

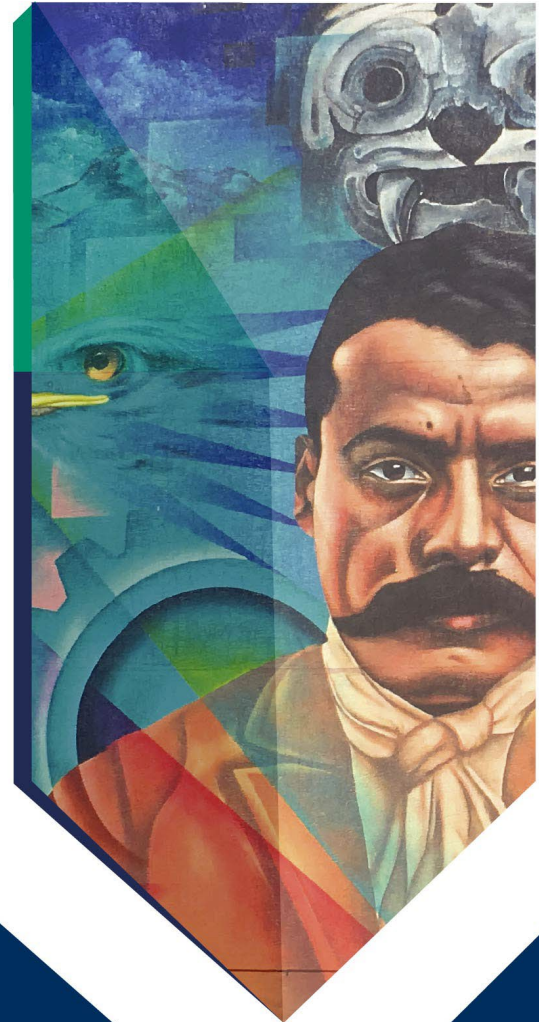
**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EMILIANO
ZAPATA DEL ESTADO DE MORELOS**

DIVISIÓN ACADÉMICA DE MECÁNICA INDUSTRIAL

**IMPLEMENTACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN
LEVITADOR ACUSTICO DE FASE VARIABLE**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO/ INGENIERA EN NANOTECNOLOGÍA**



PRESENTA:

JESÚS QUEZADA URBINA

ASESORA/ASESOR INSTITUCIONAL

DRA. ESTELA SARMIENTO BUSTOS

DR. JORGE SALVADOR VALDEZ MARTÍNEZ

ASESOR ACADÉMICO

DR. VICTOR ULISES LEV CONTRERAS LOERA

EMILIANO ZAPATA, MOR, MAYO DE 2020

ÍNDICE

Índice de figuras

Índice de tablas

Agradecimientos

Resumen

Abstract

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1 Planteamiento del Problema	14
1.2 Justificación.....	16
1.3 Hipótesis	17
1.4 Objetivos	18
1.4.1 General	18
1.4.2 Específicos.....	18
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	19
2.1 Estado del arte.....	19
2.2 Conceptos básicos.....	43
Electrónica	43
CAPÍTULO 3. DESARROLLO TEÓRICO/EXPERIMENTAL	58
3.1 Cronograma de Actividades	58
3.2 Materiales y equipos	60
3.3 Herramientas computacionales.....	61
3.4 Metodología teórico/experimental	62
3.5 Técnicas de caracterización.....	74
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	77
4.1 Resultados y discusión.....	77

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	87
5.1 Conclusiones.....	87
5.2 Recomendaciones	88

REFERENCIAS

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Fuerzas de algún tipo rodeando aun objeto provocando la levitación.....	19
Figura 2.2 Diagrama de funcionamiento de las pinzas ópticas.	20
Figura 2.3 Levitadores iononcraft hexagonales.....	21
Figura 2.4 Esquema de levitador electrostático de alta temperatura.....	21
Figura 2.5 Estructura de la levitación de trenes tipo EDS y EMS.....	22
Figura 2.6 Campos magnéticos mostrando el fenómeno de repulsión.....	23
Figura 2.7 Simulación ondas electromagnéticas rodeando al material superconductor provocando el efecto Meissner	23
Figura 2.8 Experimento de levitación aerodinámica mediante una secadora de pelo y una esfera de poliestireno.	24
Figura 2.9 Aerodinámica del ala de un avión mediante la cual se logra el principio de vuelo de los aviones fenómeno semejante al de la levitación aerodinámica.	24
Figura 2.10 Simulación de una onda estacionaria mostrando los nodos y antinodos.	25
Figura 2.11 Ley de la reflexión de ondas.	26
Figura 2.12 Levitación acústica de cuatro esferas de poliestireno levitadas con un levitador uniaxial.	26
Figura 2.13 Levitación acústica de partículas de poliestireno y el potencial adimensional de Gor'kov para tres configuraciones de levitador.	27
Figura 2.14 Levitador acústico con una gota de agua levitada analizada mediante LIBS b) Arreglo experimental de la técnica de LIBS	28
Figura 2.15 Esquema de un microreactor acústico	29
Figura 2.16 Se observan las soluciones antes y después de la reacción asi como su retiro del levitador con un tamiz de cobre.....	30
Figura 2.17 a) Estructura de levitador básica con usos en transporte sin contacto b) Estructura de levitador compleja utilizada para realizar reacciones.....	31
Figura 2.18 Imagen del levitador acústico de eje único sin contenedor externo el cual fue enviado al espacio en 1985.....	32

Figura 2.19 Sistema de hologramas acústicos monolíticos a) imagen objetivo b) distribución de fase c) impresión del holograma d) generación de imagen plana mediante el transductor ultrasónico e) generación de la imagen de la presión del sonido.	33
Figura 2.20 Levitador ultrasónico con rotación electrostática.....	34
Figura 2.21 Hologramas generados mediante el MATD.	34
Figura 2.22 Sistema de schlieren propuesto por Robert Hooke.....	39
Figura 2.23 Imagen del cambio del índice de refracción de la llama generada por un encendedor obtenida mediante la técnica de schlieren.	40
Figura 2.24 Esquema de un sistema de schlieren moderno.	40
Figura 2.25 Imágenes tipo schlieren de aviones ultrasónicos obtenidas por la NASA.	41
Figura 2.26 Diagrama de desviación de rayos de luz por un gradiente de índice de refracción dn / dy	42
Figura 2.27 Microcontrolador arduino mega.....	44
Figura 2.28 Circuito de semáforo a) circuito generado en una placa de pruebas b) circuito generado en un PCB	44
Figura 2.29 Placa con FPGA modelo cyclone IV de altera.....	45
Figura 2.30 Esquema explicativo del funcionamiento de una FPGA.....	46
Figura 2.31 Sensor ultrasónico utilizado en proyectos escolares como robots.	47
Figura 2.32 Espectro acústico	48
Figura 2.33 Experimento en el cual mediante una caja de resonancia se hace resonar otra misma que causa movimiento en una pelota comprobando así el fenómeno de resonancia.....	49
Figura 2.34 Fotografía del puente de Tacoma resonando.	49
Figura 2.35 Desplazamiento de una onda.....	50
Figura 2.36 Ecuación de desplazamiento de una onda.....	51
Figura 2.37 imagen que ayuda a comprender el desfase de una onda.....	52
Figura 2.38 Descripción de las partes de una onda.	52
Figura 2.39 Aparato generador de ondas.....	53

Figura 2.40 diagrama de conceptos y subconceptos de óptica geométrica. **¡Error!**

Marcador no definido.

