



SISTEMA DE LEVITACIÓN ULTRASÓNICA PARA ANÁLISIS ESPECTROSCÓPICO DE MUESTRAS LÍQUIDAS



Como Requisito para obtener el grado de:
Maestro en Optomecatrónica

Asesor:
Dr. Marco Antonio Meneses Nava

Estudiante:
Ing. Ricardo Abraham Valencia Murillo

Julio de 2017
León, Guanajuato, México

*A mis padres,
a mi hermano
y a mi novia.*

Agradecimientos

Primeramente le agradezco a mis padres *Carlos y Blanca*, por su inmenso apoyo, confianza y sobre todo consejos que me han formado en una persona íntegra, que gracias a ellos es posible lograr este objetivo tan importante en mi vida.

A mi hermano por motivarme y darme su apoyo siempre que lo necesite.

Agradecer a mi novia *Alfa* por su apoyo incondicional, comprensión y confianza durante todos estos años que ha estado a mi lado.

Le agradezco a mi asesor de tesis, *Dr. Marco Antonio Meneses Nava* por darme la confianza para realizar este trabajo, por su invaluable ayuda, consejos y conocimientos aplicados en la realización de este trabajo de tesis.

A mis sinodales *Dr. Victor Ulises Contreras Loera* y *M.I. Ricardo Valdivia Hernández* les agradezco por el tiempo dedicado en la revisión del presente trabajo y sus comentarios oportunos de este mismo, por su constante participación en el presente trabajo.

Al *Grupo de Propiedades Ópticas de la Materia* del CIO por abrirme sus puertas y brindarme lo necesario para desarrollar este trabajo.

Al *Centro de Investigaciones en Óptica* por brindarme la oportunidad de pertenecer a esta institución y llevar a cabo mis estudios de maestría, gracias por darme la oportunidad de superarme personal y profesionalmente.

A mis compañeros y amigos con los cuales pase grandes momentos.

Por último pero no menos importante, agradezco al *CONACYT* por el apoyo económico otorgado durante el estudio de la maestría a través de su sistema de becas.

Resumen

En este trabajo se construye un sistema de levitación de partículas, y evalúa para su posible uso en conjunto con la técnica Espectroscopia de rompimiento inducido por láser (LIBS) para determinar la composición química de muestras líquidas. El diseño mecánico del levitador implica el desarrollo de programas con variación de parámetros específicos, y así simular la presión acústica para diferentes geometrías mediante un método matricial recientemente propuesto, esto para la determinación óptima de la geometría de las piezas que constituyen el levitador. En la cual el campo de potencial acústico de la onda estacionaria generada en la cavidad del levitador cumple las condiciones para levitar partículas de tamaño adecuado y realizar análisis espectroscópico. Posteriormente, con estas condiciones se diseña, implementa un soporte de sujeción para las piezas mecánicas que constituyen el levitador y se caracteriza el desempeño del sistema de levitación acústica.

Índice general

Agradecimientos	v
Resumen	vii
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Contribuciones de este trabajo	2
1.3 Estructura de la tesis	3
2. Conceptos de levitación acústica y simulación numérica	5
2.1 Definición y clasificación de sistemas de levitación	6
2.1.1 Clasificación de levitadores uniaxiales	7
2.1.2 Métodos de simulación numérica	7
2.2 Simulaciones numéricas	8
2.2.1 Método matricial	8
2.2.2 Metodología	13
2.2.3 Verificación del método matricial	17
2.2.4 Distancia y frecuencia de resonancia	22
2.2.5 Cálculo del tamaño de partícula	28
3. Diseño Mecánico y eléctrico	31
3.1 Fuente de ultrasonido	31
3.1.1 Fuente de voltaje simétrica	32
3.1.2 Generador de funciones	35
3.1.3 Amplificación de señal en amplitud	36
3.1.4 Etapa de potencia	37
3.1.5 Integración de la fuente de ultrasonido	39
3.2 Mecanismo de sujeción y alineación	41
3.3 Caracterización del sistema	45

4. Sistema óptico de monitoreo de gota y estabilidad	51
4.1 Arreglo óptico	51
4.2 Metodología	53
4.3 Monitoreo de tamaño de gota	57
4.4 Estabilidad de la gota	59
5. Evaluación del sistema para espectroscopia LIBS	65
5.1 LIBS	66
5.2 Resultados experimentales	68
6. Conclusiones	73
6.1 Perspectivas	74
Referencias bibliográficas	75

Índice de figuras

2.1	Diagrama de levitador acústico uniaxial.	6
2.2	Clasificación de los sistemas de levitación por la geometría del transductor y reflector.	7
2.3	Diagrama esquemático del método matricial	8
2.4	Potencial acústico en un sistema experimental de levitación uniaxial compuesto por tres nodos de levitación, donde es posible levitar partículas con geometría esférica.	9
2.5	Diagrama de Cuerpo Libre de gota levitada.	9
2.6	Diagrama esquemático del método matricial [1].	11
2.7	Parámetros geométricos de simulación para los diferentes sistemas de levitación acústica.	13
2.8	Geometría del levitador acústico por medio de mallas que representan las superficies del emisor y reflector además de una malla que discretiza la cavidad acústica en $y = 0$	14
2.9	Graficación del potencial acústico (parte superior) y diámetro de gota (parte inferior) para un sistema de levitación plano-plano.	16
2.10	Potencial acústico relativo de un levitador acústico plano-plano	17
2.11	Potencial acústico relativo de un levitador acústico plano-cóncavo	18
2.12	Potencial acústico relativo determinado por el método matricial para el levitador acústico cóncavo-cóncavo	19
2.13	Potencial acústico relativo invariante a la orientación del sistema de levitación determinado por el método matricial.	20

2.14	Verificación del potencial acústico en la parte central del sistema de levitación cuando $x = 0 \text{ mm}$	21
2.15	Período de la Fuerza acústica de la onda estacionaria generada en la cavidad del levitador plano-plano	22
2.16	Período de la Fuerza acústica de la onda estacionaria generada en la cavidad del levitador cóncavo-cóncavo	23
2.17	Presión acústica como una función de la distancia h entre transductor y reflector de un sistema <i>plano-plano</i>	24
2.18	Presión acústica como una función de la distancia h entre transductor y reflector de un sistema <i>cóncavo-cóncavo</i>	25
2.19	Comparación de potencial acústico a diferentes distancias entre reflector y transductor a frecuencia fija para un mismo sistema.	26
2.20	Simulación de presión acústica en función de la frecuencia para determinar frecuencia de resonancia.	27
2.21	Posición de los nodos de levitación del sistema	28
2.22	Fuerza acústica necesaria para levitar gotas de agua en los nodos del sistema	29
2.23	Posición de los nodos de levitación en la parte central del levitador acústico.	30
3.1	Diagrama de bloques de fuente de ultrasonido.	32
3.2	Diagrama de bloques de fuente de regulación de voltaje.	33
3.3	Circuito electrónico de la fuente de voltaje regulado.	34
3.4	Circuito impreso de la fuente de voltaje.	34
3.5	Diagrama esquemático de generador de funciones ICL8038.	35
3.6	Diagrama esquemático de amplificador operacional no inversor.	36
3.7	Diagrama esquemático de la etapa de potencia de la fuente de ultrasonido.	37
3.8	Diagrama esquemático de un transformador de voltaje.	39
3.9	Circuito impreso de la fuente de ultrasonido.	39
3.10	Diagrama esquemático de fuente de ultrasonido.	40
3.11	Ensamble general de parte mecánica del sistema de levitación acústica.	41
3.12	Vista explosionada del ensamble general de las partes mecánicas que constituyen el mecanismo de sujeción y alineación (soporte) del sistema de levitación acústica.	42
3.13	Fuente de ultrasonido.	45

3.14 Onda senoidal medida a la salida del generador de funciones.	46
3.15 Onda senoidal medida después de la etapa de amplificación a ganancia: (a) mínima y (b) máxima.	46
3.16 Onda senoidal de alimentación del transductor en el rango de voltaje: (a) mínimo y (b) máximo.	47
3.17 Mecanismo de sujeción y alineación del sistema de levitación acústica: (a) inicial y (b) final.	48
4.1 Arreglo experimental del sistema de levitación acústica.	52
4.2 Diagrama de bloques del algoritmo propuesto para realizar análisis de tamaño de gota y análisis de estabilidad	53
4.3 Binarización de imágenes capturas por las cámaras del sistema de monitoreo: (a) cámara 1, (b) cámara 2.	54
4.4 Posición de los centros en los planos ortogonales correspondientes a la captura de la gota levitada en una misma imagen.	55
4.5 Evolución temporal del diámetro de gota a diferentes concentraciones de cloruro de sodio en agua	57
4.6 Evolución temporal del diámetro de gota	58
4.7 Seguimiento de la trayectoria de la partícula levitada	59
4.8 Desplazamiento relativo de la gota en 120 segundos.	60
4.9 Respuesta temporal del sistema de levitación sobre la gota levitada.	61
4.10 Desplazamiento relativo de la gota levitada en el intervalo de tiempo donde es estable.	61
4.11 Velocidad instantánea de la gota levitada en el espacio tridimensional.	62
4.12 Condiciones para las cuales existe la posibilidad de realizar espectroscopia óptica.	63
5.1 Principio del rompimiento inducido por láser.	66
5.2 Diagrama esquemático del arreglo experimental LIBS.	67
5.3 Espectros de emisión atómica de una solución acuosa que contiene Na a 1 <i>ppm</i>	68
5.4 Espectros de emisión atómica de una solución acuosa que contiene Al a 3 <i>ppm</i>	69
5.5 Espectros de emisión atómica de una solución acuosa que contiene Al a 300 <i>ppb</i>	69
5.6 Espectros de emisión atómica de una solución acuosa que contiene Mn a 5 <i>ppm</i>	70

Índice de tablas

3.1	Descripción de las partes mecánicas que constituyen el soporte del sistema de levitación acústica.	44
3.2	Características eléctricas de la fuente de ultrasonido.	45
4.1	Calibración de cámaras CMOS del sistema de monitoreo.	56

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes

La levitación de partículas se ha utilizado ampliamente como un medio de manipulación de objetos libre de contacto, las cuales pueden ser analizadas químicamente por medio de técnicas espectroscópicas en combinación con técnicas de detección remota [2–5].

Actualmente, uno de los mejores métodos de levitación de aerosoles se basa en la técnica de balance electrodinámico (EDB), donde es necesario cargar eléctricamente a la partícula para su levitación [6]. Sin embargo, esta necesidad representa una limitación para el análisis de materiales no conductores. Además, la técnica requiere de altos voltajes para producir el campo electrostático, aumentando el costo y complejidad para la implementación de sistemas para monitoreo fuera del laboratorio.

Una alternativa para evitar estos inconvenientes es la levitación acústica. El principio básico de un levitador acústico es la generación de una onda estacionaria, generalmente en aire, entre un transductor y un reflector cóncavo separados por una distancia múltiplo entero de media longitud de onda. En un dispositivo con estas características, una pequeña muestra se levita en contra de la fuerza de gravedad por medio de la presión acústica generada, alcanzando el equilibrio estático en los planos nodales acústicos. Adicionalmente se puede construir un sistema más robusto que opera a voltajes más bajos y logra levitar con acústica cualquier tipo de material, lo cual no se logra con EDB.

La combinación de levitadores acústicos y técnicas espectroscópicas, en

particular la técnica Raman, ha resultado una herramienta de gran utilidad en el análisis químico. En general, el análisis de muestras líquidas a través de la levitación de gotas milimétricas y micrométricas se lleva a cabo empleando levitadores comerciales [7–10].

Un análisis de estabilidad de levitadores comerciales muestra que la desviación estándar, del movimiento de la partícula en dirección radial, oscila las $200\ \mu\text{m}$ [11]. Este rango de estabilidad ha limitado el análisis de partículas de menor dimensión y la combinación de levitadores acústicos con técnicas espectroscópicas como la espectroscopia de rompimiento inducido por láser (LIBS), donde la estabilidad o posición de la partícula es trascendental en cuanto a la reproducibilidad de los espectros obtenidos.

LIBS se ha utilizado para el monitoreo de partículas individuales, líquidas y en aerosol, para la determinación de su composición química elemental, en donde la señal de líquidos y aerosoles se optimiza a través de técnicas de levitación que permiten fijar la muestra en un punto específico del espacio para su ablación y posterior análisis químico [12].

1.2. Contribuciones de este trabajo

La investigación reportada en este trabajo de tesis hace cuatro aportaciones al conocimiento del fenómeno de levitación acústica.

Se aporta un paquete de programas para la simulación numérica de levitadores acústicos uniaxiales con geometría cóncava, cuyo propósito es modelar numéricamente los gradientes de presión y velocidad que permiten calcular espacialmente los nodos de la onda estacionaria en la cavidad del sistema de levitación y el tamaño de gota de agua que se puede levitar bajo ciertas condiciones de operación.

La segunda aportación es el desarrollo tecnológico realizado en el diseño del sistema optomecatrónico del levitador acústico, el cual está conformado por una fuente de control que permite ajustar la frecuencia de modulación a la frecuencia de resonancia y voltaje de operación del transductor tipo Langevin del sistema. Por la parte mecánica, se diseñó y fabricó un mecanismo de sujeción para transductor, reflector y amplificador mecánico del sistema de levitación considerando tanto el sistema óptico para monitorear la estabilidad radial y axial del sistema, como el arreglo óptico para realizar la espectroscopia LIBS en muestras líquidas.

La tercera aportación es el desarrollo de programas de cómputo para analizar la evolución temporal del tamaño de gota y la estabilidad radial y axial

de las partículas de agua levitadas, respectivamente. El primer programa analiza el cambio del tamaño de la gota en el tiempo debido a su evaporación por medio de la captura de imágenes sucesivas en una cámara; el segundo analiza la estabilidad axial determinando la posición espacial de la partícula levitada, lo cual se logra al capturar la imagen de la partícula levitada en un arreglo óptico ortogonal con una cámara. Ambos programas se realizaron para ejecutarse en tiempo real y forman parte de la automatización del sistema de análisis de la composición química de muestras líquidas.

La cuarta aportación es la prueba de concepto del uso de LIBS en gotas levitadas, para la detección de metales disueltos en agua.

1.3. Estructura de la tesis

En este trabajo se diseñó y construyó un sistema de levitación acústica, basado en los trabajos desarrollados por Andrade et al., [11] que permiten, además de reducir costos, levitar muestras sin cargarlas eléctricamente. Para lo cual se han establecido cuatro líneas de trabajo, las cuales serán descritas en esta tesis de la siguiente forma:

En el capítulo 2 se discuten los conceptos básicos de un levitador acústico uniaxial y su modelo matemático para simular numéricamente el campo de presión acústica en la cavidad del levitador. En el capítulo 3 se presenta el diseño electro-mecánico del sistema de levitación acústico uniaxial. Por otra parte, en el capítulo 4 se reportan los resultados obtenidos en la caracterización del sistema; esto es, el análisis de la evolución temporal del tamaño de gota y la estabilidad axial y radial de las partículas levitadas. En el capítulo 5 se presenta la evaluación del sistema de levitación uniaxial y se reportan los resultados obtenidos. Por último, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones generales y trabajo a futuro.

Capítulo 2

Conceptos de levitación acústica y simulación numérica

Un levitador acústico está conformado por un transductor¹ y un reflector. En donde, las múltiples reflexiones de la onda acústica en la región entre transductor y reflector generan una onda estacionaria con potencial acústico. El potencial acústico puede simularse numéricamente a través de técnicas convencionales como elemento finito. Recientemente se ha implementado un método matricial que da resultados similares a los obtenidos mediante el cálculo de elemento finito. Una de las ventajas del método matricial es que no requiere grandes recursos computacionales para llevar a cabo las simulaciones numéricas y el tiempo de cálculo es menor. Sin embargo, el método diverge al ser aplicado a geometrías cóncavas. Esta divergencia se puede evitar al incluir en las simulaciones un absorbedor en las fronteras, el cual elimina aquellas ondas que se propagan fuera de los límites del levitador. Este modelo matricial determina la distancia de resonancia entre transductor y reflector para una frecuencia dada; es decir, la distancia donde se genera una onda estacionaria en la cavidad del levitador con distribución de potencial acústico capaz de levitar partículas de geometría esférica. Los resultados obtenidos empleando el método matricial fueron comparados con los resultados obtenidos en la literatura mediante el cálculo de elemento finito [13].

¹Este elemento consiste de un transductor ultrasónico acoplado a un sonotrodo que amplifica la onda mecánica transmitida.

2.1. Definición y clasificación de sistemas de levitación

Las técnicas de levitación en combinación con técnicas espectroscópicas son de gran interés en áreas de la química analítica y la biología ya que se pueden estudiar muestras a escalas micrométricas sin mantener contacto durante el análisis. Para esto existen diferentes técnicas de levitación, entre ellas, magnética, electrostática y levitación acústica. Sin embargo, al comparar las técnicas entre sí, la levitación acústica presenta la ventaja de no requerir ninguna propiedad magnética y/o eléctrica del material a levantar.

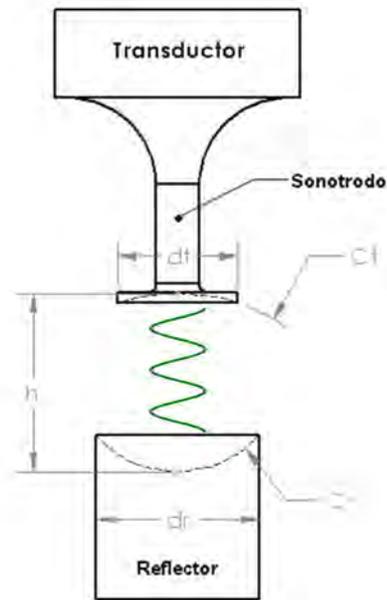


Figura 2.1: Diagrama de levitador acústico uniaxial.

Un levitador acústico uniaxial con sección transversal circular, Figura 2.1, consiste de un transductor tipo Langevin conectado a un sonotrodo que amplifica la onda mecánica que genera el transductor. Dicha onda acústica se propaga hasta un reflector, el cual está separado una distancia h igual a un múltiplo de media longitud de onda; donde la onda acústica se refleja y genera una onda estacionaria entre transductor y reflector capaz de levantar partículas.

2.1.1. Clasificación de levitadores uniaxiales

Los sistemas de levitación acústica uniaxiales se pueden clasificar por su geometría de la superficie de transductor y reflector como:

- **plano-plano:** en el cual ambos transductor y reflector tienen superficie con geometría plana.
- **plano-cóncavo:** donde transductor y reflector tienen superficie con geometría plana y cóncava, respectivamente.
- **cóncavo-cóncavo:** en esta configuración transductor y reflector, ambos tienen superficie con geometría cóncava.

Se emplea la nomenclatura transductor-reflector para denominar el tipo del sistema de levitación. En la Figura 2.2 se ilustran los diferentes tipos de sistemas de levitación acústica.

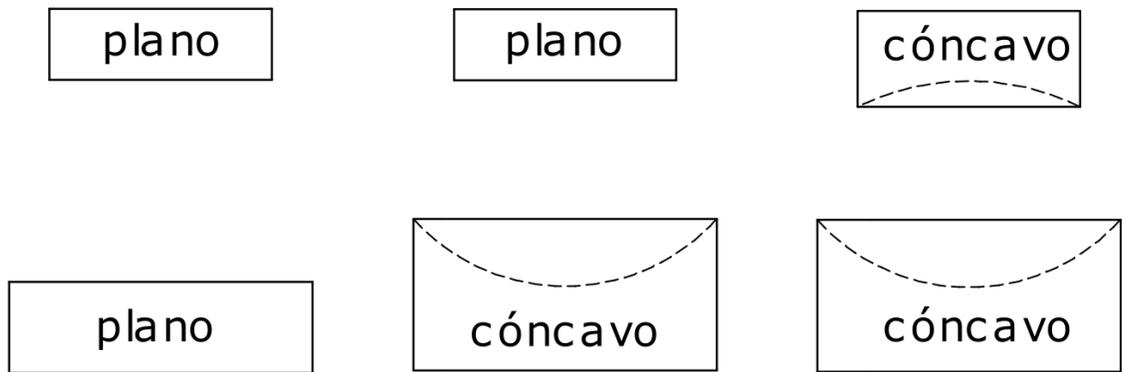


Figura 2.2: Clasificación de los sistemas de levitación por la geometría del transductor y reflector.

En esta tesis se analiza, construye y caracteriza el sistema de levitación cóncavo-cóncavo.

2.1.2. Métodos de simulación numérica

Los métodos más empleados para la simulación del potencial acústico de un levitador acústico con simetría axial son: elemento finito y modelo matricial. El primer método implica realizar un modelado complejo del levitador acústico y requiere recursos computacionales avanzados.

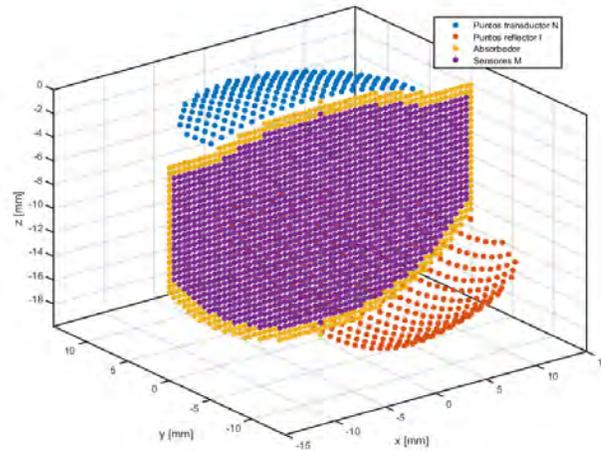


Figura 2.3: Diagrama esquemático del método matricial .

