser una mayor resolución de imagen y tener un sistema más compacto, se ha optado por utilizar solo la de un espejo. Para la configuración de esta técnica, la distancia a la que se colocan tanto la fuente de luz puntual como el cuerpo que bloquea la luz es de  $2f$  (distancia focal). De esta manera ambos elementos estarán lo más cerca posible del origen del radio de curvatura del espejo como les sea posible [28]. El fenómeno del cambio de índice de refracción tiene efectos visuales más notorios cuando el levitador se encuentra a la menor distancia posible del espejo. Este arreglo se puede apreciar en la figura 4.01.

---

<sup>13</sup> Se probaron ambas configuraciones para hacer una comparación entre ellas y las diferencias en la sensibilidad son tan sutiles que se pueden despreciar. La técnica óptica solo se utilizó en esta tesis con fines visualmente comparativos. También se puede utilizar para cuantificar la magnitud del gradiente de densidad [29].

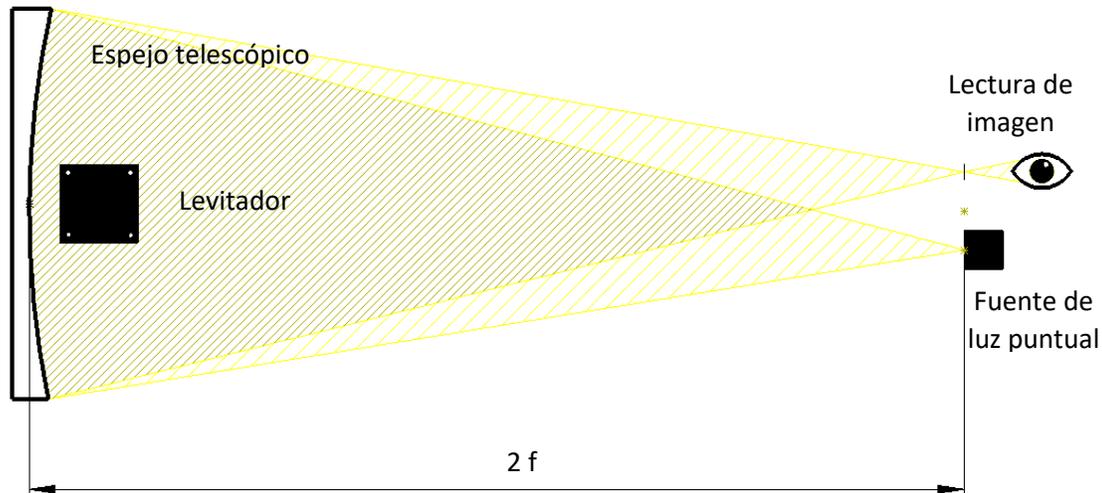


Figura 4.01. Sistema de deflectometría schlieren de un espejo.

Es deseable que la distancia entre el centro de curvatura del espejo y la fuente de luz puntual sea la mínima posible, así como de su proyección que está a la misma distancia en dirección opuesta. Entre menor sea esta distancia, la sensibilidad del sistema será óptima. La ventaja de esta configuración es que esa distancia de separación es bastante reducida en comparación con la configuración de dos espejos.

El sistema de lectura de imagen debe de tener un zoom óptico bastante considerable para poder ver la difracción con alta resolución. Dado que el área de análisis es atravesada dos veces por el mismo haz de luz, cada rayo se somete a dos deflexiones. Aunque en teoría debería aumentar en dos el factor de deflexión y, por ende, aumentar la sensibilidad del sistema, ambas deflexiones no son idénticas ya que un haz de luz diverge y el otro converge, esto podría causar un ligero desenfocado de la imagen [29]. Entre más cerca esté el sistema de levitación del espejo, este inconveniente debe de ser menor, lo suficiente como para ser despreciable. En diseños más innovadores, donde no hay ningún cuerpo físico en el área de análisis que pueda contaminar la información, esta desventaja se desprecia y pasa a ser ventaja, duplicando la sensibilidad [38].

## 5 – Resultados y discusión

### 5.1 – Simulaciones

Para asegurar que las simulaciones numéricas predicen el comportamiento real del amplificador, es necesario replicar el comportamiento del amplificador en operación. Dicha acción se lleva a cabo en la sección 5.2.2. Una vez que las simulaciones concuerdan con el comportamiento de un amplificador de referencia, se pueden comenzar a modificar los parámetros geométricos para optimizar el factor de amplificación y, consecuentemente, en el potencial de radiación acústica relativo.

#### 5.1.1 – Simulación del amplificador ultrasónico

Siguiendo los pasos descritos en el apartado de “software de simulación” de la sección 3.1, se genera la simulación del amplificador ultrasónico, descrita a continuación. El proceso de esta simulación fue realizado en ANSYS Workbench®.

#### Diseño CAD

Dado que el análisis armónico solo puede ser aplicado sobre el transductor y el amplificador ultrasónico y el primero es una pieza comercial que viene prediseñada, el amplificador es la única pieza que se necesita dibujar. El transductor se representa en la simulación como una condición de frontera y el reflector es empleado para el análisis del potencial de radiación acústica. Debido a la simetría, una geometría en 2D es suficiente para este tipo de estudios como se muestra en [3, 34]. Se considera a un amplificador como una geometría de revolución ya que es axialmente simétrica, por lo que un análisis sobre su perfil de revolución es suficiente para obtener los resultados al aplicarles a estos una revolución de  $\pi$  radianes. Sin embargo, debido a que el software utilizado trabaja con elementos 3D, se ha optado por utilizarlos. El tiempo computacional para el análisis es

moderado, con tan solo unos cuantos minutos de procesamiento, por lo que no hubo necesidad de utilizar otro software.

La geometría con la que se comienza, figura 5.01, es la del amplificador que está acoplado al transductor tipo Langevin que opera a 41.6 kHz. Este diseño fue realizado por el Dr. Víctor Contreras siguiendo algunos diseños utilizados previamente por otros autores [5, 7, 9] y ha sido fabricado y utilizado en un sistema de levitación previo a este trabajo de tesis [2] por lo que a partir de ahora se hará mención a él como amplificador de referencia.

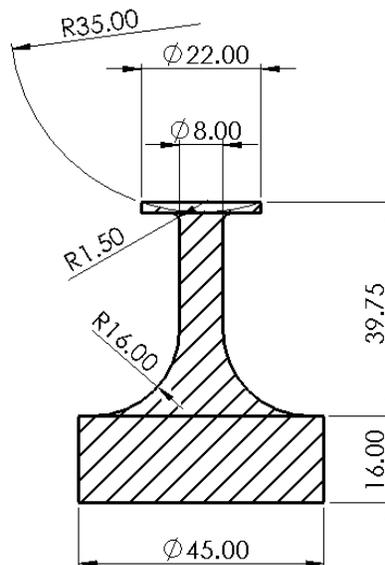


Figura 5.01. Diseño de amplificador ultrasonico cilindrico de referencia de dos escalones y una cabeza de 2 mm con curvatura de 35 mm en la cara principal para un amplificador tipo Langevin. Las unidades se encuentran en mm.

La pieza física que se encuentra en operación cuenta con un barreno central con cuerda interna en la cara inferior, de donde se fija al transductor. Dicho barreno se omite para las simulaciones debido a que se asume que la conexión roscada lo llena por completo, dejando así una pieza sólida completa. El diseño CAD de este diseño se muestra en la figura 5.02.

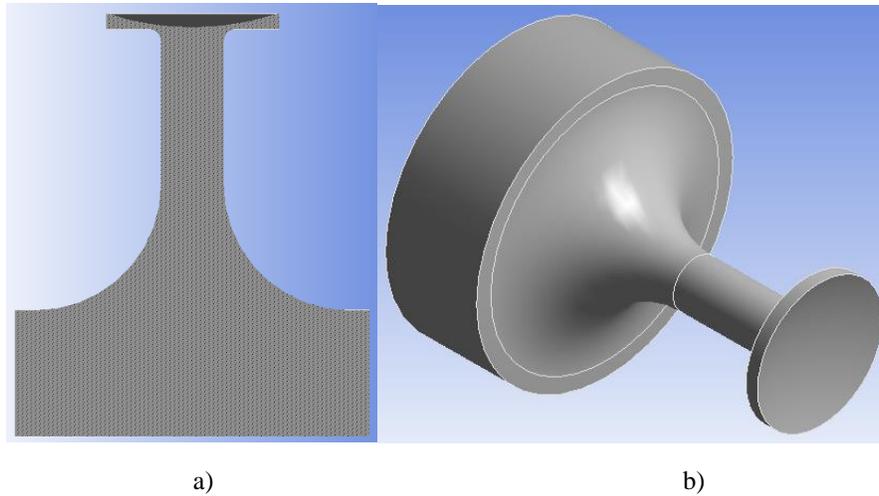


Figura 5.02. Pieza CAD 3D del amplificador ultrasonico cilindrico escalonado con cabeza. a) Vista desde un plano medio bidimensional. b) Vista isometrica.

### Propiedades del material

El material con el que fue maquinado el amplificador es aluminio debido a su elevado módulo de elasticidad y a su baja densidad en comparación con los aceros. En la literatura [7, 33, 35] también es el material más utilizado solo por debajo del titanio que tiene aplicaciones más industrializadas, por lo que es una elección ideal debido a su abundancia, facilidad de maquinado y bajo costo. La aleación de aluminio básica que proporciona el software de ANSYS® es suficiente para el propósito de esta tesis, ya que cuenta con las propiedades más importantes de la pieza física, tabla 5.01.

Tabla 5.01. Propiedades mecánicas de la aleación de aluminio utilizadas para las simulaciones. Las propiedades se muestran a una temperatura de 0°C.

| <b>Propiedad</b>        | <b>Valor</b>  |
|-------------------------|---------------|
| Densidad                | 2770 $km/m^3$ |
| Módulo de Young         | 71 $GPa$      |
| Distribución de Poisson | 0.33          |
| Módulo de volumen       | 69.608 $GPa$  |
| Módulo de corte         | 26.692 $GPa$  |

A pesar de que los valores se muestran a 0°C, son aplicables para trabajos a temperatura ambiente, ya que la diferencia de temperatura es mínima en comparación con su punto de fusión de  $\approx 660^{\circ}\text{C}$ . Para análisis térmicos es un factor relevante, pero en este caso se puede pasar por alto.

#### Mallado del amplificador

Para el amplificador mecánico, la malla se ha concentrado en el segundo escalón, figura 5.03, debido a que es donde ocurre la amplificación de las ondas mecánicas. La densidad de elementos aumenta en el centro de la cara externa, figura 5.04, que es donde ocurre la mayor cantidad de desplazamientos y por consiguiente se necesita un mayor gradiente de soluciones.

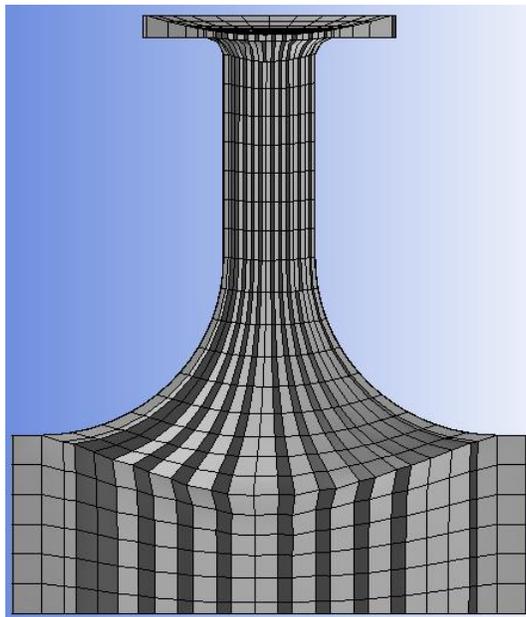


Figura 5.03. Malla interna tipo hexaédrica del amplificador ultrasónico.

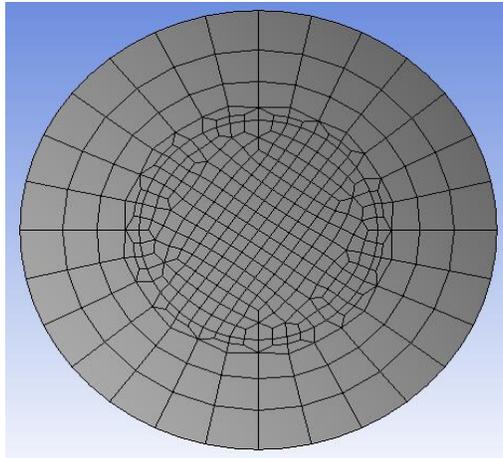


Figura 5.04. Malla sobre la cara frontal del amplificador. Concentración de elementos en el centro de la pieza.

Se crearon 6,040 elementos con 27,405 nodos. Con base en la literatura [10, 11, 34] es una cantidad suficiente de elementos para tener resultados de alta calidad. Los elementos creados tienen un área de superficie promedio de  $7.8376 \text{ mm}^4$ . Fueron normalizados mediante un control de malla, con la función *MultiZone* del software, que descompone la geometría en regiones mapeadas y regiones libres. Con esta técnica de mallado todas las regiones se pueden combinar en una malla (se sigue la metodología multibloque) [19]. Se escogió un tipo de malla hexaédrica con la superficie del mallado uniforme como base de malla principal para tratar de obtener los elementos hexaédricos más regulares posibles.

El control de malla utilizado no restringe completamente la topología del mallado. Cualquier topología es permisible siempre que se adapte a los espacios donde los elementos hexaédricos no pueden satisfacer las necesidades deseadas.

#### Asignación de condiciones de frontera

Es esta etapa del análisis representa las condiciones de operación de la pieza a simular. Para el caso concreto que se está trabajando, es aquí donde se modela la influencia que tiene el transductor sobre el amplificador ultrasónico.

En condiciones reales, el amplificador está empotrado al transductor, por lo que es necesario restringir los grados de libertad traslacionales y rotacionales sobre el plano donde se intersectan las caras que entran en contacto de las dos piezas, ya que no existen desplazamientos sobre dichos grados de libertad. La influencia que tiene el transductor sobre el amplificador es una presión que genera un desplazamiento armónico en dirección perpendicular al plano mencionado.

Por lo antes citado, en el análisis modal de este tipo de piezas mecánicas solo las condiciones de frontera de restricción son requeridas y las de carga no son necesarias [33]. En consecuencia, se utiliza una unión fija que solo pueda ser desplazada en dirección perpendicular al plano. Con base en las especificaciones proporcionadas por el fabricante del transductor tipo Langevin [45, 46], para determinado voltaje de excitación el transductor se estará deformando de manera armónica, con dirección perpendicular a su cara principal, en un rango que va desde un estado de reposo, es decir 0, hasta una deformación de 200 nm. Por lo tanto, en la simulación se toma este desplazamiento como la única condición de frontera, figura 5.05.

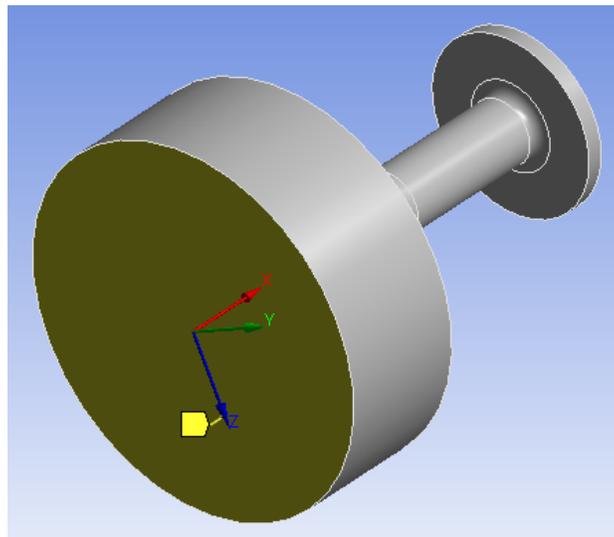


Figura 5.05. Desplazamiento generado por el amplificador representado como una condición de frontera sobre el amplificador ultrasónico.

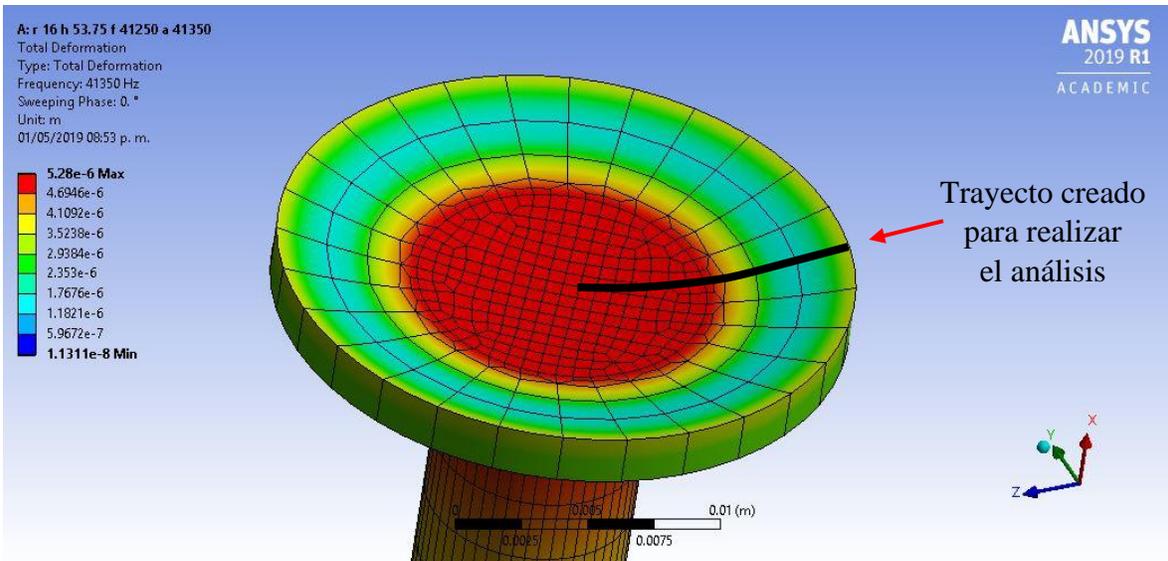
La finalidad de la modificación del elemento mecánico es que se logre un mayor potencial acústico con la misma cantidad de energía. Por lo que una vez que se replica el comportamiento del amplificador de referencia, bajo las mismas condiciones se modifican los parámetros hasta obtener resultados más satisfactorios.

#### Resultados del análisis armónico

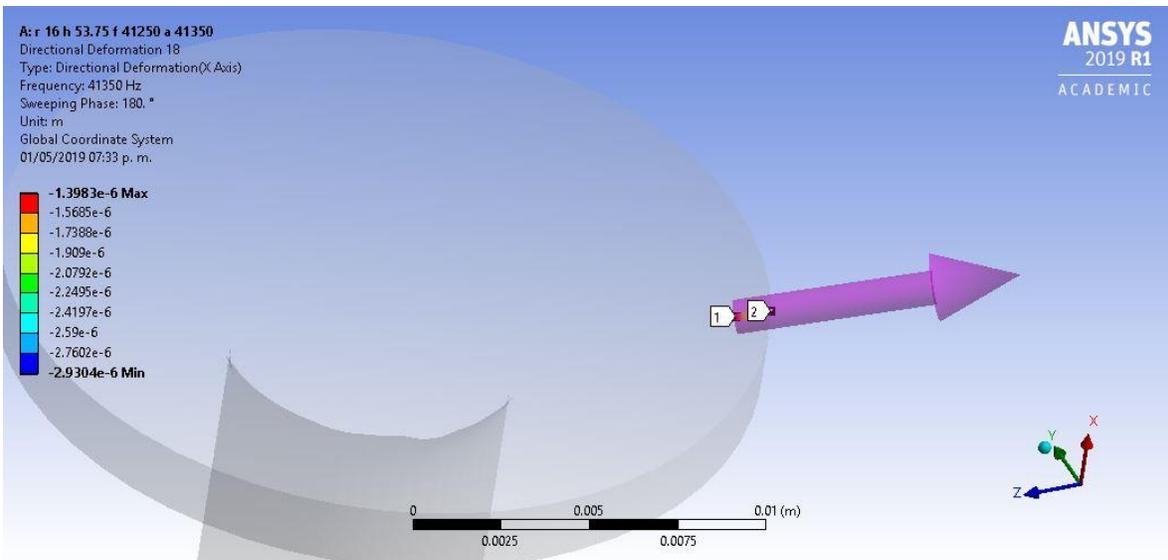
Debido a limitaciones electrónicas, el transductor no vibra de manera armónica a una frecuencia específica, sin embargo, lo hace en un rango de frecuencias. Cuando el sistema se tiene controlado y estable, el rango de frecuencias se reduce hasta tener un intervalo de una centena de Hertz. Como se ha mencionado con anterioridad, la simulación se realiza para determinar el desplazamiento obtenido en la cara principal del amplificador ultrasónico. Por lo cual, dentro del análisis armónico, solo nos interesa obtener los resultados de la deformación.