Figura 2.41 logos de programas generados en lenguaje de programación java	55
Figura 3.1 Modelo del levitador realizado en solidWorks.	63
Figura 3.2 Planos para con medidas para el diseño del levitador	63
Figura 3.3 diagrama simplificado del pcb	64
Figura 3.4 Diferentes campos generados con una matriz plana de 8×8 . (a) - (c) Punto de enfoque. (d) - (f) Trampa doble. (g) - (i) Trampa de vórtice de carga topológica $l = 1$. (a), (b), (d), (e), (g) y (h) Campos de amplitud. (c), (f) y (i) Campos de fase. (a), (d) y (g) Vista frontal. (b), (c), (e), (f), (h) y (i) Vista superior.	65
Figura 3.5 Parte del código para el arduino mega encargado de controlar los transductores	66
Figura 3.6 Parte del código para el arduino nano encargado de la asignación de los transductores	67
Figura 3.7 Esquema del código VHDL para la FPGA.....	67
Figura 3.8 Base de acrílico para el levitador con los transductores puestos.....	68
Figura 3.9 Multímetro utilizado para determinar la polaridad de los transductores ...	68
Figura 3.10 proceso de soldar capacitores a la pcb y comparación de su tamaño con una moneda	69
Figura 3.11 pcb terminada y pcb con descripción de los componentes soldados	69
Figura 3.12 diagrama y arreglo electrónico para realizar la asignación de pines.	70
Figura 3.13 levitador plano 8×8 utilizando ultraino expulsando partícula de poliestireno.	71
Figura 3.14 estructura de acrílico para acomodar de forma más compacta los módulos amplificadores L298N.	71
Figura 3.15 levitador cóncavo con reflector de aluminio levitando una esfera de poliestireno.....	72
Figura 3.16 tractor beam funcionando con ultraino mismo que se observa en la pantalla del fondo	73
Figura 3.17 Esquema de programación de la fpga alhambra II cada bloque se encuentra programado en verilog.	73

Figura 3.18 Levitador plano 8x8 funcionando con la fpga alhambra II.	74
Figura 3.19 osciloscopio de la marca teltronix mostrando las señales cuadradas salidas del microcontrolador.....	75
Figura 3.19 osciloscopio de la marca teledyne mostrando las señales senoidales salidas de los transductores ultrasónicos.....	76
Figura 4.1 Imagen ilustrativa de los amplificadores emitiendo presión acústica hacia una mano produciendo una sensación táctil.	78
Figura 4.2 poliestireno levitado e iluminado generando una holografía acústica de forma de s.	79
Figura 4.2 Levitador desarrollado por inoue de 1992 transductores.	80
Figura 4.4 Diferentes arreglos de transductores con aplicaciones distintas todos desarrollados por el Dr. Asier marzo.....	81
Figura 4.2 Estructura de la programación de la fpga y del funcionamiento del levitador propuesto por el Dr. William.....	82
Figura 4.6 Estructura del levitador strobino.....	83
Figura 4.7 Diagrama de funcionamiento del levitador del Dr. zenhnter.....	84
Figura 4.8 FPGA alhambra II esta fpga es open source y se ha ido innovando de manera acelerada en su programación haciéndola cada vez más amigable.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Diagrama de Gantt.	59
Tabla 3.2 Materiales utilizados para la fabricación del levitador.....	60
Tabla 3.3 consumos de voltaje y amperaje del levitador plano utilizando ultraino junto con los amplificadores TC4427A.....	74
Tabla 3.4 Consumo del levitador tractor beam con amplificadores I298n.	75
Tabla 3.5 Consumo del levitador plano 8x8 con amplificadores I298N y alhambra II.75	
Tabla 4.1 En esta tabla se pueden observar los diferentes proyectos realizados desde el 2013 hasta el 2019.....	77
Tabla 4.2 Levitadores utilizados durante esta tesis.....	86

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a:

Agradezco a: mi familia por apoyarme siempre en mis decisiones especialmente a mi madre Matilde Urbina Salas, a mi hermana Martha Elena Quezada Urbina y a mi padre Jesús Quezada Sotelo ya que gracias a ellos me he convertido en un hombre de bien ya que me han guiado adecuadamente a lo largo de mi vida, emocional, económica y académica, gracias a ellos he logrado cumplir muchos de mis propósitos.

También agradezco a mis amigos y compañeros de trabajo por brindarme su confianza y amistad que han sido los que me han acompañado durante esta travesía.

Agradezco a la Universidad Tecnológica Emiliano Zapata del Estado de Morelos por darme profesores calificados como la Dra. Estela Sarmiento Bustos y el Dr. Jorge Valdez quienes fueron mis asesores académicos y me brindaron toda su atención al igual que a la Dra. Manuela Calixto Rodríguez y la Dra. Adriana Reyes Mayer quienes siempre han estado al pendiente de nuestro grupo, así mismo agradezco a todos los profesores de la DAMI, de la Academia de Ciencias y la Academia de Idiomas, que brindaron su tiempo, conocimiento y atención para enseñarme de la mejor manera.

De igual manera agradezco al Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM por haberme permitido trabajar en sus instalaciones, brindándome todo lo necesario para realizar mi trabajo de tesis, agradezco especialmente al Dr. Víctor Ulises Lev Contreras Loera por haber sido mi asesor académico, por haberme permitido trabajar con él y enriquecerme con sus conocimientos y tiempo. Y finalmente agradecer al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) IN109221 de DGAPA-UNAM por brindar los recursos para la adquisición del equipo y material utilizado en este trabajo.

RESUMEN

Se trabajó con diferentes levitadores durante la estancia en el laboratorio de óptica del instituto de ciencias físicas de la UNAM (ICF) levitadores como el nanolev, el tinylev, el tractor beam y un arreglo plano de 8x8 transductores ultrasónicos. El nanolev se construyó como levitador de practica debido a su sencillez y al ser reportado con anterioridad se logró replicar sin ningún problema, este consta de dos transductores ultrasónicos en fase que generan una onda estacionaria siendo capaz de levitar pequeñas partículas de poliestireno estos deben estar separados entre 2 y 3 cm y estar fijos uno encima del otro para poder lograr la levitación acústica este levitador se utilizó como introducción al campo de la levitación acústica debido a su sencillez.

Posteriormente se construyó el tinylev este es un levitador que ya se había realizado en el laboratorio este cuenta un total de 36 transductores distribuidos en 3 anillos concéntricos, pero se utilizaron solamente 18 transductores que distribuidos en los dos anillos centrales. El modelo inicial controla todos los transductores en fase pero se procedió a controlar cada transductor individualmente. Los amplificadores de voltaje utilizados fueron los módulos L298N mismos que son conocidos como puentes H utilizados comúnmente para controlar motores. Cada amplificador es capaz de manipular 4 transductores individualmente ya que no se realizó la función push-pull, esto se realizó para poder asignar fases diferentes a cada transductor y así probar el primer código realizado con la FPGA (field-programmable gate array). Posteriormente se utilizó el tractor beam y el levitador plano para poner a prueba el software Ultraino, código de acceso libre diseñado y publicado por el Dr. Asier marzo de la Universidad Pública de Navarra. Este software cuenta con un simulador de levitadores en el cual se pueden diseñar diferentes arreglos y diferentes tipos de levitación. Asimismo el software cuenta con un código para controlar arduino mega y se encarga de generar y separar los desfases para cada transductor. En el caso del tractor beam se utilizaron los mismos módulos amplificadores (L298) mientras que para el levitador plano se utilizó una pcb con amplificadores smd TC4427A esto debido a la gran cantidad que se necesitarían.

El tractor beam fue un levitador que ya se encontraba en el laboratorio y funcionaba al controlar dos mitades con diferencia de fase de π para generar la distribución de presión conocida como “trampa gemela”. En este trabajo se adaptó este levitador para manipularlo con el software de Ultraino, Sin embargo, solo se logró levitar pero no se logró obtener manipular la posición de los objetos levitados. Por otra parte el levitador plano se construyó desde cero utilizando una placa fenólica como base adaptada y unas patas de acrílico para sostenerlo, en el mismo caso que el tractor beam este no logro funcionar debido a que el cambio de fase no se lleva a cabo por parte del software ultraino, así que posteriormente se procedió a implementarlo con nuestro código de la FPGA y los módulos amplificadores L298N con el push pull activado logrando así que pudiera levitar pero sin llevar a cabo una manipulación de la partícula.

Estos levitadores fueron realizados con fines de investigación y para futuras aplicaciones del laboratorio de óptica del instituto de ciencias físicas de la UNAM. Lamentablemente las técnicas de caracterización como es schlieren quedaron inconclusas por motivos de la pandemia covid-19 pero se lograron levitar partículas de poliestireno sin su manipulación tridimensional aun así se pueden observar ciertas imágenes semejantes a lo que menciona la literatura a lo largo de este escrito mostrando tanto patrones de ondas estacionarias como dedos acústicos

Sin embargo, se ha logrado el inicio de un proyecto en el cual mediante la implementación de las FPGAs libres sea más fácil la manipulación de fases, cambios de estructuras de levitadores, así como de modos de levitación variando entre vórtices, puntos focales, trampas gemelas y ondas estacionarias siendo estas últimas la más comunes en el uso de estos dispositivos. De igual manera se planea optimizar este sistema a futuro para mejorar su estabilidad e incluso construir dispositivos de mayor tamaño para la realización de holografía acústica similares a los dispositivos descritos en artículos ya publicados, pero diferenciando en un código de acceso más fácil a modificaciones así como un costo accesible para fines de investigación.