Por otra parte, el método matricial simplifica el modelado del sistema y reduce el tiempo computacional a unos cuantos minutos; obteniendo resultados similares al elemento finito. Sin embargo, presenta cierta divergencia para geometrías no planas de reflector y transductor. Este inconveniente se soluciona al incluir en el cálculo un absorbente acústico en las fronteras del levitador acústico, Figura 2.3; el cual elimina aquellas ondas acústicas que se propagan fuera de los límites de la geometría del levitador.

2.2. Simulaciones numéricas

En esta sección se presenta la metodología empleada para la simulación de un levitador acústico uniaxial y se reportan las simulaciones realizadas para caracterizar numéricamente el sistema de levitación. Esto como parte de los resultados obtenidos en el paquete de programas para este propósito. Se incluyen también las gráficas generadas en la simulación y los parámetros de simulación empleados para su obtención, así como, la interpretación y análisis de los resultados obtenidos.

2.2.1. Método matricial

El método matricial se emplea para determinar el potencial acústico dentro de un levitador uniaxial, compuesto por un solo transductor y un reflector;

con el cual se puede predecir la posición de los nodos de levitación, Figura 2.4, y el tamaño de partícula que se puede levitar en dicha posición. Siendo esto último el objetivo principal de realizar simulaciones numéricas.

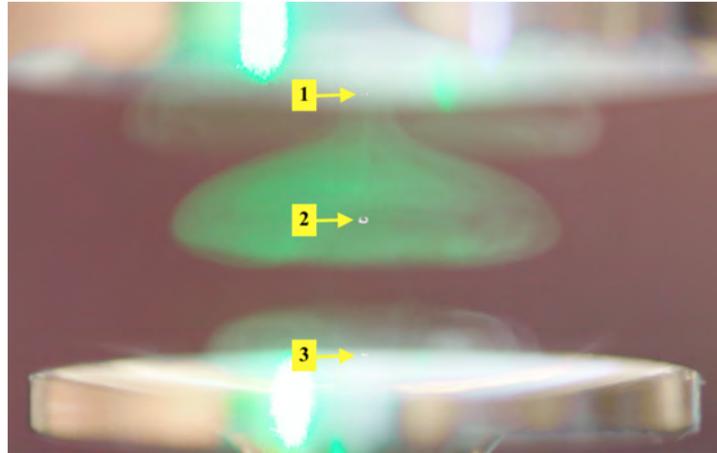


Figura 2.4: *Potencial acústico en un sistema experimental de levitación uniaxial compuesto por tres nodos de levitación, donde es posible levitar partículas con geometría esférica.*

Es necesario realizar un análisis estático de la partícula levitada a fin de determinar el tamaño de gota posible de levitar en los nodos del levitador acústico. Para esto se supone que la forma ideal de la partícula levitada es esférica, Figura 2.5, en la obtención de su modelo matemático.

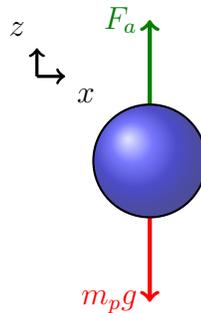


Figura 2.5: *Diagrama de Cuerpo Libre de gota levitada.*

El modelo matemático de la partícula se obtiene a partir de la *Primera ley de Newton*. El cual expresa que existe una fuerza F_a que actúa sobre la

partícula, de la misma magnitud pero en sentido opuesto, tal que contrarresta la fuerza que es causada sobre la partícula por el campo gravitatorio, logrando el equilibrio; por lo tanto, se dice que la partícula levita en la región existente entre transductor y reflector cuando se cumple esta relación. El tamaño de gota se obtiene a partir de las siguientes dos ecuaciones,

$$\sum F_z = 0 \quad (2.1)$$

$$F_a - (\rho V_p)g = 0 \quad (2.2)$$

dando como resultado,

$$R = \left(\frac{3}{4\pi} \left(\frac{F_a}{\rho g} \right) \right)^{1/3} \quad (2.3)$$

En la ecuación (2.3), R es el radio de la partícula, F_a es la fuerza acústica, ρ es la densidad de la partícula levitada y g es la gravedad que actúa sobre la masa de la partícula.

De acuerdo a la teoría de Gor'kov [14], la fuerza de radiación acústica en términos de energías cinéticas y potenciales promediadas en el tiempo de campos acústicos estacionarios de cualquier geometría; cuando se aplican a pequeñas partículas de fluido compresible, dan la fuerza como un gradiente del potencial acústico V ,

$$F_a = -\nabla V. \quad (2.4)$$

El potencial acústico V en función de la presión y velocidad acústica está dado por,

$$V = 2\pi R^3 \left(\frac{\overline{p^2}}{3\rho c^2} - \frac{\rho \overline{\dot{v}^2}}{2} \right), \quad (2.5)$$

donde, R es el radio de una partícula esférica inmersa en un fluido de densidad ρ y con velocidad de propagación de la onda acústica en el medio c . Asimismo, el potencial acústico relativo está definido por la ecuación (2.6),

$$\tilde{V} = \frac{V}{2\pi R^3}, \quad (2.6)$$

esta expresión se emplea para obtener la fuerza acústica que actúa sobre una partícula que no depende del radio de la partícula, la cual se determina por la ecuación (2.4). La velocidad acústica en el término $\overline{\dot{v}^2}$ de la ecuación (2.5) está dada por las siguientes dos ecuaciones,

$$\phi = -\frac{p}{j\omega\rho}, \quad (2.7)$$

$$\dot{v} = \nabla\phi, \tag{2.8}$$

Esta aproximación, que se basa en la teoría de la dispersión, sólo es válida para las partículas que son pequeñas en comparación con la longitud de onda $R \mid R/\lambda \ll 1$.

El campo de presión acústica en la cavidad del levitador, región existente entre transductor y reflector compuesta generalmente por aire, de acuerdo al método matricial propuesto por Andrade et. al. [1]; se calcula a partir de la *integral de Rayleigh*, que considera múltiples reflexiones de ondas entre el transductor y el reflector, en combinación con matrices de transferencia monocromática de acuerdo a la ecuación (2.9).

$$p_m = U_n \frac{\omega\rho c}{\lambda} \sum_{n=1}^N s_n \frac{e^{-jkr_{nm}}}{r_{nm}}. \tag{2.9}$$

La ecuación (2.9) calcula la presión acústica en el punto o sensor m dentro de la cavidad del sistema de levitación. Este modelo matemático considera las contribuciones de la vibración U_n de la onda mecánica que transmite cada subcelda de área s_n , en la que se discretiza la geometría del transductor, a cada sensor m ubicado entre transductor y reflector del sistema de levitación. Por lo tanto, a partir de esta ecuación se obtiene una matriz de presión acústica de la forma $\mathbf{P} = [p_1, p_2, \dots, p_M]^T$; tal como se observa en la Figura 2.6.

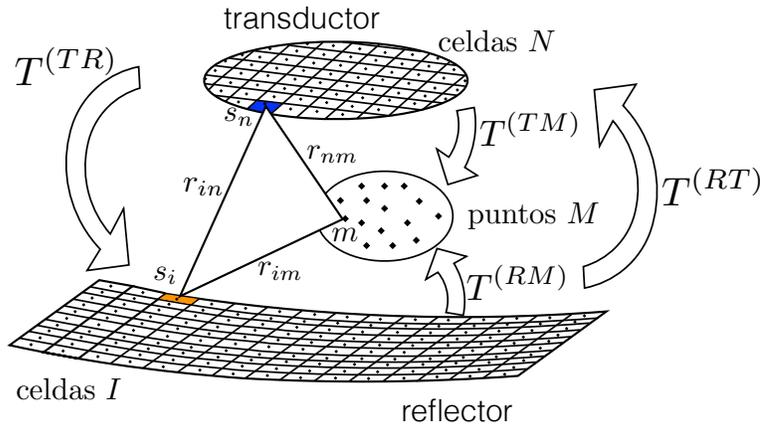


Figura 2.6: Diagrama esquemático del método matricial [1].

Los términos $T^{(TM)}$, $T^{(TR)}$, $T^{(RT)}$ y $T^{(RM)}$ del diagrama de la Figura 2.6, representan matrices de transferencia de transductor a sensores de me-

dición, reflector a sensores de medición, transductor a reflector, y reflector a transductor, respectivamente. Las cuales están dadas por las siguientes expresiones,

$$\mathbf{T}_{mn}^{(TM)} = s_n \frac{\exp(-jkr_{nm})}{r_{nm}}, \quad (2.10)$$

$$\mathbf{T}_{in}^{(TR)} = s_n \frac{\exp(-jkr_{in})}{r_{in}}, \quad (2.11)$$

$$\mathbf{T}_{ni}^{(RT)} = s_i \frac{\exp(-jkr_{ni})}{r_{ni}}, \quad (2.12)$$

$$\mathbf{T}_{mi}^{(RM)} = s_n \frac{\exp(-jkr_{mi})}{r_{mi}}, \quad (2.13)$$

En las ecuaciones (2.10) a (2.13) r_{nm} , r_{in} , r_{ni} , r_{mi} son distancias euclidianas entre celdas de transductor a celdas de los sensores de medición, celdas del reflector a celdas del transductor, celdas del transductor a celdas del reflector y celdas de sensores de medición a celdas del reflector, respectivamente. Así como, s_n y s_i son el área de cada celda en las que se discretiza el transductor y reflector.

Es necesario considerar las múltiples reflexiones que ocurren en la cavidad del levitador, para determinar la presión acústica en cada sensor m ubicado entre transductor y reflector, en función de la amplitud U_n y frecuencia f de vibración de cada celda n del transductor. Esto se logra mediante la multiplicación de las matrices de transferencia $T^{(TM)}$, $T^{(RM)}$, $T^{(TR)}$ y $T^{(RT)}$; tal como, se expresa en la ecuación (2.14) [1].

$$\begin{aligned} \mathbf{P} = & \left(\frac{\omega\rho c}{\lambda}\right) \mathbf{T}^{(TM)}U + \left(\frac{\omega\rho c}{\lambda}\right) \left(\frac{j}{\lambda}\right) \mathbf{T}^{(RM)}\mathbf{T}^{(TR)}U \\ & + \left(\frac{\omega\rho c}{\lambda}\right) \left(\frac{j}{\lambda}\right)^2 \mathbf{T}^{(TM)}\mathbf{T}^{(RT)}\mathbf{T}^{(TR)}U \\ & + \left(\frac{\omega\rho c}{\lambda}\right) \left(\frac{j}{\lambda}\right)^3 \mathbf{T}^{(RM)}\mathbf{T}^{(TR)}\mathbf{T}^{(RT)}\mathbf{T}^{(TR)}U + \dots, \end{aligned} \quad (2.14)$$

En la ecuación (2.14), la constante $\omega\rho c/\lambda$ que multiplica a las matrices de transferencia debe utilizarse cuando el transductor emite la onda acústica. En cambio, cuando la onda acústica reflejada llega al transductor, comienzan las múltiples reflexiones, la constante $\omega\rho c/\lambda$ debe multiplicarse por $(j/\lambda)^n$, indicando que hubo un cambio de fase en la onda en la n -ésima reflexión.

El término $\mathbf{U} = [U_1, U_2, \dots, U_N]^T$ es un vector que contiene la amplitud de vibración U_n de cada celda n del transductor; el transductor se discretiza en N puntos de área s_n .

2.2.2. Metodología

Para realizar la simulación numérica de los diferentes tipos de sistema de levitación acústica se creó un paquete de programas en *MATLAB*[®]. A continuación, se describen en forma general los pasos necesarios para realizar la simulación.

Paso 1: Definición de parámetros de simulación

Los parámetros de simulación se dividen en parámetros: físicos y geométricos. Los parámetros físicos están conformados por las propiedades físicas de la cavidad y el transductor del sistema de levitación. Esto es, la amplitud y frecuencia de vibración (U, f) del transductor; así como, la densidad del medio de propagación ρ y la velocidad del sonido c en el medio de propagación. Por otra parte, los parámetros geométricos están conformados por la geometría propia de los componentes del levitador acústico según la Figura 2.7.

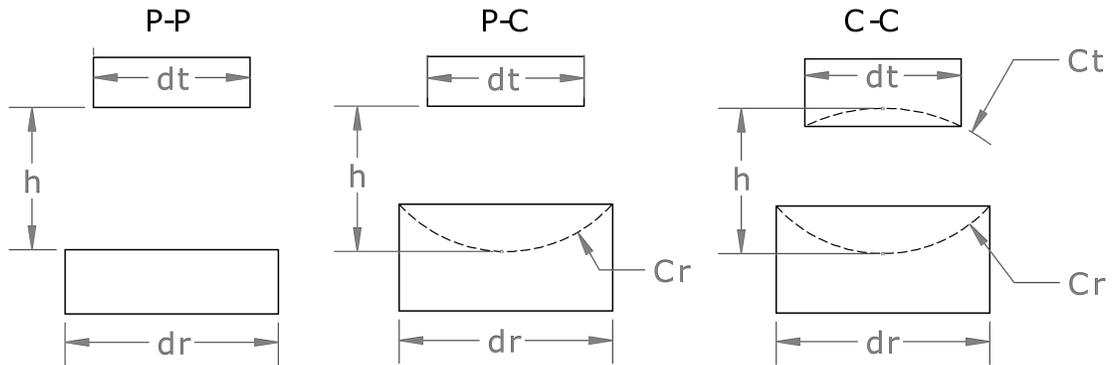


Figura 2.7: Parámetros geométricos de simulación para los diferentes sistemas de levitación acústica.

La frecuencia angular $\omega = 2\pi f$ y la longitud de onda λ en la ecuación de presión acústica son parámetros dependientes de la frecuencia f y la velocidad

de propagación c en el medio; esto se expresa en la siguiente ecuación,

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (2.15)$$

Paso 2: Definición de la geometría del sistema de levitación

En base a los parámetros geométricos del sistema de levitación, se generan matrices con la información del transductor y reflector. Además, se genera una matriz de dos dimensiones con la posición (x, z) de los puntos de detección en el plano central de la cavidad del levitador; de esta manera se crea una malla central con sensores la cual es suficiente para determinar la presión calculada². En la Figura 2.8 se muestra la definición de la geometría del sistema de levitación cóncavo-cóncavo.

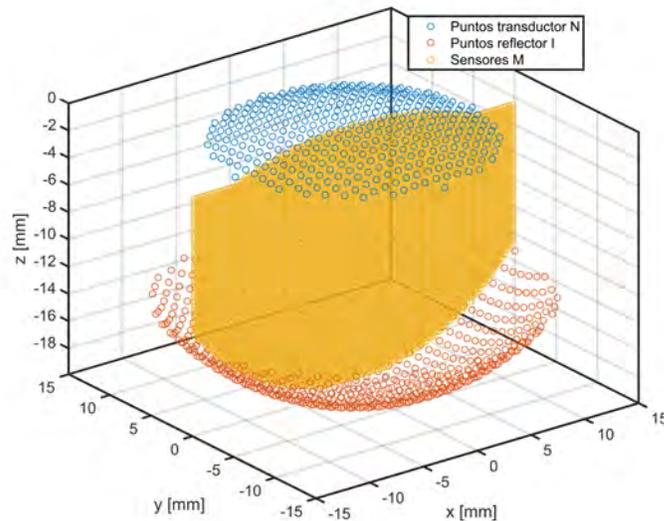


Figura 2.8: Geometría del levitador acústico por medio de mallas que representan las superficies del emisor y reflector además de una malla que discretiza la cavidad acústica en $y = 0$.

²El sistema de levitación tiene geometría axial, entonces los semiplanos tomados a partir de la parte central (mediatriz) presentan idénticas características. Por lo tanto, se puede reconstruir el campo de presión 3D a partir de los resultados de presión 2D obtenidos, al realizar una revolución de 180 grados alrededor del eje central.

Paso 3: Cálculo de las matrices de transferencia

Se calculan las matrices de transferencia mediante las ecuaciones (2.10) a (2.13), las cuales generan las matrices $\mathbf{T}^{(TM)}$, $\mathbf{T}^{(RM)}$, $\mathbf{T}^{(TR)}$ y $\mathbf{T}^{(RT)}$.

Paso 4: Cálculo de la presión acústica

Se calcula el campo de presión acústica en la cavidad del levitador empleando la ecuación (2.14), la cual determina la contribución de cada una de las múltiples reflexiones existentes entre transductor y reflector. En donde, el criterio de convergencia de la ecuación (2.14) es un número entero de reflexiones o términos N_t , o bien, cuando la contribución de presión es aproximadamente nula o converge a un valor numérico et. al. Andrade [1]. Cabe mencionar que un levitador con configuración plano-plano tiene convergencia exponencial a diferencia de un cóncavo-cóncavo, donde se deben considerar un mayor número de reflexiones.

Paso 5: Cálculo del potencial acústico y fuerza acústica

Se calcula el potencial acústico de la onda estacionaria generada en la cavidad del levitador mediante la ecuación (2.5) a partir del campo de presión obtenido en el paso anterior; y con la ecuación (2.4) se calcula la fuerza acústica en el plano central del sistema.

Paso 6: Cálculo del tamaño de partícula

Una vez determinada la fuerza acústica en el plano central del levitador acústico uniaxial se calcula el tamaño de partícula que es posible levitar en los nodos de levitación, a partir del modelo matemático de la ecuación (2.3).

Paso 7: Graficación

Por último, se grafican los resultados obtenidos mediante la simulación numérica para su análisis e interpretación; tal como, se muestra en la Figura 2.9 donde se indica la posición de los dos nodos de levitación existentes. De acuerdo a las simulaciones es posible levitar partículas de agua de hasta $350 \mu\text{m}$ de diámetro.

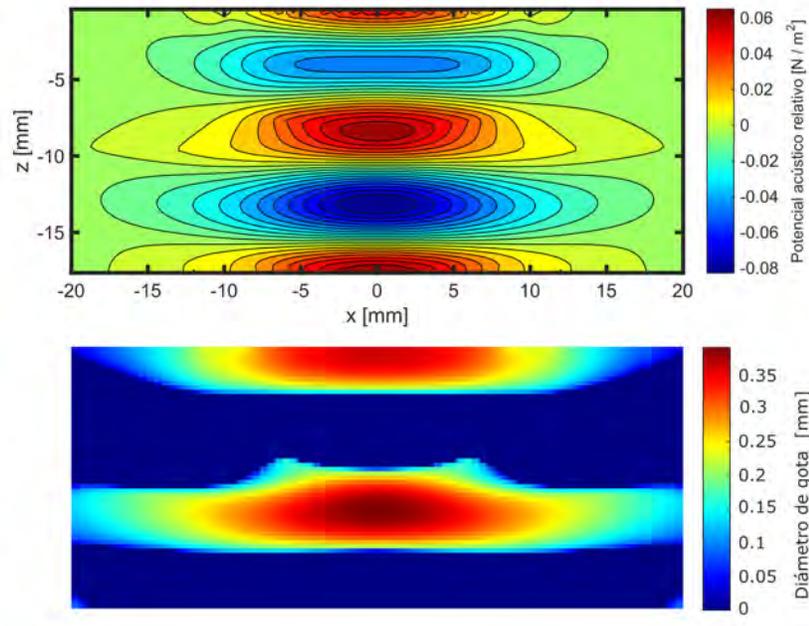


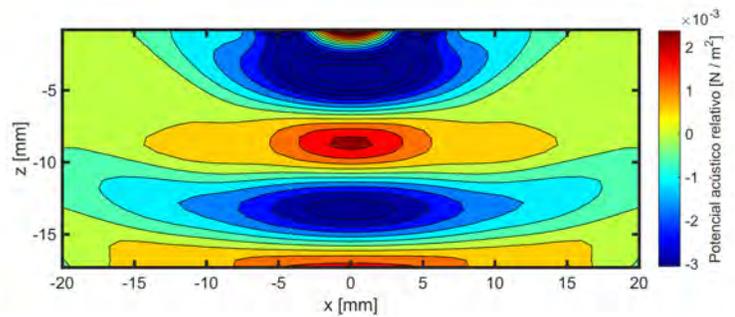
Figura 2.9: Graficación del potencial acústico (parte superior) y diámetro de gota (parte inferior) para un sistema de levitación plano-plano.

2.2.3. Verificación del método matricial

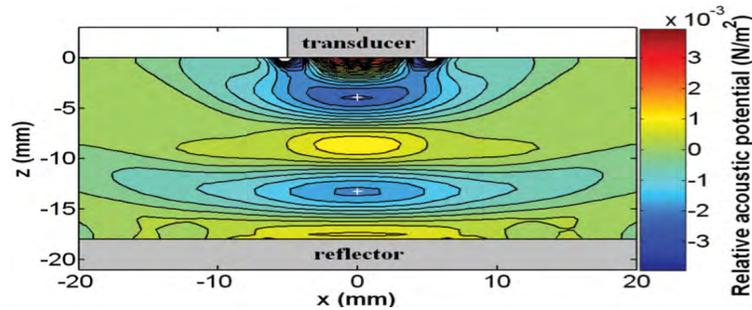
Se realizaron simulaciones de potencial acústico para sistemas de levitación plano-plano, plano-cóncavo y cóncavo-cóncavo; como parte de la verificación del programa diseñado. Los resultados obtenidos se comparan conforme a lo reportado en la literatura empleando este mismo método [1] para los dos primeros casos y por elemento finito [13] para el tercer caso.

Caso 1: Configuración plano-plano

Se verifica que para este caso los valores y la forma de potencial acústico obtenidos con la simulación concuerdan con lo reportado en la literatura, Figura 2.10. Por lo que, se dice que con la simulación se tiene un análisis tanto cualitativo como cuantitativo del potencial acústico de la onda estacionaria generada entre transductor y reflector.



(a) Método matricial programado.