El análisis experimental del desplazamiento armónico de la pieza, descrito en el capítulo 4.1, es el punto de partida de la simulación. Los resultados que se obtienen mediante la técnica SMI muestran la amplitud absoluta de la vibración a lo largo del radio de la cara del amplificador. Por ende, en la simulación es preciso obtener resultados del mismo parámetro para poder compararlos. Se determina para las simulaciones una temperatura ambiente de 22°C y un rango de operación comprendido de 41 250 Hz hasta 41 350 Hz, que son los valores de operación del experimento. La manera de obtener numéricamente el desplazamiento sobre el radio de la cara es a través de aplicar el análisis armónico sobre un trayecto que describa dicho radio. Al no ser una geometría plana, este camino debe discretizarse en pequeños segmentos de donde se pueda obtener información en puntos específicos. El software de Workbench tiene la facilidad de crear dicho trayecto sobre puntos específicos de la pieza o de la malla. Al trabajar con una geometría lisa pero no plana, la

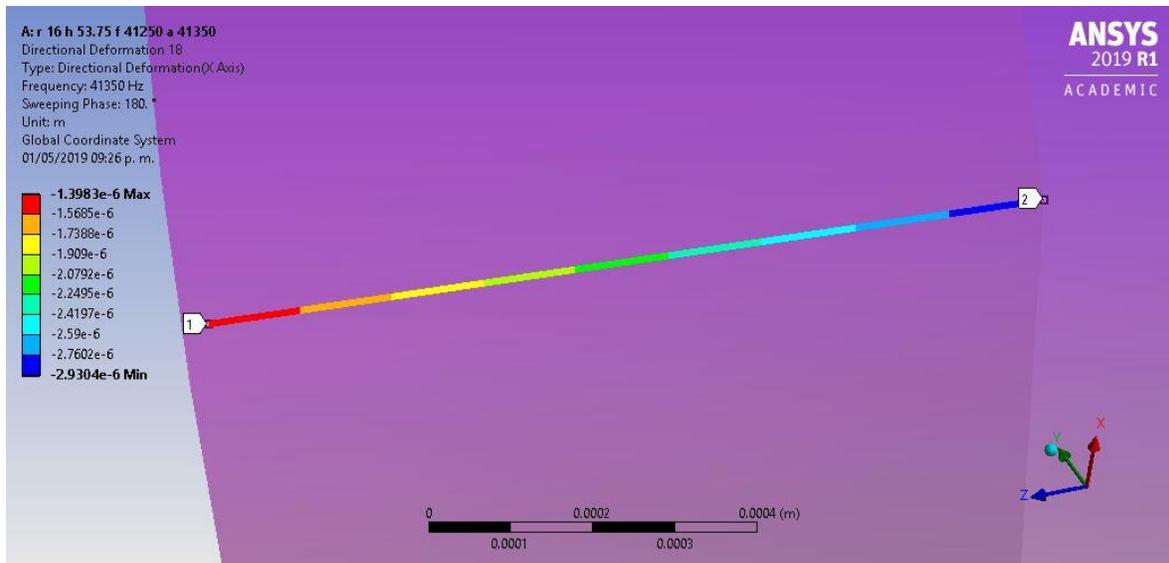
opción de crear el camino sobre los nodos o puntos específicos de la malla es la que se utiliza para realizar el trabajo, como se puede ver en la figura 5.06.



a)



b)



c)

Figura 5.06. a) Representación del trayecto donde se realiza el análisis. El camino pasa por varios puntos nodales. b) Segmento de camino creado sobre los nodos que describen el radio de la superficie curva del transductor. c) Segmento amplificado. Se puede observar que tiene por lo menos dos puntos muy bien definidos (1 y 2) donde se pueden tomar muestras de los resultados.

Se analiza cada segmento de camino entre los puntos inicial y final (1 y 2 de la figura 5.06) para obtener valores puntuales de los cuales se puede extraer la información deseada. Si se considera a la pieza como una viga empotrada en voladero con una fuerza cualquiera aplicada sobre su base empotrada con dirección perpendicular a la misma, es de esperarse que en el extremo final se presenten modos de vibración en todas las direcciones. De todos los modos posibles, aquellos que presentan deformaciones que se generan de manera paralela a la fuerza aplicada son las que contribuyen a amplificar las ondas ultrasónicas dentro del levitador. Por lo tanto, es el dato que se obtiene de este análisis. Los modos de vibración que se generan en otros planos de inclinación son considerados como pérdidas de energía. Esto se debe a que la amplitud que presentan es de un orden menor, en comparación con la deformación en dirección paralela a la fuerza aplicada.

Además, considerando el hecho de que son emitidos en una dirección que no llega al plato reflector, es decir, que se salen del sistema, la contribución que aportan al campo de levitación acústica es irrelevante. Por tanto, se desprecian, ya que no contribuye significativamente.

Como se puede visualizar en la figura 5.06 a), en la zona central de la cara es donde se genera una mayor amplitud de deformación y esta va decreciendo conforme incrementa el valor del radio hasta que llega a un punto de mínima deformación. Posterior a este punto la magnitud de esta variable vuelve a incrementar al aproximarse al borde de la cara. Esto sucede debido a que el análisis solo muestra el valor absoluto de la deformación. Si se analiza toda la superficie, se obtiene el resultado mostrado en la figura 5.07 y se observa que el borde de la cabeza del amplificador se deforma en la dirección opuesta, debido a que no tiene un soporte y se considera también como una viga en voladizo con respecto al escalón secundario del amplificador.

La figura 5.08 a) muestra la deformación en sentido opuesto en el borde de la pieza con respecto a la forma inicial del amplificador mecánico, donde la amplitud se incrementó en 4000% para poder apreciarse de manera visual en las gráficas. Al tener un movimiento sinusoidal, después de  $\pi$  radianes el movimiento será en el sentido opuesto como se muestra en la figura 5.08 b).

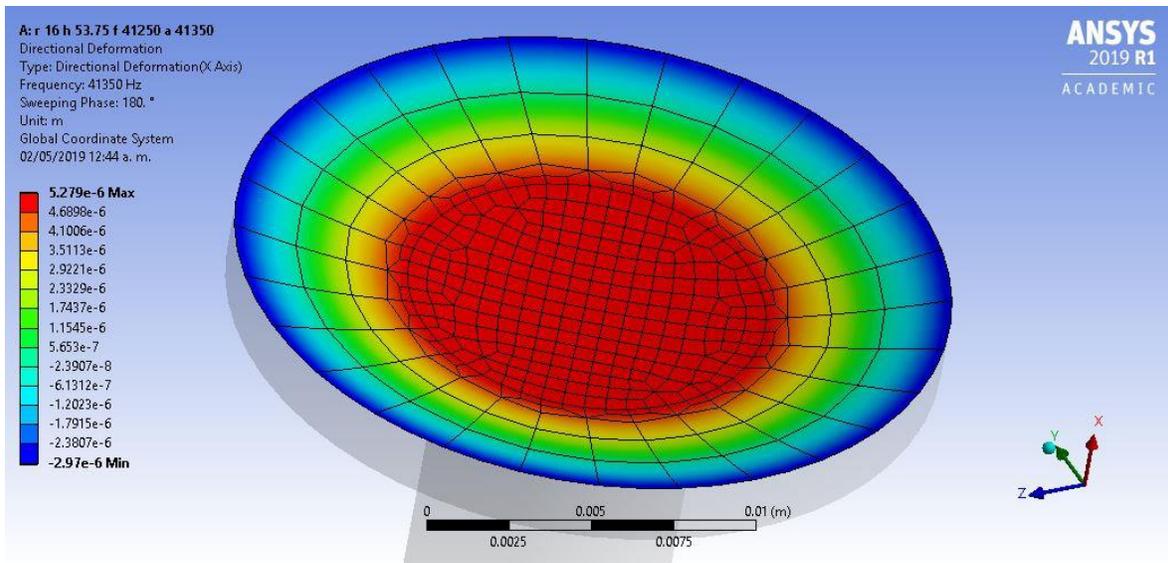
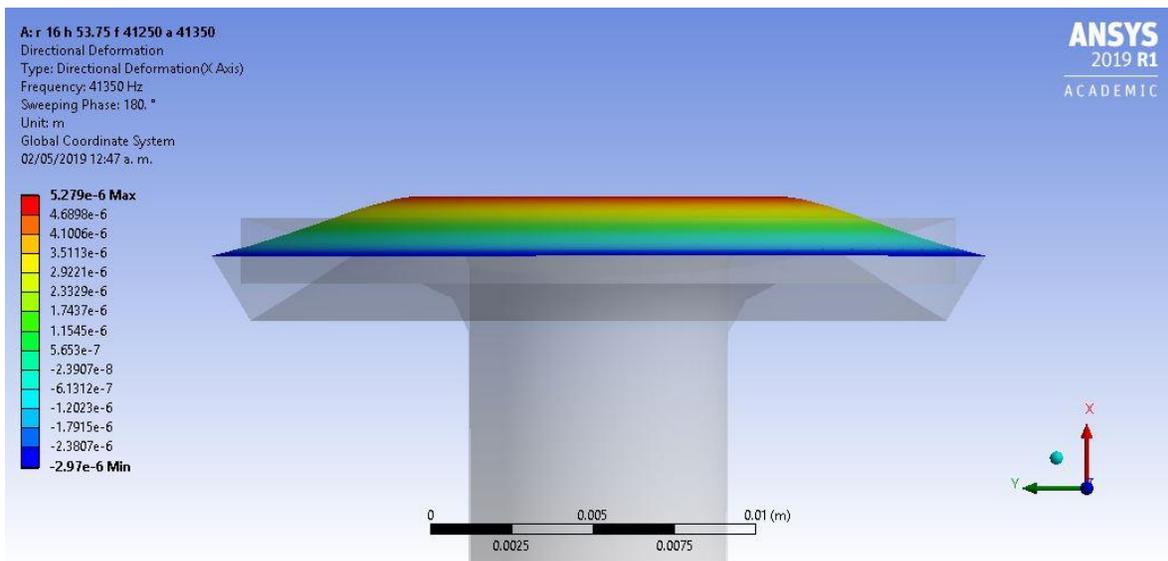
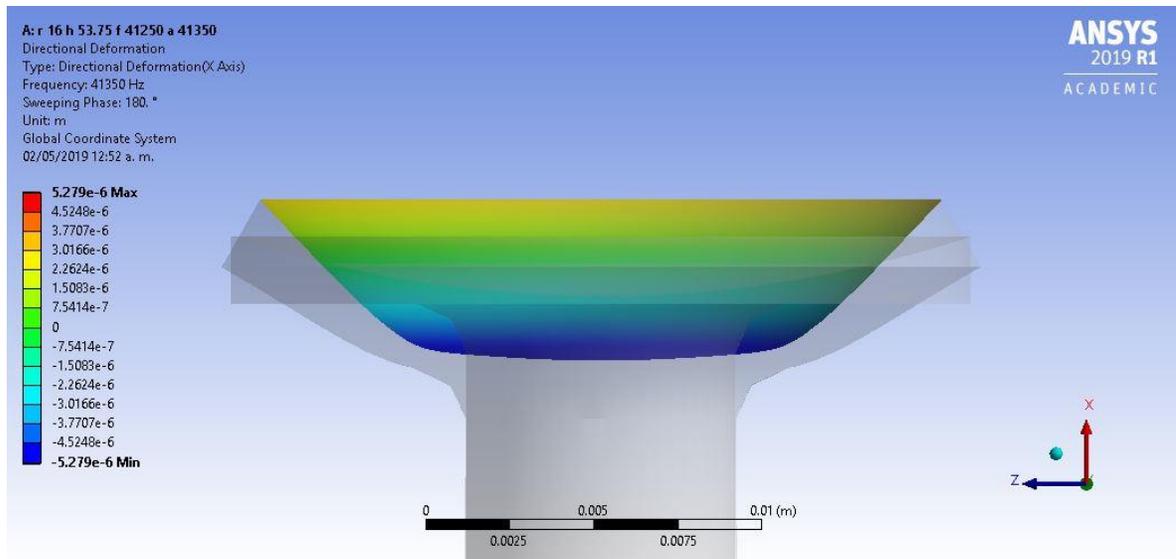


Figura 5.07. Deformación relativa a la cara principal del amplificador ultrasónico en dirección paralela a la carga aplicada.



a)



b)

Figura 5.08. a) Deformación relativa a la cara del amplificador con un aumento en los resultados del 3944.9%.

b) Deformación relativa a la cara del amplificador después de  $\pi$  radianes con un aumento en los resultados del 3944.9%.

La medición experimental de la amplitud de desplazamiento de la cara del amplificador de referencia mediante la técnica SMI se utilizó como referencia, por lo que se comparó con los resultados obtenidos mediante la simulación. La figura 5.09 muestra la comparación de los resultados obtenidos por los dos medios a lo largo del radio de la pieza de referencia y la pieza simulada.

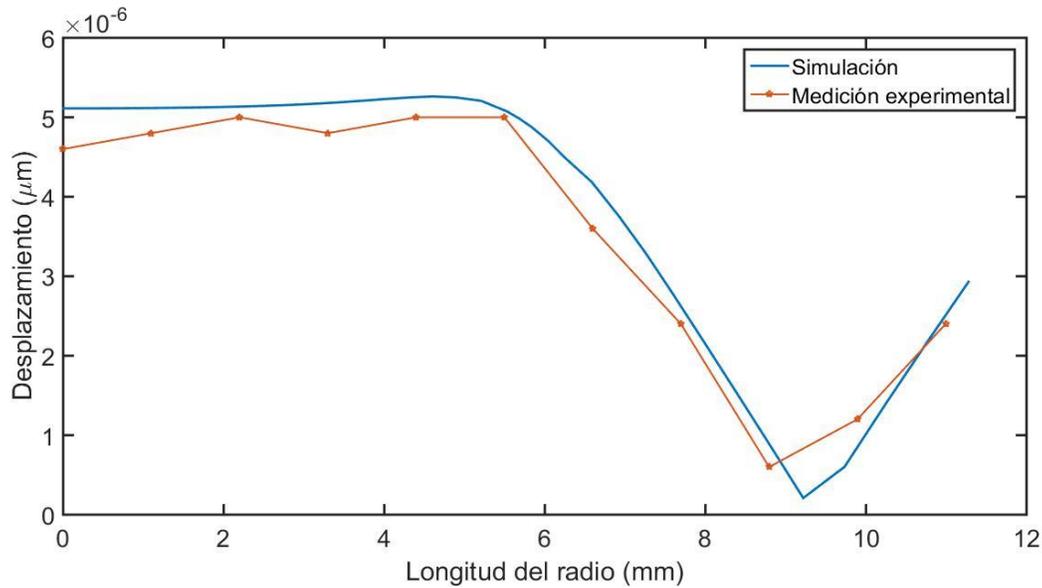


Figura 5.09. Gráfica comparativa entre la medición experimental y la simulada. Se muestra el desplazamiento (deformación) absoluto ocurrido a lo largo del radio de 11 mm de la cara de la pieza. La línea azul representa los resultados de la simulación. La línea roja muestra los resultados obtenidos de manera experimental. Los 10 puntos, separados 1.1 mm, marcan donde fue obtenida cada medición.

Como se puede notar, los resultados numéricos y experimentales muestran el mismo comportamiento. Por lo tanto, los valores que se muestren en simulaciones para esta aplicación están validados experimentalmente. Para los siguientes análisis se realizó un promedio de las deformaciones que se generan sobre toda la superficie de la cara del amplificador para poder obtener un factor de amplificación promedio que represente a la geometría en cuestión. El factor de amplificación es la variable clave que determina si existe una mejora en el potencial de radiación acústica relativo.

### 5.1.2 – Factor de amplificación

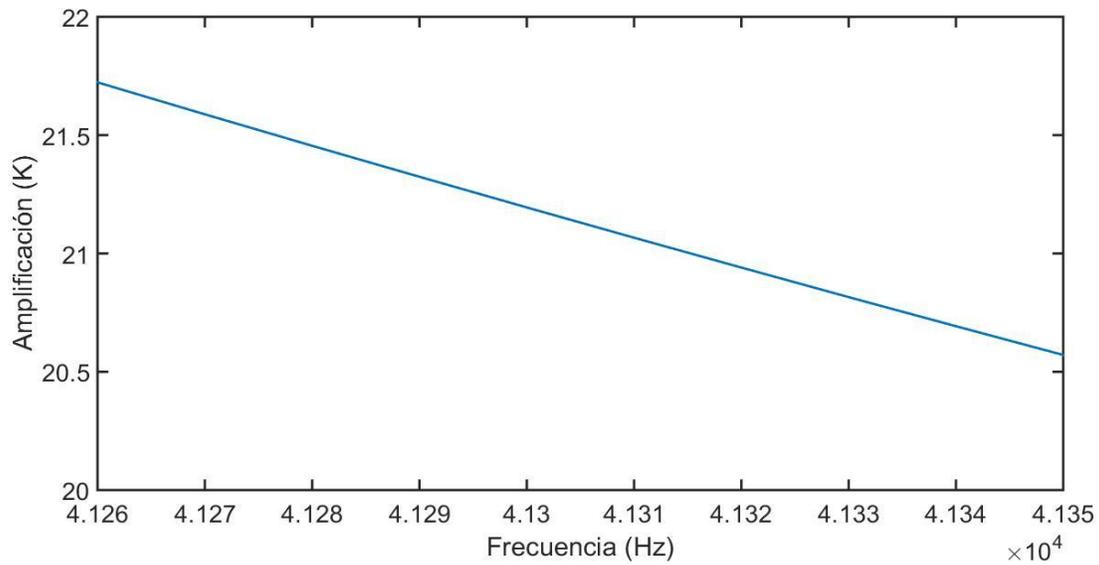
El factor de amplificación es una razón de salida/entrada de alguna variable. Para el análisis de una pieza mecánica que amplifique un valor derivado de vibraciones forzadas, es necesario conocer su respuesta en frecuencia. La respuesta en frecuencia de un sistema en régimen permanente se da

cuando se utiliza como señal de entrada una excitación senoidal de amplitud constante y de frecuencia variable desde cero hasta infinito [19]. Por lo tanto, dentro del análisis armónico, se toma la respuesta en frecuencia promedio de la cara principal del amplificador ultrasónico con respecto a la vibración de entrada en la cara opuesta. Para determinar el factor de amplificación de las simulaciones se puede emplear la ecuación que relaciona las amplitudes de onda ecuación 2.2. Se puede interpretar también con base en los valores manejados en las simulaciones, quedando en la siguiente ecuación:

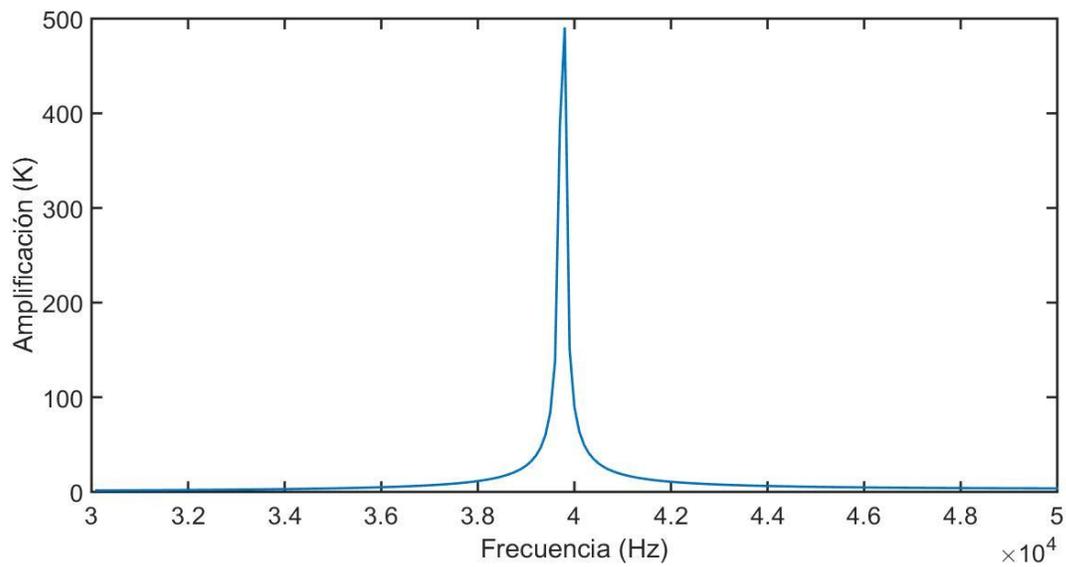
$$K = \frac{\xi_2}{\xi_1} = \frac{d_f}{d_o} \quad (5.1)$$

Donde  $d_f$  es la deformación promedio que ocurre en la cara principal del amplificador en dirección perpendicular a la cara y  $d_o$  es la deformación inicial o desplazamiento que se aplica en la cara del amplificador que está en contacto con el transductor.