ABSTRACT

Different levitators were made during the stay in the optics laboratory of the physical sciences institute of the UNAM (ICF) levitators such as the nanolev, the tinylev, the tractor beam and a flat arrangement of 8x8 ultrasonic transducers, the nanolev was made as a levitator of It is practiced due to its simplicity and when previously reported, replication was achieved without any problem, it consists of two ultrasonic transducers in phase that generates a standing wave, being able to levitate small polystyrene particles, these must be separated between 2 and 3 cm and be fixed one on top of the other to achieve acoustic levitation this levitation was used as an introduction to the field of acoustic levitation due to its simplicity.

Subsequently, the tinylev was carried out, this is a levator that had already been carried out in the laboratory, this has three rings and a total of 36 transducers, but only 18 were used, which are the two central rings, the initial model had all the rings in phase but we proceeded to desolder the transducers and put individual amplifiers for each transducer, the amplifiers used were the L298N modules, which are known as H bridges used to control motors, each amplifier is capable of handling 4 transducers individually since the push function was not performed pull, this was done to be able to assign different phases to each transducer and thus test the first code made with the FPGA (field-programmable gate array), then the tractor beam and the flat levator were used to test the ultraino software itself. which was obtained from an article by Dr. Asier March this software has a simulated r of levitation ores in which different arrangements and different types of levitation can be made, also this has a code for arduino mega this is responsible for generating and separating the phases for each transducer, in the case of the tractor beam the same amplifier modules were used (L298) while for the flat levitator a pcb with smd TC4427A amplifiers was used, this due to the large number that would be needed, the pcb was sent to China due to its complexity, in addition to the amplifiers, 25V 4.7uF smd capacitors were used and 25VDC 0.1uF these components were hand soldered.

The tractor beam was a levator that was already found in the laboratory, it worked in such a way that it was divided into two parts, having a phase of 0 and the other of π , thus generating the acoustic fingers, but when trying to use it with ultrasound, this achievement levitated but it was not possible to obtain the necessary phase change, on the other hand, the flat levator was made from scratch using a phenolic plate as an adapted base and acrylic legs to support it, in the same case that the tractor beam did not work because the Phase shift is not carried out by the ultra-thin software, so later we proceeded to implement it with our FPGA code and the L298N amplifier modules with the push pull activated, thus achieving that it could levitate but without carrying out a manipulation of the particle.

These levitators were made for research purposes and for future applications in LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy), a technique used in the optics laboratory of the physical sciences institute of UNAM, unfortunately, characterization techniques such as schlieren were left unfinished due to the pandemic. covid-19 but it was possible to levitate polystyrene particles without their three-dimensional manipulation, even so, certain images similar to what the literature mentions throughout this writing can be observed showing both standing wave patterns and acoustic fingers

However, the start of a project has been achieved in which, through the implementation of free FPGAS, it is easier to manipulate phases, changes in levitation structures, as well as levitation modes varying between vortices, focal points, acoustic fingers. and standing waves, the latter being the most common in the use of these devices. In the same way, it is planned to optimize this system in the future to improve its stability by changing the arrangements of the levitators and even having larger devices to perform acoustic holography similar to the articles already published, but differentiating in a more access code. easy to modify as well as an affordable cost for research purposes.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del Problema

A finales de 1970 y principios de 1990 la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio, más conocida como NASA, buscaba nuevas formas de estudiar los efectos de la microgravedad, una de las maneras más económicas y viables de este estudio fue el desarrollo del primer levitador acústico (E.G.Lierke, R.Grossbach, K.FIOge1, 1983). Es así como surgieron estos curiosos artefactos que son una verdadera obra de ingeniería y tienen múltiples aplicaciones en diversos campos de la ciencia, la ingeniería y la industria.

En química, al realizar alguna manipulación o almacenamiento de un reactivo debe considerarse que el envase que se utilizara depende de la sustancia usada. Por ejemplo, para el uso de Ácido fluorhídrico es necesario usar contenedores de plástico ya que este corroe el vidrio, mientras que para la mayoría de ácidos fuertes como ácido bromhídrico y ácido perclórico es necesario utilizar vidrio. Si no se utilizan los recipientes adecuados surgen problemas que van desde una contaminación del reactivo en caso de un simple trasvase, hasta un derrame en caso de almacenamiento. La contaminación de un reactivo representa una gran problemática que puede estropear una reacción o medición de alguna muestra, por otra parte al manipular estos reactivos existe un riesgo de contacto por el cual al no usar equipo de seguridad adecuado puede terminar en quemaduras graves u otros daños de acuerdo al reactivo y al tipo contacto es por eso que manipular un objeto sin necesidad de contacto es un sueño para muchas ciencias ya que mediante un aparato que sea capaz de esto se evitarían problemas de contaminación por contacto, riesgos de manipulación de sustancias químicas etc.

Otro uso que podría darse a un LAFV (Levitador Acústico de Fase Variable) es en infoentretenimiento ya que utilizando láseres se pueden iluminar las partículas suspendidas por el LAFV mismas que al ser movidas a altas velocidades son capaces

de formar imágenes tridimensionales semejantes a un holograma como los de las películas de ciencia ficción (Hirayama et al., 2019). Los hologramas actuales tienen una fabricación compleja y costosa, los que se han logrado hacer se elaboran mediante el uso de múltiples proyectores posicionados estratégicamente, pero este sistema es deficiente ya que consume altas cantidades de energía y brinda imágenes poco visibles en ambientes iluminados, mientras que el sistema propuesto implementando el LAFV se espera que presente una mayor viabilidad mejorando aspectos como la calidad de las imágenes obtenidas, los costos por consumos de energía y manufactura. Siendo así una opción más factible para su comercialización en un futuro.

Otra aplicación que se le da en la actualidad a los levitadores acústicos, es su uso en técnicas espectroscópicas como la espectroscopia de plasma inducido por láser (LIBS) esta técnica se utiliza en diversos laboratorios., Por ejemplo, en el Instituto de Ciencias Físicas de la UNAM en el cual mediante un levitador se suspenden gotas de agua en diferentes atmosferas controladas y con ayuda de un haz láser se evaporan obteniendo así una muestra preconcentrada. Posteriormente se enfoca un pulso láser para generar un plasma a partir de la muestra y obtener un espectro de emisión, del cual es posible identificar la composición química del agua analizada. Gracias a la levitación acústica se pueden analizar volúmenes del orden de nanolitros y detectar con una sensibilidad de hasta partes por billón, dependiendo del analito y las condiciones experimentales(Contreras et al., 2018) al implementar un levitador acústico de fase variable capas de manipular las partículas tridimensional mente se podría llevar a cabo una medición más rápida ya que se podrían realizar preconcentraciones a una partícula mientras otra es analizada y al final generar un promedio de los análisis realizados.

Es así que la elaboración de un levitador acústico de fase variable (LAFV) es un artefacto innovador que será capaz de solucionar diversas problemáticas del mundo moderno.

1.2 Justificación

La acústica es una ciencia que comenzó en la antigua Grecia y Roma, aunque en un principio no se consideraba una ciencia sino un arte. Sin embargo, tiempo después comenzaría su estudio y surgiría la acústica como una ciencia. La acústica siempre ha tenido múltiples aplicaciones desde su surgimiento con instrumentos musicales resonantes hasta experimentos complejos que se realizan en la actualidad. La acústica se ha estudiado desde hace varios años logrando muchas contribuciones para la humanidad en diversas áreas científicas, por ejemplo: en química se usan equipos de ultrasonido para dispersión de sustancias coloidales, el ultrasonido también es utilizado en radares de aviones, barcos y submarinos permitiendo anticiparse a las inclemencias del clima. Otra aplicación de la acústica es en los cuartos anti ruido que son construidos con paneles que son capaces de aislar los ruidos exteriores.

Es así que la acústica es una ciencia que sigue abriendo ramas y campos de investigación entre las cuales se encuentra la levitación acústica. Existen diversos campos en los que se han utilizado levitadores acústicos. Ahora se propone la implementación de un LAFV para seguir desarrollando tecnología nueva capaz de satisfacer las necesidades de los seres humanos contribuyendo en diversos campos de la ciencia. Por ejemplo, en microbiología se han logrado separar microorganismos implementando levitadores acústicos (Miles' et al., 1995).