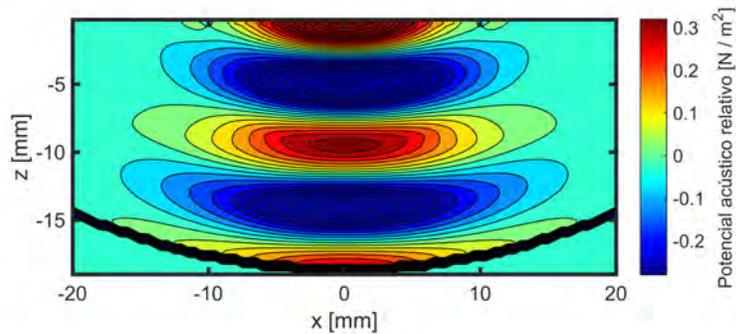


(b) Fuente: Andrade et al. [1].

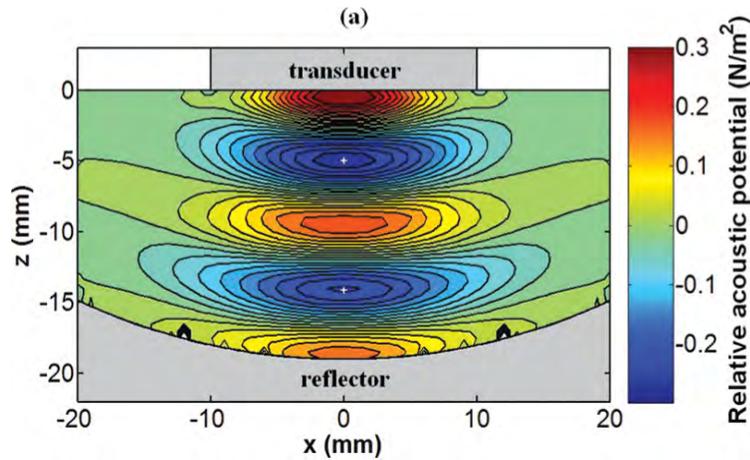
Figura 2.10: Potencial acústico relativo de un levitador acústico plano-plano (frecuencia de resonancia $f = 20 \text{ kHz}$, distancia entre reflector y transductor $h = 18 \text{ mm}$ y diámetro de transductor = 10 mm).

Caso 2: Configuración plano-cóncavo

En la Figura 2.11 se realiza la comparación del potencial acústico relativo determinado en la simulación, en donde por inspección de ambas gráficas se concluye que son muy parecidas; por lo que, nuevamente para este caso se tiene un análisis cualitativo y cuantitativo realizado con el método matricial.



(a) Método matricial programado.

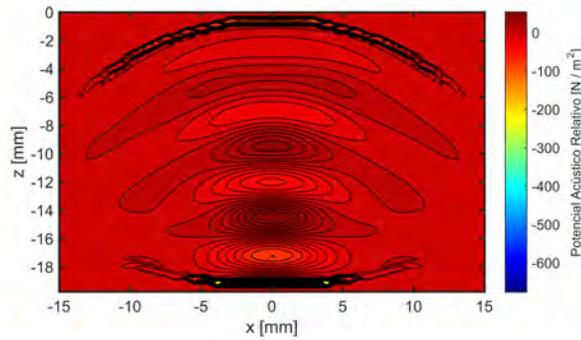


(b) Fuente: Andrade et al. [1].

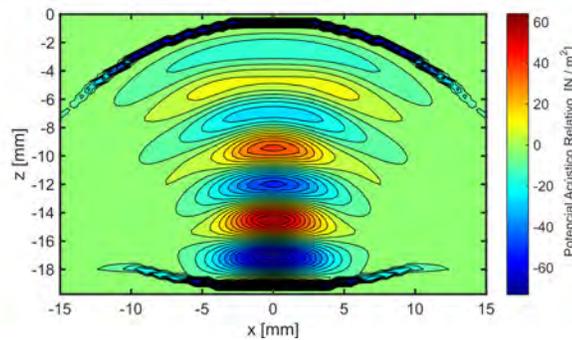
Figura 2.11: Potencial acústico relativo de un levitador acústico plano-cóncavo (frecuencia de resonancia $f = 20$ kHz, distancia entre reflector y transductor $h = 19$ mm, diámetro de transductor = 20 mm y radio de curvatura de reflector = 70 mm).

Caso 3: Configuración cóncavo-cóncavo

Para este caso en particular, el método matricial no presenta convergencia debido a las curvaturas en los elementos del sistema de levitación. Por lo cual, en analogía con lo que se realiza en elemento finito para simular la presión acústica de levitadores de cualquier geometría, se incluye al método matricial un absorbedor acústico en las fronteras [15]; el cual elimina aquellas ondas que se propagan más allá de los límites de la geometría del levitador acústico.



(a)



(b)

Figura 2.12: *Potencial acústico relativo determinado por el método matricial para el levitador acústico cóncavo-cóncavo (frecuencia de resonancia $f = 38.15$ kHz, distancia entre reflector y transductor $h = 19.9$ mm, radio de curvatura de reflector $C_r = 20.3$ mm, diámetro de transductor $d_t = 22$ mm y radio de curvatura de reflector $C_t = 35$ mm): (a) sin absorbedor, (b) considerando absorbedor acústico.*

En donde, originalmente resulta que se tiene un análisis cualitativo de la

forma del potencial acústico (Figura 2.12a), y al incluir el absorbedor en el cálculo del potencial acústico se obtiene un análisis tanto cualitativo como cuantitativo del campo de potencial acústico (Figura 2.12b); esto se corrobora conforme a lo reportado en la literatura realizado por elemento finito.

Invariancia en la orientación del sistema

La orientación del sistema se refiere a la posición del transductor y reflector del levitador respecto a un mismo sistema de referencia. La orientación típica del levitador es el transductor en la parte superior y reflector en la parte inferior, respectivamente. Sin embargo, existe la variante en la cual se invierte la posición de transductor y reflector del levitador acústico; se le conoce como sistema invertido.

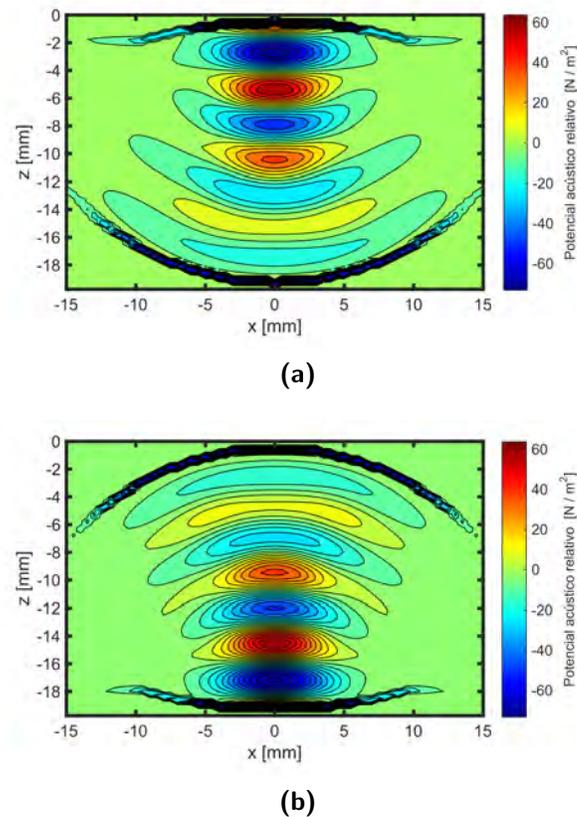


Figura 2.13: *Potencial acústico relativo invariante a la orientación del sistema de levitación determinado por el método matricial.*

Por lo tanto, se realizó una serie de simulaciones con ambas orientaciones para observar el efecto en los resultados según la orientación del sistema como es de esperarse, el potencial acústico de la onda estacionaria generada entre transductor y reflector no presenta variaciones con la orientación del sistema; tal como se observa en la Figura 2.13. Esto como parte de la verificación de la invariancia de los resultados obtenidos en función de la orientación del sistema.

Por cuestiones de visualización y para verificar que el potencial acústico es igual, en la gráfica de la Figura 2.14 se superpone el potencial acústico de la Figura 2.13a y Figura 2.13b en la coordenada $x = 0 \text{ mm}$ a lo largo del eje z , respectivamente. En donde, se observa que la amplitud del potencial acústico corresponde en ambas casos para cada coordenada z .

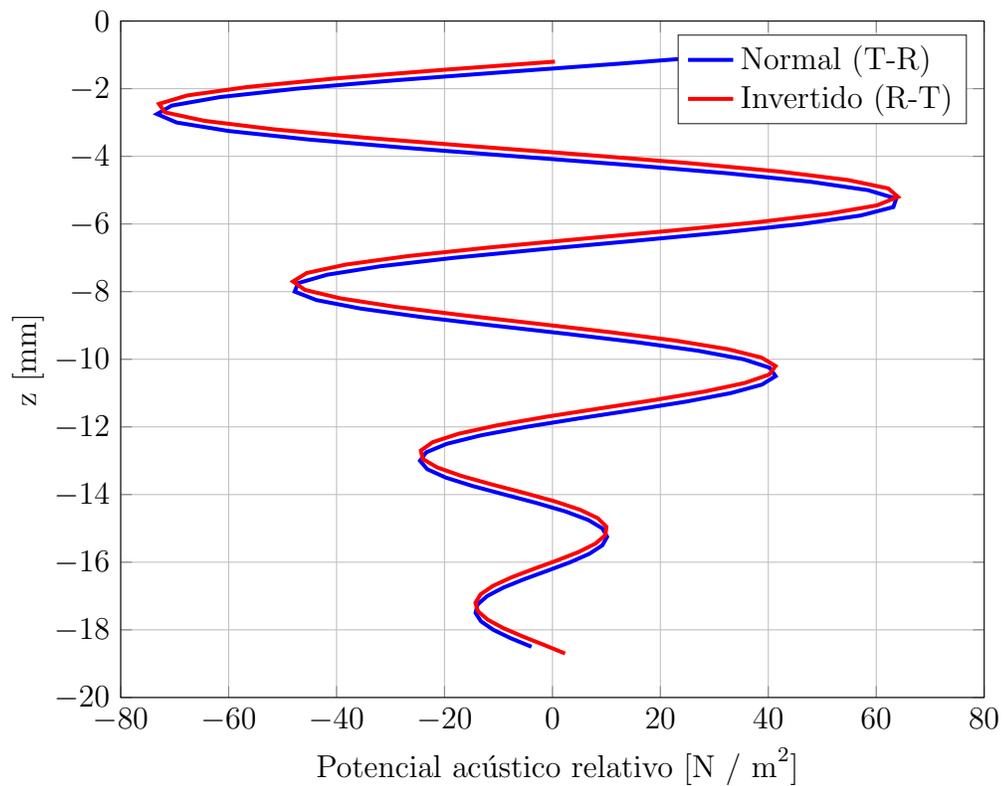


Figura 2.14: Verificación del potencial acústico en la parte central del sistema de levitación cuando $x = 0 \text{ mm}$.

2.2.4. Distancia y frecuencia de resonancia

En un levitador con geometría rectangular las condiciones óptimas para levitar una partícula son cuando la distancia entre transductor y reflector es un múltiplo de la mitad de la longitud de onda [16]; esta relación se mantiene para levitadores con secciones transversales circulares y superficies planas de transductor y reflector. En la Figura 2.15 se grafica el período de la fuerza acústica para un levitador plano-plano, donde este es $\Lambda \approx \frac{\lambda}{2}$.

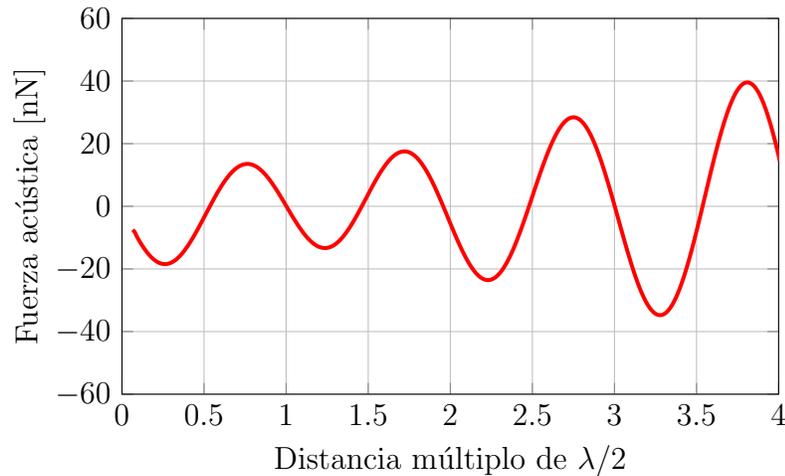
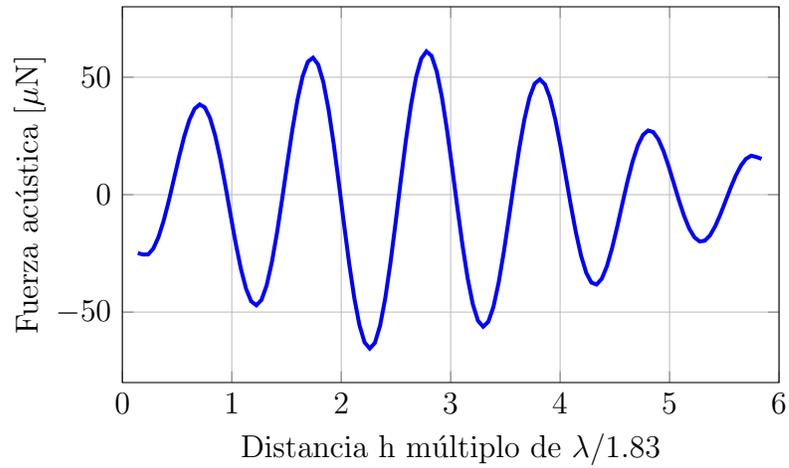


Figura 2.15: *Período de la Fuerza acústica de la onda estacionaria generada en la cavidad del levitador plano-plano con frecuencia de resonancia $f = 20 \text{ kHz}$.*

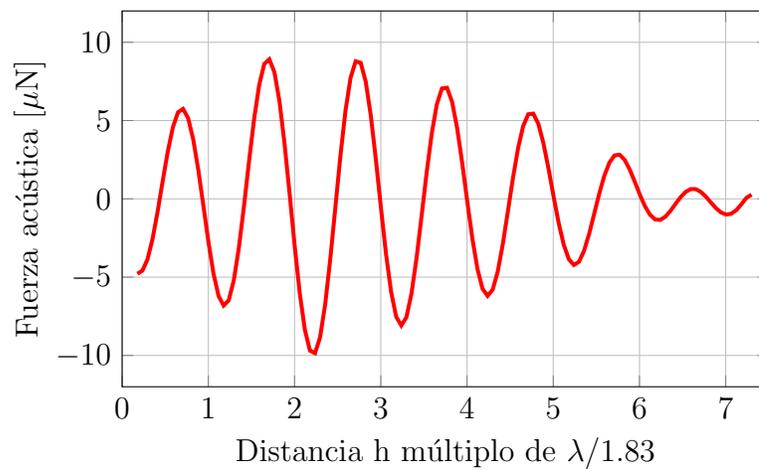
Sin embargo, la distancia de resonancia para un sistema de levitación cóncavo-cóncavo se determinó por medio de las simulaciones numéricas que las posiciones en las cuales se genera una onda estacionaria están ubicadas cuando la distancia entre transductor y reflector son múltiplo de $\lambda/1.83$. En la Figura 2.16 se grafica la fuerza acústica en $x = 0 \text{ mm}$ a lo largo del eje z para un sistema con las mismas características pero a diferentes valores de frecuencia, donde de la simulación realizada resulta que el período de la fuerza está dado por

$$\Lambda \approx \frac{\lambda}{1.83}, \quad (2.16)$$

para un sistema de levitación cóncavo-cóncavo independientemente de la frecuencia de simulación. Sin embargo, este valor depende del radio de curvatura del reflector [13].



(a)



(b)

Figura 2.16: *Período de la Fuerza acústica de la onda estacionaria generada en la cavidad del levitador cóncavo-cóncavo con frecuencia de resonancia : (a) $f = 35.0 \text{ kHz}$ y (b) $f = 43.75 \text{ kHz}$*

Con la finalidad de comprobar lo anterior, se realiza la simulación del potencial acústico de la onda estacionaria generada en la cavidad del levitador para un sistema *plano-plano* con parámetros de simulación $d_t = 20\text{ mm}$, $d_r = 40\text{ mm}$, frecuencia de resonancia $f = 20\text{ kHz}$, desplazamiento $U = 1\text{ }\mu\text{m}$ y distancia h entre transductor y reflector variable. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2.17, donde se encuentra que existe un valor pico máximo de presión al igual que de potencial acústico en $h = 9.563\text{ mm}$. Por lo cual, se dice que esta posición del transductor respecto al reflector es una distancia óptima para levitar una partícula esférica de mayor tamaño en comparación otros dos valores pico existentes en la gráfica; ya que a estas distancias se puede levitar gotas de menor tamaño debido a que el valor de presión acústica decae un 90 % de su amplitud en $h = 9.563\text{ mm}$.

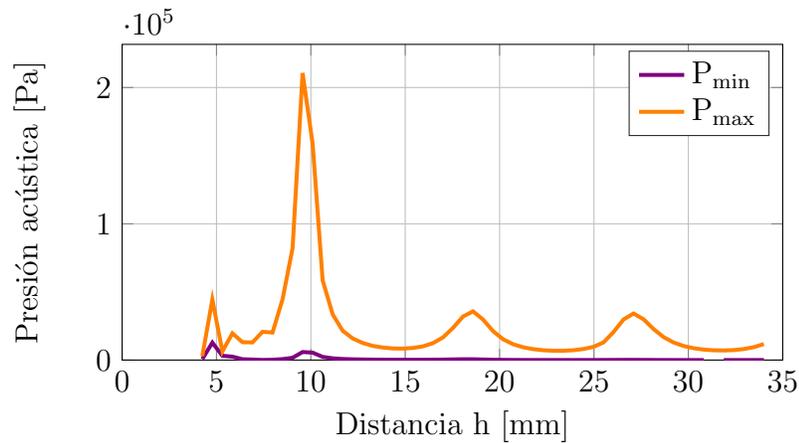


Figura 2.17: Presión acústica como una función de la distancia h entre transductor y reflector de un sistema plano-plano.

También se simuló para un sistema *cóncavo-cóncavo* con las mismas condiciones que el levitador *plano-plano* anterior y distancia h variable entre reflector y transductor. Los resultados obtenidos se reportan en la Figura 2.18, se puede observar en la gráfica que existen diferentes valores picos de presión a lo largo del eje horizontal, donde su magnitud no decae significativamente como en el sistema plano-plano. Por lo que, se concluye que hay diferentes distancias óptimas en las cuales idealmente es posible levitar partículas y es por esto que en esta tesis se diseñó el sistema de levitación con geometría cóncava en el cual se pueda ajustar a estas diferentes distancias. Por ejemplo, en las distancias $h = 19.13\text{ mm}$ y $h = 27.63\text{ mm}$ es probable

levitar partículas del mismo tamaño; así como, dentro de este intervalo en $h = 23.38 \text{ mm}$ partículas del doble de tamaño.

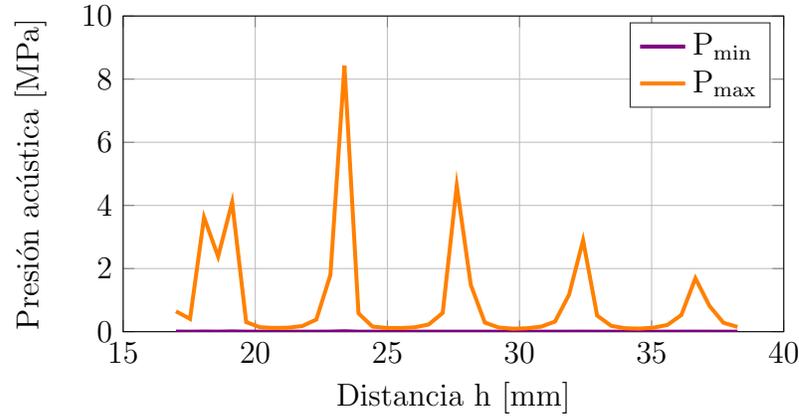
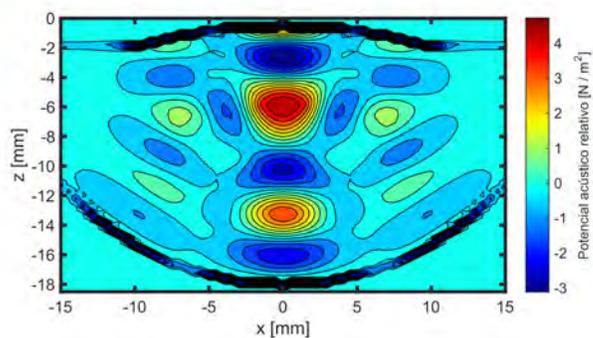


Figura 2.18: Presión acústica como una función de la distancia h entre transductor y reflector de un sistema cóncavo-cóncavo.

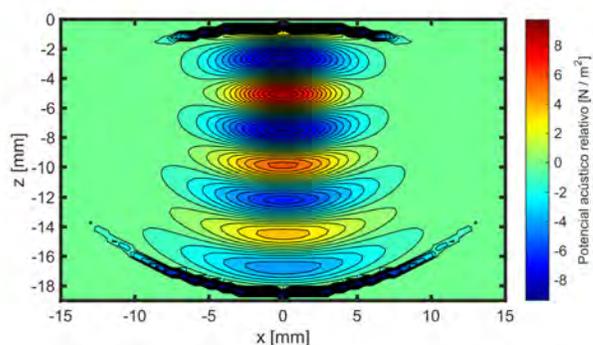
En resumen, en un sistema de levitación *cóncavo-cóncavo* existen diferentes distancias óptimas locales en las cuales es probable lograr levitar a diferencia del sistema *plano-plano*, en el cual solo existe una distancia h en la cual la presión acústica es máxima. Además, la magnitud del potencial acústico en un sistema cóncavo-cóncavo es aproximadamente 40 veces mayor que para un sistema plano-plano; lo cual indica que se pueden levitar partículas de mayor tamaño con este tipo de sistema de levitación. Cabe mencionar que cada valor pico de presión indica una posible distancia de resonancia en ambas configuraciones del sistema de levitación.