Al crear un barrido en la frecuencia sobre la geometría de la pieza inicial, se determina que el rango de frecuencia de operación al cual trabaja el piezoeléctrico, no es el de mayor amplitud, tal cual se muestra en la figura 5.10. Se puede observar que el rango de operación queda lejos de la amplificación máxima que se puede obtener de la geometría en cuestión. Debido a limitaciones electrónicas, no se puede cambiar el rango de operación del piezoeléctrico, por lo que es necesario encontrar otra configuración geométrica que tenga los mayores niveles de resonancia en el rango de frecuencia de operación para poder optimizar este factor.



a)



b)

Figura 5.10. a) Amplificación en el rango de frecuencias de operación 41.26 KHz – 41.35 KHz. Es un valor aproximado al calculado con la ecuación 2.2 de  $K = 31.64$ . b) Amplificación en función de la frecuencia en el rango de 3 a 5 KHz. El sistema entra en resonancia a una frecuencia de 39.8 KHz, con una amplificación total de 490.7, sin tomar en consideración ningún factor de amortiguamiento.

Realizando modificaciones aleatorias a los parámetros geométricos del amplificador en las simulaciones numéricas se ha determinado que los parámetros con mayor influencia sobre la amplificación son las longitudes de los escalones primario y secundario, así como el radio eliminador de esfuerzos principal. La modificación de los demás parámetros, incluyendo aquellos que le dan forma a la punta o cabeza del amplificador ultrasónico, resultan afectar los valores de amplificación en uno o dos órdenes de magnitud menores que los mencionados.

Modificar el radio de la cabeza del amplificador no magnifica el factor de amplificación, si no que reduce su valor. Cuando el radio de la cabeza es inferior al radio de referencia (22 mm), la amplitud de vibración armónica es más uniforme y justo lo opuesto cuando es superior. Buscando obtener los resultados con mayor factor de amplificación promedio, se han descartado las modificaciones en esta zona de la pieza. Como se puede apreciar en la figura 5.11, cuando el radio de la cabeza es excesivamente largo, la amplitud del desplazamiento decrece al acercarse al borde sin mostrar un aumento considerable pasada la zona nodal de mínima vibración. En la figura 5.12 se pueden comparar las magnitudes de desplazamiento a lo largo del radio cuando tenemos una cabeza más corta y una larga. Si se compara esta gráfica con la de la figura 5.09 queda claro que la mejor configuración de parámetros geométricos de la punta del amplificador es la del amplificador de referencia, diseñada a un diámetro de 22 mm.

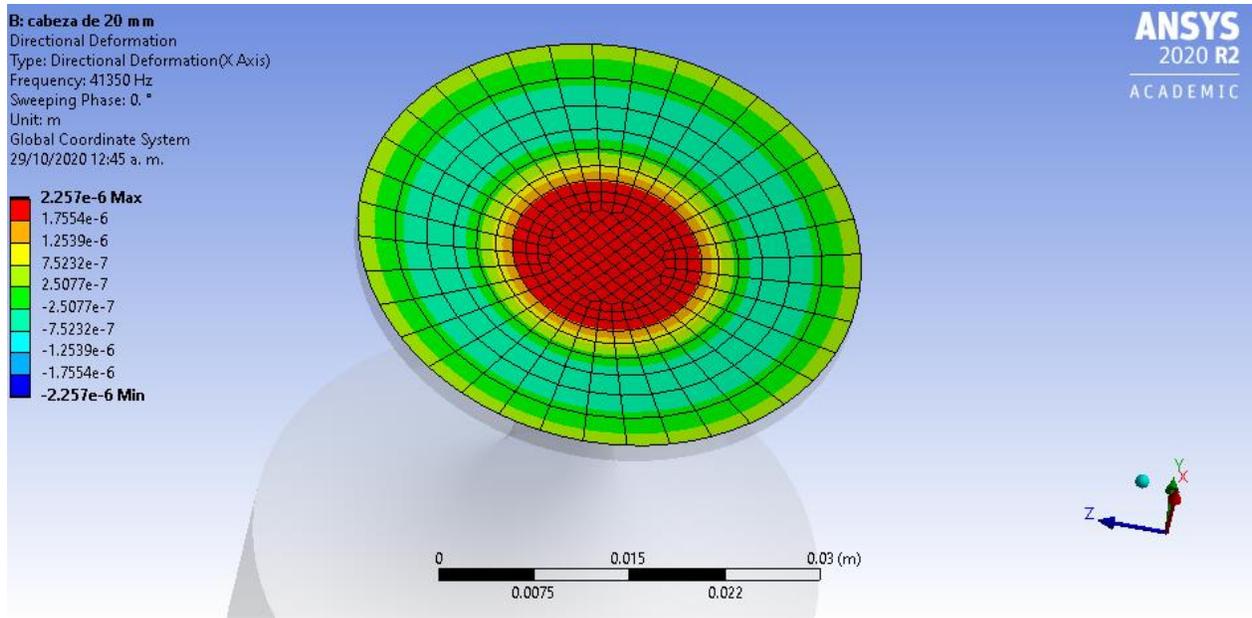


Figura 5.11. Deformación relativa a la cara principal del amplificador ultrasónico con cabeza de 40 mm de diámetro en dirección paralela a la carga aplicada.

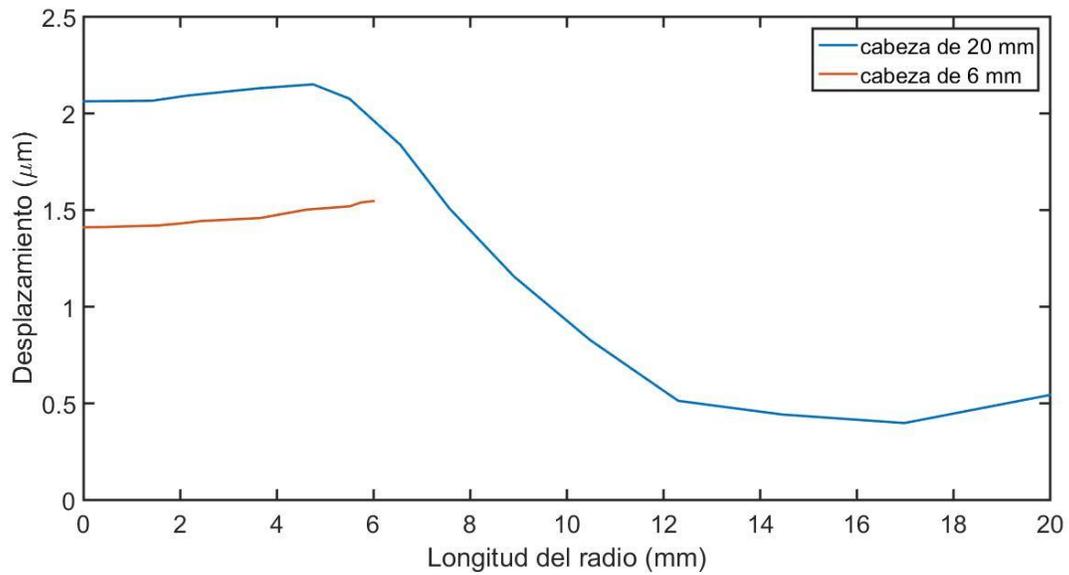


Figura 5.12. Gráfica comparativa entre los niveles de desplazamiento a lo largo de la cabeza del amplificador simulado cuando tiene una un radio de 6 mm y otro de 20 mm.

La carga que se aplica sobre un piezoeléctrico afecta directamente sobre su frecuencia de operación, ya sea una carga eléctrica o una carga de masa. Por tanto, al modificar parámetros geométricos del amplificador ultrasónico acoplado al transductor, se va modificando la carga de masa a la que trabaja. Esto se debe a que, al cambiar dichos parámetros, se afecta directamente al volumen de la pieza. Y dado que la densidad del material se mantiene constante, se ve alterada la masa del amplificador. La modificación en la cantidad de masa acoplada al transductor puede alterar ligeramente su frecuencia de operación. La manera en que se determina la frecuencia de operación del levitador es midiéndolo de manera experimental con un osciloscopio. Debido a que no es viable manufacturar una gran cantidad de amplificadores para determinar dicho rango, se puede ampliar el rango de frecuencia en las simulaciones.

En las simulaciones posteriores, que proporcionan los datos para las siguientes gráficas, se utiliza un rango de frecuencias que comprende desde 41 150 Hz hasta 41 450 Hz. Ya que, como se vio en la figura 5.10 b), el factor de amplificación crece súbitamente en un intervalo corto de aproximadamente 100 Hz, se agregaron 100 Hz por debajo y por encima del rango de operación del amplificador de referencia con la finalidad de evitar perder información importante para determinar el valor máximo de amplificación.

Siguiendo la metodología del diseño de un amplificador ultrasónico escalonado, el primer paso es determinar su longitud. Como se ha mencionado, los amplificadores escalonados sencillos se diseñan generalmente a una longitud ideal que sea igual a  $\lambda/2$ . Siguiendo las ecuaciones 2.6 y 2.7 y el rango de frecuencias que se trabaja, el valor de  $L$  debe de comprender desde 61.07 mm hasta 61.51 mm, un valor que está por encima del diseño operación que es de 55.75 mm.

Ya que la pieza no se limita a solo dos cilindros de diferente diámetro, se debe de determinar la longitud total de la misma que muestre los mayores niveles de amplificación. Como se tienen dos

escalones que determinan esta longitud, se deja estático el primario a sus 16 mm de longitud ya que el valor óptimo de este se determina en el paso dos. Realizando las simulaciones al variar  $L$  de 50 mm hasta a 65 mm, con pasos de 3 mm y manteniendo todos los demás parámetros con sin alteraciones, se obtienen los resultados mostrados en la siguiente serie de gráficas de la figura 5.13.

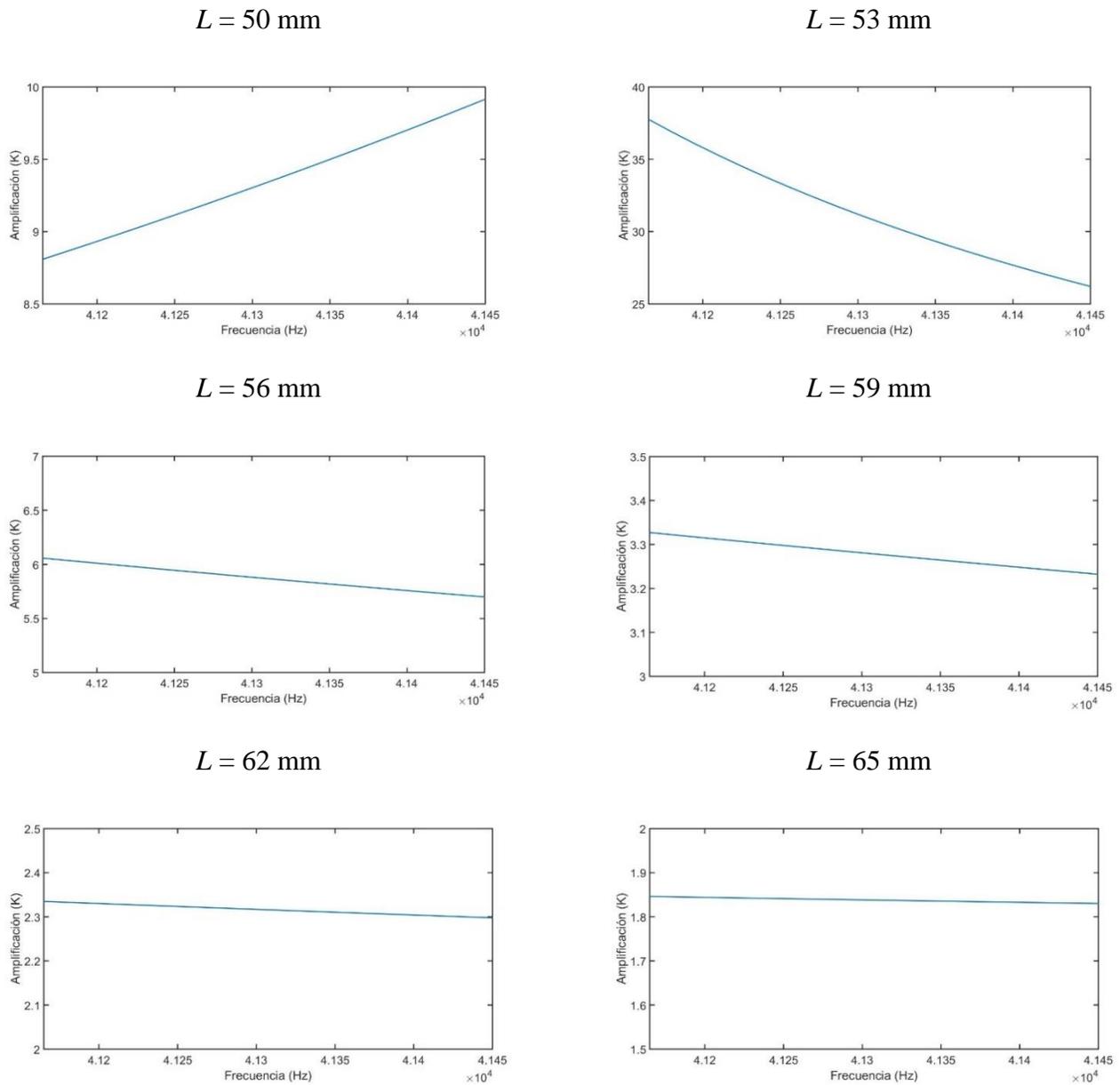


Figura 5.13. Gráficas de frecuencia vs amplificación. Barrido en la frecuencia cambiando el valor de  $L$  en pasos de 3 mm.

Como se puede observar en las gráficas, en los valores para  $L$  entre 50 mm y 53 mm existe un máximo en la amplificación. Después de dicho valor, existe un decaimiento en la amplificación cuanto más aumenta el valor de  $L$ . Siguiendo un proceso iterativo, se llega al valor máximo de resonancia para el parámetro modificado, con una resolución de 10  $\mu\text{m}$ . El resultado máximo se muestra en la siguiente gráfica de la figura 5.14.

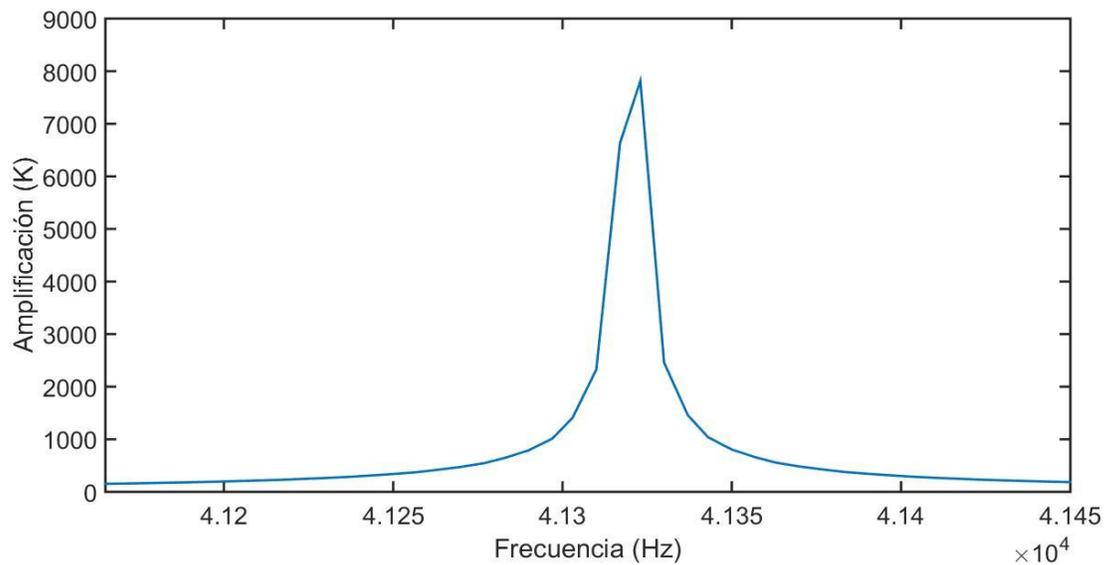


Figura 5.14. Frecuencia vs amplificación para una pieza con  $L = 52.30$  mm. Sin tomar en cuenta ningún factor de amplificación. Valor de  $K$  máximo = 7813 se muestra a una  $f$  de 41 323 Hz.

Como se puede observar, existe un valor de amplificación mayor que el esperado, ya que, con las ecuaciones que se encuentran en la teoría, el valor máximo de amplificación, para un tipo de amplificador escalonado cilíndrico, debe de estar en un orden de magnitud de dos cifras. El umbral de amplificación máxima ( $>1,000$ ) se encuentra entre una frecuencia de 41 297 Hz hasta 41 343 Hz. Es decir, que se encuentra en un rango de operación de 50 Hz.

Ya que se ha determinado el valor óptimo del primero de los parámetros principales, se comienza con un proceso igualmente iterativo con el segundo parámetro. El siguiente parámetro modificado

ha sido el valor  $h_1$ , del escalón primario. De acuerdo con la ecuación 2.8 o las ecuaciones 2.3 y 2.4 este valor debe de ser muy próximo al valor de  $h_2$ , es decir, un 50% de  $L$ . Los resultados de este proceso iterativo se pueden ver en la figura 5.15.