Los beneficios que un LAFV vienen al definir una de muchas aplicaciones que se le pueden dar, algunos ejemplos de estas aplicaciones serian la holografía acústica las pinzas acústicas y el rayo tractor sónico, todos estos aparatos son capaces de manipular las partículas sin necesidad de contacto, pero cada uno cuentan con diversas propiedades características de cada aparato, por ejemplo:

En la holografía acústica se enfoca en la creación de hologramas mediante partículas suspendidas por el sonido iluminadas con la ayuda de láseres creando así imágenes tridimensionales semejantes a un holograma esta busca mover partículas lo más rápido posible.

Por otra parte, las pinzas acústicas se orientan a la manipulación de sustancias sin interferencia u contaminación por contacto esto es muy útil en química ya que se podrían tener reacciones más puras las pinzas acústicas buscan la estabilidad de las partículas. Así como manejar presiones mayores para poder manipular mayores cantidades de sustancias Así mismo las pinzas acústicas tienen aplicaciones en transporte sin contacto.

Por otro lado, el rayo tractor sónico es capaz de dirigir partículas en puntos específicos podría utilizarse en medicina para la eliminación de nefrolitos e incluso se podría pensar en microcirugía interna y muchas aplicaciones más que resultarían más complejas, pero en las cuales es necesario empezar a investigar y desarrollar mejor para que sean viables sus futuras aplicaciones.

1.3 Hipótesis

Se espera comprender el principio de levitación acústica de fase variable mediante la réplica de un levitador obtenido del artículo Ultrair: An Open Phased-Array System for Narrowband Airborne Ultrasound Transmission (Marzo et al., 2018).

Así mismo se considera conveniente la modificación de este levitador mediante la implementación de un FPGA de la marca ICE modelo ICE ZUM ALHAMBRA II

La expectativa es que los levitadores sean capaces de manipular partículas tridimensionalmente controlando sus movimientos mediante un ordenador en tiempo real o incluso programar animaciones para que se carguen en los controladores seleccionados.

Es posible que la réplica sea un poco inestable debido al uso del microcontrolador, arduino mega.

Mientras que en el levitador propuesto con la implementación de la FPGA se espera una reacción más rápida y precisa, misma que permitirá que el levitador pueda acceder a actualizaciones de software y hardware posteriormente.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Realizar el diseño, manufactura y programación un levitador acústico de fase variable que sea capaz de manipular partículas tridimensionalmente sin contacto, innovando científica y tecnológicamente.

1.4.2 Específicos

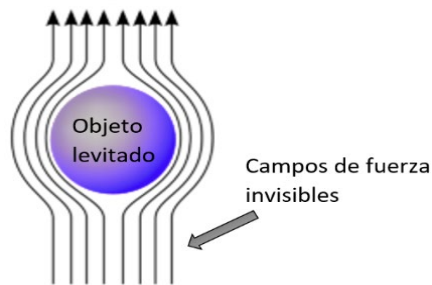
- Realizar un levitador acústico de fase variable controlado mediante una FPGA.
- Realizar los códigos de programación para controlar los levitadores acústicos.
- Implementar el uso de una FPGA en el levitador.
- Observar las ondas acústicas mediante la técnica de schlieren.
- Observar y describir las diferencias de un levitador acústico sin cambios de fase y un LAFV

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Estado del arte

Levitación

La levitación es un fenómeno físico en el cual, mediante fuerzas a distancia, llevan a cabo la suspensión libre de materia sólida o líquida como se observa en la figura 2.1



1. Figura 2.1 Fuerzas de algún tipo rodeando aun objeto provocando la levitación

La generación de los campos de fuerza invisibles con acción a distancia que contrarrestan la gravedad resulta ser una tarea fácil pero la tarea ardua consiste en la estabilidad de la levitación, el cuerpo levitado no debe desplazarse de su posición de equilibrio, sino que debe someterse a fuerzas restauradoras en todas las direcciones cuando está ligeramente desplazado de su posición de equilibrio (Brandt, n.d.). Dependiendo del tipo de fuerza ejercida para suspender el objeto se tendrá un tipo específico de levitación.

TIPOS DE LEVITACION

Levitación Óptica

El premio nobel en física del 2018 fue otorgado al científico Arthur Ashkin por sus aportaciones en la invención de las pinzas ópticas (Ashkin et al., 1987).

Una pinza óptica es un dispositivo que usa un haz de luz láser enfocado para atrapar y manipular a voluntad micropartículas dieléctricas individuales en un medio. El haz es enviado a través de un objetivo de microscopio de alta apertura numérica que es usado para capturar y observar las partículas bajo estudio(Vargas, 2007).

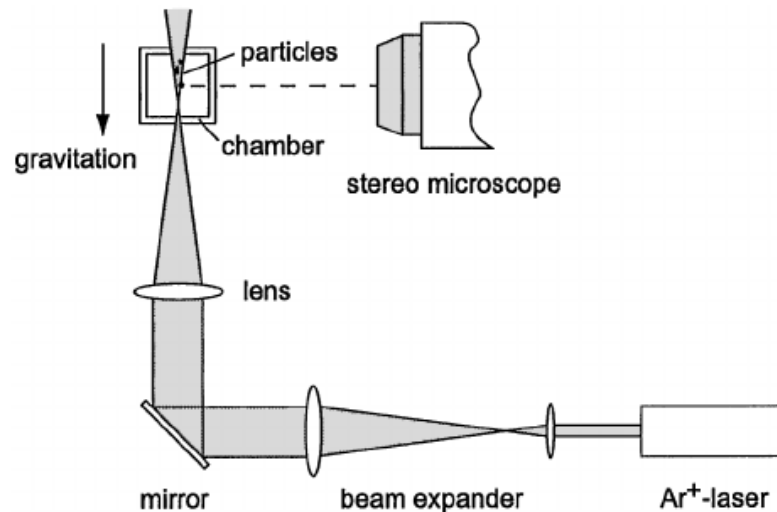


Figura 2.2 Diagrama de funcionamiento de las pinzas ópticas.

Mediante el uso de trampas ópticas como la mostrada en la figura 2.2, se han realizado diversos experimentos de “levitación óptica” con partículas micrométricas de diferentes materiales y propiedades ópticas, (partículas transparentes de alto y bajo índice de refracción, partículas metálicas, etcétera). La levitación se obtiene cuando la presión de radiación ejercida por un haz de luz que se propaga verticalmente hacia arriba, equilibra a la fuerza de gravedad de tal manera que la partícula queda suspendida (Sepúlveda et al., 2007).

Levitación Electroestática

El levitador electrostático es un dispositivo basado en la propulsión de aire ionizado los levitadores IONOCRAFT conocidos así por su patente realizada en estados unidos(De Seversky, 1964) como el mostrado en la figura 2.3



Figura 2.3 Levitadores ionocraft hexagonales

Estos levitadores cuentan con un principio de funcionamiento basado en el efecto Biefeld-Brown es un efecto eléctrico que produce un viento iónico que transfiere su cantidad de movimiento lineal a los alrededores de las partículas neutras (Abad, 2012).

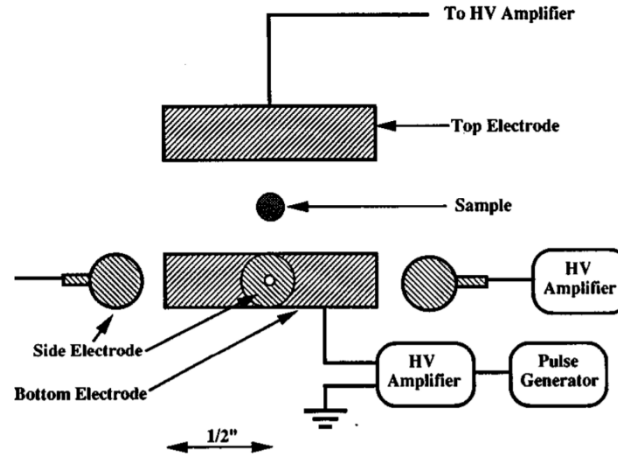


Figura 2.4 Esquema de levitador electrostático de alta temperatura.