Los valores picos de presión acústica en las gráficas de las Figuras 2.17 y 2.18 son muy angostos, lo cual implica que al mínimo desplazamiento Δ_h fuera de las distancias de resonancia h_r , se pierden las condiciones del sistema de levitación para levitar partículas esféricas. Por lo tanto, se realizó un análisis numérico en cual se determinó que el valor de potencial acústico decae más del 50 % para desplazamientos $\Delta_h = \pm\lambda/16$ en ambos casos. Esto implica que si la distancia entre transductor y reflector no es la *distancia de resonancia*, **no se genera** la onda estacionaria en la cavidad del levitador.

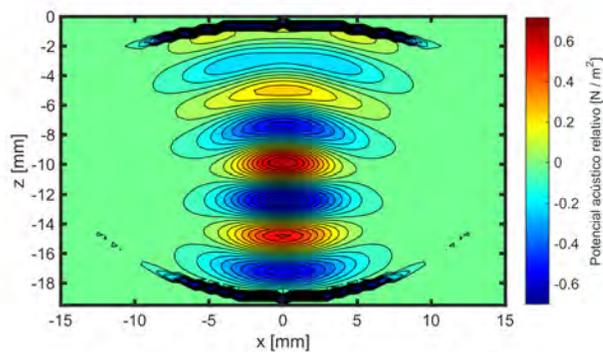
En la Figura 2.19 se muestra el campo de potencial acústico para las mismas condiciones que el levitador *cóncavo-cóncavo* anterior cuando se encuentra a la segunda distancia de resonancia $h_{r_2} = 19.13 \text{ mm}$ (Figura 2.18), y cuando se introduce un desplazamiento negativo y positivo de la misma



(a) $h = 18.59 \text{ mm}$



(b) Distancia de resonancia $h_r = 19.13 \text{ mm}$



(c) $h = 19.67 \text{ mm}$

Figura 2.19: Comparación de potencial acústico a diferentes distancias entre reflector y transductor a frecuencia fija para un mismo sistema.

magnitud, Figuras (2.19a y 2.19c), respectivamente. Con esto se verifica que es posible levitar en un cierto intervalo fuera de la distancia de resonancia, pero no bajo las mismas condiciones, debido a que cambia la forma de los nodos de levitación. Es decir, en cada desplazamiento cambia el tamaño de gota y la posición en la que esta puede levitar debido al cambio en la distribución del campo de potencial acústico; lo cual es crucial en la estabilidad de la partícula.

Frecuencia de resonancia

Se realizó una simulación de la presión acústica del sistema cóncavo-cóncavo anterior en función de la frecuencia para determinar la frecuencia de resonancia de dicho sistema. Esto como parte de evaluar el efecto de las posibles variaciones en la frecuencia de operación del transductor del levitador en la generación de la onda estacionaria entre transductor y reflector. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 2.20 donde la frecuencia de resonancia es $f = 40 \text{ kHz}$ debido a que es la frecuencia para la cual se tiene valor de presión acústica máxima y es evidente que el sistema de levitación uniaxial es sensible a las variaciones de frecuencia; se determinó numéricamente que no se tiene presión acústica para variaciones del 1% del valor de la frecuencia de resonancia; esto implica que el sistema esta fuera de resonancia y no se genera la onda estacionaria entre transductor y reflector del levitador. Por lo cual, en su implementación es necesario emplear una fuente de ultrasonido que no presente variaciones de frecuencia.

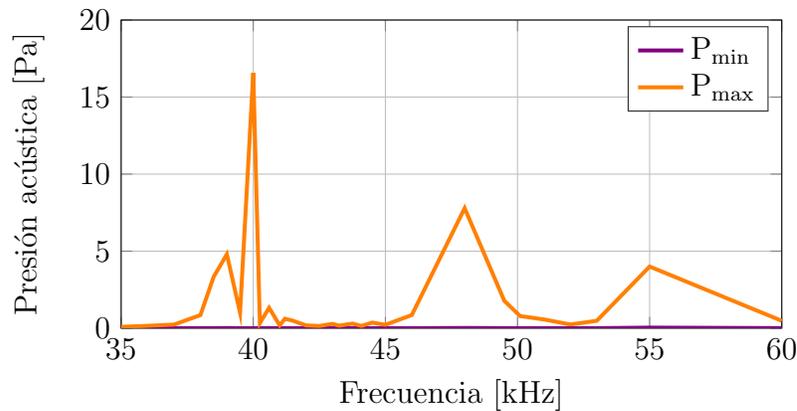


Figura 2.20: Simulación de presión acústica en función de la frecuencia para determinar frecuencia de resonancia.

2.2.5. Cálculo del tamaño de partícula

Al obtener un análisis cuantitativo del campo de potencial acústico entre transductor y reflector; se puede estimar con una buena aproximación la posición de los nodos de levitación y el tamaño de partícula posible a levitar en dicha posición mediante la ecuación (2.3). Un nodo de levitación es cuando el potencial acústico V tiene valor cero. Esto es, cuando la onda estacionaria generada en la cavidad del levitador va de alta a baja presión es posible atrapar la gota en dicha posición. En la Figura 2.21, se observa el diámetro de gota de agua que se puede levitar en los nodos de levitación.

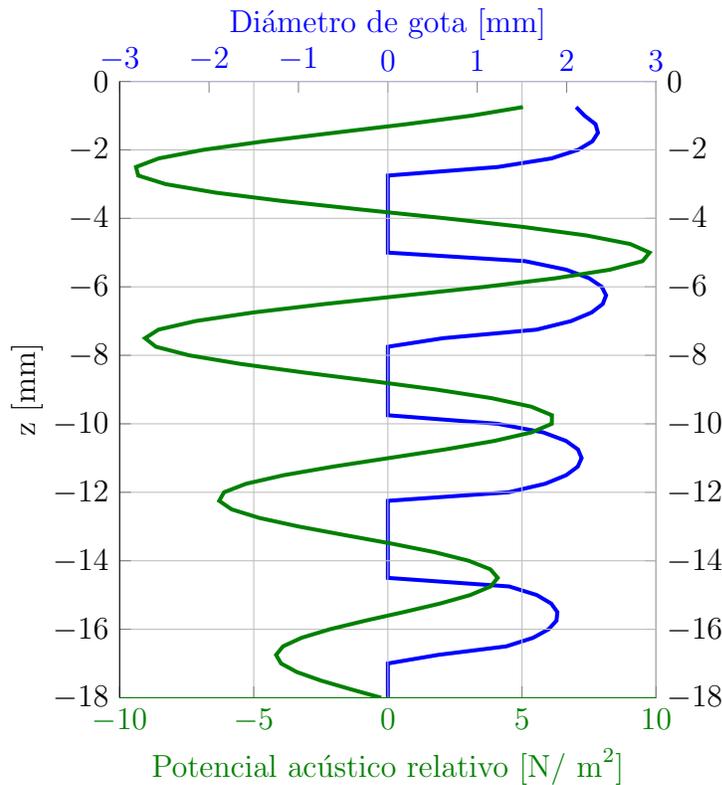


Figura 2.21: Posición de los nodos de levitación del sistema cóncavo-cóncavo, los cuales están ubicados en: 1) $z = -1.32$ mm, 2) $z = -6.30$ mm, 3) $z = -11.01$ mm y 4) $z = -15.60$ mm.

Cabe mencionar que la gota de mayor tamaño que se puede levitar en los nodos de levitación es cuando se tiene potencial acústico relativo $V = 0$ N/m^2 y fuerza acústica máxima.

En la Figura 2.22 se observa que para una fuerza acústica negativa los valores de diámetro son cero indicando que en dichas posiciones no es posible levitar partículas de agua según el modelo de la Figura 2.5. A esta posición se le conoce como *antinodo* debido a que actúa una fuerza negativa sobre la partícula. Es decir, la fuerza actúa en sentido contrario al supuesto en el modelo matemático obtenido; por lo que, no se logra establecer el equilibrio sobre la partícula y no es posible levitar. Por lo que, este levitador cuenta con cuatro nodos de levitación e idealmente es probable levitar gotas de 2.35 mm de diámetro en $z = -1.32\text{ mm}$, 2.44 mm en $z = -6.30\text{ mm}$, 2.16 mm en $z = -11\text{ mm}$ y 1.89 mm en $z = -15.6\text{ mm}$, respectivamente.

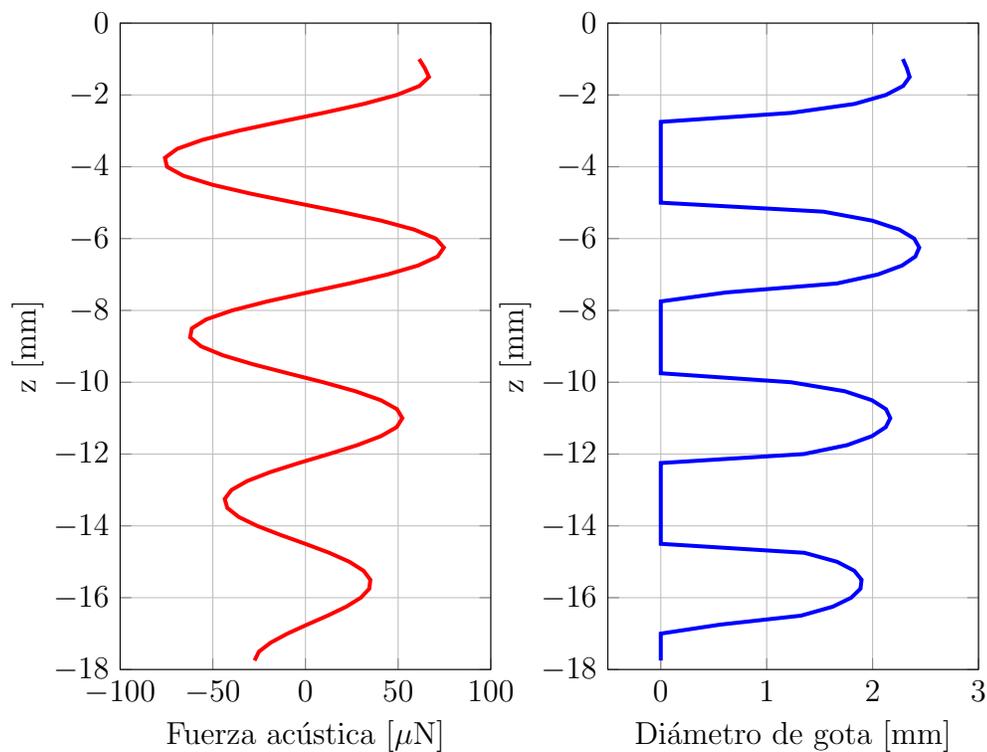


Figura 2.22: Fuerza acústica necesaria para levitar gotas de agua en los nodos del sistema; por ejemplo, en $F_a(z = -2\text{ mm}) = 50\ \mu\text{N}$ la cual es la fuerza necesaria para levitar una gota de $d = 2.13\text{ mm}$.

El número de nodos de levitación n_l que se forman en la cavidad del levitador está determinado por el período de la fuerza de radiación acústica Λ y la distancia entre transductor y reflector del sistema de levitación h ; tal como lo establece la siguiente relación,

$$n_l = \frac{h}{\Lambda}. \quad (2.17)$$

Finalmente, en la Figura 2.23 se muestra el mapa de tamaño de gota que se puede levitar en las diferentes posiciones en la región ubicada entre transductor y reflector. Con el mapa de diámetro de gota se obtiene la forma de los nodos de levitación y con esto se podría realizar un análisis de estabilidad de la gota levitada en trabajos futuros. Es decir, estimar la región en la cual se encontrará la partícula levitada conforme está se evapora; de esta manera se puede predecir el cambio de posición de partícula.

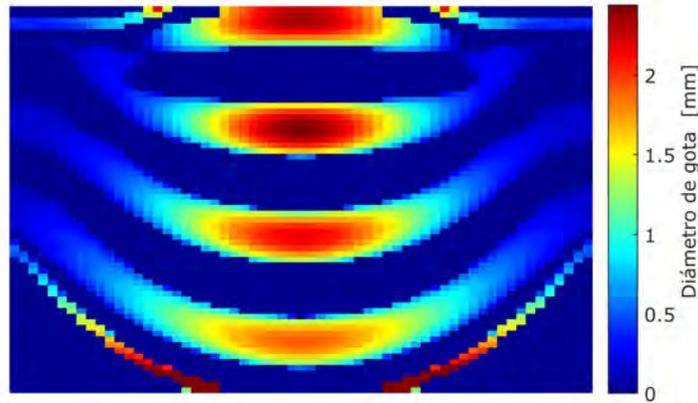


Figura 2.23: Posición de los nodos de levitación en la parte central del levitador acústico.

En el siguiente capítulo se presenta el diseño electromecánico del sistema de levitación acústica uniaxial, el cual se basa en los resultados obtenidos mediante las simulaciones numéricas por el método matricial.

Capítulo 3

Diseño Mecánico y eléctrico

El sistema electro-mecánico del levitador acústico está conformado por una fuente de control y transductor tipo Langevin. La fuente de control permite sintonizar la frecuencia de modulación a la frecuencia de resonancia y voltaje de operación del transductor. Por la parte mecánica, se requiere un mecanismo de sujeción para transductor, reflector y amplificador del sistema de levitación, considerando el sistema óptico para monitorear la estabilidad radial y axial del sistema, así como, el arreglo óptico para realizar la espectroscopia óptica en muestras líquidas.

Para lograr una mejor comprensión de los subsistemas que forman el levitador acústico: eléctrico y mecánico; las siguientes secciones describen el principio de operación y los elementos que conforman cada subsistema, respectivamente.

3.1. Fuente de ultrasonido

El subsistema eléctrico del levitador acústico requiere una fuente de ultrasonido con las siguientes características:

1. Forma de onda senoidal.
2. Ajuste de distorsión de la forma de onda senoidal.
3. Ajuste de frecuencia de oscilación en el rango $10 - 120 \text{ kHz}$.
4. Voltaje mayor a 200 V , debido al voltaje de operación del transductor tipo Langevin del sistema.

La fuente de ultrasonido está conformada por cuatro diferentes etapas; tal como se ilustra en el diagrama de bloques de la Figura 3.1. A continuación se describe de manera breve el principio de operación de cada una de ellas:

1. **Fuente de voltaje simétrica:** transforma corriente alterna a directa para proporcionar el voltaje de alimentación a los circuitos subsecuentes que conforman la fuente de ultrasonido, a un *voltaje regulado* constante.
2. **Generador de funciones:** se encarga de generar la señal de onda senoidal con ajuste de frecuencia; permite minimizar la distorsión en la forma de onda senoidal.
3. **Amplificación de señal en amplitud:** amplifica en amplitud la señal de salida del generador de funciones, emplea un amplificador operacional con ganancia variable; de esta manera se puede tener variación de voltaje en la fuente de ultrasonido.
4. **Etapas de potencia:** emplea un transformador para elevar el voltaje de salida de la etapa de amplificación de señal en amplitud. Sin embargo, es necesario amplificar en corriente la señal de salida de la etapa anterior debido a que el transformador demanda un mayor consumo de corriente y el amplificador operacional no la proporciona.

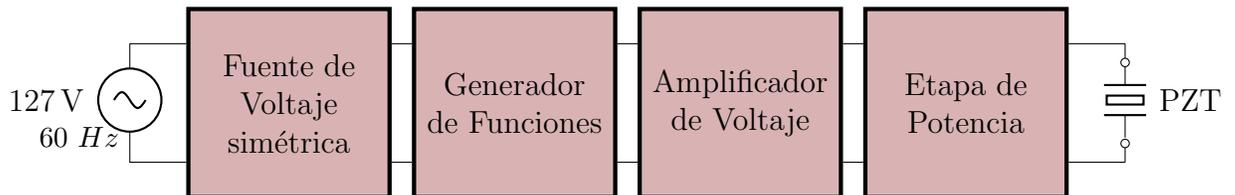


Figura 3.1: Diagrama de bloques de fuente de ultrasonido.

Cada una de las etapas que conforman la fuente de ultrasonido se describe en las siguientes secciones.

3.1.1. Fuente de voltaje simétrica

Todos los dispositivos electrónicos requieren una fuente de voltaje de corriente directa constante, ya sea suministrada por una batería o una fuente de voltaje. La fuente de voltaje convierte el voltaje de corriente alterna estándar

127 V, 60 Hz (voltaje de línea) disponible en todas las tomas de corriente, en voltaje de corriente directa.

Cuando se tiene alguna etapa de amplificación en el diseño del sistema es necesario tener voltajes de referencia constantes, para asegurar que el factor de amplificación G no sea modificado debido a variaciones en los voltajes de referencia VCC (voltaje positivo) y VSS (voltaje negativo). Por lo cual, se diseñó una fuente de voltaje simétrica, empleando reguladores de voltaje de ± 15 V, para tener voltajes de referencia constante. Una fuente de voltaje regulado está conformado por 4 etapas: transformación, rectificación, filtrado y regulación; tal como, se ilustra en el diagrama de la Figura 3.2.

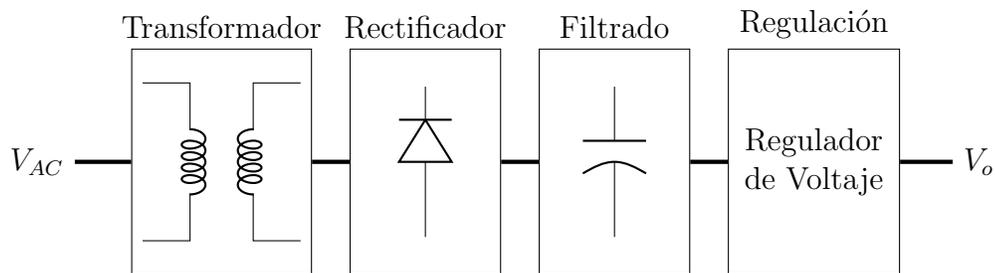


Figura 3.2: Diagrama de bloques de fuente de regulación de voltaje.

La etapa de *Transformación* emplea un transformador de voltaje con derivación central, el cual se encarga de transformar el voltaje de línea 127 Vac a 24 Vac; esto es, cambia el voltaje *ac* en base a la relación de vueltas que existe entre devanado primario y secundario. Posteriormente, en la etapa de *Rectificación* se emplea un rectificador de onda completa para utilizar ambos semiciclos de la onda senoidal; el cual es un circuito que convierte una señal de corriente alterna de entrada en una señal de corriente directa de salida pulsante.

El *Filtro* elimina las fluctuaciones en el voltaje rectificado y produce un nivel constante de voltaje directo; el filtro está conformado por capacitores conectados a tierra, tal como, se observa en el diagrama de la Figura 3.3.

El *regulador* es un circuito integrado que mantiene un voltaje directo constante para variaciones en el voltaje de línea de entrada o en la carga. La carga es un circuito o dispositivo conectado a la salida de la fuente de voltaje y funciona con el voltaje y corriente de la fuente de voltaje regulada.

En la Figura 3.3 se muestra el diagrama esquemático de la fuente de voltaje regulado, diseñada para proporcionar los voltajes de referencia (VCC

y VSS); para lograr este propósito se emplearon los reguladores de voltaje LM7815 y LM7915, para regular el voltaje a ± 15 V.

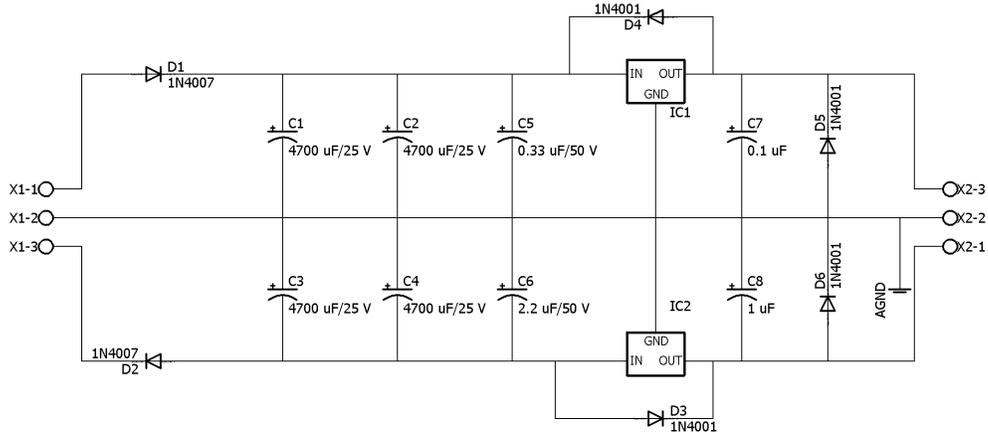


Figura 3.3: Circuito electrónico de la fuente de voltaje regulado.

En la Figura 3.4 se muestra el circuito impreso (PCB), por sus siglas en inglés *Printed Circuit Board*, del circuito electrónico de la fuente de voltaje regulada (Figura 3.3).