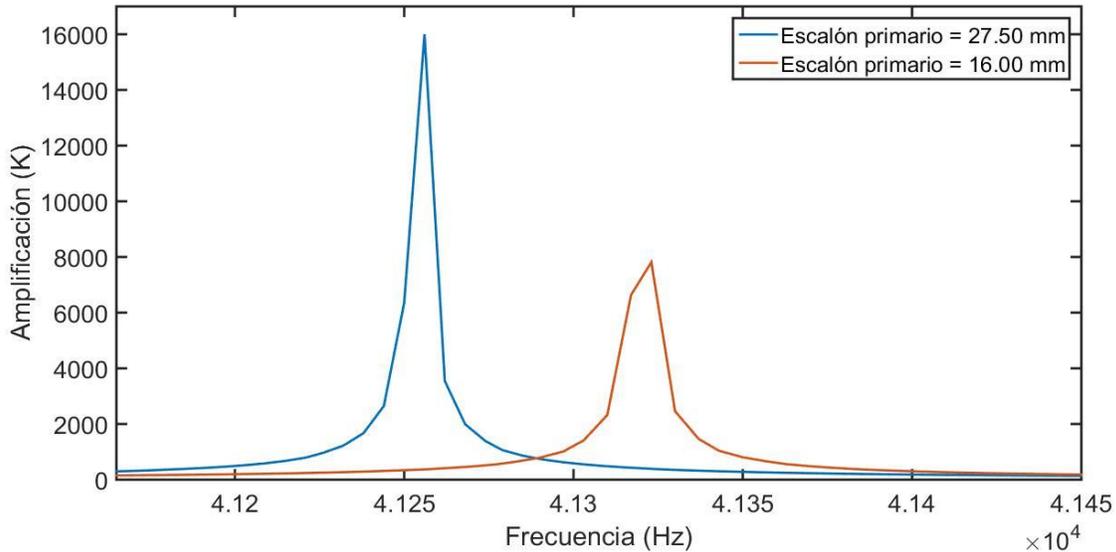


Figura 5.15. Gráfica de comparación entre la amplitud máxima de vibración con dos valores diferentes de  $h_1$ . Cuando  $h_1 = 27.50 \text{ mm}$ , el valor de K máximo es de 15 999 a una f de 41 256 Hz.

Como se puede observar, existen dos valores máximos en la amplificación. Considerando que  $L \cong \lambda/2$ , en el diseño de un amplificador escalonado, siempre se van a encontrar valores máximos cuando  $h_1 \cong \frac{1}{8}\lambda$ ,  $h_1 \cong \frac{1}{4}\lambda$  y  $h_1 \cong \frac{3}{8}\lambda$ . Esperando encontrar el valor más grande cuando  $h_1 \cong \frac{1}{4}\lambda$ , debido a la relación que se puede apreciar en la figura 2.1. El resultado cuando  $h_1 \cong \frac{3}{8}\lambda$  se omite en la gráfica debido a que el tamaño del radio eliminador de esfuerzos limita la altura máxima del escalón primario. Los resultados de la figura anterior muestran que el umbral de amplificación máxima se encuentra en el rango de frecuencia que comprende de 41 232 Hz hasta 41 279 Hz. Por lo que este rango de operación es de 47 Hz. Siendo así que esta configuración geométrica es 2.05 veces más eficiente en comparación con la geometría de la gráfica 5.14.

El tercer parámetro geométrico significativo, el radio eliminador de esfuerzos, no va a presentar ningún cambio positivo en la configuración geométrica que se ha determinado hasta este momento. Esto debido a que ya se cuenta con el máximo valor de  $K$  a las alturas establecidas. Por lo tanto, sobre la pieza de referencia se vuelve a hacer el proceso iterativo modificando este parámetro, para encontrar el de mayor valor. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.16.

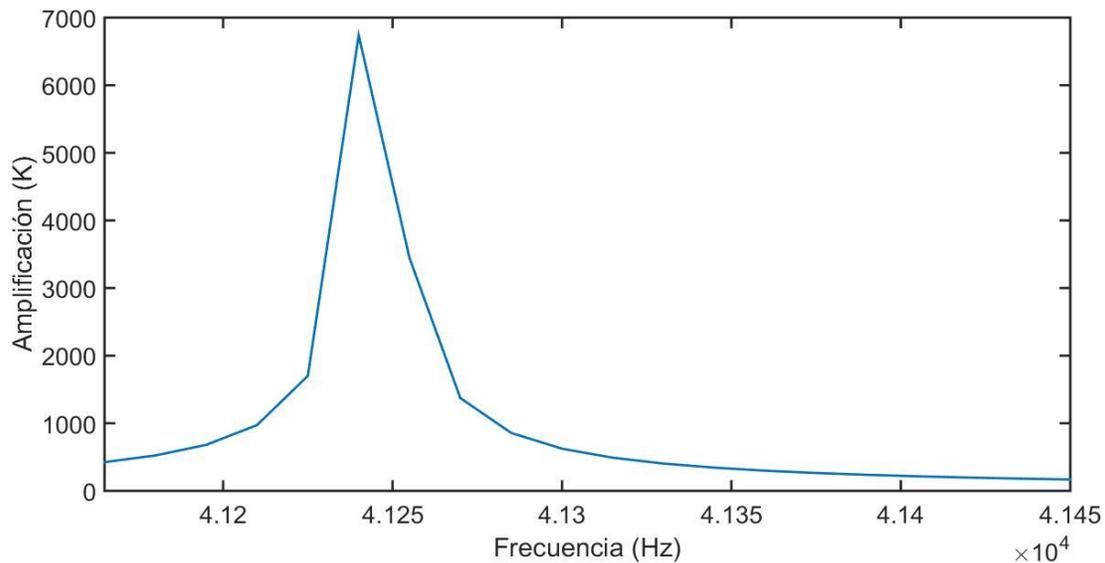


Figura 5.16. Amplificación máxima sobre la pieza original al modificar el valor del radio eliminador de esfuerzos principal a 18.2 mm. El valor máximo de 6738.5 se encuentra a una frecuencia de 41 240 Hz.

En la figura 5.16 se puede observar que el umbral máximo de amplificación se encuentra en un rango que va desde 41 225 Hz hasta 41 270 Hz, siendo así un rango de 45 Hz. Ahora que se ha determinado este valor, automáticamente el valor de  $L$  queda definido, por lo que resta validar el valor que se tiene cuando  $h_1 \cong \frac{\lambda}{4}$ , el cual se muestra en la figura 5.17.

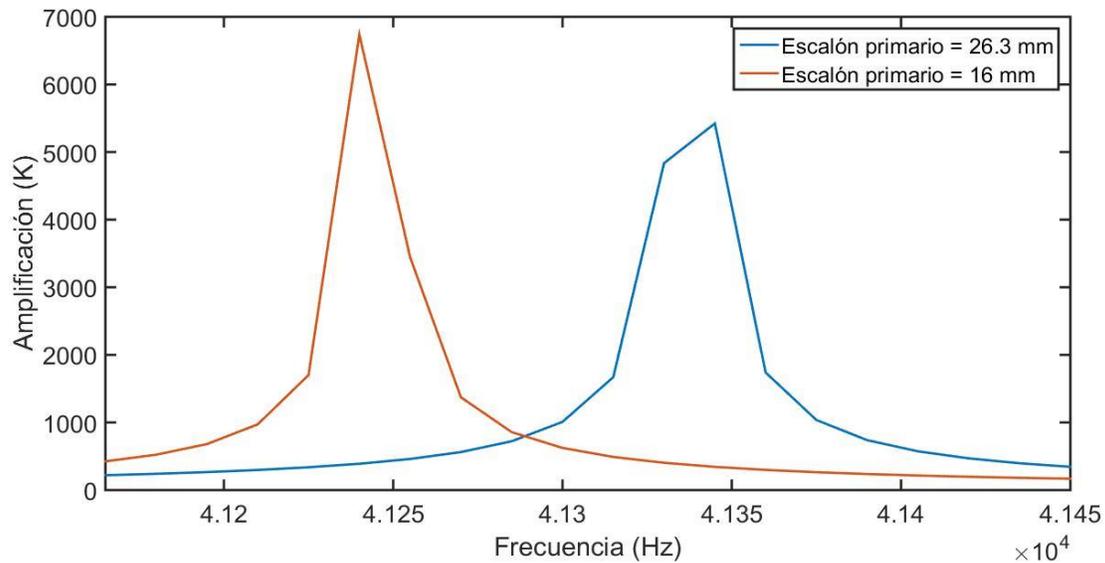


Figura 5.17. Comparación entre la amplitud máxima de vibración cuando  $L$  se mantiene fija y se cambia el valor del radio eliminador de esfuerzos y la altura del escalón primario. La amplitud en rojo, misma de la gráfica anterior, se compara con el comportamiento de una pieza (en azul) con escalón primario diferente, que muestra un máximo de amplitud  $K = 5422.5$  para el valor  $h_1 = 26.3\text{mm}$ .

Como se puede apreciar, los valores obtenidos modificando este parámetro son menos significativos que los presentados anteriormente. Sin embargo, el proceso iterativo realizado muestra que modificaciones ligeras en el radio, cuando ya ha alcanzado su valor máximo generan un ligero desplazamiento en la frecuencia, sin disminuir el valor de amplitud. Este dato es de utilidad para el proceso de maquinado ya que se puede ir disminuyendo paulatinamente este valor hasta llegar a la frecuencia de resonancia en caso de que experimentalmente no se logre ajustar.

### 5.1.3 – Análisis esfuerzo-deformación

Como se ha mencionado con anterioridad, los resultados mostrados en estas gráficas se han realizado mediante simulaciones numéricas, sin considerar ningún factor de amortiguamiento. Para determinar si es necesario emplear un factor que amortigüe la magnitud de los picos encontrados en los máximos locales, es necesario hacer un análisis de esfuerzo-deformación.

Tomando de ejemplo la geometría que muestra el factor de amplificación de mayor amplitud (figura 5.15), se realiza un análisis para conocer la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación. Esto se analiza con la carga aplicada y cargas mayores, para conocer el valor de esfuerzo máximo y compararlo con una gráfica de esfuerzo-deformación del material empleado en las simulaciones, es decir, del aluminio comercial.

La geometría en cuestión se puede apreciar en la figura 5.18. Esta geometría cuenta con un factor de amplificación de 15 999, a una frecuencia de resonancia de 41.256 kHz. Teniendo una vibración armónica de entrada de 200 nm, resulta tener una vibración armónica promedio de salida de 3.1998 mm.

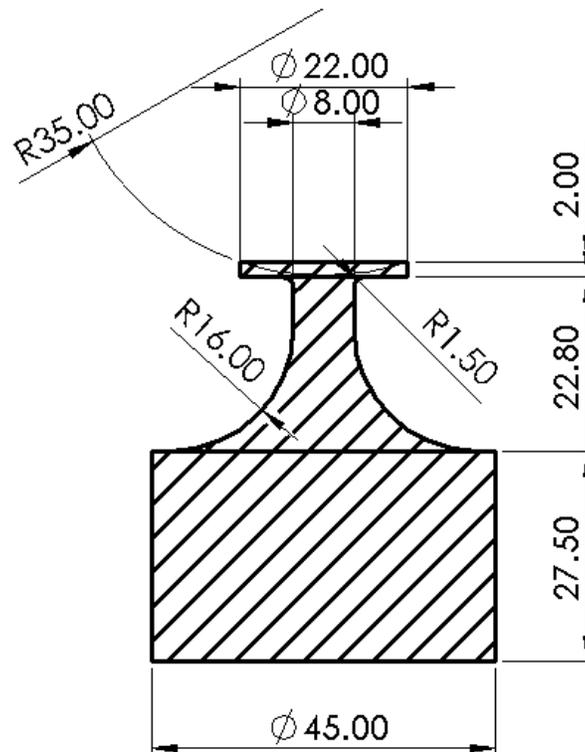
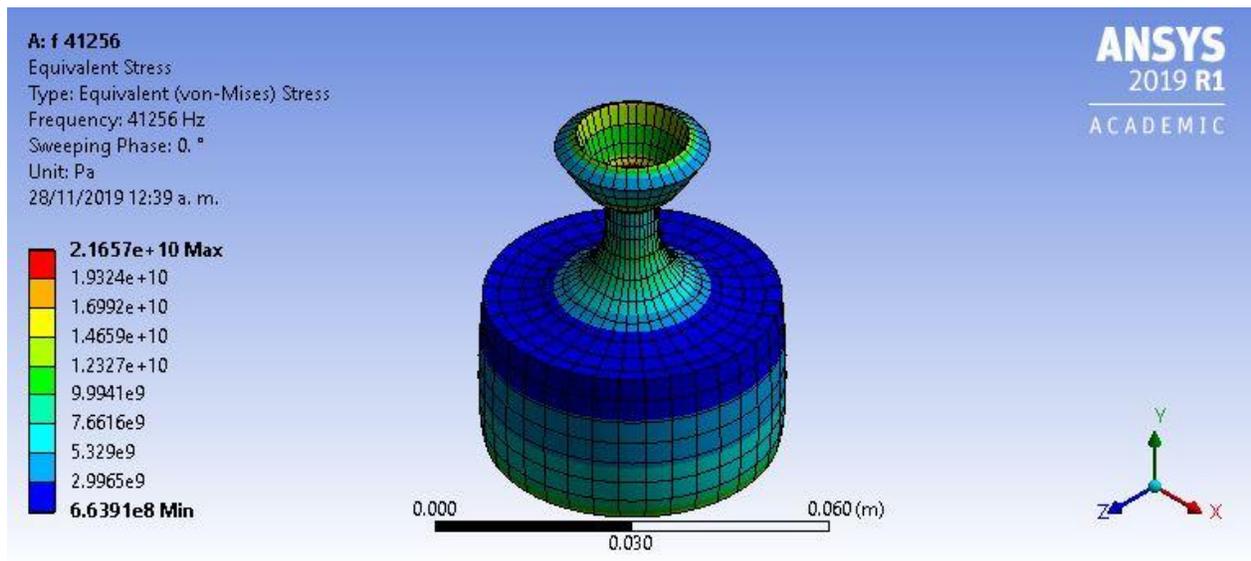


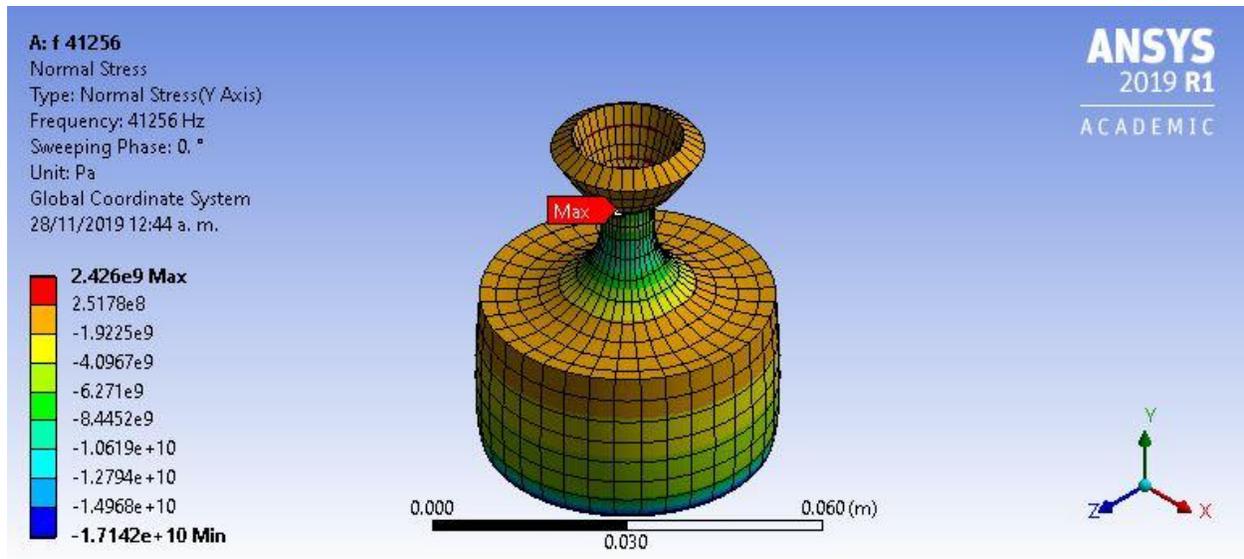
Figura 5.18. Representación del amplificador propuesto en la gráfica de la figura 5.15 que muestra el mayor factor de amplificación encontrado. Las unidades se encuentran en mm.

En una segunda simulación, solo sobre la frecuencia de resonancia de 41 256 Hz y conservando todos los parámetros, el valor de la amplitud de la vibración armónica de salida resulta en 2.9895 mm, reduciendo a un valor de 14 947.5 el factor de amplificación. Sobre esta simulación, el valor del esfuerzo normal promedio sobre la superficie de la cara principal del amplificador es de 126.87 MPa.

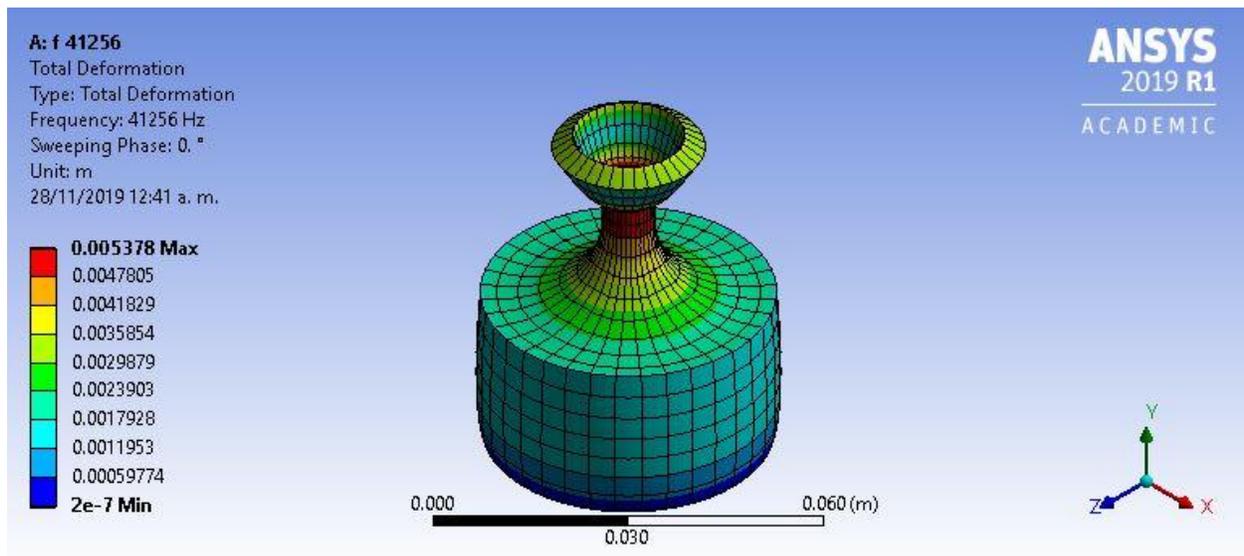
En la siguiente serie de imágenes, de la figura 5.19, se muestran los valores del esfuerzo de Von-Mises, el esfuerzo normal y la deformación (en mm) para la simulación antes mencionada. Los resultados visuales no están a escala real.



- a) Esfuerzo de Von-Mises sobre el cuerpo completo del amplificador, con un valor máximo de 21.657 GPa sobre la cara principal.



- b) Esfuerzo normal sobre el cuerpo completo del amplificador, con un valor máximo de 2.426 GPa sobre el radio eliminador de esfuerzos secundario (entre el escalón secundario y la cabeza del amplificador).



- c) Deformacion total del amplificador, con un desplazamiento máximo de 5.378 mm sobre la cara principal.

Figura 5.19. Análisis de esfuerzos y deformaciones sobre la pieza simulada que muestra el mayor factor de amplificación.

A pesar de que los resultados presentan amplitudes muy elevadas, los valores que se muestran caen dentro de la zona elástica del material, ya que el aluminio simulado tiene un módulo de Young

de 71 GPa. El esfuerzo de Von-Mises en el punto máximo es de 21.657 GPa y el esfuerzo normal en su punto máximo es de 2.426 GPa. A una amplitud de vibración inicial de 800 nm ya se supera el módulo de Young, con un valor de esfuerzo de Von-Mises de 82 GPa.