Los levitadores electrostáticos tienen múltiples aplicaciones como su uso en técnicas sin contacto para medir la tensión superficial y la viscosidad de materiales fundidos como el observado en la figura 2.4 (Rhim et al., 1999). hasta futuras aplicaciones en tecnología aeroespacial para simular ambientes gravitacionales (BOLONKIN, 2017).

Levitación Magnética

Se conoce como levitación magnética al fenómeno por el cual un dado material puede, levitar. Este fenómeno se da gracias a la repulsión existente entre los polos iguales de dos imanes. o a lo que se conoce como “Efecto Meissner” (Perren, 2003).

Este efecto explica la física detrás de los superconductores como es la caída de la resistencia abruptamente cuando el material llega a su temperatura crítica (T_c). Y su cambio de propiedades magnéticas del mismo que es lo que nos sirve para entender la levitación magnética (LINARES, 2009).

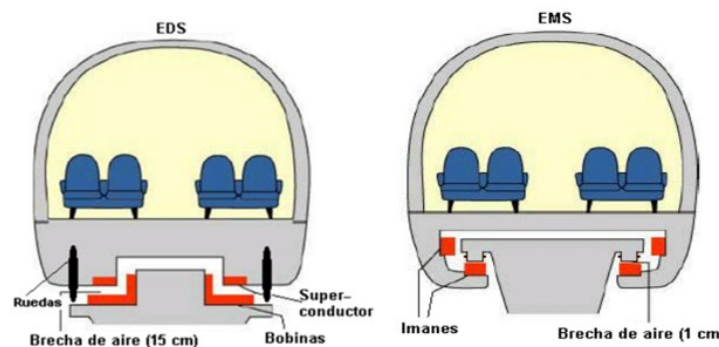


Figura 2.5 Estructura de la levitación de trenes tipo EDS y EMS.

La levitación magnética tiene múltiples aplicaciones en la actualidad, pero la más destacada es su uso en trenes de levitación. Estos tienen diferentes estructuras las dos más comunes son la EMS (electromagnetic suspension o suspensión electromagnética) y EDS (electrodynamic suspension o suspensión electrodinámica). Estos dos sistemas se pueden observar en la figura 2.5 en estos se pueden observar tanto el fenómeno de repulsión magnética para el EMS como el efecto meissner para el EDS.

Pero que ocurre detrás de esa levitación para la levitación como la EMS se requiere solo un efecto de repulsión magnética como el observado en la figura 2.6.

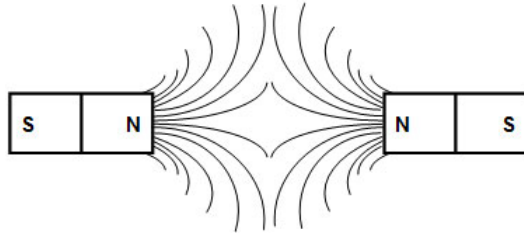


Figura 2.6 Campos magnéticos mostrando el fenómeno de repulsión.

Por otra parte, para la EDS se requiere el efecto Meissner observado en la figura 2.7 en el cual las ondas electromagnéticas rodean al superconductor creando así una fuerza de levitación.

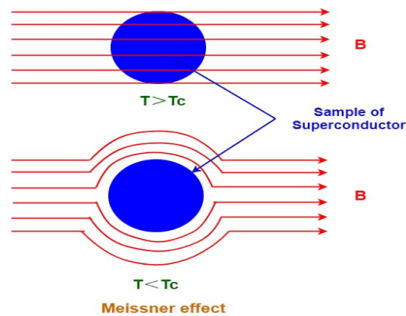


Figura 2.7 Simulación ondas electromagnéticas rodeando al material superconductor provocando el efecto Meissner

Levitación Aerodinámica

Levitación aerodinámica El término levitación aerodinámica se utiliza para una técnica en la que los sólidos o líquidos flotan libremente sobre la parte superior de una corriente de gas vertical (Pack et al., 2010).

Con esta técnica, las muestras no están en contacto con ningún material del contenedor. Por lo tanto, la levitación aerodinámica permite la realización de experimentos de alta temperatura al tiempo que evita problemas relacionados con la interacción química entre la muestra y las paredes del recipiente.

Esta levitación es una de las más sencillas de comprender y realizar ya que con un secador de pelo, una pelota de poliestireno expandido y paciencia es fácil lograrlo como en la figura 2.8

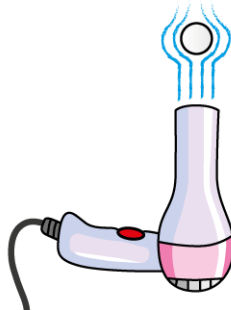


Figura 2.8 Experimento de levitación aerodinámica mediante una secadora de pelo y una esfera de poliestireno.

Pero detrás de este sencillo experimento está un fenómeno igual de complejo que el utilizado para los diferentes tipos de levitación de hecho comparando la pelota de poliestireno con el súper conductor y el aire con las ondas electromagnéticas se obtiene un sistema similar al de la levitación de los superconductores.

Pero la levitación aerodinámica es más que levitar una simple pelota este principio es utilizado para el vuelo de aviones como el esquema mostrado en la figura 2.9 en el que se muestra la aerodinámica del ala de un avión y mediante el principio de Bernoulli se logra describir su aerodinámica.

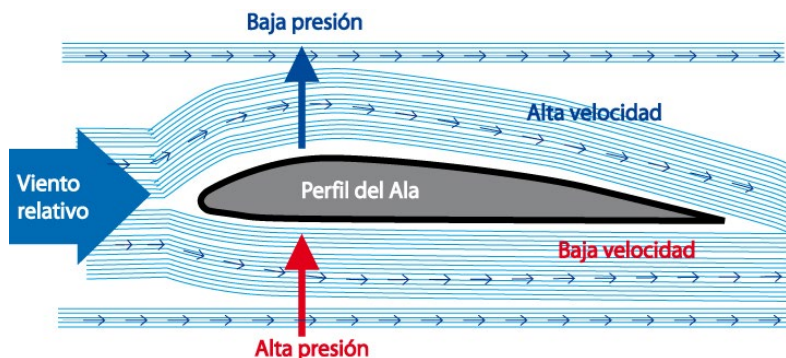


Figura 2.9 Aerodinámica del ala de un avión mediante la cual se logra el principio de vuelo de los aviones fenómeno semejante al de la levitación aerodinámica.

De igual manera la levitación aerodinámica es utilizada para técnicas estructurales de fundidos subenfriados (Mathiak et al., 2005).

Levitadores acústicos

La levitación acústica es un fenómeno que se ha estudiado desde años atrás. Por ejemplo en 1984 M. Barmatz y P. Coilas, estudiaron el potencial de radiación acústica de ondas estacionarias en una esfera y campos esféricos (Barmatz & Coilas, n.d.) y para abril de 1993 John L. Watkins y Martin B. Barmatz en conjunto con la NASA patentarían el primer levitador acústico (John L. Watkins; Martin B. Barmatz, 1993).

En la levitación acústica se debe tomar en cuenta la presión de radiación acústica, si contamos con una presión de radiación acústica fuerte podremos levitar objetos con mayor masa, las presiones acústicas más fuertes son ejercidas por las ondas de sonido estacionarias (Brandt, 2001). Debido a que las ondas estacionarias son ondas que vibran, pero no viajan, es decir son modos de vibración conocidos como armónicos compuestos por nodos (áreas de mínima presión) y antinodos (áreas de máxima presión) como los observados en la figura 2.10 la cual cuenta con dos armónicos tres nodos y dos antinodos.

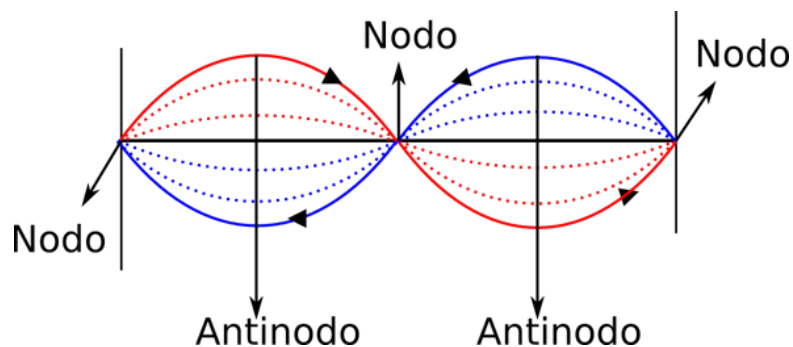


Figura 2.10 Simulación de una onda estacionaria mostrando los nodos y antinodos.