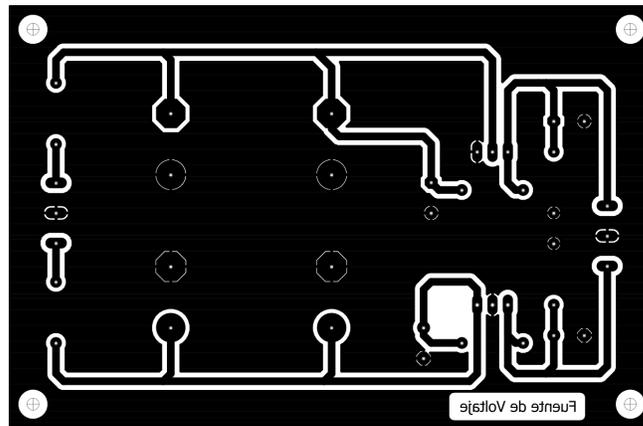


Figura 3.4: Circuito impreso de la fuente de voltaje.

entre voltaje positivo (VCC) y negativo (VSS), con la terminal variable conectada a cada uno de los pines de ajuste 1 y 12, respectivamente.

3.1.3. Amplificación de señal en amplitud

Se requiere controlar la amplitud de vibración del piezo-eléctrico del transductor tipo Langevin, por medio de la señal sinusoidal de salida del generador de funciones (pin 2 del ICL8038). Esto se logra al modular en amplitud la señal sinusoidal mediante un amplificador no inversor con ganancia variable $G_{min} \leq G \leq G_{max}$, cuya ganancia de amplificación esta determinada por

$$G = 1 + \frac{P_1 + R_2}{R_1}, \quad (3.3)$$

en donde la ganancia de amplificación se varía con el potenciómetro P_1 .

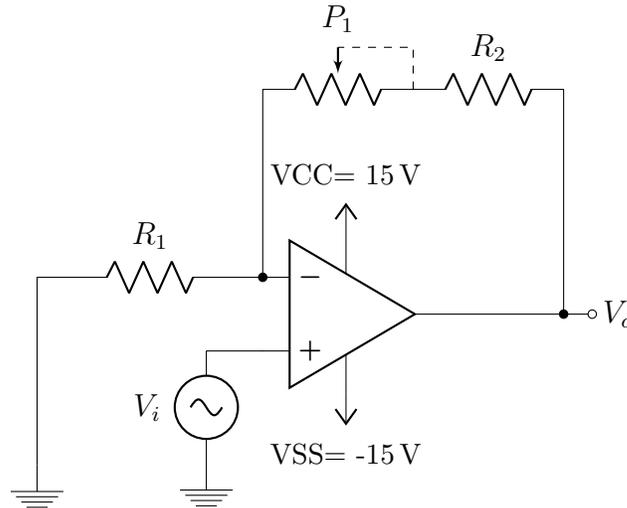


Figura 3.6: Diagrama esquemático de amplificador operacional no inversor.

En la Figura 3.6 se muestra el diagrama esquemático de un amplificador no inversor. El circuito se diseñó para el rango de ganancias de amplificación $1 \leq G \lesssim 4$ en base a la amplitud pico-pico de la señal de entrada, para evitar saturación de la señal de salida en la etapa de amplificación y posible modificación en la forma de onda sinusoidal.

El circuito integrado del amplificador operacional seleccionado en el diseño de esta etapa corresponde al CA3140, debido a la frecuencia de operación en la cual se requiere la amplificación de la señal en amplitud.

3.1.4. Etapa de potencia

La etapa de potencia está conformada por un amplificador de potencia y un transformador de voltaje. Primeramente, se amplifica en corriente la señal de salida del amplificador operacional para proporcionar el nivel de corriente requerido por el transformador. Posteriormente, el transformador de voltaje se encarga de elevar el voltaje conforme a la relación que existe entre el número de vueltas en el devanado primario N_p y en el devanado secundario N_s .

En la Figura 3.7 se muestra el diagrama esquemático de la etapa de Potencia que forma parte de la fuente de ultrasonido.

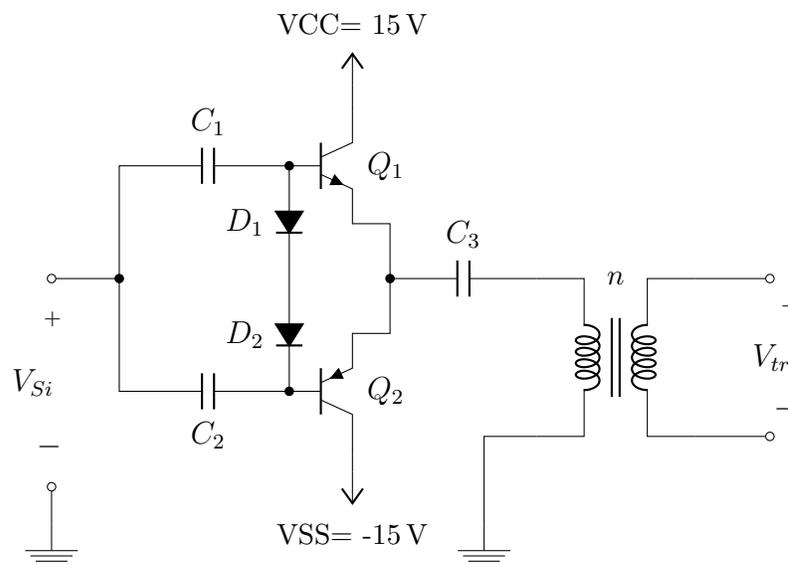


Figura 3.7: Diagrama esquemático de la etapa de potencia de la fuente de ultrasonido.

Amplificador Clase AB

El circuito de la etapa de potencia emplea un amplificador clase AB, el cual está conformado por dos transistores de potencia complementarios Q_1 y Q_2 . El transistor Q_1 tipo NPN genera la señal para el semiciclo positivo y el transistor Q_2 tipo PNP genera la señal para el semiciclo negativo; de tal manera, que cada transistor amplifica solo la mitad de la forma de onda de salida.

Los diodos D_1 y D_2 son diodos de polarización para evitar distorsión de cruce por cero; esto es, los diodos mantienen polarizados cada transistor debido a que se requiere un voltaje base-emisor $V_{BE} > 0.7$ V para que un transistor bipolar de silicio comience a conducir. La distorsión de cruce por cero sucede cuando la señal de entrada es menor al voltaje de umbral V_{BE} ; entonces la señal sinusoidal es igual a cero en este instante, o bien se dice que se “corta” debido a que los transistores no conducen en dicha región.

El diseño considera el acoplamiento capacitivo C_1 y C_2 para bloquear el voltaje de polarización de la fuente V_{Si} ; así como, el capacitor C_3 elimina cualquier componente dc (corriente directa) existente en la señal de salida.

Diseño y Construcción del Transformador

Los transformadores de voltaje son dispositivos eléctricos que convierten la energía eléctrica alterna de cierto nivel de voltaje en otro de nivel de voltaje. Es decir, pueden aumentar o disminuir el nivel de voltaje y corriente de un circuito eléctrico de corriente alterna, sin modificar su frecuencia o la potencia eléctrica transferida de un devanado a otro mediante el circuito magnético.

El funcionamiento del transformador se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética y está constituido por dos bobinas de material conductor, devanadas sobre un núcleo cerrado de material ferromagnético, pero aisladas entre si eléctricamente. Las bobinas o devanados se denominan *primario* y *secundario* según correspondan a la entrada o salida del sistema, respectivamente.

La relación de transformación n del voltaje entre el bobinado primario y secundario depende del número de vueltas que tengan cada uno; tal como, lo expresa la ecuación (3.4).

$$n = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} \quad (3.4)$$

En la ecuación (3.4) V_p y V_s son el voltaje en el devanado primario y secundario, respectivamente. Si el número de vueltas en el bobinado secundario N_s es el doble del primario N_p , entonces en el secundario habrá el doble de voltaje y se dice que se tiene relación de transformación 1 : 2. En la Figura 3.8 se ilustran los términos correspondientes a la ecuación de relación de transformación.

En la construcción del transformador se empleó alambre magneto de cobre calibre 32 para generar las bobinas sobre un núcleo de ferrita. Se diseñó un

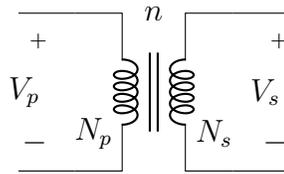


Figura 3.8: Diagrama esquemático de un transformador de voltaje.

transformador de voltaje con relación de transformación 1 : 10. Es decir, la bobina secundaria tiene 10 vueltas por cada vuelta de la bobina primaria; de esta manera el transformador eleva 10 veces el nivel de voltaje en el devanado primario.

3.1.5. Integración de la fuente de ultrasonido

En la Figura 3.9 se muestra la placa circuito impreso del circuito de la Figura 3.10. La finalidad del circuito impreso es conectar eléctricamente los dispositivos electrónicos entre sí, que conforman la fuente de ultrasonido, a través de pistas de material conductor; y sostener mecánicamente el conjunto de componentes electrónicos.

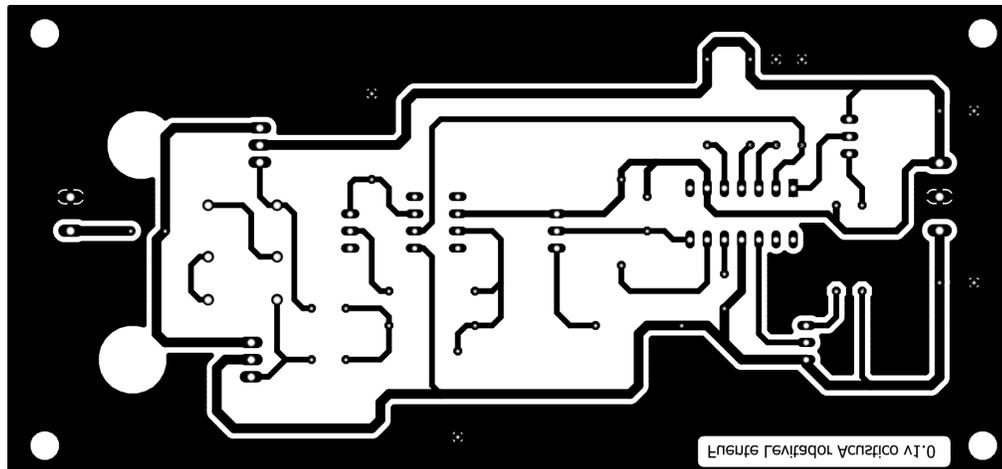


Figura 3.9: Circuito impreso de la fuente de ultrasonido.

En la Figura 3.10 se muestra el diagrama esquemático del circuito que conforma la fuente de ultrasonido, diseñada para sintonizar la frecuencia

de resonancia y proporcionar el voltaje de operación del transductor tipo Langevin.

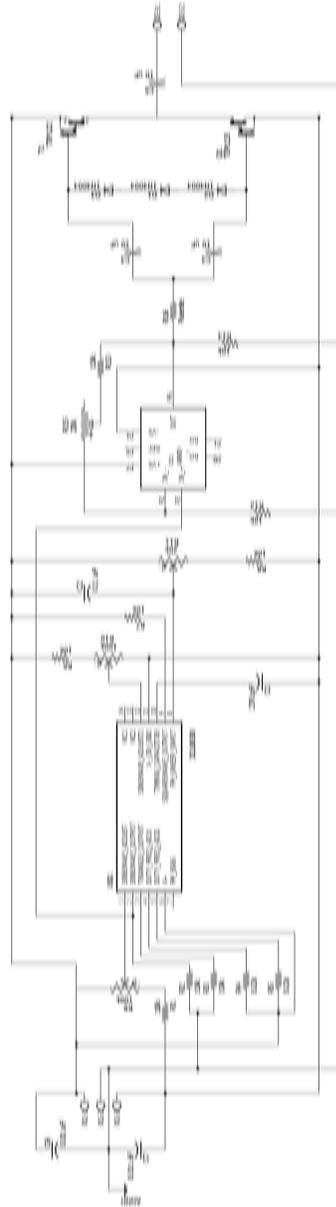


Figura 3.10: Diagrama esquemático de fuente de ultrasonido.

3.2. Mecanismo de sujeción y alineación

El primer paso en la construcción del sistema mecánico del levitador acústico, consistió en el diseño del mecanismo de acoplamiento o integración entre sonotrodo y transductor tipo Langevin, para transmitir la amplitud y frecuencia de vibración del piezoeléctrico que constituye dicho transductor, a un reflector y generar una onda estacionaria con distribución de potencial acústico suficiente para levitar muestras líquidas.

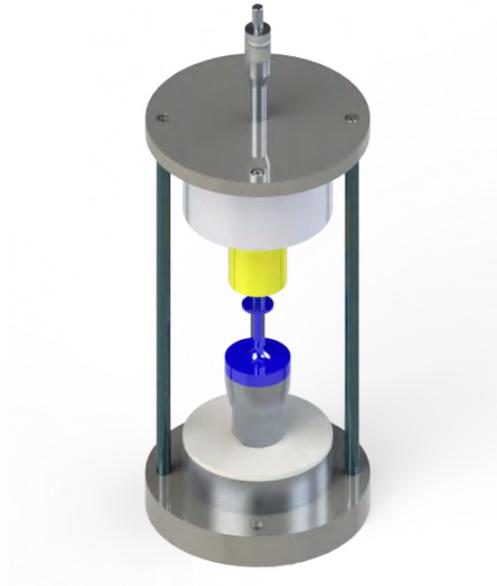


Figura 3.11: *Ensamble general que constituye la parte mecánica del sistema de levitación acústica; se resalta con diferentes colores el reflector (amarillo) y el sonotrodo (azul) del sistema, respectivamente.*

Para generar una onda estacionaria en un levitador acústico con simetría axial, es necesario que el transductor y el reflector se encuentren perfectamente alineados sobre un mismo eje de referencia. Por lo que se diseñó un mecanismo de sujeción del transductor y reflector, el cual alinea en eje axial ambos componentes del sistema de levitación; cabe mencionar que el transductor se debe fijar en la posición de sujeción especificada por el fabricante para no afectar su frecuencia de resonancia. El reflector se fija a una montura móvil, con desplazamiento vertical sobre el eje del sistema axial, diseñada para cambiar el tamaño de la cavidad del sistema de levitación. A continuación, en la Figura 3.12 se muestra la vista explosionada del mecanismo de sujeción

y alineación del sistema de levitación; de esta manera se puede observar cada una de las piezas mecánicas que conforman dicho mecanismo.

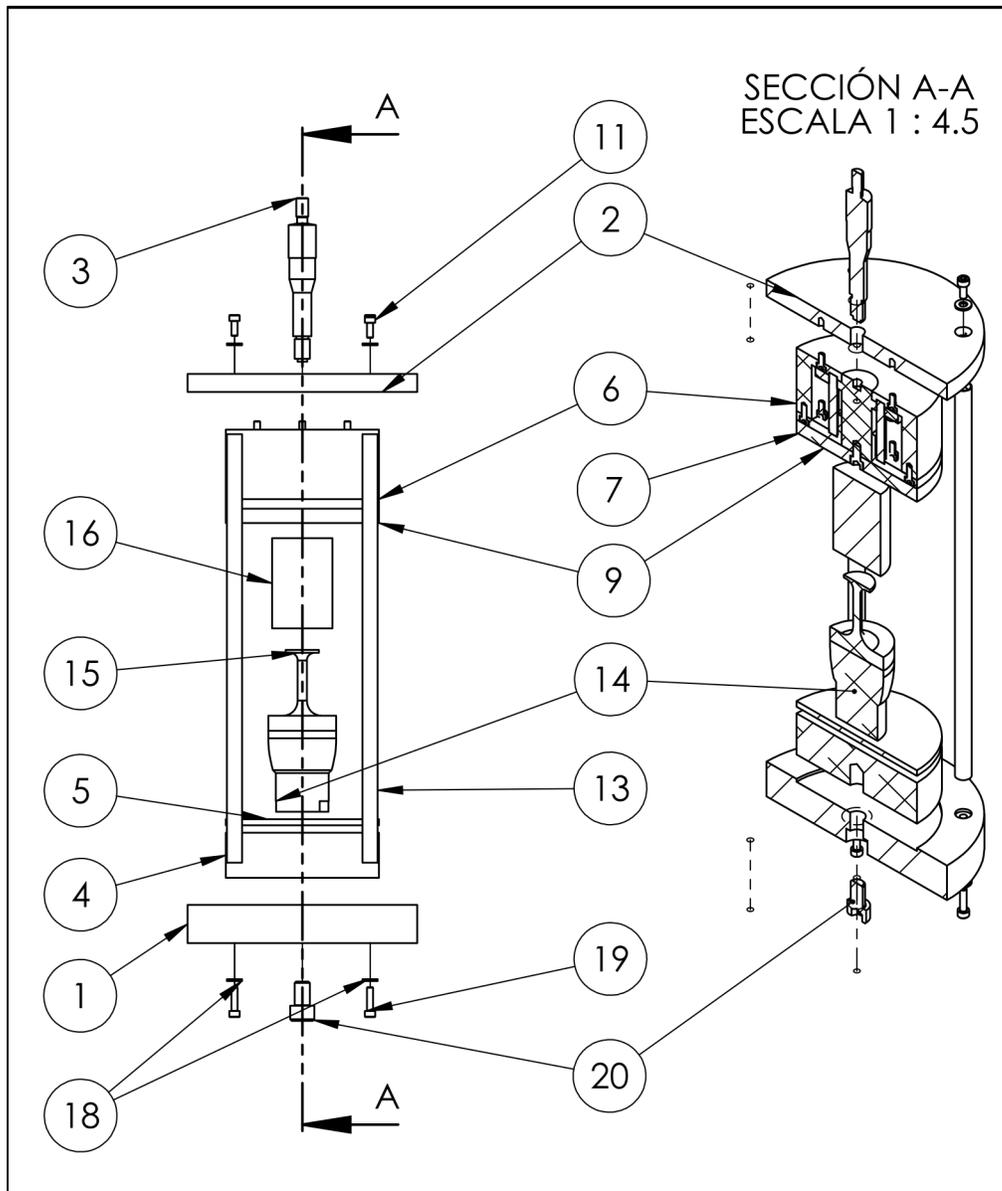


Figura 3.12: Vista explosionada del ensamble general de las partes mecánicas que constituyen el mecanismo de sujeción y alineación (soporte) del sistema de levitación acústica.

En la Tabla 3.1 se describe la función de cada una de las piezas que conforman el mecanismo de sujeción y alineación del sistema de levitación acústica. En donde, la pieza o parte mecánica principal es el mecanismo **MV** (*Movimiento Vertical*), debido a que permite controlar la distancia vertical entre transductor y reflector, mediante desplazamiento vertical paralelo a la superficie plana del transductor.

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Base Inferior	Tiene como función sujetar todas las piezas mecánicas.	1
2	Base Superior	Fija la cabeza micrométrica para movimiento vertical.	1
3	Cabeza micrométrica	Se encarga de cambiar la distancia entre reflector y transductor del levitador.	1
4	Base Intermedia 1	Es la base de sujeción del transductor tipo Langevin.	1
5	Absorbedor	Se encarga de amortiguar las posibles vibraciones transmitidas por el transductor.	1
6	Soporte MV	Interconecta a la cabeza micrométrica con la pieza MV para transmitir el desplazamiento vertical.	1
7	Tapa Soporte MV	Limita el movimiento vertical a la longitud del husillo de la cabeza micrométrica.	1
9	Sujetador MV	Fija por medio de un tornillo la geometría del reflector.	1
11 – 12	Tornillería	Tornillos M4x10 y M6x10	8, 1

Continúa en la siguiente página.

Tabla 3.1 – *Continuación*

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
13	Varilla Soporte	Alinea la base superior con la base inferior.	4
14	Transductor	Transductor tipo Langevin.	1
15	Sonotrodo	Amplifica en amplitud la onda mecánica transmitida por el piezoeléctrico del transductor tipo Langevin del levitador acústico; un extremo del sonotrodo se acopla al transductor y el otro tiene la geometría del transmisor.	1
16	Reflector	Esta pieza mecánica se diseñó considerando la geometría del reflector.	1
17 – 18	Accesorios de sujeción	Tornillos M4x8 con arandela plana	8
19 – 20	Tornillería B	Tornillos M4x16 y M10x16	4, 1

Tabla 3.1: *Descripción de las partes mecánicas que constituyen el soporte del sistema de levitación acústica.*

El material de fabricación de cada pieza del soporte del sistema de levitación se seleccionó considerando la función específica que realiza cada una de ellas; así como, en su diseño se emplearon diámetros nominales de barra redonda comercial para minimizar costos de maquinado.

3.3. Caracterización del sistema

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la construcción del control eléctrico y la fabricación de las partes mecánicas del levitador acústico.

Por parte del control eléctrico se construyó una fuente de ultrasonido (Figura 3.13) que permite ajustar en frecuencia y amplitud la onda sinusoidal que alimenta el transductor del sistema de levitación.

Valor	Voltaje [V]	Frecuencia [kHz]
Mínimo	96	10
Máximo	290	125
Error	$\pm 4\%$	$\pm 1.25\%$

Tabla 3.2: Características eléctricas de la fuente de ultrasonido.



Figura 3.13: Fuente de ultrasonido.

Para la caracterización de la fuente de ultrasonido se realizaron pruebas y mediciones en cada una de sus etapas: generador de funciones, etapa de amplificación y señal de alimentación del transductor, respectivamente. En la Figura 3.14 se muestra la onda senoidal generada por el generador de funciones modulada a la frecuencia de operación del transductor del sistema de levitación. Es importante ajustar los potenciómetros del circuito de

generación de onda senoidal para minimizar su distorsión, previamente a la conexión de carga en la salida de la fuente de ultrasonido.