#### 5.1.4 – GUI para la simulación del campo de levitación acústica

El método matricial utilizado tiene una aplicación muy específica pues se encarga de dar una representación gráfica de una simulación del potencial acústico relativo y conexos por lo que no existe un programa especializado en resolverlo, Sin embargo, se pueden crear códigos de programación que sirvan para tal fin. Una desventaja de trabajar de esta manera es que se debe de crear un código diferente para cada simulación que se desee realizar. Inconveniente que se hace evidente cuando se generan decenas de ellos, especialmente cuando pueden ser códigos de varias centenas de líneas de programación. Para evitar estos inconvenientes en este trabajo de tesis se utilizó el software MATLAB® de *MathWorks* para crear una interfaz gráfica de usuario (GUI por sus siglas en inglés). Por lo que se puede estandarizar y agilizar el proceso de simulación del método matricial. La GUI analiza y procesa la información del campo de presión acústica de manera tridimensional y proporciona información sobre la presión acústica y el potencial acústico relativo de un espacio bidimensional situado entre las superficies de un transductor y un reflector o incluso entre múltiples superficies.

Se puede generar una interfaz sencilla donde solo se requiera ingresar los parámetros de entrada esenciales tales como posición, altura, ángulo de inclinación, etc. para la representación virtual de las superficies y otros como velocidad, densidad, frecuencia, etc. para representar las propiedades del medio de propagación. Se puede apreciar la GUI que se ha creado para resolver el método matricial en la figura 5.20.

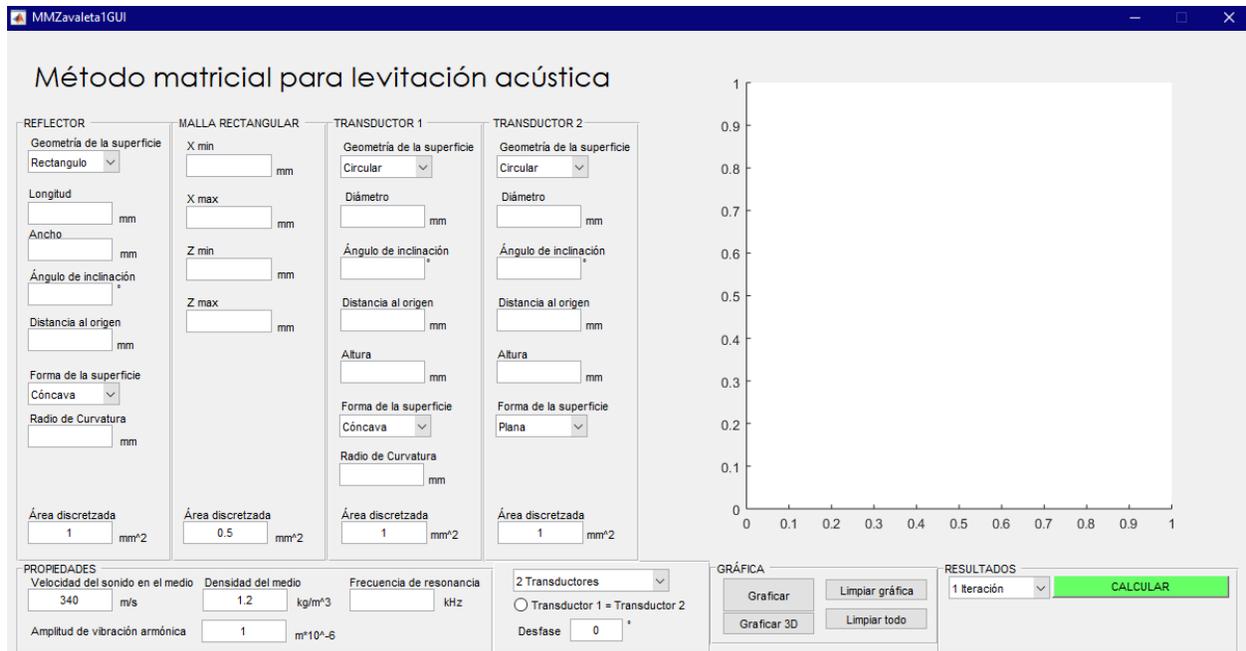


Figura 5.20. GUI diseñada para resolver el método matricial para la levitación acústica.

La GUI está diseñada para simular campos de levitación acústica que pueden ir incluso más allá de lo requerido para este trabajo de tesis. Se enfoca principalmente al análisis de levitadores acústicos uniaxiales y biaxiales e inclusive, también puede simular campos de levitación con dos transductores. A pesar de que no representa gran dificultad modificar el código para agregar más elementos, no son requeridos, pues el levitador acústico analizado es uniaxial y consta de solo un transductor y un reflector. Aun así, esta GUI puede resolver la mayoría de los análisis realizados en la bibliografía de esta tesis de Andrade *et al.* entre otros. La GUI creada también es capaz de trabajar con ciertas geometrías menos usuales que también se tomaron en consideración para obtener una mejora en el potencial de radiación acústica relativo. Se puede trabajar con superficies circulares y cuadradas en el caso de los transductores e incluso con rectangulares y circulares con un barreno central para el caso del reflector.

Con esta interfaz se puede generar la distribución geométrica del arreglo antes de resolver las ecuaciones del método matricial. En primera instancia, se presenta una vista isométrica del arreglo directamente en la GUI, como se muestra en la figura 5.21. También se da la opción de poderla visualizar de manera libre en una ventana independiente, como se muestra en la figura 5.22.

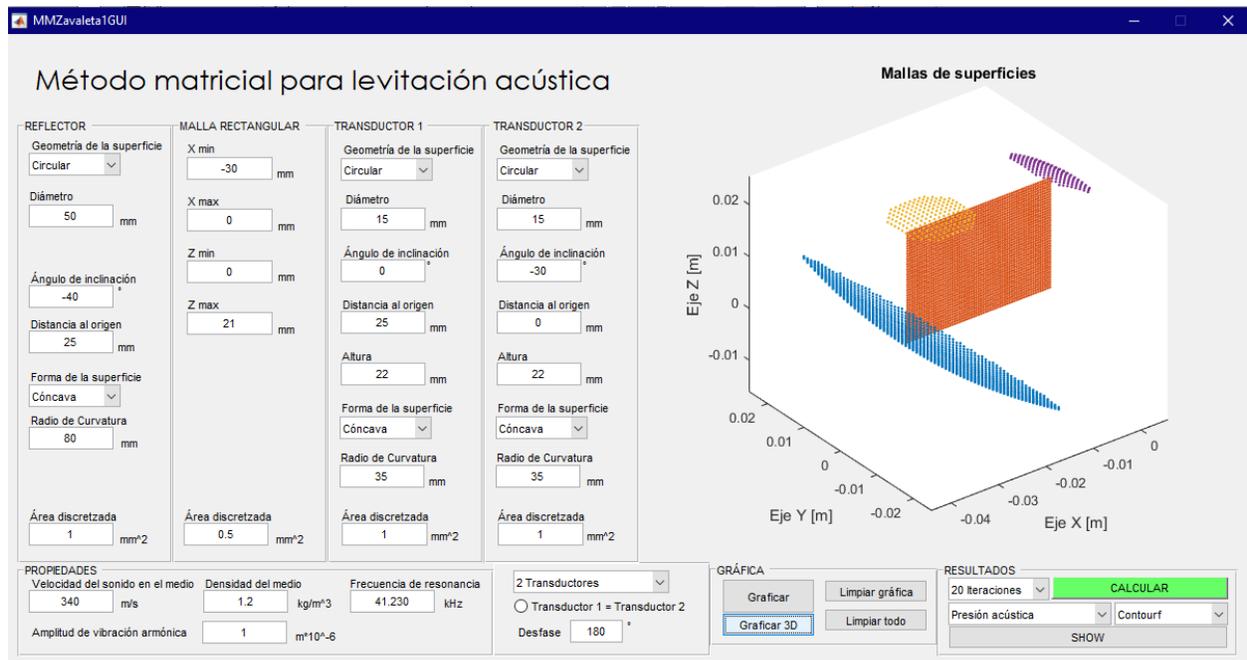


Figura 5.21. Representación de la vista isométrica en la GUI. Los datos ingresados para este ejemplo son aleatorios y no representan ninguna configuración real.

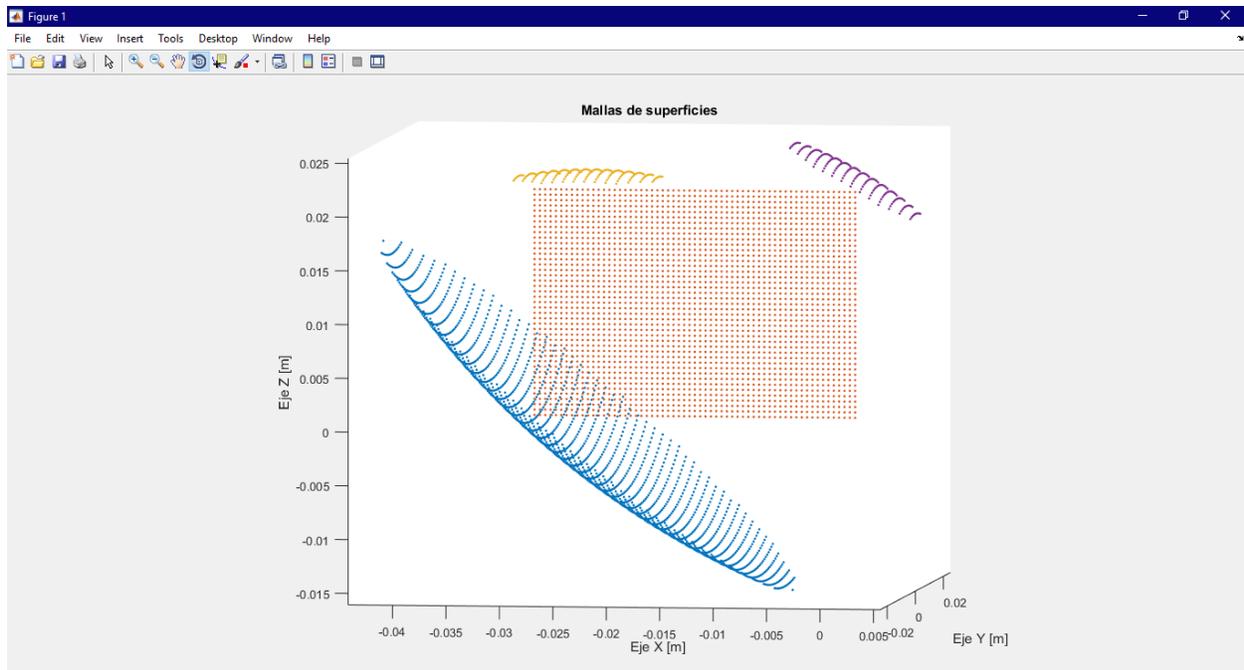


Figura 5.22. Ventana de visualización espacial de los elementos en la GUI. Esta ventana tiene libertad de rotación de la imagen 3D, por lo que se puede visualizar desde cualquier ángulo.

La GUI muestra directamente como resultado una gráfica de la distribución del potencial acústico relativo dentro del campo de análisis, como se muestra en la figura 5.27. Aunque también tiene la opción de mostrar gráficas de la presión acústica, figura 5.23, de la primera onda emitida, figura 5.24, de la primera reflexión de ondas, figura 5.25 y una gráfica de la presión acústica punto a punto, figura 5.26. Para las figuras mencionadas se han tomado los valores del ejemplo de la figura 5.21.

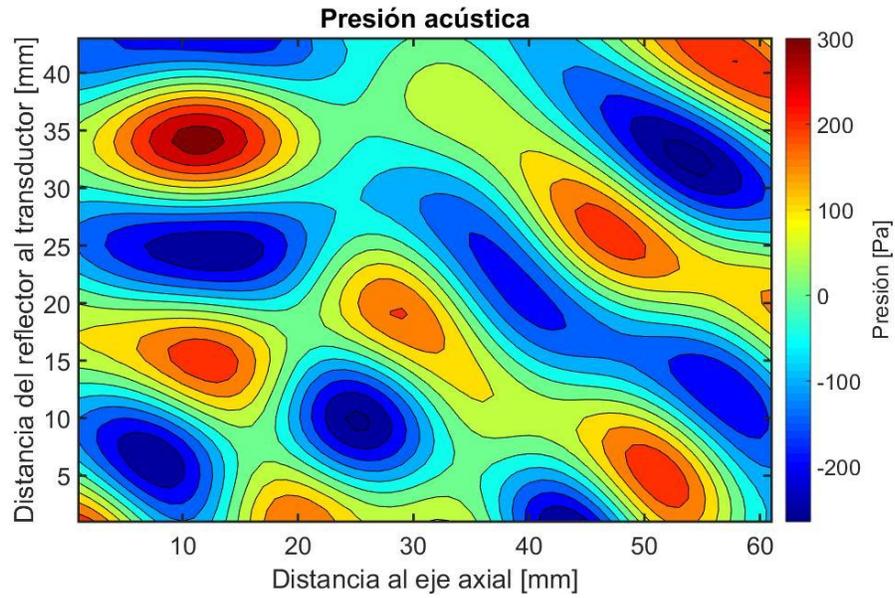


Figura 5.23. Representación de la gráfica de distribución de presión acústica generada con la GUI.

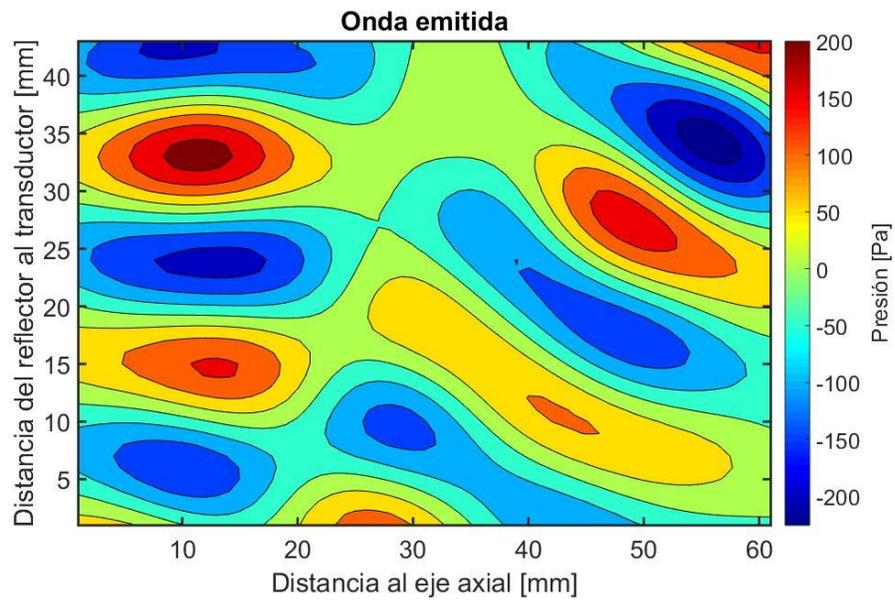


Figura 5.24. Representación de la gráfica de distribución de la onda acústica generada por el o los transductores con la GUI.

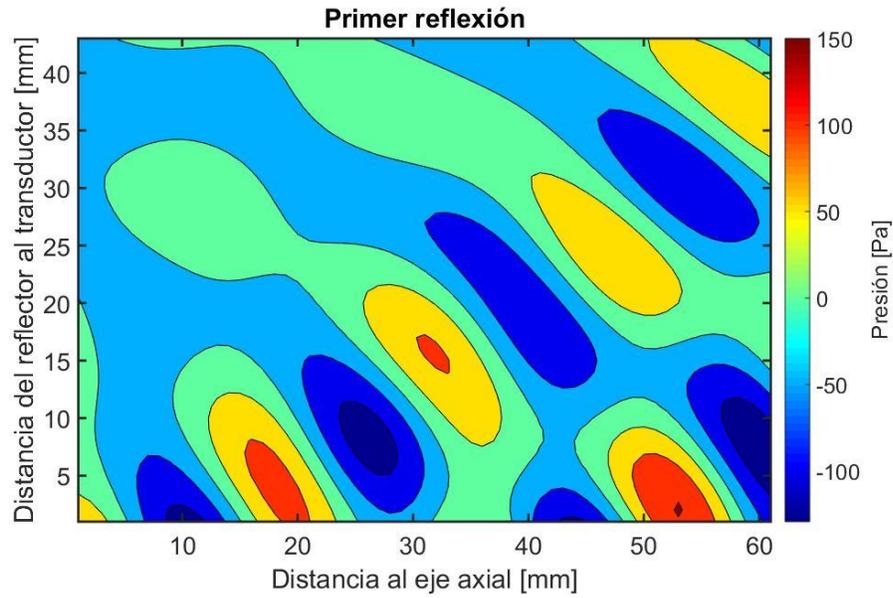


Figura 5.25. Representación de la gráfica de distribución de la primera reflexión de la onda acústica generada por el reflector con la GUI.

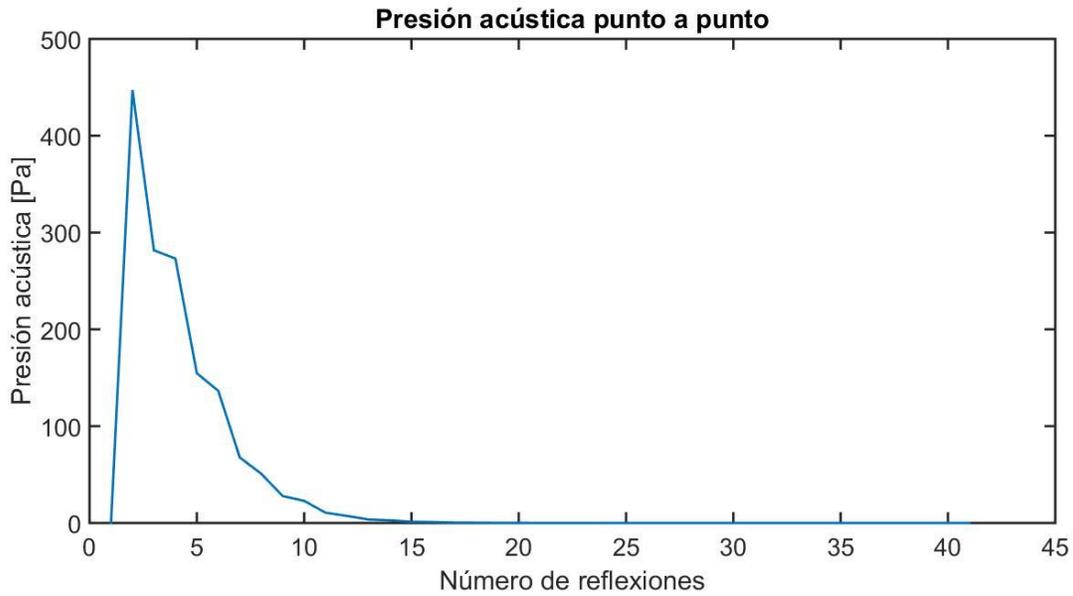


Figura 5.26. Representación de la gráfica de presión acústica punto a punto con la GUI. Se emplearon 20 iteraciones, aunque en esta gráfica se muestra que con tan solo 5 habría sido suficientes.