El principio de funcionamiento de un levitador acústico es que una fuente irradia una onda sonora determinada y esta rebota contra la superficie bajo el principio de reflexión

mostrado en la figura 2.11, que establece que el ángulo de incidencia de la onda sonora será igual al ángulo de reflexión.

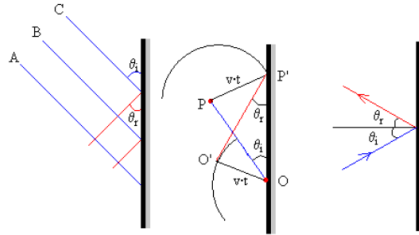


Figura 2.11 Ley de la reflexión de ondas.

Si el ángulo incidente formado por la onda sonora y la superficie reflectiva es de 90° , el camino que recorre la onda reflejada será el mismo que la incidente, lo que permite la interferencia entre los puntos de máxima y mínima presión que al combinarse generan una onda estacionaria (David Octavio Medrano, 2010).

El tipo más común de levitador acústico se es el de eje único también conocido como uniaxial observado en la figura 2.12, propuesto y realizado por W. J. Xie y B. Wei este levitador consta de un transductor ultrasónico circular y un reflector.

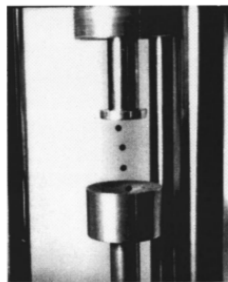


Figura 2.12 Levitación acústica de cuatro esferas de poliestireno levitadas con un levitador uniaxial.

La fuerza de levitación acústica de un solo eje se logra curvando adecuadamente la superficie y agrandando la sección del reflector para levitar materiales de alta densidad como tungsteno (Xie & Wei, 2001). aunque existen diferentes tipos de levitadores

como el de Marco A. B. Andrade que llevo a cabo la implementación de un levitador acústico no resonante que se puede observar en la figura 2.13. En un típico levitador acústico de un solo eje, en la onda estacionaria está formada por las reflexiones de onda múltiple que ocurren entre el transductor y el reflector.

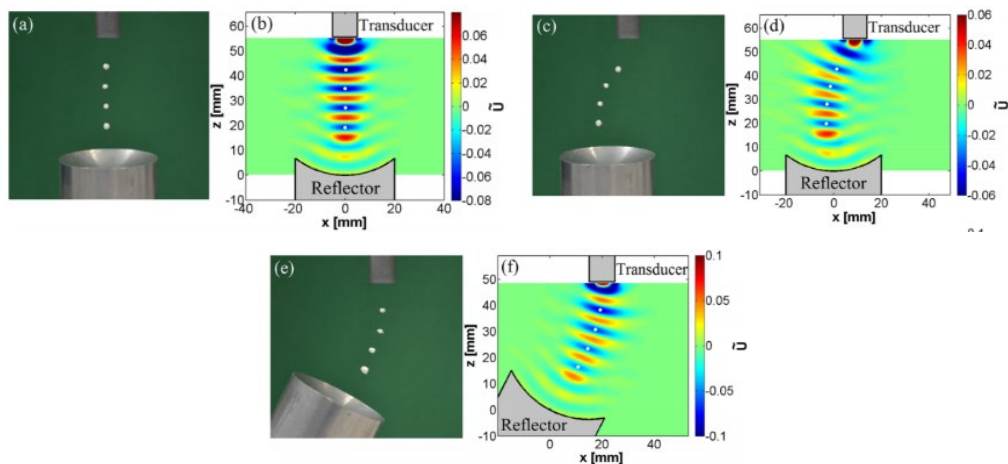


Figura 2.13 Levitación acústica de partículas de poliestireno y el potencial adimensional de Gor'kov para tres configuraciones de levitador.

En el levitador no resonante, la onda estacionaria se forma principalmente por la superposición de dos ondas: la onda emitida por el transductor y la primera onda reflejada. La interferencia entre estas dos ondas crea un nodo de presión cerca de la superficie del reflector, permitiendo que una pequeña partícula pueda ser levitada en ese nodo (Andrade et al., 2015).

APLICACIONES DE LEVITADORES ULTRASONICOS

Espectroscopia de ruptura inducida por láser

La espectroscopia de ruptura inducida por láser Laser o LIBS por sus siglas en inglés (Induced Breakdown Spectroscopy) es utilizada para la detección de elementos traza de muestras líquidas mediante el análisis de una gota levitada por ondas ultrasónicas en la figura 2.14 se observa el arreglo de la técnica de LIBS.

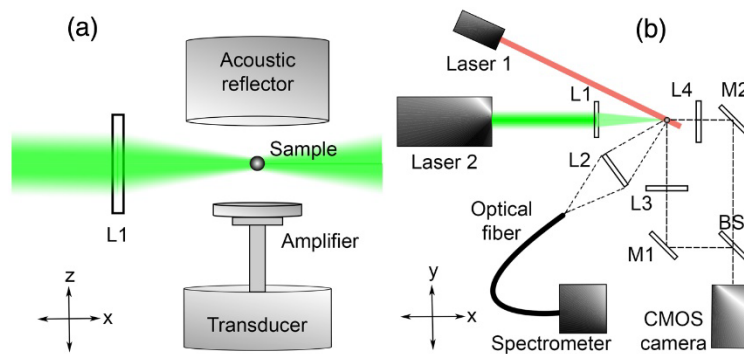


Figura 2.14 Levitador acústico con una gota de agua levitada analizada mediante LIBS b) Arreglo experimental de la técnica de LIBS

Para llevar a cabo esta técnica se usa una micro jeringa para colocar muestras individuales de gotas de líquido en uno de los nodos producidos por un levitador uniaxial (Contreras et al., 2018).

Posteriormente la muestra es sometida a ablación láser, el material ablacionado se disocia en átomos e iones excitados ya que interactúa con una porción posterior del pulso láser empleado para formar un plasma. El cual emite radiación específica del elemento, que es medida mediante un espectrómetro para obtener información cualitativa y cuantitativa de la muestra (Murillo, 2017).

Microreactores

Los microreactores son deseables para explorar procesos químicos y biológicos, ya que el consumo de reactivos es mínimo además los problemas de seguridad se manejan fácilmente.

Los levitadores acústicos de gotas son una clase de microreactores para los cuales la mezcla es continua y las interfaces sólido/líquido están ausentes o son de menor importancia que en los reactores de flujo microfabricados canalizados.

Por lo tanto, la adsorción de reactivos o la catálisis de la pared, posiblemente de importancia en los sistemas microfluídicos ordinarios, está ausente en las gotas levitadas. El transporte de reactivos o productos gaseosos es fácil. Los microreactores

de gota levitada son susceptibles de estudio por lotes o de flujo continuo de reacciones bioquímicas (Quiroga, 2014).

Los microreactores acústicos ya han sido implementados en diversas experimentaciones por ejemplo en la fusión de múltiples mármoles líquidos para la cual se utilizó el arreglo mostrado en la figura 2.15.

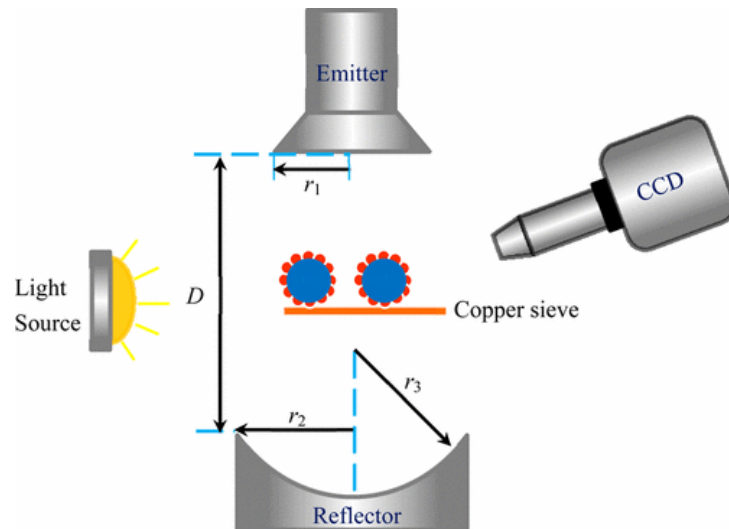


Figura 2.15 Esquema de un microreactor acústico

La levitación acústica puede impulsar la fusión de mármoles líquidos, la coalescencia provocada por la levitación acústica proporciona aún más posibilidades de microreacciones a base de mármol líquido en el futuro. Como intento preliminar, se realizó un experimento de reacción de indicador. Dos canicas líquidas que contienen fenolftaleína y solución de NaOH (5% en peso) con el mismo volumen (10 μL), se mantuvieron con un tamiz de cobre en el levitador después de encender el levitador, las canicas se unieron en una canica más grande, que rápidamente se volvió de color rosa, lo que indica que la solución de NaOH se había mezclado con la fenolftaleína Figura 2.16. Luego, la canica líquida unida se retiró fácilmente del levitador sin daños ni fugas.