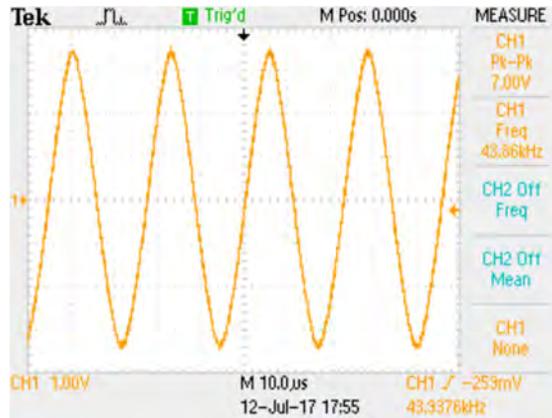


Figura 3.14: Onda senoidal medida a la salida del generador de funciones.

La ganancia de amplificación real medible, sin carga conectada, a la salida del amplificador operacional está en el rango de $1.88 \leq G < 3.46$, el cual concuerda conforme a su diseño. En la Figura 3.15 se muestran las mediciones realizadas a diferentes instantes de tiempo, donde la ganancia de amplificación permanece en el rango antes mencionado.

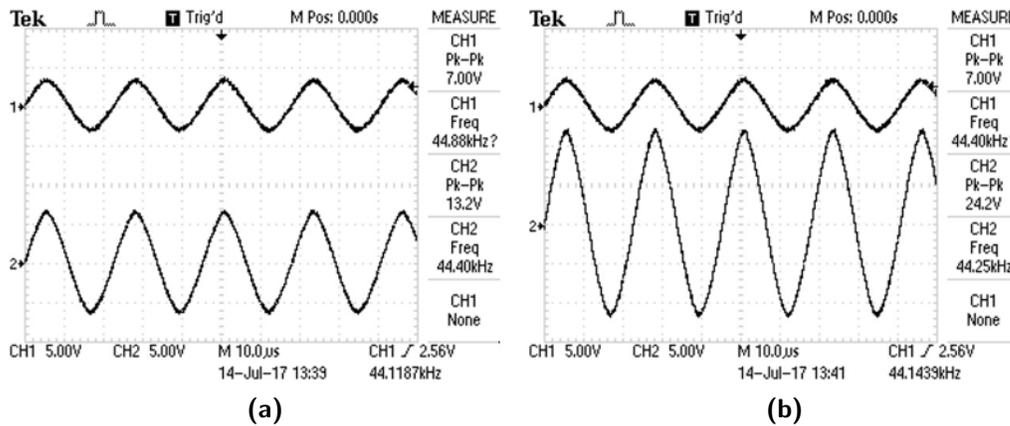
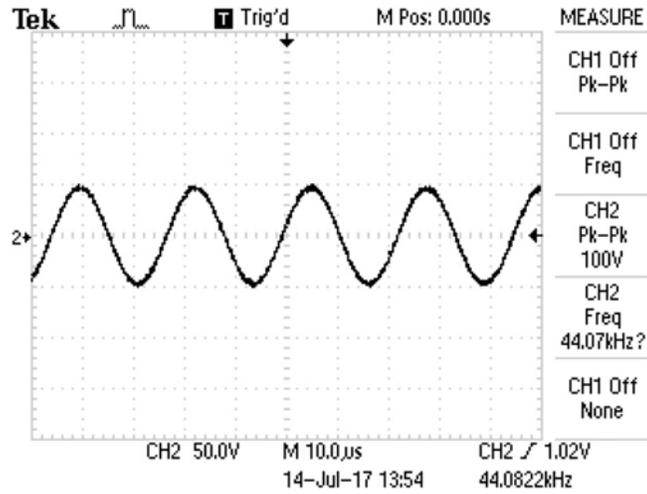


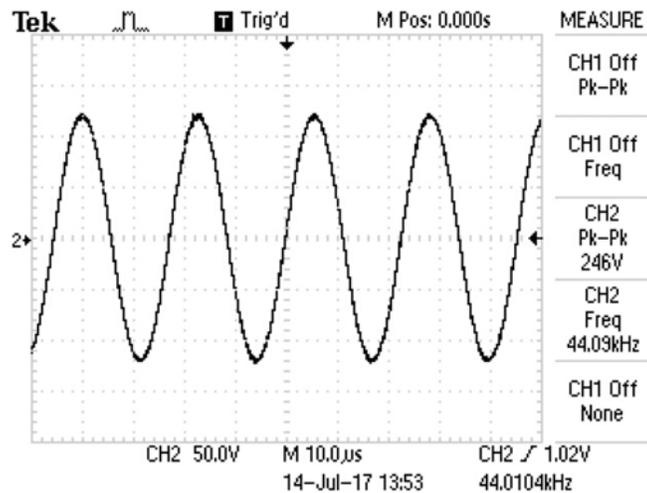
Figura 3.15: Onda senoidal medida después de la etapa de amplificación a ganancia: (a) mínima y (b) máxima.

En la Figura 3.16 se reportan las mediciones realizadas en el rango del voltaje mínimo y máximo de la fuente de ultrasonido, al conectar el transductor

a la salida de esta misma.



(a)



(b)

Figura 3.16: Onda senoidal de alimentación del transductor en el rango de voltaje: (a) mínimo y (b) máximo.

Por la parte mecánica se maquinó el mecanismo de sujeción y alineación diseñado, el cual aparece en la Figura 3.17. Una *cabeza micrométrica* controla la distancia entre reflector y transductor para ajustarla a la distancia de resonancia; donde se genera una onda estacionaria con distribución de potencial acústico capaz de levitar partículas de geometría esférica. La cabeza

micrométrica **Mitutoyo 150-192** se consideró en el diseño, ya que tiene un rango de operación de 0 – 25 mm con resolución de 0.01 mm y precisión de ± 0.002 mm.

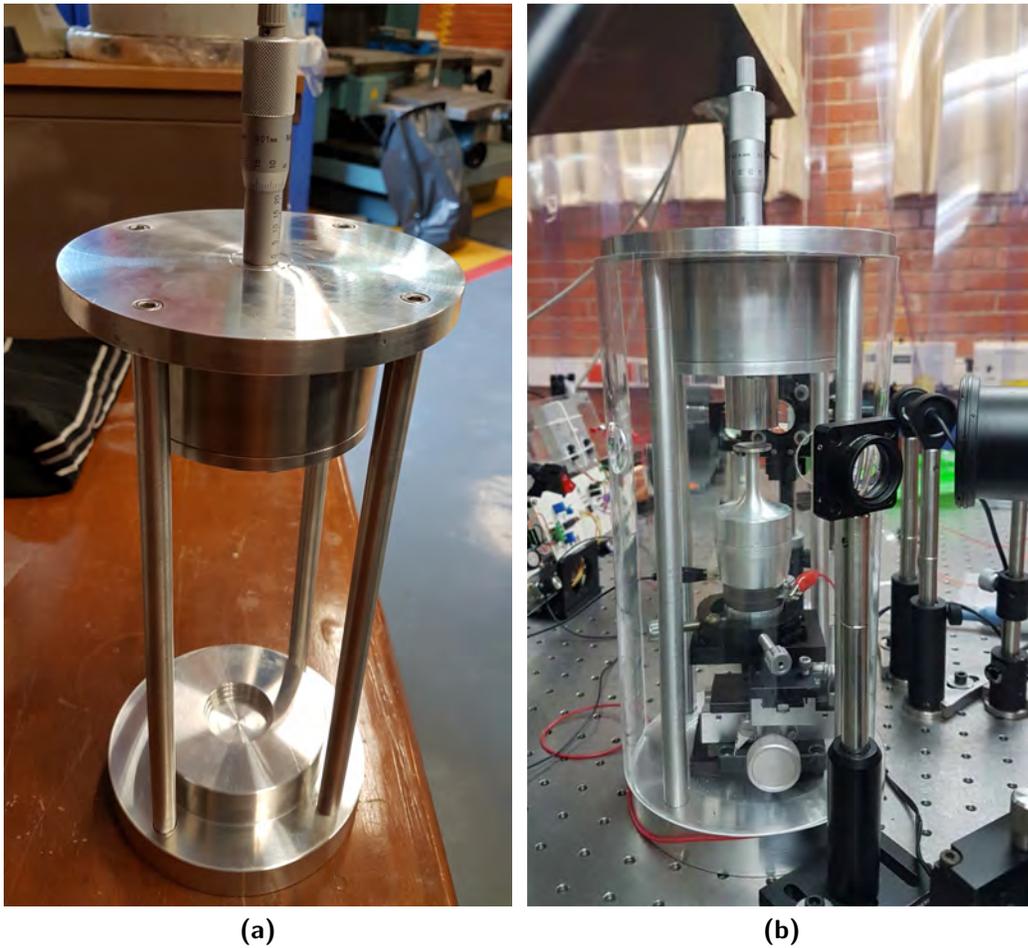


Figura 3.17: Mecanismo de sujeción y alineación del sistema de levitación acústica: (a) inicial y (b) final.

Al realizar pruebas experimentales con el levitador acústico se observó que la posición de la gota suspendida en la cavidad del levitador, es afectada por las corrientes de aire existentes alrededor del levitador. Por lo que se agregó una cámara de acrílico, al diseño inicial, con la finalidad de aislar la cavidad del levitador; ésta cuenta con pequeñas ventanas para montar la óptica de enfoque y colección de luz empleada en el monitoreo de la gota

suspendida y espectroscopia LIBS, Figura 3.17b.

En resumen, la integración de la **fente de ultrasonido** y el **mecanismo de sujeción y alineación** en conjunto con el transductor tipo Langevin constituyen el *Sistema de Levitación acústica*.

Capítulo 4

Sistema óptico de monitoreo de gota y estabilidad

El sistema de monitoreo de gota consiste en el análisis de la imagen, que forma la gota levitada en una cámara, para determinar sus características físicas en función del tiempo; tales como diámetro de gota y la posición de su centroide en el espacio. Esto implica el diseño de un arreglo óptico para la captura de imágenes y desarrollo de programas para realizar procesamiento digital de imágenes.

Por lo cual, se desarrolló un programa para analizar la evolución temporal del tamaño de gota y la estabilidad radial y axial de las partículas de agua suspendidas en el sistema de levitación. Esto es, analizar el cambio del tamaño de la gota en el tiempo debido a su evaporación. Así como, registrar la posición de la partícula suspendida en la cavidad acústica, lo cual se logra al capturar simultáneamente la imagen de la partícula en dos planos ortogonales.

Las siguientes secciones describen el principio de operación y los elementos que conforman el arreglo óptico del sistema. Así como, los resultados obtenidos en el análisis de tamaño de gota y su estabilidad radial y axial.

4.1. Arreglo óptico

La Figura 4.1 muestra el diagrama esquemático del arreglo experimental del sistema de monitoreo de gota en el plano xy . El Láser 2 se emplea para iluminar la gota levitada y proporcionar suficiente luz en la visualización

de la gota en las cámaras CMOS. Un arreglo óptico ortogonal conformado por espejos, una lente y un divisor de haz (M1, M2, L3 y BS) se emplea para visualizar la posición xyz de la gota con la cámara 2 y de esta manera determinar su estabilidad.

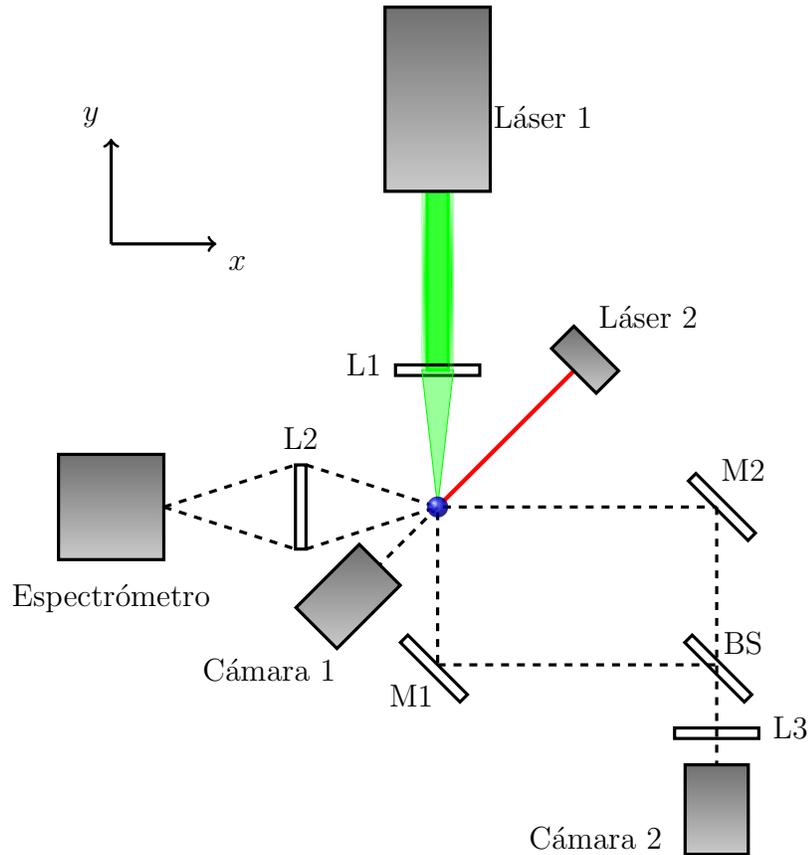


Figura 4.1: Arreglo experimental del sistema de levitación acústica.

Adicionalmente, al sistema de monitoreo de gota se agrega un arreglo óptico para realizar espectroscopia *LIBS* conformado por dos lentes L1 y L2; donde L1 enfoca los pulsos del Láser 1 en la muestra para inducir el plasma, y L2 dirige la luz emitida por el plasma al espectrómetro.

4.2. Metodología

El monitoreo de tamaño de gota y el análisis de estabilidad axial y radial de la partícula levitada, se basa en procesamiento digital de imágenes. Por lo tanto, se diseñó una interfaz gráfica de usuario (*GUI*, por sus siglas en inglés) en MATLAB[®]; el cual procesa las imágenes adquiridas por las cámaras del sistema según el diagrama de bloques de la Figura 4.2. La cámara 1¹ se emplea para determinar el diámetro de gota de la partícula levitada, y la cámara 2² para realizar el análisis de estabilidad.

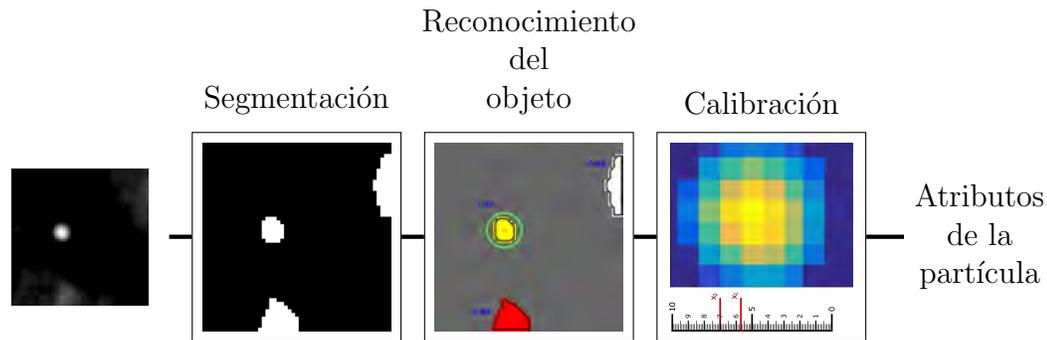


Figura 4.2: Diagrama de bloques del algoritmo propuesto para realizar análisis de tamaño de gota y análisis de estabilidad axial y radial de la partícula levitada mediante procesamiento digital de imágenes.

A continuación, se describe a detalle el algoritmo propuesto en el diagrama de bloques:

Paso 1: Segmentación

Se realiza una segmentación por umbralización (del inglés *thresholding*) a las imágenes de entrada $g(x, y)$ de acuerdo al método de Otsu [17], el cual en base al histograma de la imagen en escala de grises, determina el umbral σ . Asimismo, etiqueta los objetos comparando su valor de intensidad $I(x, y)$ con un valor de referencia (umbral); de esta manera realiza la binarización de la imagen de entrada y genera una imagen binaria $b(x, y)$.

$$b(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{si } I(x, y) \geq \sigma, \\ 0, & \text{otro caso.} \end{cases} \quad (4.1)$$

¹Cámara iDS con sensor CMOS monocromático y resolución 768×1024 .

²Cámara iDS con sensor CMOS a color y resolución 1540×2940 . color

En la Figura 4.3 se muestra un ejemplo del proceso de *Segmentación* para el sistema de monitoreo.

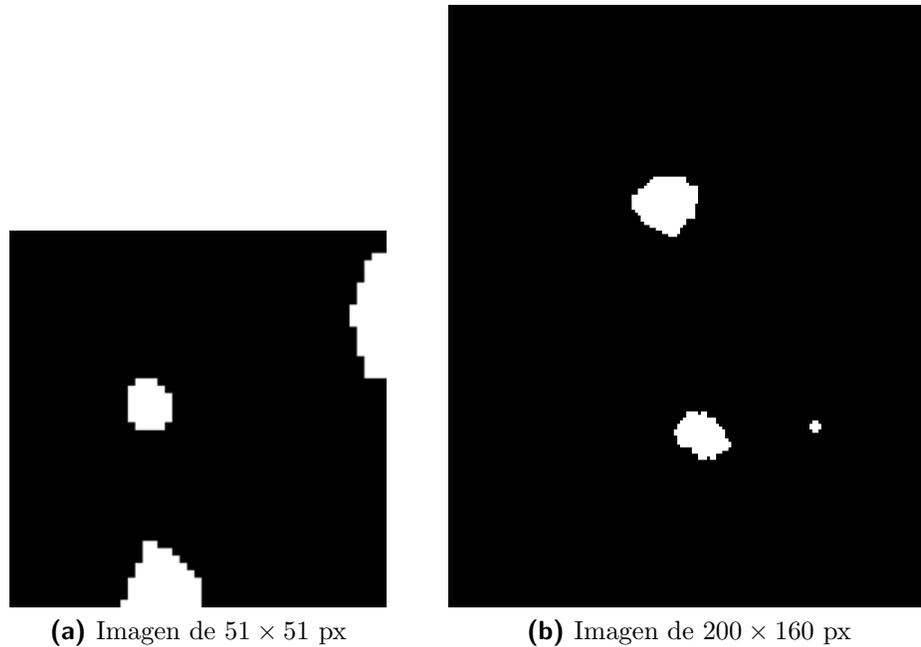


Figura 4.3: *Binarización de imágenes capturas por las cámaras del sistema de monitoreo: (a) cámara 1, (b) cámara 2.*

Paso 2: Reconocimiento del objeto

La proyección de una partícula de forma esférica, en un plano ortogonal 2D con iluminación en un plano paralelo al de captura de imagen, es un círculo. Por lo tanto, para determinar el tamaño de gota es necesario emplear un algoritmo detector de círculos en la imagen capturada.

Primeramente, el algoritmo secciona la imagen en las diferentes áreas que existen en la imagen; donde determina el número de píxeles por lo cuales se conforma cada una de las áreas. Posteriormente, la morfología de estas se clasifican o reconocen de acuerdo al factor de forma (FF) que relaciona el área (A) y el perímetro (P) de alguna sección [18]; el cual toma valores que se aproximan a la unidad cuanto más se parezca a un círculo.

$$FF = \frac{4\pi A}{P^2}. \quad (4.2)$$

En la ecuación 4.2, los términos A y P corresponden a la cuenta de píxeles dentro y en el contorno de la sección, respectivamente. El perímetro aumenta, cuando el contorno presenta muchos pliegues, por lo que el factor de forma tiende a cero.

Una vez que se realiza el reconocimiento del objeto, el programa entrega a la salida las características físicas del círculo: radio y las coordenadas del centro o centroide $C(x, y)$ del círculo, en píxeles.

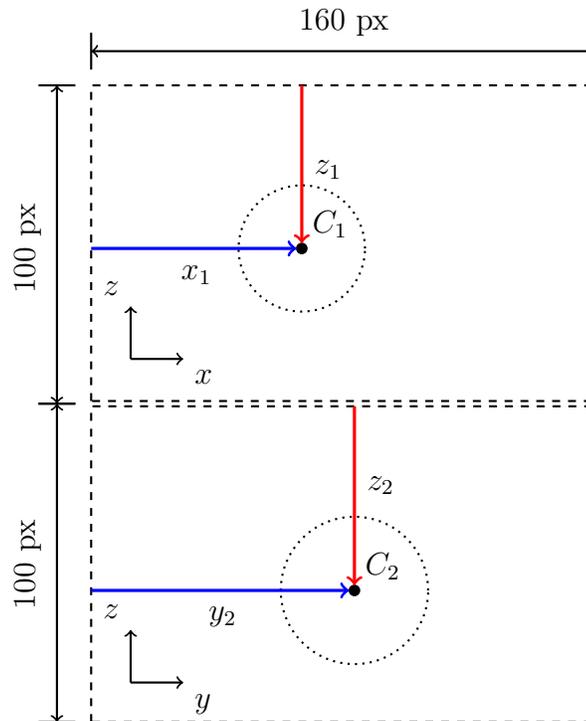


Figura 4.4: Posición de los centros en los planos ortogonales correspondientes a la captura de la gota levitada en una misma imagen.

Para el caso particular del análisis de estabilidad, la imagen $h(x, y)$ capturada por la cámara 2 de tamaño (200×160) píxeles se subdivide en dos imágenes de (100×160) píxeles, donde las imágenes generadas $h_1(x, y)$ y $h_2(x, y)$ corresponden a los planos yz y xz del sistema de referencia de la partícula levitada. Esto con la finalidad de procesar de manera independiente las componentes de las coordenadas de los centroides $C_1(x_1, z_1)$ y $C_2(y_2, z_2)$ en los planos ortogonales, y realizar el seguimiento de la partícula en el espacio tridimensional.