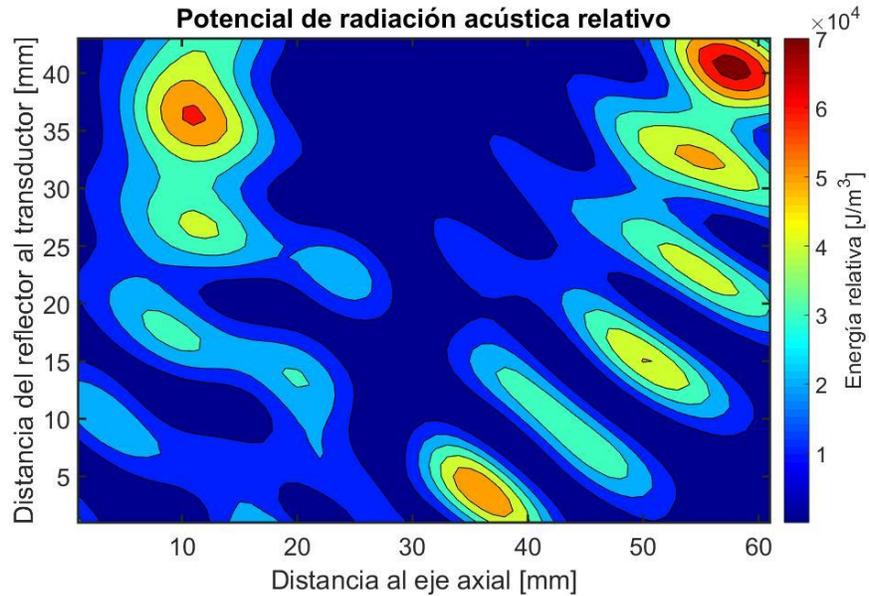


Figura 5.27. Representación de la gráfica de distribución del potencial de radiación acústica relativo con la GUI.

En resumen, con la creación de esta herramienta, aplicar el método matricial se vuelve algo bastante sencillo. Por lo que el tiempo computacional que se requiere para simularlo desde cero se reduce considerablemente si se compara con las técnicas de elemento finito convencional [3, 7]. La GUI se utiliza para obtener los resultados de la siguiente subsección.

#### 5.1.5 – Simulación del potencial de radiación acústica relativo

El método matricial es una gran herramienta que ha servido de apoyo para el cálculo numérico del potencial de radiación acústica relativo. Este potencial es, en resumen, la energía de la presión del aire suficiente como para poder anular o contrarrestar la interacción gravitatoria que se ejerce sobre un cuerpo. Para determinar el efecto de la optimización de los parámetros geométricos de la superficie del amplificador ultrasónico sobre dicho potencial, se hace uso del GUI para poder hacer comparaciones.

En este apartado se muestran diversas gráficas del potencial generado por la geometría del amplificador de referencia y las mencionadas en el apartado 5.1.2 para poder hacer la comparación correspondiente y afirmar cuál configuración geométrica del amplificador ultrasónico presenta el mayor nivel de energía. Se ha utilizado para cada simulación los siguientes parámetros geométricos del reflector:

- Radio de la superficie: 15 mm.
- Radio de curvatura: 20.3 mm.

Estos parámetros corresponden al reflector del sistema de levitación acústica de referencia. Se mantienen sin alteración para poder hacer una comparación en el potencial de radiación acústica relativo generado por cada configuración geométrica propuesta. Los resultados se muestran en la siguiente serie de imágenes, desde la imagen 5.28 hasta la 5.32.

Hay muy poca literatura que menciona la manera de calcular la distancia entre las superficies, como en [2] que se menciona que la distancia es un múltiplo de  $\lambda/2$ , información que se cumple para superficies planas, pero no para superficies curvas como las que se han trabajado. Tras hacer validaciones numéricas con las figuras mencionadas, se encontró que dicha distancia se encuentra muy próxima al 21.91% de  $\lambda$ , con un margen de error del  $\pm 0.1\%$ .  $\lambda$  lo obtenemos despejando las ecuaciones 2.6 y 2.7 y sirve de referencia para encontrar la distancia óptima tras un proceso iterativo. La distancia entre superficies se mide desde la parte más profunda de la superficie curva [2].

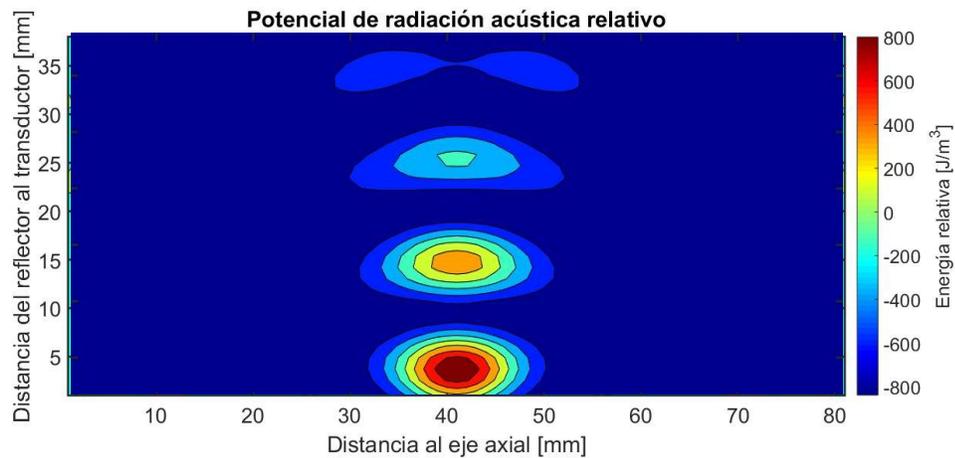


Figura 5.28. Análisis aplicado a la pieza de referencia de la figura 5.10 a) con  $f = 41.26\text{kHz}$ ,  $U_n = 6.328\mu\text{m}$  y una distancia de separación de 26.89 mm.

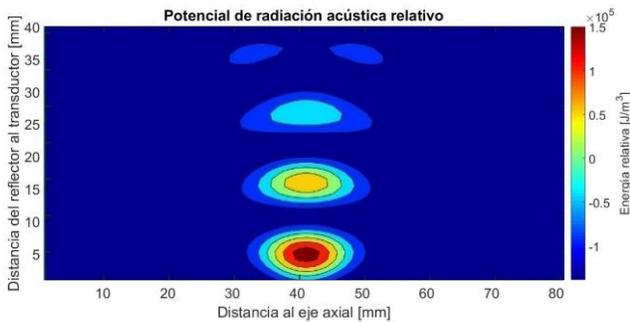


Figura 5.29. Análisis aplicado a la pieza de la figura 5.10 b) con  $f = 39.8\text{kHz}$ ,  $U_n = 98.14\mu\text{m}$  y una distancia de separación de 27.89 mm.

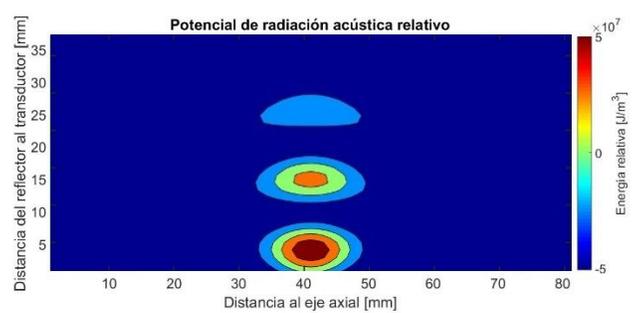


Figura 5.30. Análisis aplicado a la pieza de la figura 5.14 con  $f = 41.323\text{kHz}$ ,  $U_n = 1562.6\mu\text{m}$  y una distancia de separación de 26.79 mm.

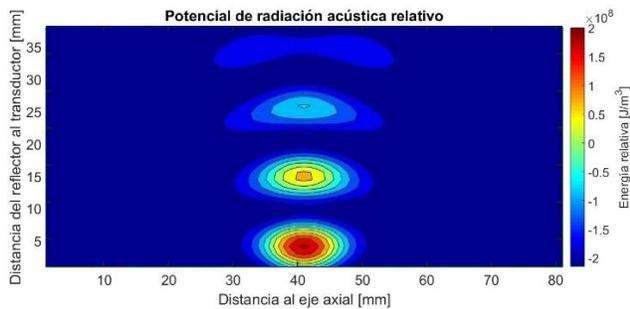


Figura 5.31. Análisis aplicado a la pieza de la figura 5.15 con  $f = 41.256\text{kHz}$ ,  $U_n = 3199.8\mu\text{m}$  y una distancia de separación de 26.89 mm.

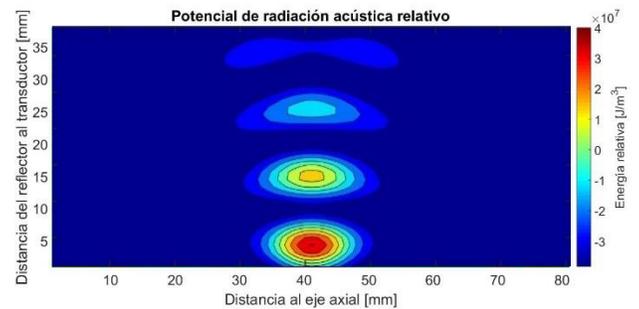


Figura 5.32. Análisis aplicado a la pieza de la figura 5.16 con  $f = 41.24\text{kHz}$ ,  $U_n = 1347.7\mu\text{m}$  y una distancia de separación de 26.89 mm.

Los análisis de las imágenes anteriores fueron realizados con 15 iteraciones, ya que la gráfica punto a punto, figura 5.33, muestra que después de la reflexión 25, las contribuciones de cada una

dejan de ser significativas. Como se puede apreciar, es de esperarse que la configuración de la figura 5.31 sea la que muestre la mayor magnitud de energía relativa. Ahora se modifican los parámetros del reflector sobre esta simulación para intentar obtener un resultado aún más satisfactorio.

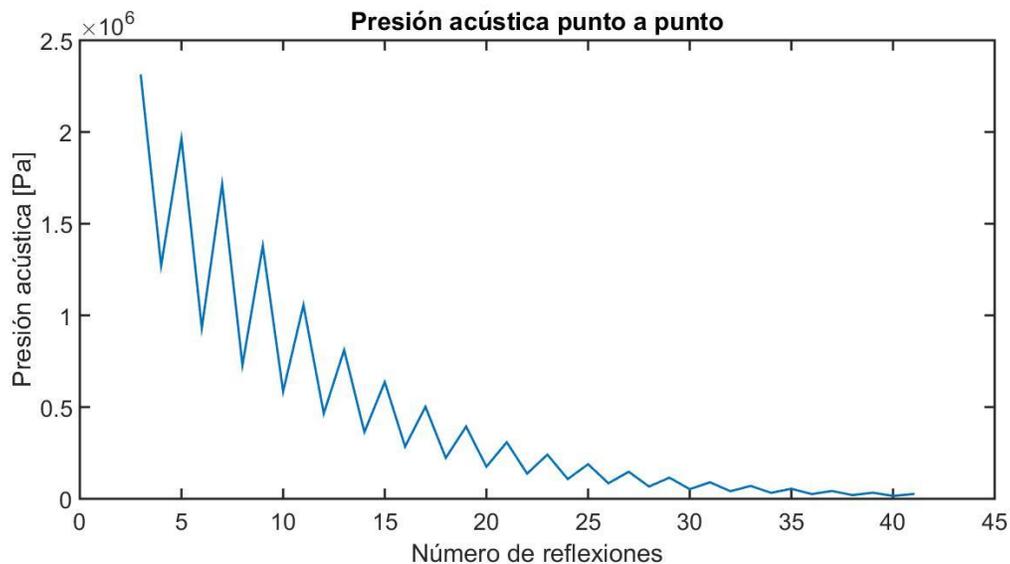
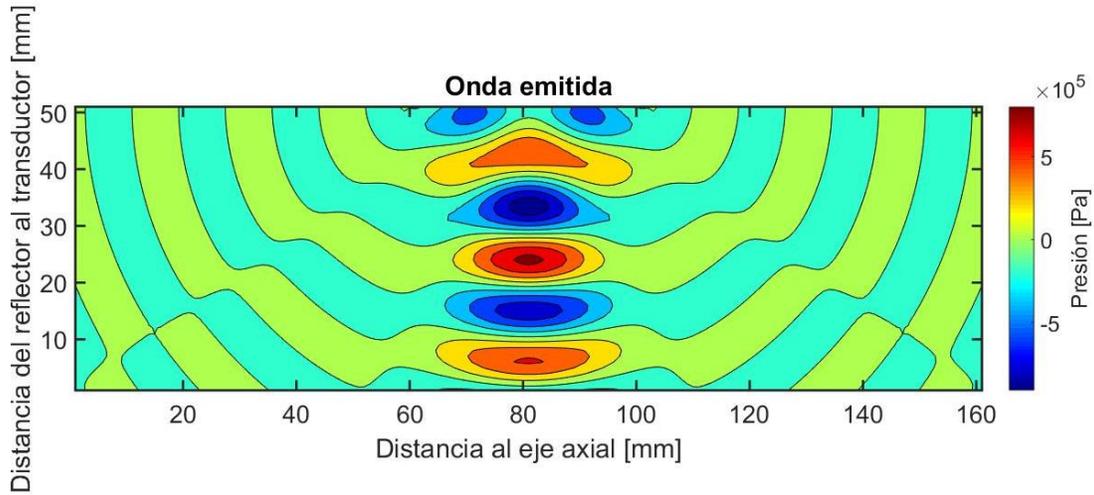
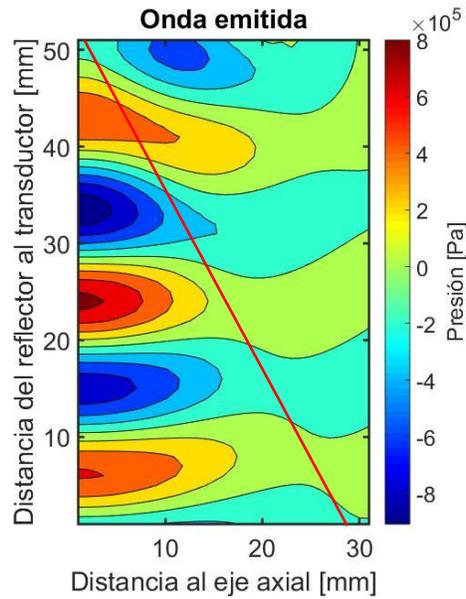


Figura 5.33. Análisis de las contribuciones de cada reflexión para el potencial de radiación acústica relativo mostrado en la figura 5.31. Para las demás figuras del mismo punto, la gráfica de presión acústica punto a punto presenta el mismo comportamiento.

Para aprovechar el máximo de la energía recibida, el radio de curvatura del reflector debe ser de la misma longitud que la distancia de separación, así puede focalizar la onda reflejada de vuelta al transductor. El cálculo del diámetro del anillo del borde se calcula de manera matemática, para lo cual se necesita saber, a la distancia de separación establecida, la distancia máxima a la que puede llegar sobre el eje X. Por lo cual, un análisis de la presión acústica de la onda emitida es necesario, figura 5.34.



a)



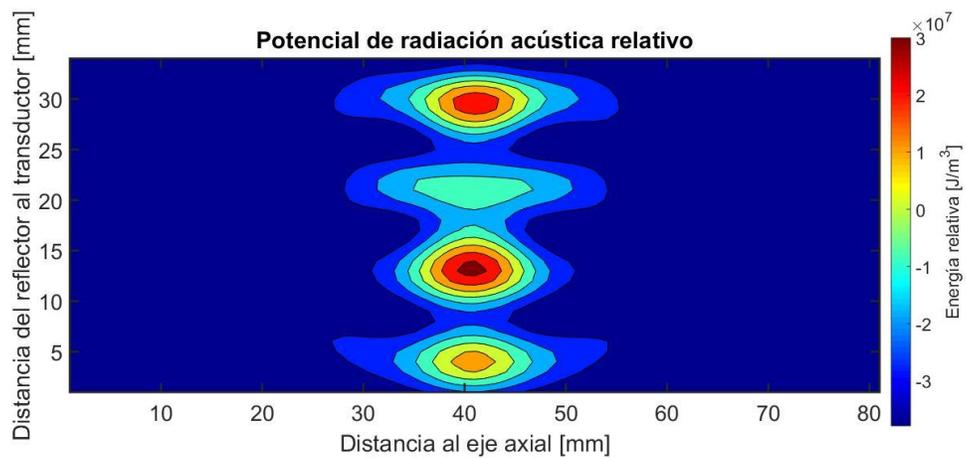
b)

Figura 5.34. Onda emitida por el transductor de la configuración de la figura 5.15. En a) se aprecia la distribución de la onda en un margen de visualización amplio del campo. Ya que tiene una simetría de revolución, en b) se muestra la mitad de la parte central de la onda, donde se concentra la mayor parte de la energía emitida. Con una línea roja se define de manera visual y empírica la distancia  $x(y)$  de esta zona.

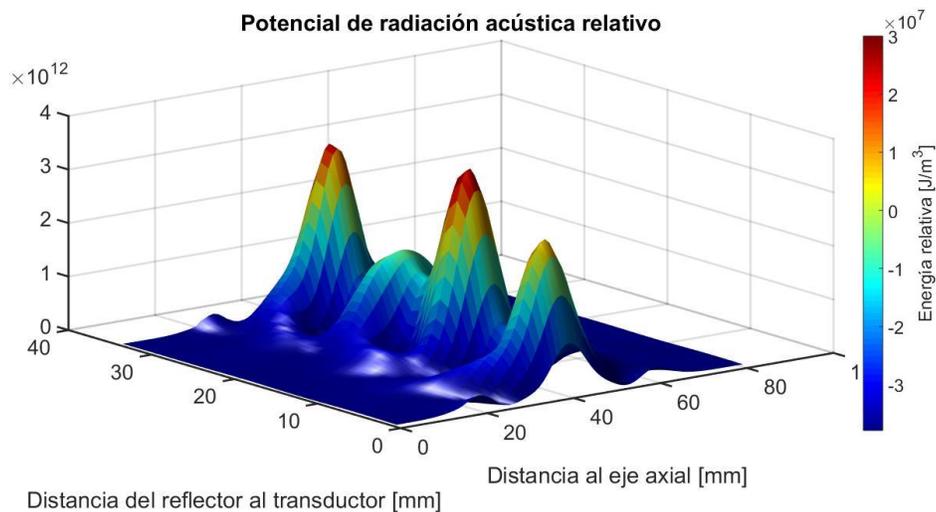
Como se puede apreciar en la figura 5.34 b), la distancia de apertura de la zona principal de la onda emitida llega aproximadamente a los 14 mm de separación del centro del reflector. Con esta

información y usando el teorema de Pitágoras se obtiene el ángulo de apertura de la parte más significativa de la onda, el cual resulta ser de  $27.5^\circ$  con respecto al eje axial del sistema. Con estos datos se obtuvo que el radio del anillo del borde resulta ser de 12.42 mm.

Utilizando un reflector con las dimensiones calculadas se obtiene un campo de potencial de radiación acústica mostrado en la figura 5.35.



a) Vista frontal.



b) Vista isométrica.

Figura 5.35. Potencial de radiación acústica relativo utilizando los valores de la figura 5.31 y modificando los valores del reflector por un diámetro de 24.84 mm y un radio de curvatura de 26.89 mm

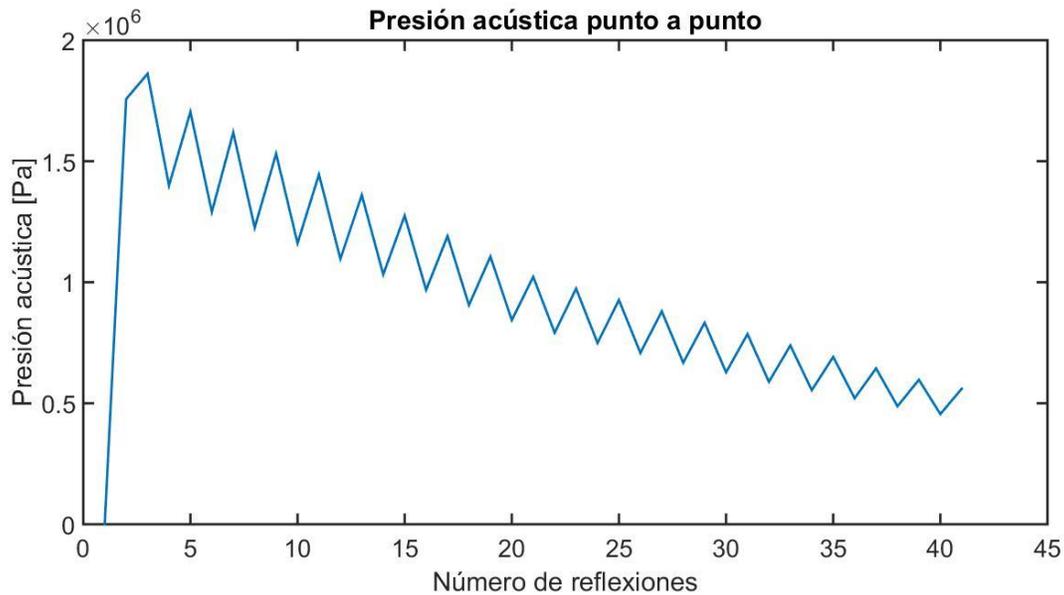


Figura 5.36. Contribución de cada reflexión de la figura 5.35.