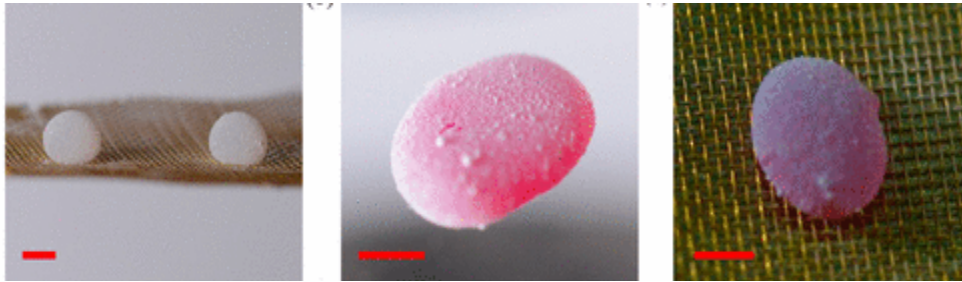


Figura 2.16 Se observan las soluciones antes y después de la reacción así como su retiro del levitador con un tamiz de cobre

Este enfoque permitió convenientemente un mayor transporte y análisis del mármol líquido. Con este método, la velocidad de reacción puede acelerarse debido a la mejor difusión causada por la oscilación de caída durante la fusión de mármol líquido (Chen et al., 2017).

Transporte sin contacto

Para el transporte sin contacto se ha utilizado pinzas acústicas estas son un conjunto versátil de herramientas que utilizan fuerzas de radiación sonora para manipular partículas que van desde vesículas extracelulares de tamaño nanométrico hasta organismos multicelulares de tamaño milimétrico(Ozcelik et al., 2018). También permiten atrapar una amplia gama de materiales de muestra en diversos medios (Marzo & Drinkwater, 2019).

Existen diferentes arreglos experimentales de las pinzas acústicas como los mostrados en la figura 2.17. En la cual se puede observar un arreglo sencillo de elaborar y un arreglo más complejo. Las estructuras acústicas con forma de pinzas, trabalenguas, etc. Emergen como los mecanismos óptimos para el tractor sónico o el transporte sin contenedores (Marzo et al., 2015). El tipo de arreglo se adaptará de acuerdo a las necesidades del usuario.

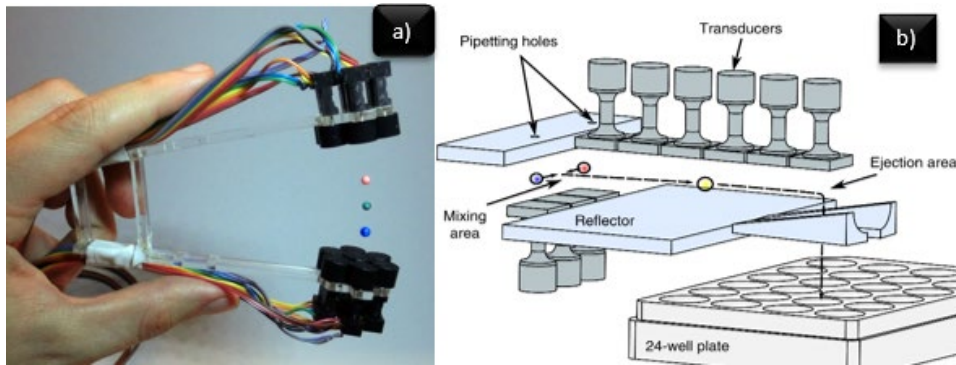


Figura 2.17 a) Estructura de levitador básica con usos en transporte sin contacto b) Estructura de levitador compleja utilizada para realizar reacciones.

El transporte sin contacto tiene múltiples aplicaciones en ciencias ya que es útil para evitar impuras en los materiales así como muestras contaminadas de igual manera mediante las pinzas acústicas se pueden llevar a cabo reacciones controladas con una mínima cantidad de reactivos ideal para experimentación a escala laboratorio.

la levitación acústica ha requerido que los objetivos estén encerrados con elementos acústicos o que tengan una maniobrabilidad limitada (Ozcelik et al., 2018).

Tecnología aeroespacial.

Durante la misión STS-61A. del Transbordador espacial Challenger. Se llevó al espacio el horno de levitación acústica mostrado en la figura 2.18 este fue destinado para el procesamiento a alta temperatura de muestras pequeñas sin recipientes.

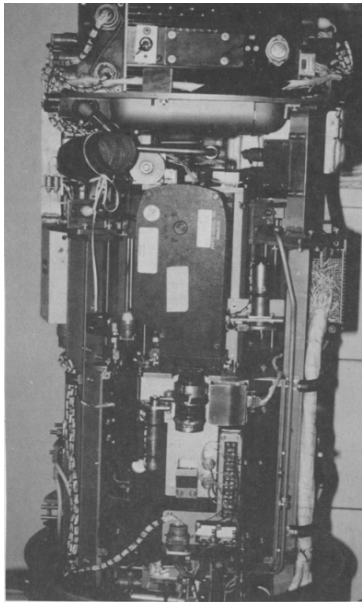


Figura 2.18 Imagen del levitador acústico de eje único sin contenedor externo el cual fue enviado al espacio en 1985

La técnica incluye el posicionamiento, calentamiento, fusión, enfriamiento y solidificación de un material soportado sin contacto físico con un recipiente u otra superficie. El espécimen se apoya en un pozo de energía potencial, creado por un campo acústico, que es lo suficientemente fuerte como para colocar la muestra en el entorno de microgravedad del espacio.

Durante el experimento, tres muestras fueron levitadas y procesadas con éxito a temperaturas de 600°C a 1500°C (Rey et al., n.d.).

HOLOGRAFIA

La holografía es una técnica fotográfica que, mediante iluminación por láser, permite obtener imágenes tridimensionales en color.

Los hologramas son realizados por procesos holográficos. Al mirar un holograma el espectador tiene la impresión de ver, a través de una placa de vidrio, un objeto realmente existente y puede observarlo desde diferentes ángulos. El holograma refleja las zonas de luz y sombra, y la textura del material resulta visible, lo que acrecienta la impresión de relieve (Toledo et al., 2009).

Se han presentado diferentes propuestas para la creación de hologramas mediante levitadores acústicos entre las que se encuentran los hologramas acústicos monolíticos, la pantalla en el aire basada en la rotación electrostática de objetos Janus levitados y la pantalla de trampa acústica multimodal.

Los hologramas acústicos monolíticos, pueden reconstruir campos de presión acústica limitados por difracción y, por lo tanto, haces de ultrasonido arbitrarios. En la figura 2.19 se puede observar el sistema de hologramas acústicos monolíticos para el que se han usado métodos de Fabricación rápida para elaborar los hologramas y lograr grados de libertad de reconstrucción dos órdenes de magnitud más altos que las fuentes de matriz en fases comerciales.