De acuerdo a la Figura 4.4, las coordenadas de la partícula $P(x, y, z)$ en función de los centroides C_1 y C_2 están dadas por,

$$\mathbf{P}_{xyz} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_2 \\ \langle z_1, z_2 \rangle \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

para el instante de tiempo en el cual se realiza la captura de la imagen. La ecuación 4.3 representa la reconstrucción 3D de la posición de la gota a partir de las coordenadas obtenidas en los dos planos 2D ortogonales empleados; de esta manera las coordenadas resultantes de la transformación 2D a 3D implicadas en dicha ecuación, se grafican en el espacio y así es posible reconstruir la posición tridimensional de la gota.

Paso 3: Calibración

La calibración se realizó mediante la conversión del número de píxeles al sistema métrico de la imagen de un objeto de tamaño conocido que se forma en los sensores de las cámaras CMOS del sistema, respectivamente.

iD	Calibración
Cámara 1	1 píxel \equiv 18.50 μm
Cámara 2	1 píxel \equiv 11.28 μm

Tabla 4.1: *Calibración de cámaras CMOS del sistema de monitoreo.*

En las siguientes secciones se presentan los resultados obtenidos empleando el algoritmo propuesto de procesamiento digital de imágenes para realizar los análisis correspondientes.

4.3. Monitoreo de tamaño de gota

La gota levitada en aire mediante acústica presenta un cambio de tamaño (radio, suponiendo que se trata partículas esféricas) debido a que pequeñas partículas se desprenden de la gota a medida que transcurre el tiempo; a este fenómeno se le conoce como evaporación de la gota, o bien, tiempo de secado de la gota. Por lo cual, se evalúa la evolución temporal del tamaño de gotas de agua con cloruro de sodio a diferentes concentraciones; para esto se realiza una serie de experimentos³ en condiciones de ambiente controlado; tales como temperatura $T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa (H_R) del $\sim 40\%$, ya que son condiciones críticas en el tiempo de secado de la gota de agua [19,20].

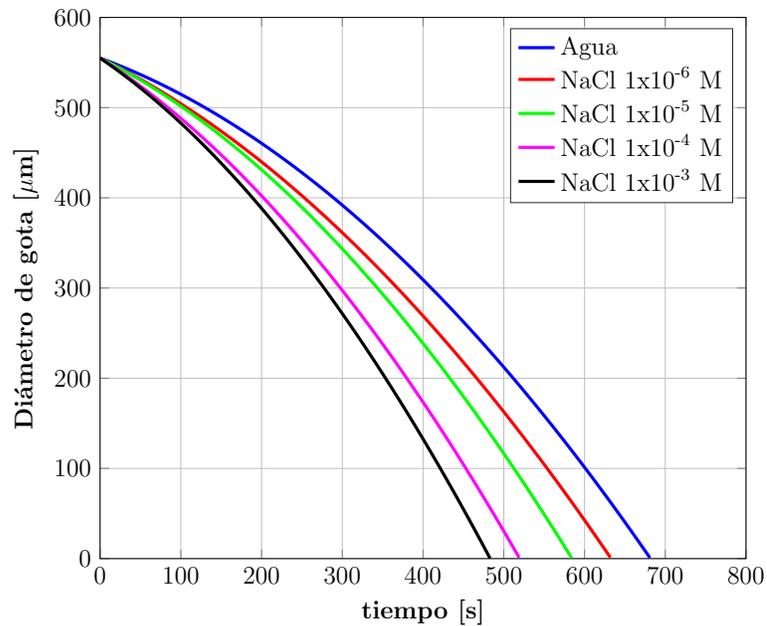
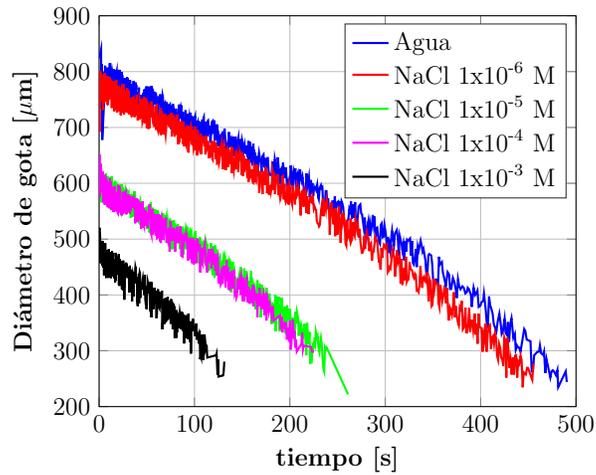


Figura 4.5: Evolución temporal del diámetro de gota a diferentes concentraciones de cloruro de sodio en agua en un ambiente controlado ($T = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $H_R \approx 40\%$).

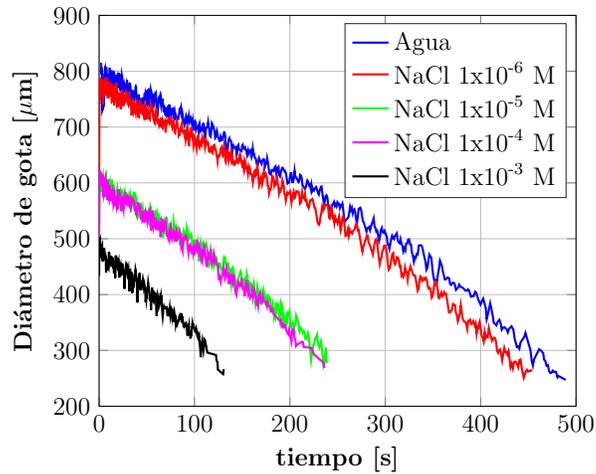
A medida que se aumenta la concentración molar de cloruro de sodio en la solución, se puede observar en la gráfica de la Figura 4.5 que se tienen tiempos de secado más cortos. Las curvas de la Figura 4.5 se obtienen al realizar un ajuste polinomial de grado 2 a las curvas de los resultados experi-

³Se analizan al menos 10 muestras para cada solución.

mentales (promedio de diez mediciones). Las curvas experimentales, Figura 4.6a, en primera instancia se sometieron a un proceso de suavizado por el método de promedio adyacente, empleando una ventana móvil de 3 puntos en *OriginLab*[®]; el cual funciona como un filtro *pasa-bajas* eliminando los cambios abruptos en las mediciones realizadas, Figura 4.6b.



(a)



(b)

Figura 4.6: Evolución temporal del diámetro de gota a diferentes concentraciones de cloruro de sodio en agua: a) promedio de 10 mediciones, b) curvas suavizadas, respectivamente.

4.4. Estabilidad de la gota

En el análisis de estabilidad de la gota levitada, se realiza un seguimiento en el espacio, para determinar la evolución temporal de la posición de la partícula; empleando para esto la información de los centroides obtenidos en los planos ortogonales yz y xz con el programa propuesto.

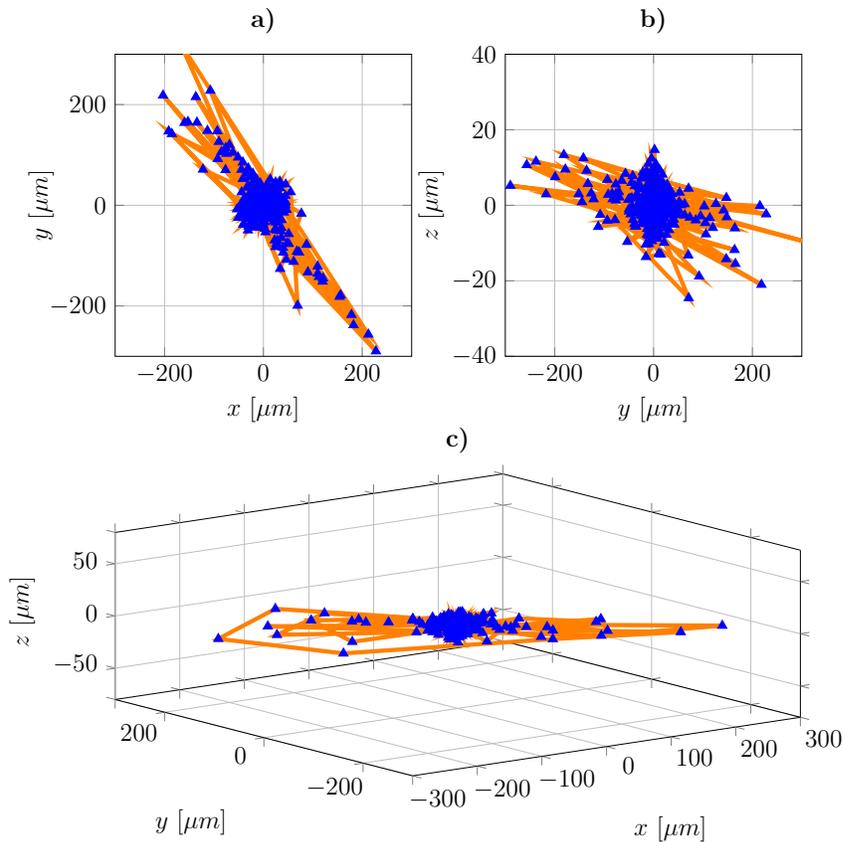


Figura 4.7: Seguimiento de la trayectoria de la partícula levitada: a) en el plano xy , b) en el plano yz y c) en el espacio tridimensional, durante 200 segundos, respectivamente.

En la Figura 4.7 se muestra el seguimiento en el espacio (3D) de una gota de agua levitada, en la cavidad acústica, en función del tiempo; donde se puede observar que la amplitud máxima de vibración de la gota en las coordenadas x y y es de alrededor de $200 \mu m$, y para la coordenada z de $20 \mu m$. Por lo que, se concluye que debido a la geometría axial del levitador

acústico tiene valores similares de amplitud de vibración de la gota alrededor del eje central (coordenadas x , y del levitador) manteniendo su posición en la coordenada z .

Si se grafican los desplazamientos en las coordenadas x , y y z en un mismo eje (Figura 4.8), se confirma que los desplazamientos con mayor amplitud absoluta suceden en los ejes x y y . Asimismo, que la variación de la posición en cada uno de estos ejes es similar; ya que su desviación estándar es $\sigma_x = 19.13 \mu m$ y $\sigma_y = 21.32 \mu m$) para el intervalo de tiempo $0 < t \leq 120$ s, respectivamente. Cabe mencionar que la variación del desplazamiento en el eje z es de $\sigma_z = 3.45 \mu m$; esto significa que la partícula se mantiene a la misma altura en comparación al diámetro de gota. Todo esto es válido para gotas con diámetro inicial mayor a $500 \mu m$ y diámetro final aproximado a $200 \mu m$.

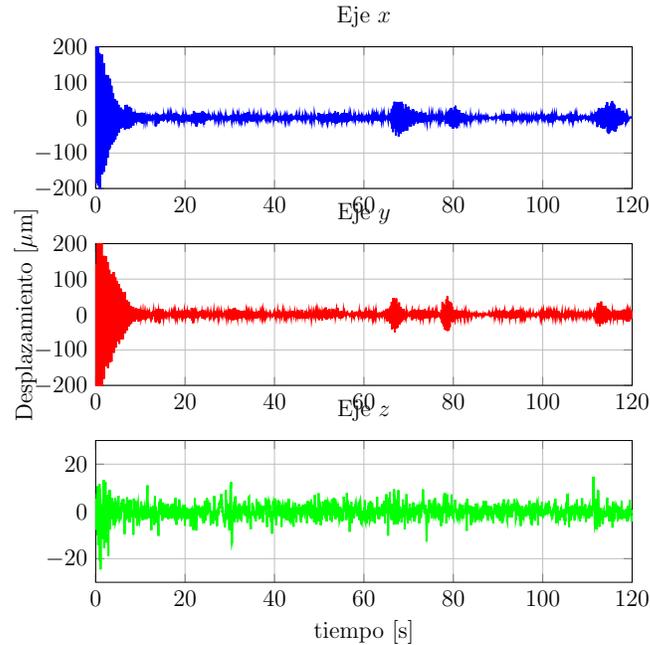


Figura 4.8: Desplazamiento relativo de la gota en 120 segundos.

En la Figura 4.9 se hace un acercamiento del desplazamiento en los primeros 12 s. Se observa que la gota levitada oscila los primeros segundos pero se estabiliza después de un tiempo dado; estas oscilaciones se atribuyen al mecanismo de inserción, que se realiza por medio de una jeringa, la cual afecta el campo de potencial acústico. En analogía, con un sistema de segun-

do orden (masa-resorte-amortiguador) en la teoría de control; el sistema de levitación presenta una respuesta subamortiguada [21, 22].

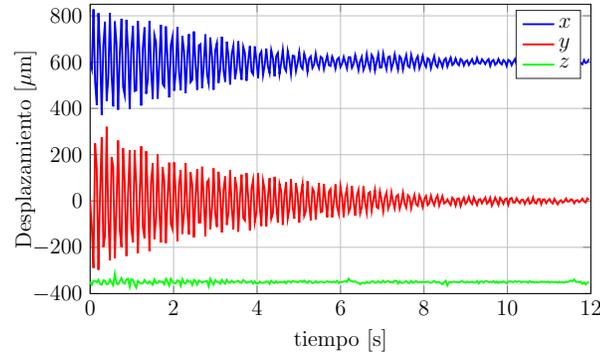


Figura 4.9: Respuesta temporal del sistema de levitación sobre la gota levitada.

Una vez que se estabiliza la gota, las variaciones de posición en cada una de las coordenadas del espacio tridimensional tienen desviación estándar de $\sigma_x = 6.45 \mu\text{m}$, $\sigma_y = 6.35 \mu\text{m}$ y $\sigma_z = 3.15 \mu\text{m}$ en el intervalo de tiempo de $20 < t \leq 60 \text{ s}$, respectivamente. Por lo cual, en este intervalo de tiempo la gota puede considerarse estable, ya que dichas desviaciones solo representan el 3% del tamaño de la gota actual Figura 4.5.

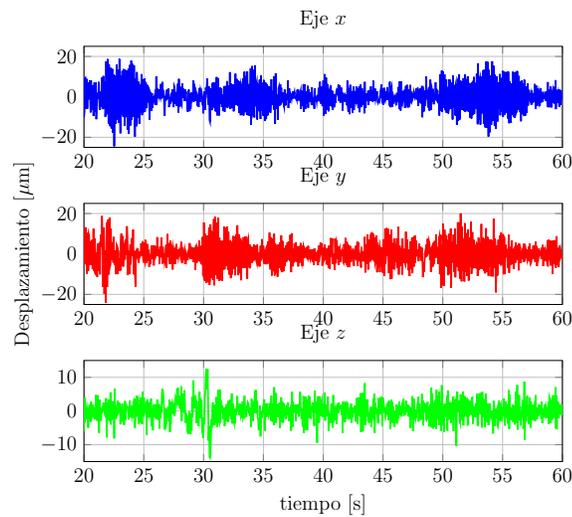


Figura 4.10: Desplazamiento relativo de la gota levitada en el intervalo de tiempo donde es estable.

Se incluye un análisis de velocidad con la finalidad de determinar un instante o intervalo de tiempo específico, donde la partícula es estable (cuando la partícula mantiene su posición relativa). Los resultados se muestran en la Figura 4.11, en la cual se observa que la velocidad instantánea máxima es de $400 \mu\text{m/s}$.

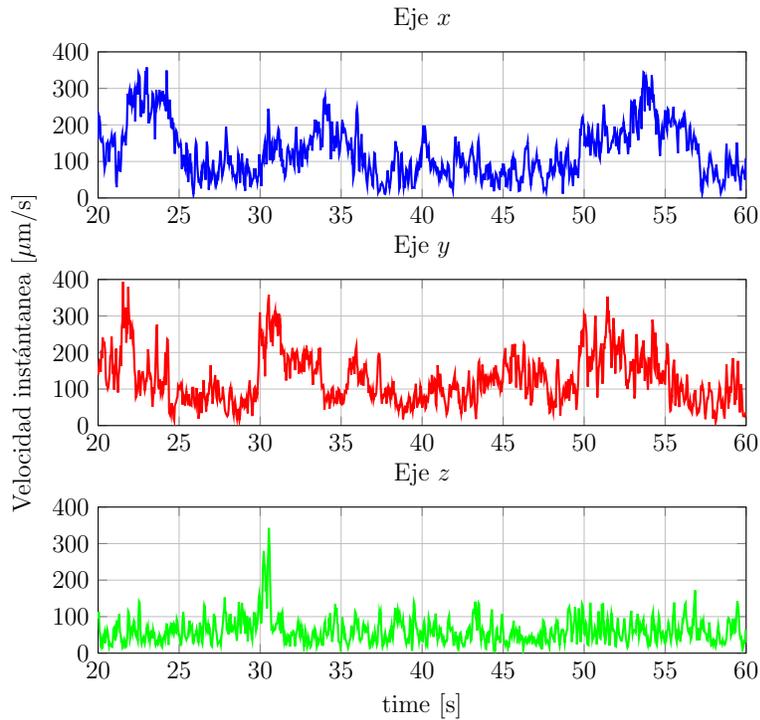


Figura 4.11: Velocidad instantánea de la gota levitada en el espacio tridimensional.

Finalmente, se desea evaluar el sistema de levitación en un arreglo de espectroscopia de rompimiento inducido por láser (LIBS), donde la estabilidad o posición de la partícula es trascendente en cuanto a la reproducibilidad de la señal. Por lo tanto, las condiciones para las cuales es posible realizar LIBS, en función del análisis de estabilidad, son cuando la partícula permanezca estática en un instante de tiempo, o bien, su velocidad instantánea implique movimientos en los ejes coordenados despreciables en comparación al tamaño de partícula. El cumplimiento de estas condiciones permite realizar LIBS de manera automatizada. En la Figura 4.12 se muestran las condiciones para las cuales una gota de agua levitada se mantiene estática, como resultado

del análisis de estabilidad para diferentes partículas. En donde, se establece que estas condiciones se cumplen cuando las velocidades instantáneas V_x y V_y son menores a $30 \mu m/s$, y cuando la velocidad instantánea V_z es menor a $5 \mu m/s$; ya que representan movimientos en el plano xy menores a $2.5 \mu m$ y que mantiene su altura en el eje z . Cabe mencionar que existen dos instantes de tiempo donde estas condiciones se cumplen; por lo tanto, se traduce en dos posibilidades de realizar análisis elemental de esta muestra o partícula.

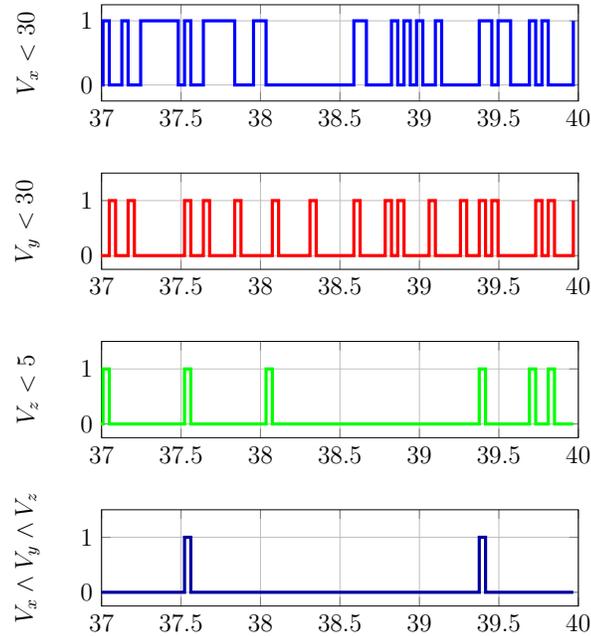


Figura 4.12: Condiciones para las cuales existe la posibilidad de realizar espectroscopia óptica.

Con los resultados obtenidos en el análisis de estabilidad en gotas de solución de agua con cloruro de sodio a diferentes concentraciones, se puede concluir que existen zonas o instantes de tiempo en los cuales es posible realizar LIBS. Por consiguiente, en el siguiente capítulo se presenta la evaluación del sistema de levitación en un arreglo LIBS y los resultados obtenidos al realizar análisis elemental de muestras líquidas.

Capítulo 5

Evaluación del sistema para espectroscopia LIBS

La espectroscopia de plasma inducido por láser, conocida como LIBS, es una poderosa técnica para el análisis elemental de forma rápida y en tiempo real de una amplia gama de materiales, ya sean muestras sólidas, líquidas o aerosoles. Generalmente en LIBS no es necesario la preparación de muestras y es una opción adecuada cuando elementos únicos o múltiples deben ser detectados simultáneamente de una manera rápida con sensibilidad y selectividad aceptables. Además, presenta las siguientes ventajas en comparación a otras técnicas de análisis elemental:

- Análisis de trazas *in situ* o de manera remota debido a la portabilidad de los elementos que conforman el instrumento.
- No requiere de consumibles o reactivos para preparar la muestra.
- Análisis elemental en cuestión de segundos.
- Técnica semi-destructiva a escala de micrómetros.

En este capítulo se presenta la evaluación del sistema de levitación en un arreglo LIBS. En las siguientes secciones, se presentan el principio básico de esta técnica de espectroscopia y los resultados obtenidos al realizar el análisis elemental; al tomar en cuenta las condiciones de estabilidad establecidos en el capítulo anterior.

5.1. LIBS

LIBS, es un tipo de espectroscopia de emisión atómica que emplea como fuente de excitación un láser de alta potencia. La espectroscopia de emisión atómica es un método de análisis químico que se utiliza para determinar la identidad y la estructura de átomos al analizar su radiación emitida en una longitud de onda particular.

El principal proceso físico que forma la esencia de la técnica LIBS es la formación de un plasma de alta temperatura, inducido por un pulso láser; con valores de irradiancia por encima de 10 MW/cm^2 . En la Figura 5.1 [23] se muestra el proceso de la formación del plasma. En LIBS, un pulso láser se enfoca sobre la superficie de la muestra; cuando este colisiona con la muestra, ablaiona un pequeño volumen de material; este proceso es conocido como ablación láser.