En la figura 5.35 se aprecia un orden de magnitud menor para la energía relativa, pero con una distribución más uniforme sobre los puntos nodales. La magnitud menor puede deberse a que, como se aprecia en la figura 5.36, la contribución de cada reflexión se vuelve más significativa, por lo que se necesitaría ampliar el número de iteraciones para el cálculo. Ahora ya se ha determinado la configuración geométrica del sistema de levitación acústica que muestra el mejor valor del potencial de radiación acústica relativo empleando métodos numéricos. Basta con comparar visualmente dichos resultados de manera experimental para validar la efectividad de los métodos.

## 5.2 – Experimentales

La caracterización numérica del sistema de levitación acústica permite tener una representación virtual del mismo y de ahorrar costos y tiempo de diseño y maquinado de un sistema real. Sin embargo, para dar veracidad de los resultados que se muestran, es necesaria una confirmación experimental de los datos obtenidos. Mediante el empleo de dos técnicas ópticas se obtienen, en

este trabajo de tesis, confirmaciones visuales de los resultados numéricos del levitador de referencia. El diseño propuesto no se valida de manera experimental.

### 5.2.1 – Arreglo de la técnica Self-Mixing Interferometry

Para la aplicación de esta técnica se utilizó un diseño previo de un vibrometro basando en SMI [44] que utiliza un láser semiconductor comercial (L405P20). Con el cual se emitieron múltiples modos longitudinales alrededor de los 405 nm apuntando directamente al punto a analizar del amplificador que se ubicó a una distancia  $s_{láser}$ . El haz del láser fue colimado con un lente esférico de una distancia focal de 11 mm. Entre la cara del transductor y el lente esférico se colocó una ventana acuñada (ww por sus siglas en inglés) para reflejar aproximadamente el 0.4% del rayo láser hacia una rejilla de volumen de Bragg (VBG por sus siglas en inglés) que se utilizó como un filtro de borde para la conversión de señal FM a IM. Para detectar la señal de la VBG, en el puerto de salida se acopló un fotodiodo DET, el cual a su vez fue acoplado a un amplificador de transimpedancia que se acopló finalmente a un osciloscopio para generar una gráfica de tiempo-VBG [1].

Para incrementar la resolución de la técnica, se utilizó un lente óptico para focalizar el rayo sobre la superficie a analizar colocada de manera ortogonal a él. Durante este experimento, la corriente del láser se mantuvo fija a 39 mA y se controló la temperatura para mantenerla constante a 25°C, esto con el fin de mantener estables las propiedades del láser y poder hacer un experimento replicable.

El diagrama del arreglo puede ser visualizado en la figura 5.37 y en la figura 5.38 se muestra el arreglo de forma experimental.

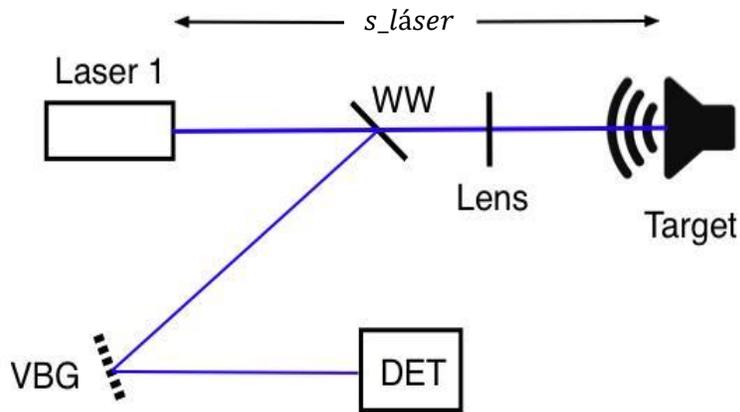


Figura 5.37. diagrama de un vibrometro láser basado en ESMI. Imagen cortesía de [1].

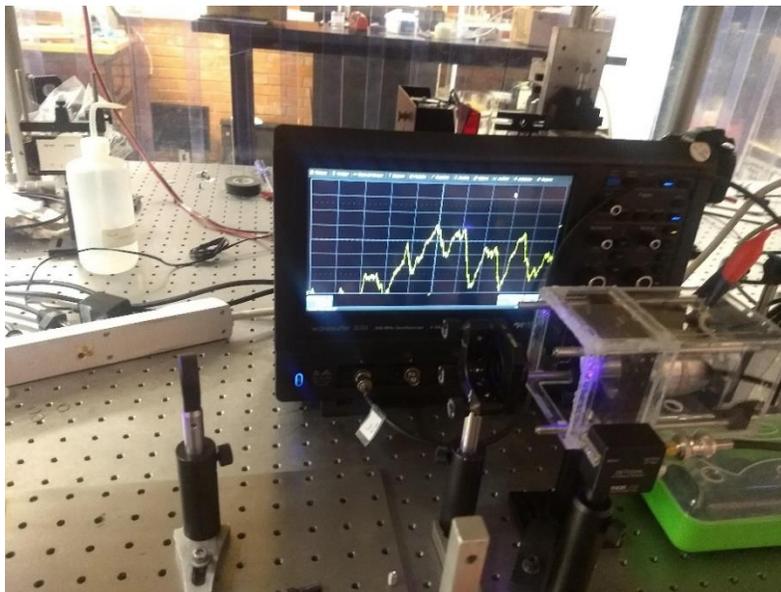


Figura 5.38. Experimento ESMI en operación basado en el diagrama de la figura 5.39.

### 5.2.2 – Medición de la amplitud de vibración armónica con SMI

La variante ESMI, de la técnica SMI, fue utilizada para caracterizar la amplitud de vibración armónica de la cara principal del amplificador ultrasónico. En un vibrometro no invasivo se aplicaron las bases de esta técnica, con lo que se pudo obtener información puntual. El análisis se realizó sobre el radio de la cara, figura 5.39, de 11 mm, discretizado en espacios de 1.1 mm.

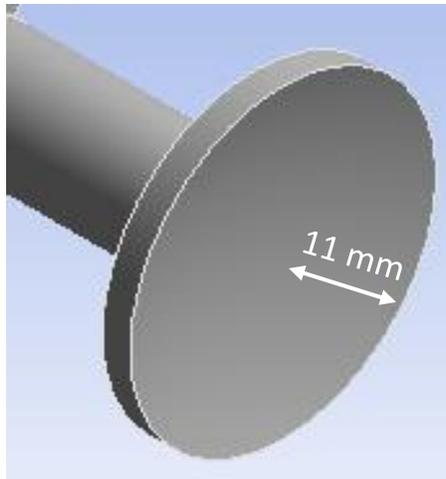


Figura 5.39. Radio de la cara del amplificador ultrasónico representado sobre dibujo CAD.

La señal obtenida es la variación del voltaje respecto al tiempo, como se puede visualizar en la figura 5.40. Dicha señal varía respecto a cada punto de medición. El amplificador vibra a una frecuencia de 41.26 kHz, por lo que su periodo tiene una duración de 24.24  $\mu\text{s}$ . En la figura 5.40 se muestra un ejemplo de estas mediciones. Se exponen dos periodos sobre la medición realizada a 4.4 mm del centro del amplificador.

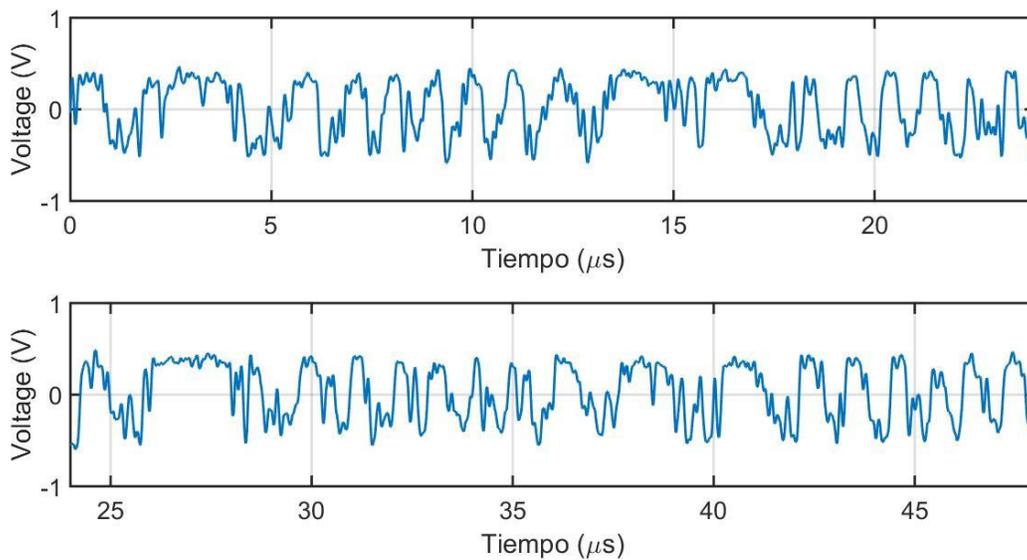


Figura 5.40. Señal ESMI para la medición realizada a 4.4 mm del centro de la superficie del amplificador.

Como cada ciclo de señal representa un cambio de fase, la cantidad de ciclos que haya presentes durante un periodo determina la amplitud de vibración. Cada ciclo corresponde aproximadamente a un desplazamiento de 200 nm, puesto que la longitud de onda del láser es muy cercana a 405 nm [1]. Para este análisis se utilizó el voltaje de operación de 200 V para el transductor.

Tras varias mediciones sobre cada punto discretizado, se logró obtener un promedio que representa la amplitud de vibración armónica. Dicho resultado se comparó con la simulación numérica para comprobar la precisión de los análisis computacionales. Esta comparativa se puede apreciar en la figura 5.09.

### 5.2.3 – Arreglo de la técnica de deflectometría schlieren

El sistema tradicional de schlieren fue el utilizado en este trabajo, ya que solo se necesita validar la forma del potencial de radiación acústica. Para el montaje de esta técnica se empleó un espejo telescópico con las siguientes características: radio de 8 cm, distancia focal de 1.5 m. Se empleó como fuente de luz puntual un arreglo entre un diodo emisor de luz (LED, por sus siglas en inglés) de alta densidad, una lente con una distancia focal de una pulgada y un *pinhole*<sup>14</sup> de 200 micrómetros. El LED se coloca a una distancia de al menos 2 f (en este caso se toma la distancia focal de la lente en sí) de la lente. En cambio, el *pinhole* se coloca a 1 f del otro lado de la lente. Este arreglo se puede visualizar en la figura 5.41 La idea de este arreglo es concentrar el haz de luz en el *pinhole* que servirá como fuente puntual.

---

<sup>14</sup> Término en inglés que describe un agujero circular pequeño. En óptica se utiliza como sistema de apertura. Su tamaño puede variar dependiendo de la aplicación y de la manufactura desde el orden micrométrico hasta el de centímetros.

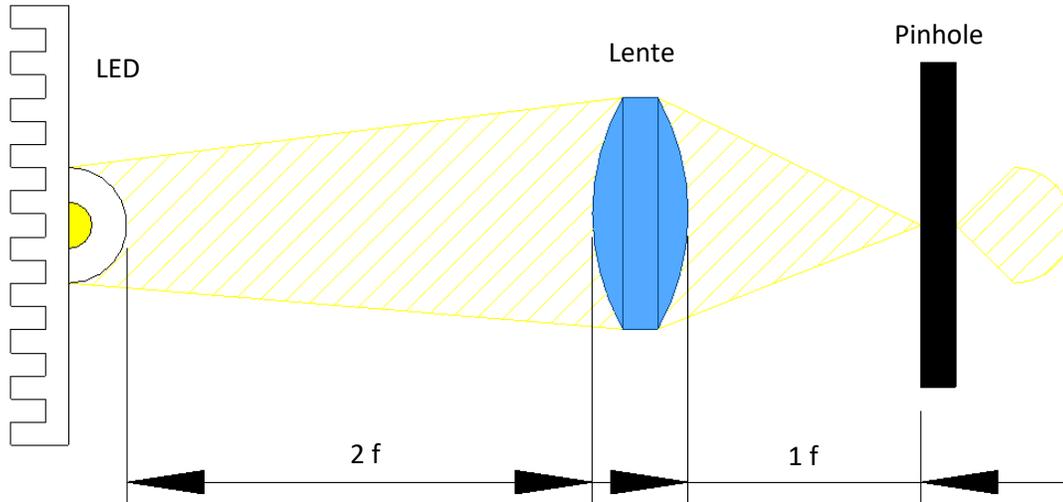


Figura 5.41. Fuente de luz puntual.

Finalmente, se utilizó el cuerpo filoso de una navaja como cuerpo de bloqueo, figura 5.42, y se colocó una cámara como receptor para poder hacer tomas del sistema de levitación acústica.

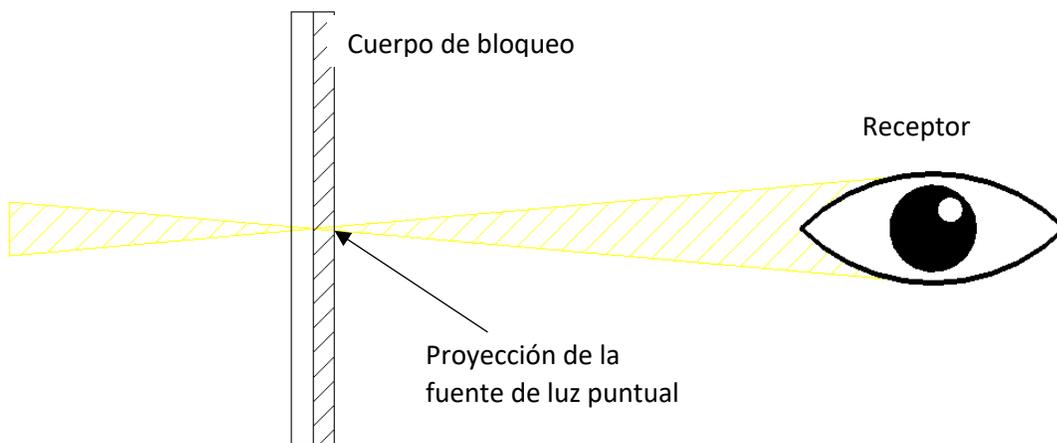


Figura 5.42. Sistema de lectura de imagen.

El arreglo general de la técnica es como el mostrado en la figura 4.1.

#### 5.2.4 – Visualización del potencial de radiación acústica con schlieren

Cuando el sistema está correctamente alineado, solamente hay que poner en funcionamiento el sistema de levitación acústica, para poder compararlo con la simulación obtenida. Se puede usar

cualquiera de las dos configuraciones de la técnica de deflectometría schlieren, la de un espejo o la de dos espejos. Aunque se esperarían resultados casi idénticos con cada configuración, se aprecia cierta diferencia de contraste entre cada arreglo, esto puede ser influenciado a la distancia de separación entre las superficies. Esto se puede apreciar en la figura 5.43.

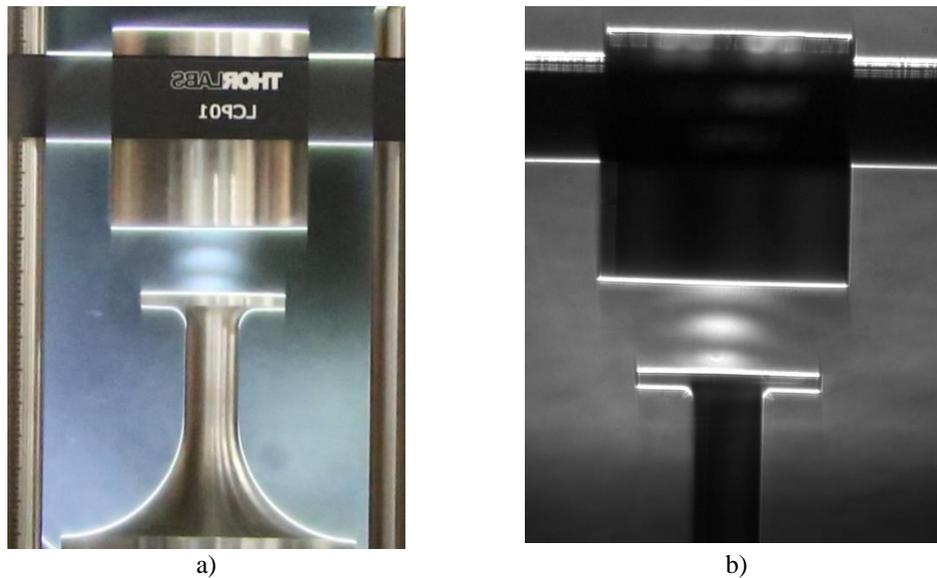


Figura 5.43 Comparación del sistema de levitación con la técnica óptica de Schlieren en a) un espejo y b) dos espejos. Para ambas imágenes se utiliza el mismo sistema de levitación, con el amplificador ultrasónico original a la frecuencia de 41.26 kHz.

Se compara el campo de levitación del levitador acústico de referencia con su simulación para validar que el comportamiento sea el mismo. Simplemente es una confirmación visual que refuerza el trabajo realizado en esta tesis. Esta comparación se puede apreciar en la figura 5.44.

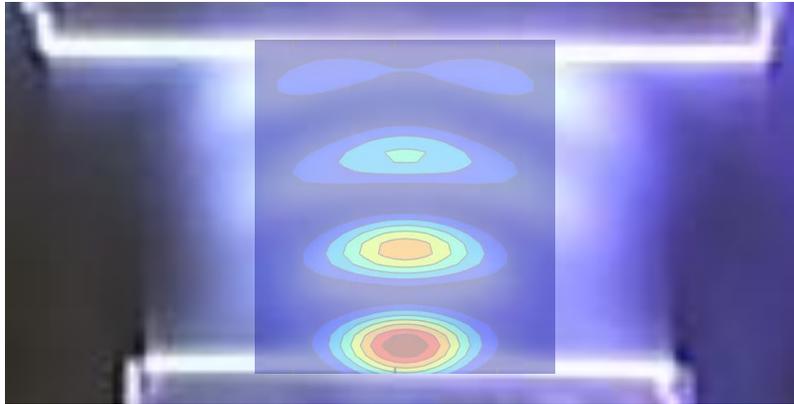


Figura 5.44. comparación entre la simulación del campo acústico de levitación y el campo acústico generado de manera experimental. se puede observar la validación visual de la figura 5.28.

De manera experimental se observa el comportamiento predicho mediante las simulaciones con métodos numéricos.

## 6 – Conclusiones

La optimización mecánica de un amplificador ultrasónico es posible de realizar mediante métodos numéricos. Al trabajar en la frecuencia de resonancia, el factor de amplificación obtenido mediante simulaciones puede ser varios ordenes de magnitud mayor que el que se puede calcular con las ecuaciones que se basan en la teoría de Gor'kov. El máximo valor que se puede obtener del factor de amplificación para un amplificador cilíndrico escalonado de dos escalones principales se obtiene siempre cuando el valor de cada uno de ellos es muy próximo a  $\lambda/4$ .