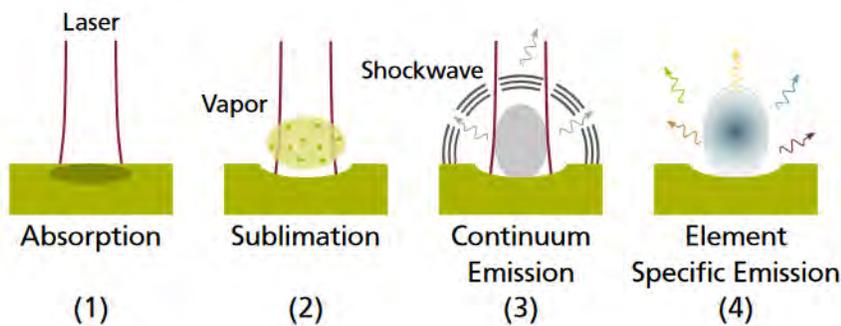


Figura 5.1: Principio del rompimiento inducido por láser.

Durante la ablación láser, el material ablaionado se disocia (del inglés, break down) en átomos e iones excitados ya que interactúa con una porción posterior del pulso láser empleado para formar un plasma altamente energético. Después del pulso láser, el plasma emite radiación específica del elemento, mientras su emisión decae, a partir de la cual se puede obtener información cualitativa y cuantitativa de la muestra.

Inicialmente, durante el enfriamiento del plasma, su emisión es dominada por una “luz blanca” conocida como *radiación electromagnética continua* o emisión en continuo, debido a que tiene casi nula variación de intensidad en función de la longitud de onda; esto como producto de la radiación producida por la recombinación entre iones y electrones libres. Esto implica, un

tiempo de retardo entre la señal de disparo del láser y el inicio del tiempo de exposición, de tal manera que en la radiación emitida se reduzca el ruido luminoso de fondo (luz blanca) y las líneas de emisión atómica, característica de los elementos, puedan aún apreciarse en la señal.

En la Figura 5.2 se muestran las partes principales que conforman un sistema LIBS. La luz emitida por el plasma es colectada y dirigida a un espectrógrafo para su análisis. Una unidad de control (PC) se encarga de sincronizar la señal de disparo del láser con los retardos y tiempos de exposición de la cámara.

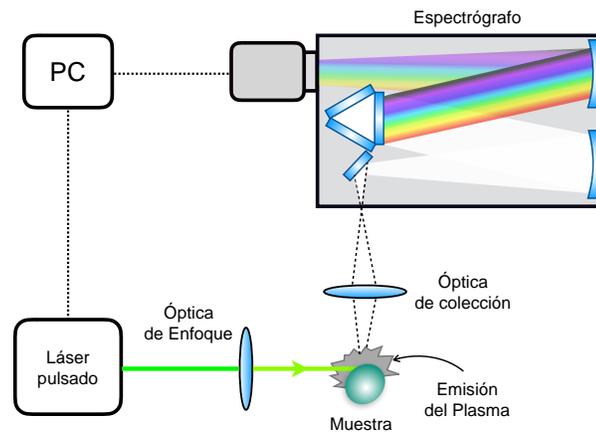


Figura 5.2: Diagrama esquemático del arreglo experimental LIBS.

5.2. Resultados experimentales

Para la detección de líneas espectrales en el análisis de trazas, se prepararon muestras que contenían elementos específicos disolviendo diferentes sales que contienen Sodio (Na), Aluminio (Al) y Manganeso (Mn) en agua purificada. Se utilizó una jeringa para colocar la gota de agua en el nodo acústico ubicado a la altura donde se dispara el láser. En la Figura 5.3 se muestra un espectro LIBS obtenido del promedio de dos señales de una gota acústicamente levitada; donde, el espectro muestra el bien conocido doblete del Sodio ubicado en 589 nm .

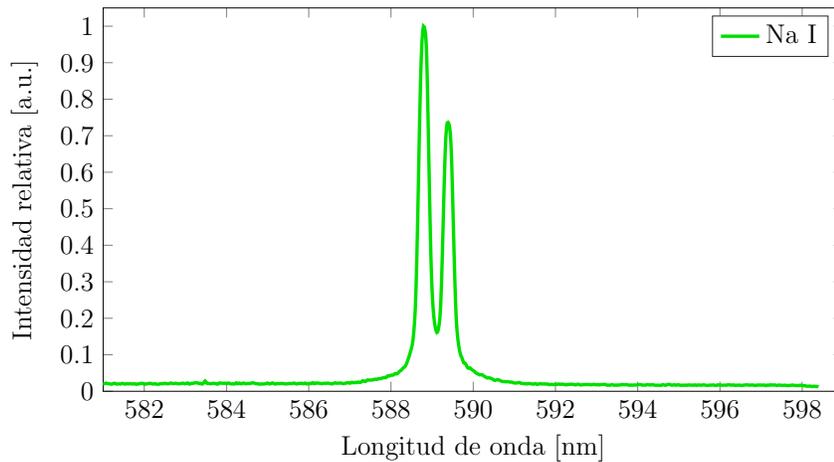


Figura 5.3: Espectros de emisión atómica de una solución acuosa que contiene Na a 1 ppm .

Posteriormente, se levitaron gotas de solución acuosa con Aluminio a diferentes concentraciones. Fue posible obtener señal de su línea espectral hasta una concentración de 300 ppb . En la Figura 5.4 se muestra el espectro LIBS del aluminio en una gota de agua a 3 ppm . Se puede observar también en este espectro las líneas espectrales de *Ca II* (ión de Calcio) localizadas en 393.3 nm y 396.8 nm , respectivamente. La presencia de estas líneas se debe al calcio disuelto en el agua empleada para la preparación de las soluciones [12].

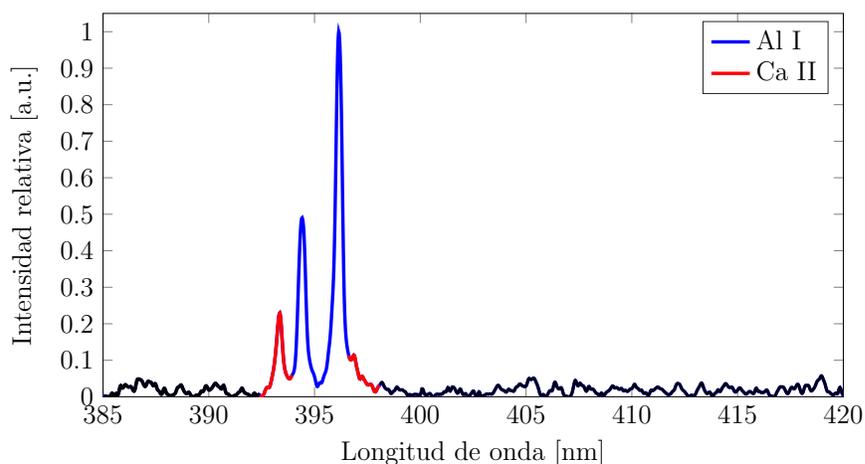


Figura 5.4: Espectros de emisión atómica de una solución acuosa que contiene Al a 3 ppm.

En la Figura 5.5 se muestra el espectro del Al I para una concentración de 300 ppb. El cual es cercano a 200 ppb, límite permisible de este metal en el agua para uso y consumo humano, de acuerdo a la norma NOM-127-SSA1-1994.

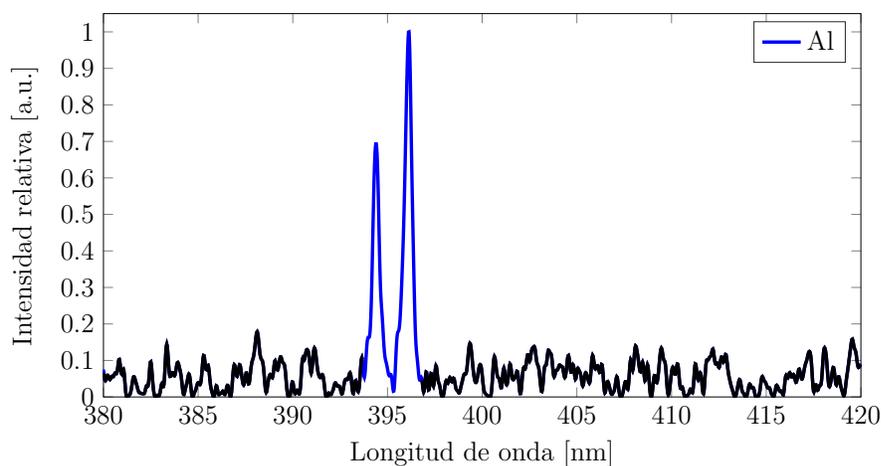
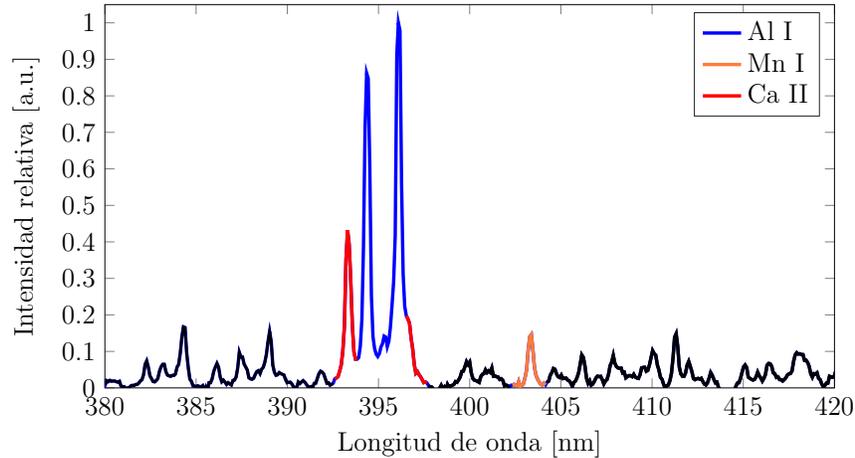


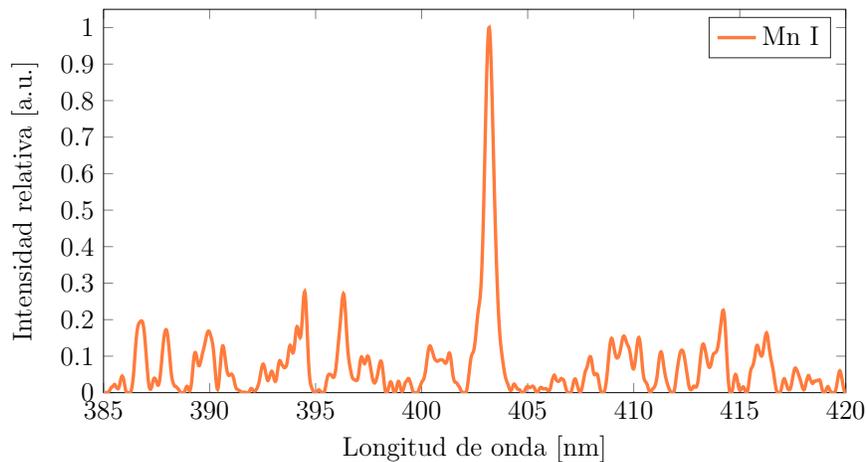
Figura 5.5: Espectros de emisión atómica de una solución acuosa que contiene Al a 300 ppb.

Finalmente, se realizaron pruebas con soluciones acuosas de Manganeseo a diferentes concentraciones, ya que este es otro metal típico que se encuentra

en el agua. En la Figura 5.6a se muestra el espectro LIBS de manganeso en gota de agua levitada a una concentración de 5 ppm. Se puede observar señal de aluminio ya que el levitador no fue limpiado después de trabajar con el aluminio, quedando restos de este metal en el levitador. De igual forma se observan las líneas espectrales del ión de calcio, como en el caso anterior.



(a)



(b)

Figura 5.6: Espectros de emisión atómica de una solución acuosa que contiene Mn a concentración 5 ppm, espectros obtenidos (a) antes y (b) después de limpiar el levitador acústico.

Después de realizar la limpieza del levitador, se procedió a medir el es-

pectro LIBS de la solución con manganeso, Figura 5.6b, donde se muestra el promedio de los dos mejores resultados obtenidos de Mn I en gota de agua a 5 ppm . En este caso solo aparece la línea espectral del manganeso centrada en 403.3 nm , lo que indica la importancia de limpiar la cavidad del levitador cada que se realiza un análisis elemental para no contaminar la muestra en cuestión.

A pesar que el límite de detección de Manganeso en gotas levitadas no está cercano a 150 ppb , el límite permisible establecido en la norma antes mencionada, es posible mejorar estos resultados ya que el análisis espectral se realizó cuando no estaba completamente seca la muestra; por lo que al realizar LIBS en muestras con restos de agua la señal de manganeso obtenida es débil. La medición se realizó de esta manera debido a que al secarse la muestra, el tamaño de partícula llega a ser tan pequeño que el campo de presión de la onda estacionaria entre transductor y reflector la arroja fuera del nodo de levitación. Por lo cual, es importante implementar un método que asegure que el tamaño final de partícula sea adecuado para mantener su posición de levitación. Una alternativa es el empleo de cloruro de sodio para saturar una solución, de tal manera que se pueda obtener una partícula sólida, al secarse, de tamaño adecuado, que contenga la sal y el metal que se desea medir.

Capítulo 6

Conclusiones

El empleo del método matricial para la simulación del potencial acústico en reflectores con geometrías cóncavas solo es válido al incluir un absorbente acústico, en forma análoga al cálculo por elemento finito, para evitar la divergencia del criterio establecido para determinar el comportamiento estacionario del potencial. Al obtener un análisis cuantitativo del potencial acústico mediante el método matricial, se estimó de una manera rápida el tamaño de gota que se puede levitar, la posición de los nodos de levitación, las distancias de resonancia y cómo se comportan al cambiar la frecuencia del voltaje de alimentación, así como la separación entre los reflectores.

La fuente de ultrasonido diseñada es capaz de alimentar al voltaje y frecuencia de operación del transductor tipo Langevin del sistema de levitación, sin presentar variaciones significativas que representen afectaciones en el potencial acústico de la onda estacionaria generada en la región comprendida entre transductor y reflector. La estabilidad de la partícula se ve afectada por las corrientes de aire o turbulencias que se presentan alrededor del levitador acústico, por lo que en el diseño mecánico fue necesario agregar una cámara de acrílico para aislar la cavidad del levitador.

El monitoreo de la gota levitada se realizó mediante un sistema de visión, donde una cámara es empleada para medir el tamaño de gota y su evolución temporal; mientras que para determinar la posición en el espacio 3D, se emplean las proyecciones de los planos xz y yz del levitador en una misma cámara, generando una sola imagen de la cual se extrae la información necesaria.

La estabilidad axial y radial de la gota, tiene la misma desviación estándar debido a la geometría uniaxial del levitador y se ve directamente afectada

por la alineación del sistema de levitación. Al realizar el seguimiento en el espacio tridimensional, se determina que existen lapsos de tiempo en los cuales la desviación estándar del desplazamiento es aproximadamente $3 \mu\text{m}$ para el eje z (altura) y menor a los $7 \mu\text{m}$ para los ejes x y y . Adicionalmente, se realizó un análisis de velocidad de la partícula para determinar el instante de tiempo en el cual esta permanece estática, en este lapso de tiempo es cuando la realización de la espectroscopia LIBS es viable para obtener una reproducibilidad alta.

Cuando el contenido de los elementos en la gota es del orden de *ppb*, el sistema se torna inestable y por lo tanto el empleo de una solución salina saturada es necesario, mezclada con la solución a analizar. Se observó que el tiempo de secado, para esta solución salina, es menor a medida que se aumenta la concentración del cloruro de sodio disuelto en el agua, lo cual permite el análisis elemental mediante LIBS en lapsos de tiempo cortos, con una alta reproducibilidad y a concentraciones del orden de *ppb*. Una de las principales ventajas de realizar LIBS en gotas líquidas levitadas, es que requiere muestras de volúmenes del orden de unos cuantos nanolitros.

6.1. Perspectivas

Se propone como actividades futuras diseñar sistemas de levitación uniaxial, con cualquier geometría de transductor y reflector, para un propósito específico, ya sea para levitar gotas de mayor o menor tamaño. Esto se logra al emplear algoritmos genéticos para la optimización del parámetro deseado de acuerdo a un criterio o función objetivo [24–26].

En cuanto al análisis espectroscópico LIBS, es necesario mejorar la señal obtenida para generar una curva de calibración y de esta manera cuantificar el contenido del metal en el líquido. Para esto se propone agregar agua saturada a la muestra líquida, para que al secarse la partícula forme un cristal confinando el metal contenido en el agua; donde el tamaño final del sólido sea suficiente para cumplir las condiciones de estabilidad para realizar análisis elemental.

Referencias bibliográficas

- [1] M. A. B. Andrade, N. Perez, F. Buiocchi, and J. C. Adamowski, “Matrix method for acoustic levitation simulation,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 58, pp. 1674–1683, August 2011.
- [2] E. Welter and B. Neidhart, “Acoustically levitated droplets — a new tool for micro and trace analysis,” *Fresenius’ Journal of Analytical Chemistry*, vol. 357, no. 3, pp. 345–350, 1997.
- [3] S. Santesson and S. Nilsson, “Airborne chemistry: acoustic levitation in chemical analysis,” *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 378, no. 7, pp. 1704–1709, 2004.
- [4] F. Priego Capote and M. D. Luque de Castro, “Ultrasound in analytical chemistry,” *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 387, no. 1, pp. 249–257, 2007.
- [5] R. J. K. Weber, C. J. Benmore, S. K. Tumber, A. N. Taylor, C. A. Rey, L. S. Taylor, and S. R. Byrn, “Acoustic levitation: recent developments and emerging opportunities in biomaterials research,” *European Biophysics Journal*, vol. 41, no. 4, pp. 397–403, 2012.
- [6] S. T. Järvinen and J. Toivonen, “Analysis of single mass-regulated particles in precisely controlled trap using laser-induced breakdown spectroscopy,” *Opt. Express*, vol. 24, pp. 1314–1323, Jan 2016.
- [7] S. Santesson, J. Johansson, L. S. Taylor, I. Levander, S. Fox, M. Sepaniak, and S. Nilsson, “Airborne chemistry coupled to raman spectroscopy,” *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 33, no. 1, pp. 1–10, 2012.

- copy,” *Analytical Chemistry*, vol. 75, no. 9, pp. 2177–2180, 2003. PMID: 12720359.
- [8] B. R. Wood, P. Heraud, S. Stojkovic, D. Morrison, J. Beardall, and D. McNaughton, “A portable raman acoustic levitation spectroscopic system for the identification and environmental monitoring of algal cells,” *Analytical Chemistry*, vol. 77, no. 15, pp. 4955–4961, 2005. PMID: 16053309.
- [9] R. Tuckermann, L. Puskar, M. Zavabeti, R. Sekine, and D. McNaughton, “Chemical analysis of acoustically levitated drops by raman spectroscopy,” *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, vol. 394, no. 5, pp. 1433–1441, 2009.
- [10] J. Schenk, L. Trobs, F. Emmerling, J. Kneipp, U. Panne, and M. Albrecht, “Simultaneous uv/vis spectroscopy and surface enhanced raman scattering of nanoparticle formation and aggregation in levitated droplets,” *Anal. Methods*, vol. 4, pp. 1252–1258, 2012.
- [11] S. Baer, M. A. B. Andrade, C. Esen, J. C. Adamowski, G. Schweiger, and A. Ostendorf, “Analysis of the particle stability in a new designed ultrasonic levitation device,” *Review of Scientific Instruments*, vol. 82, no. 10, p. 105111, 2011.
- [12] S. T. Järvinen, J. Saarela, and J. Toivonen, “Detection of zinc and lead in water using evaporative preconcentration and single-particle laser-induced breakdown spectroscopy,” *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 86, pp. 55 – 59, 2013.
- [13] M. A. B. Andrade, F. Buiochi, and J. C. Adamowski, “Finite element analysis and optimization of a single-axis acoustic levitator,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 57, pp. 469–479, February 2010.
- [14] L. P. Gor’kov, “On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid,” *Sov. Phys. Dokl.*, vol. 6, no. 9, pp. 773–775, 1962.
- [15] C. Howard and B. Cazzolato, *Acoustic Analyses Using Matlab® and Ansys®*. Taylor & Francis, 2014.

-
- [16] M. Barmatz and P. Collas, “Acoustic radiation potential on a sphere in plane, cylindrical, and spherical standing wave fields,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 77, no. 3, pp. 928–945, 1985.
- [17] N. Otsu, “A threshold selection method from gray-level histograms,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, pp. 62–66, Jan 1979.
- [18] A. International and J. Friel, *Practical Guide to Image Analysis*. A S M International, 2000.
- [19] H. Pruppacher and J. Klett, *Microphysics of Clouds and Precipitation*. Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, Springer Netherlands, 2010.
- [20] W. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. Wiley, 2012.
- [21] C. Chen, *Linear System Theory and Design*. Linear System Theory and Design, Oxford University Press, 1999.
- [22] N. Nise, *Control Systems Engineering, 7th Edition*. Wiley, 2015.
- [23] I. Rosas, *SEMI-AUTOMATIC ELEMENTAL IDENTIFICATION AND QUANTIFICATION BY LASER INDUCED BREAKDOWN SPECTROSCOPY*. PhD thesis, Centro de Investigaciones en Óptica, July 2017.
- [24] D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Artificial Intelligence, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [25] M. Gen and R. Cheng, *Genetic Algorithms and Engineering Design*. A Wiley Interscience publication, Wiley, 1997.
- [26] O. Kramer, *Genetic Algorithm Essentials*. Studies in Computational Intelligence, Springer International Publishing, 2017.