Un análisis armónico en elemento finito, con menos de 10 000 elementos, es suficiente para simular el comportamiento experimental del amplificador con precisión suficiente como para confiar en él. Vibraciones armónicas de orden micrométrico, para el aluminio comercial, crean esfuerzos que caen dentro de la zona elástica del material, por lo que es poco probable que se presenten fallas por fatiga. Un radio eliminador de esfuerzos que se puede considerar como un escalón intermedio de tipo exponencial ayuda a distribuir de una mejor manera las ondas mecánicas que atraviesan el amplificador, lo que contribuye al aumento en el factor de amplificación.

Para la optimización del diseño del amplificador de referencia, modificaciones en el corte geométrico de su escalón final o cabeza, no presentan mejoras en el factor de amplificación. Por el contrario, disminuyen su magnitud. Para simulaciones del campo de radiación acústica cuando se trabaja con superficies curvas, la distancia de separación entre ambas que genera la máxima amplitud de energía en los puntos nodales es de 21.91% de  $\lambda$ , con un margen de error del  $\pm 0.1\%$ . Cuando el radio de curvatura del plato reflector es igual a la distancia de separación de la superficie del transductor, la distribución de las ondas estacionarias presenta la mayor uniformidad. Lo que podría reducir el margen de desviación estándar de las partículas que se leviten.

## 7 – Recomendaciones para trabajos futuros

La caracterización *in silico* de un sistema de levitación acústica deja en evidencia que la forma de los componentes que le constituyen, así como la frecuencia a la que trabajan, juegan un rol muy importante para determinar la efectividad de este. Se han obtenido factores de amplificación muy superiores a lo esperado por la literatura del diseño de amplificadores ultrasónicos. Existe la posibilidad de que no se haya contemplado algún factor de amortiguamiento que limite la amplitud máxima de amplificación. De ser el caso, se recomienda para trabajos futuros el determinar de manera experimental la magnitud del potencial de radiación acústica presente en el levitador acústico cuando se pone en operación un amplificador que en simulaciones obtenga factores de amplificación superiores en más de un orden de magnitud comparado con lo calculado con las ecuaciones. En caso de existir una discrepancia entre los valores medidos y los simulados, localizar y determinar el factor de amortiguamiento que no ha sido evidente.

Mejorar el sistema electrónico del transductor para que pueda controlarse la frecuencia de resonancia y poder fijarla a un rango pequeño, de tal modo que sea posible operarlo a la máxima amplitud de vibración.

Los levitadores acústicos uniaxiales eventualmente pueden quedar en desuso en aplicaciones de levitación a causa de diseños más innovadores que trabajen con series de transductores, por lo que se recomienda mejorar el GUI entregado como producto secundario para que sea capaz de hacer simulaciones rápidas de levitadores con una cantidad indeterminada de transductores.

## Bibliografía

- [1] Contreras, V., Zavaleta, C., Méndez, R., García, J. C. (2019). *Amplitude vibration measurements of single-axis levitation systems by enhanced self-mixing interferometry* [Manuscrito en preparación, no publicado a la fecha]. Instituto de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma de México.
- [2] Valencia Murillo, R. A. (2017, julio). *Sistema de levitación ultrasónica para análisis espectroscópico de muestras líquidas*. Tesis de maestría. Centro de investigaciones en óptica, A. C. León, México.
- [3] Andrade, Marco A. B., Pérez, N., Buiocchi, F., Adamowski, J. C. (2011, agosto). Matrix Method for Acoustic Levitation Simulation. *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 58 (No. 8), 1674-1683.
- [4] Andrade, Marco A. B. Stindt, A., Panne, U., Riedel, J., Adamowski, J. C. (2012). Numerical and Experimental Determination of the Sound Pressure Distribution in Single-Axis Acoustic Levitators. *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings*, 2754-2757.
- [5] Stindt, A., Andrade, Marco A. B., Albrecht, M., Adamowski J. C., Panne, U., Riedel, J. (2014). Experimental and numerical characterization of the sound pressure in standing wave acoustic levitators. *AIP Review of Scientific Instruments*, 85, 015110. DOI: 10.1063/1.4861197
- [6] Andrade, Marco A. B., Pérez, N., Adamowski, J. C. (2015). Particle manipulation by a non-resonant acoustic levitator. *AIP Applied Physics Letters*, 106, 014101. DOI: 10.1063/1.4905130

- [7] Andrade, Marco A. B., Buiochi, F., Adamowski, J. C. (2010, febrero). Finite Element Analysis and Optimization of a Single-Axis Acoustic Levitator. *IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, Vol. 57 (No. 2), 469-479.
- [8] Andrade, Marco A. B., Bernassau, A. L., Adamowski, J. C. (2016). Acoustic levitation of a large solid sphere. *AIP Applied Physics Letters*, 109, 044101. DOI: 10.1063/1.4959862
- [9] Baer, Sebastian, Andrade, Marco A. B., Eses, C., Adamowski, J. C., Schweiger, G., Ostenderf, A. (2011). Analysis of the particle stability in a new designed ultrasonic levitation device. *AIP Review of Scientific Instruments*, 82, 105111. DOI: 10.1063/1.3652976
- [10] Ghiculescu, D., Marinescu, N., Varga, G., Nanu, S. (2014). Determination by FEM of ultrasonic horn profile for vibrating the workpiece at EDM assisted by ultrasonics. *Romanian Association of Nonconventional Technologies*, 61-66.
- [11] Satpathy, M. P., Sahoo, S. K., Datta, S. (2015, octubre). Acoustic Horn Design and Effects of Process Parameters on Properties of Dissimilar Ultrasonic Welding Aluminum to Brass. *Materials and Manufacturing Process*, 31:3, 283-290. DOI: 10.1080/10426914.2015.1048465
- [12] Pérez, N., Carbonari, R. C., Andrade, Marco A. B., Buiochi, F., Adamowski J. C. (2014). A FEM-based method to determine the complex material properties of piezoelectric disks. *Elsevier Ultrasonics*, 54, 1631-1641.
- [13] Andrade, Marco, A. B., Pérez, N., Adamowski, J. C. (2015). Analysis of a non-resonant ultrasonic levitation device. *Elsevier Physics Procedia, 2015 International Congress on Ultrasonics, 2015 IUC Metz*, 68-71. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.08.044

- [14] Andrade, Marco A. B., Buiochi, F., Adamowski, J. C., (2005, noviembre). Unidimensional modeling and construction of a 1-3 piezoelectric composite transducer. *COBEM, International Congress of Mechanical Engineering November 6-11, 2005*.
- [15] Pérez, N., Andrade, Marco A. B., Carbonari, R. C., Adamowski, J. C., Buiochi, F. (2013, julio). Accurate determination of piezoelectric ceramic constants using a broadband approach. *Acoustical Society of America, Proceedings of Meetings on Acoustics, Session 3aEA: computational Methods in Transducer Design, Modeling, Simulation and Optimization II, Vol. 19*, 030071. DOI: 10.1121/1.4799296
- [16] Pérez, N., Pérez, C., Andrade, Marco A. B., Di Laccio, J. (2015, noviembre). Determinación de la frecuencia natural de vibración de una barra. Parte 1, estudio experimental utilizando tarjeta de sonido. *Revista de Enseñanza de la Física, Vol. 27* (No. Extra), 385-390.
- [17] Andrade, Marco A. B., Buiochi, F., Baer, S., Esen, C., Ostendorf, A., Adamowski, J. C. (2012). Experimental Analysis of the Particle Oscillations in Acoustic Levitation. *IEEE International Ultrasonics Symposium Proceedings, 2006-2009*.
- [18] Andrade, Marco A. B., Ramos, T. S., Okina, F. T. A., Adamowski, J. C. (2014). Nonlinear characterization of a single-axis acoustic levitator. *AIP Review of Scientific Instruments, 85*, 045125. DOI: 10.1063/1.4872356
- [19] Ansys® Academic Research Mechanical, Release 15.0.7, Help System, Guide, ANSYS, Inc.
- [20] Schwartz, H. R. (1998). *Finite element methods*. Londres: Academic. <https://doi.org/10.1137/1032110>

- [21] Hughes, T. J. R. (2000). *The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis*. Nueva York: Dover.
- [22] Anónimo. *Modelado de procesos de manufactura*. Capítulo 8 Conceptos básicos del método por elemento finito, 233-264.
- [23] Tadvi, M., Pandey, A., Dr. Prajapati, J., Shah, J. (2015, noviembre). Design development of sonotrode for ultrasonic drilling. *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2015-53023*.
- [24] Nad, M. (2010). Ultrasonic horn design for ultrasonic machining technologies. *University of West Bohemia. Applied and Computational Mechanics 4*, 79-88.
- [25] Khalaji, I., Patel, R. V., Naish, M. D. (2012, junio). Systematic Design of an Ultrasonic Horn Profile for High Displacement Amplification. *The Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics Roma, Italy*, 913-918.
- [26] *Ondas esféricas, radiación acústica* (2019). Recuperado de: [http://www3.uah.es/mars/acustica/RADIA\\_SONORA.pdf](http://www3.uah.es/mars/acustica/RADIA_SONORA.pdf)
- [27] Qué es el mallado en elemento finito? (2016, octubre). *Finit3element*. Recuperado de: <https://finit3element.wordpress.com/2016/10/11/que-es-el-mallado-en-elemento-finito/#more-4939>
- [28] Schlieren Optics. Harvard Natural Sciences Lecture Demonstrations (2018, abril). Recuperado de <https://sciencedemonstrations.fas.harvard.edu/presentations/schlieren-optics>

- [29] Crockett, Allen and Rueckner, Wolfgang (2018, octubre). Visualizing sound waves with Schlieren optics. *American Journal of Physics*, 86, 870 (2018). DOI: 10.1119/1.5042245
- [30] Hargather, Michael J., Settles, Gary S., Madalis, Mathew J. (2009, agosto). Schlieren imaging of loud sounds and weak shock waves in air near the limit of visibility. *Springer: Springer-Verlag 2009*. DOI: 10.1007/s00193-009-0226-6
- [31] M. Patel, A. Dipal., U. Rajurkar, B. Avadhoot (2011, diciembre). Analysis of Different Shaped Sonotrodes used for Plastic Welding. *Institute of Technology, Nirma University, Ahmedabad*, 382-481.
- [32] Díaz M., Alejandro (2000, febrero). *Métodos de mallado y algoritmos adaptativos en dos y tres dimensiones para la resolución de problemas electromagnéticos cerrados mediante el método de los elementos finitos*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Escuela Técnica superior de Ingenieros de Telecomunicación, Valencia, España.
- [33] Shu, Kuen-Ming, Hsieh, Wen-Hsiang, Yen, Hoa-Shen (2013). On the design and analysis of acoustic horns for ultrasonic welding. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 37 (No. 3).
- [34] Sergiu N., Alexandru, Marinescu, Niculae Ion, Ghiculescu, Daniel (2011). Study on ultrasonic stepped horn geometry design and FEM simulation. *Nonconventional Technologies Review* (No.4).
- [35] Branson. Ultrasonic Horn Catalog. *EMERSON Industrial Automation*. Recuperado de: <https://www.emerson.com/documents/automation/catalog-ultrasonic-horn-branson-en-us-160126.pdf>

- [36] Peshkovsky, Sergei L., Peshkovsky, Alexey S. (2006, agosto). Matching a transducer to water at cavitation: Acoustic horn design principles. *Ultrasonics Sonochemistry 14* (2007), 314-322. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2006.07.003
- [37] Contreras, V., Lonnqvist, J., Toivonen, J. (2015, junio). Edge filter enhanced self-mixing interferometry. *Optics Letters, Vol. 40, No. 12*. DOI: 10.1364/OL.40.002814
- [38] Contreras, Víctor, Marzo, Asier (2020, diciembre). Adjusting single-axis acoustic levitators in real time using rainbow schlieren deflectometry. *Review of Scientific Instruments, 92, 015107* (2021); <https://doi.org/10.1063/5.0013347>
- [39] L. P., Gor'kov (1962). On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid. *Sov. Phys. Dokl., vol. 6, no. 9, 773–775*.
- [40] Paul Chew, L. (1989). Constrained Delaunay triangulations. *Algorithmica 4*, 97–108. <https://doi.org/10.1007/BF01553881>
- [41] Díaz Morcillo, A. (2000, febrero). *Métodos de mallado y algoritmos adaptativos en dos y tres dimensiones para la resolución de problemas electromagnéticos cerrados mediante el método de los elementos finitos*. Tesis doctoral. Departamento de Comunicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación (UPV), Valencia, España.
- [42] Method, F. E. (n.d.). Finite Element Vibration Analysis (Tutorial on vibration modes), 1–17. Recuperado de [http://www1.aucegypt.edu/faculty/mharafa/MENG\\_475/Finite Element Vibration Analysis Fall 2010.pdf](http://www1.aucegypt.edu/faculty/mharafa/MENG_475/Finite_Element_Vibration_Analysis_Fall_2010.pdf)
- [43] Andrade, M.A.B., Pérez, N. & Adamowski, J.C. (2018). Review of Progress in Acoustic Levitation. *Braz J Phys 48*, 190–213. <https://doi.org/10.1007/s13538-017-0552-6>

- [44] Reyes, Alan (2018). *Prototipo de vibrómetro láser basado en interferometría de auto-mezclado: diseño y construcción*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
- [45] Bolt Clamped Langevin Transducer 40 KHz. *STEMiNC Steiner & Martins, inc.* Recuperado de: <https://www.steminc.com/PZT/en/bolt-clamped-langevin-tranducer-40-khz>
- [46] Piezo Material Properties. *STEMiNC Steiner & Martins, inc.* Recuperado de: [http://www.steminc.com/piezo/PZ\\_property.asp](http://www.steminc.com/piezo/PZ_property.asp)



Cuernavaca, Mor., a 03 de JUNIO del 2021.

**FORMA T-4A  
NOMBRAMIENTO COMITÉ REVISOR**

**DR. ARTURO MOLINA OCAMPO  
DR. JUAN CARLOS GARCIA CASTREJON  
DR. JOSE ALFREDO ARIZA ESPINOZA  
MTRA. MAYRA KARINA ZEZATTI FLORES  
DR. VICTOR ULISES LEV CONTRERAS LOERA  
P R E S E N T E S**

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de:

**TESIS**

Titulado:

**“Análisis numérico y experimental del amplificador ultrasónico de un levitador  
acústico uniaxial”**

Que presenta el **C. URIBE ZA VALETA CARLOS ALBERTO**

Del programa educativo de: **INGENIERÍA MECÁNICA**

**A T E N T A M E N T E**  
*Por una humanidad culta*

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ  
DIRECTORA**

*(SE ANEXA FIRMA ELECTRÓNICA)*

**D I C T A M E N**

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ  
DIRECTORA DE LA FCQeI  
P R E S E N T E**

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTAMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

| VOTO        | NOMBRE                                | FIRMA |
|-------------|---------------------------------------|-------|
|             | DR. ARTURO MOLINA OCAMPO              |       |
| APROBATORIO | DR. JUAN CARLOS GARCIA CASTREJON      |       |
| APROBATORIO | DR. JOSE ALFREDO ARIZA ESPINOZA       |       |
| APROBATORIO | MTRA. MAYRA KARINA ZEZATTI FLORES     |       |
| APROBATORIO | DR. VICTOR ULISES LEV CONTRERAS LOERA |       |

*Se anexan firmas electrónicas*

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2021-06-03 12:31:19 | Firmante**

Pie7rkpolQgEMLdnWH569j+k5vSpyJ6th/21QXvFifVJdOqACxTsQpGivinuC2jHSAPgjGQtpSy1Of4KpPVuB6oXue+aGrlu6iAXGHA8cPjNTkszfGNG5smX2u0RhZrj29lpM8s1HYA  
xJg6g7iUm/zSLcibsChQOC/nb+HXk9cVj43u9L5l1M8ULLa6m+cCmmgv5pB6mDNor7v2CkWEzZzhPmkeUCdIIIE6FWqIwqIsEI0yYBW2RsZbTlq+NcqAjMkLu28OiUnOYsO5AQF  
hm5NK1B3P9cPfJIInjls4Slqw4H/tdBtO5BLgHaGT3isohkMbnLFAWi2Rea/C29DjicQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[4c93Xj](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/l6LBHLKP1FLA3KCvVooLXv4g8RwZE93z>

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**JUAN CARLOS GARCIA CASTREJON** | Fecha:2021-06-04 22:16:15 | Firmante

m7FHKc9Q+W4jNaXR6tq6JVPnDlMC6J8FhLh5KGI6he939+NwNfYRoHms+/tuwsCc4uDWzQgB5DnWIZNg8g54EqOT9J2AWiSu1SAAeo+SMAvZJIYMHDbYqvo+uKsX7yoaswN96KUF1ZeJK4zgj1F5J+B3TD063ph5xsQgolh84XHDdQr2XmGhtDBDvEdgTAEn5JCPuAbe8OXqh61XBwAIFT6TBEp4UipsSBBJHV/9vBlwq/vuexkX4ftlghxei0D1DZjUh36zPAIGPSYWOktKbdq4fG9KRh3EJRxGuNTz9Pd1poaHC207IFsoLfl2oTMIv6icDqri9vr3s/Bld7v+sw==

**JOSE ALFREDO ARIZA ESPINOZA** | Fecha:2021-06-04 22:41:53 | Firmante

f3pQ9QivC/MJWg7z0AqVo557eMhaznD4WonZmXvLwMOVSp55UmVKHP/w8FRJlImvu/6JVNNW7Fy6YXBrspdwh2JkSWMt+31OByFOUQ1fBTK3grbkk98dYikWLwrl+fCWEbTSk03mfJJMNNMxBdJvbt+Szpwdm5Nz7vDzpQJs6cEX6kLm0mizVVI3CuAE0Psy8OIfDwkvJn1/3dilGIM8hkRzytwDiw3vJTRiU9SdvUkooj/SHaOTdmTFddjZdeYd4KtI94Hh6csjYKfqFIQ8R62yT7gMCSjblsyeV4wD4KgeBTaz9AsBzPyZMA0h68a2ieLIH/HtAETWvCbRTbaA==

**MAYRA KARINA ZEZZATI FLORES** | Fecha:2021-06-05 19:55:24 | Firmante

KPcPtWjt7ZgB4bYD6qVPxa5kdG8VNU553ZJWU7Zf2iCetzi9CCqQGtTE424/aWfekHZ5Eo2m4UH9gKh0lleeAayGsf1LguTURIU8meiawpkGQgvdHgy7buhufqU8rAjc15WqSn97Amu6ExG0l4wyolXOc1o+yDZDnvXD22yJageyen6dg3e/Ogk4drt8AfrvezK5QPeUL0JS1XLBEXuM12Y8fBmmQ2bPMc2xtzPM6D1wko1cG7P7jXX83emN1pE3hNYMgfMcPAFOLWjz+y8CHymAA5BNthZ/USKOpw+VXERtV8GDEdBOLxfAs2uk97crilYtxPZdhkRi8hcbFRQcQ==

**VICTOR ULISES LEV CONTRERAS LOERA** | Fecha:2021-06-08 13:13:33 | Firmante

RDQoG7jL1tXv31IA3ZH+thPx2zjDXHb0kO7wxi1Yv2K0u3Ugpy1m5abuRGSguCrDINGKFFlBS8pKfMj9/aY8DrqbcHOFWwM+0CDPdNqCUth5iOcMA7d2Xk1tnwJTHSE/euLYjqYW3zF+S+96AZaPjUyreCNGZ1KwMYOz2sPd23UEzQ5MBesnnY5Oah76JUVhsubfcReBBhC/ppLsGycLE21WSjw0WTFWFnVzhl2SdXnf7w9ZBhs1W1fZ8FpR2mtzKICpBKWuj9lZRSeTB/DzA2nawlcF5gzD66r7WVN7CJ1QjeF2poA2MkNI77X20b3KxQ0GqevTkOhmgPUeQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



p7QUnf

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/GeE1WuQe52GVhsmnMjGni9jppWl7US7r>