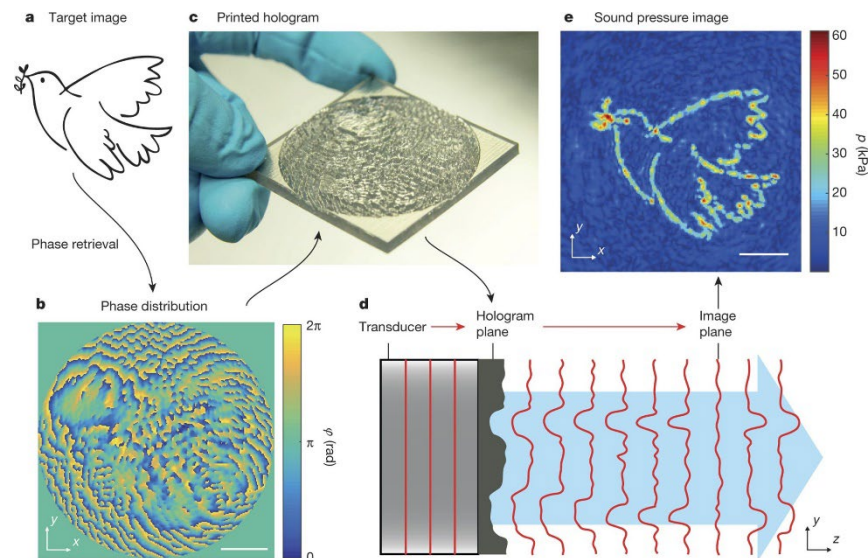


Figura 2.19 Sistema de hologramas acústicos monolíticos a) imagen objetivo b) distribución de fase c) impresión del holograma d) generación de imagen plana mediante el transductor ultrasónico e) generación de la imagen de la presión del sonido.

La técnica es económica, apropiada tanto para elementos de transmisión como de reflexión, y se adapta bien a un mayor contenido de información, mayor tamaño de apertura y mayor potencia. Las complejas distribuciones tridimensionales de presión y fase producidas por estos hologramas acústicos nos permiten demostrar nuevos enfoques para la manipulación ultrasónica controlada de sólidos en el agua y de líquidos y sólidos en el aire (Melde et al., 2016).

Mientras que en la pantalla en el aire basada en la rotación electrostática de objetos Janus levitados (JOLED) levita partículas asimétricas de diferentes colores y las rota mediante técnicas electrostáticas para formar figuras tridimensionales como la mostrada en la figura 2.20 (Sahoo et al., 2016).

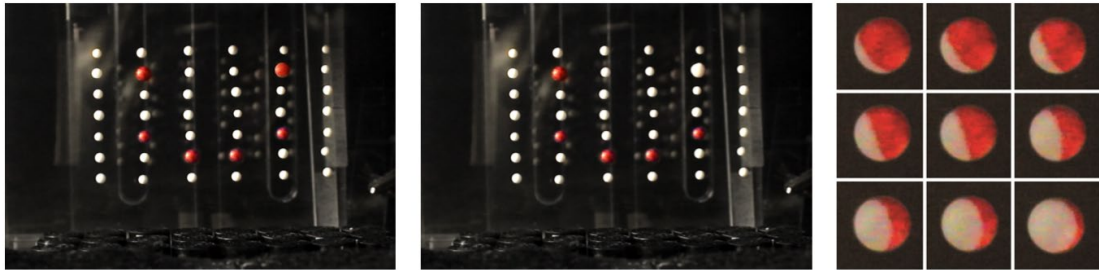


Figura 2.20 Levitador ultrasónico con rotación electrostática.

Por otra parte, el sistema holográfico más sofisticado que se acerca a los mostrados en las películas de ciencia ficción es la pantalla de trampa acústica multimodal (MATD) figura 2.21 que puede entregar simultáneamente contenido visual, auditivo y táctil, utilizando la acústoforesis como principio operativo.



Figura 2.21 Hologramas generados mediante el MATD.

El sistema atrapa acústicamente una partícula y la ilumina con luz roja, verde y azul para controlar su color mientras escanea rápidamente el volumen de la pantalla. Usando multiplexación de tiempo con una trampa secundaria, modulación de amplitud y minimización de fase, el MATD ofrece contenido auditivo y táctil simultáneo.

El sistema demuestra velocidades de partículas de hasta 8,75 metros por segundo y 3,75 metros por segundo en las direcciones vertical y horizontal, respectivamente, ofreciendo capacidades de manipulación de partículas superiores a las de otros enfoques ópticos o acústicos demostrados hasta ahora. Además, nuestra técnica ofrece oportunidades para la manipulación de la materia a alta velocidad y sin contacto, con aplicaciones en fabricación computacional y biomedicina (Hirayama et al., 2019).

ECUACIONES DE PRESIÓN Y FUERZA DE RADIACIÓN ACUSTICA

En esta sección, se presenta una visión general de la teoría detrás de La levitación acústica de objetos en un fluido ideal. La fuerza de radiación acústica es el resultado de la fuerza neta ejercida sobre un objeto por la onda de presión acústica (AUGUSTO, 2009). es así que la levitación acústica utiliza presión de radiación acústica para contrarrestar la gravedad y suspende la materia en el aire.

Para describir la presión de radiación, debemos incluir efectos de segundo orden en nuestro análisis. En la aproximación de segundo orden, los campos p , u y ρ son descrito por:

$$p = p_0 + p_1 + p_2 \quad 1a$$

$$u = u_1 + u_2 \quad 2a$$

$$\rho = \rho_0 + \rho_1 + \rho_2 \quad 3a$$

Donde considerado el movimiento de un elemento fluido de volumen infinitesimal dV como un medio continuo, puede describirse en términos de su vector de velocidad u , densidad ρ y presión p . Los campos pueden variar en espacio y tiempo, en consecuencia, son funciones de posición (r) y tiempo (t).

Reemplazando Eqs. (1a) - (3a) en la ecuación de conservación del momento expresada por: $\rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u \right] = -\nabla p$ 4a y manteniendo solo en términos de

segundo orden, obtenemos: $\nabla p_2 = -\rho_0 \frac{\partial u_2}{\partial t} - \rho_1 \frac{\partial u_1}{\partial t} - \rho_0 (u_1 \cdot \nabla) u_1$ 5a

Aunque p_2 varía con el tiempo, la mayoría de las aplicaciones que involucran las presiones de radiación acústica usan campos de armónicos temporales de alta frecuencia, cuyos efectos observables ocurren en un tiempo mucho más lento escala.

En consecuencia, podemos simplificar el tratamiento matemático calculando el valor promediado en el tiempo de p_2 sobre un gran número de ciclos. Por lo tanto, promediando el tiempo la ecuación. (5a), se puede encontrar:

$$\nabla \langle p_2 \rangle = -\rho_0 \left\langle \frac{\partial u_2}{\partial t} \right\rangle - \left\langle \rho_1 \frac{\partial u_1}{\partial t} \right\rangle - \rho_0 \langle (u_1 \cdot \nabla) u_1 \rangle$$
 6a

Donde los corchetes angulares $\langle \rangle$ representan el promedio de tiempo. La velocidad de segundo orden (u_2) es periódica para un campo armónico en el tiempo, y su descomposición en series de Fourier da como resultado una suma de ondas sinusoidales y una constante. El tiempo promedio de estas ondas sinusoidales y el tiempo derivado de la constante son ambos cero. Por lo tanto, el primero término en el lado derecho de la ecuación. 6a) también es cero, lo que resulta en:

$$\nabla \langle p_2 \rangle = - \left\langle \rho_1 \frac{\partial u_1}{\partial t} \right\rangle - \rho_0 \langle (u_1 \cdot \nabla) u_1 \rangle$$
 7a

Y combinándola con la ecuación de momento linealizado $\rho_0 \frac{\partial u_1}{\partial t} = -\nabla p_1$ 8aY la ecuación de estado del fluido en la forma linealizada $p_1 = c_0^2 \rho_1$ 9a y usando $\langle p_1^2 \rangle = 2p_1 \nabla p_1$ y $\nabla (u_1 \cdot u_1) = 2(u_1 \cdot \nabla) u_1$ 10a se obtiene:

$$\langle p_2 \rangle = \frac{1}{2\rho_0 c_0^2} \langle p_1^2 \rangle - \frac{\rho_0}{2} \langle u_1^{\text{in}} u_1 \rangle \quad 11a$$

que es el tiempo promedio de la presión de radiación

Aunque la presión de radiación $\langle p_2 \rangle$ es un fenómeno no lineal,

Se puede calcular a partir de los campos lineales p_1 y u_1 . Desde

La presión de radiación acústica, dada por la ecuación. (11a), la fuerza de radiación acústica (F_{rad}) que actúa sobre un objeto rígido de forma arbitraria

y el tamaño se calcula por:

$$F_{rad} = - \int_{S_0} \langle p_2 \rangle n dS \quad 12a$$

(Andrade et al., 2018).

Por otra parte, una expresión muy útil para obtener la fuerza de radiación acústica que actúa sobre una pequeña esfera en un campo acústico arbitrario fue derivada por Gor'kov.

En su derivación, Gor'kov asumió que una esfera de radio (R) mucho más pequeña que la longitud de onda acústica (λ) está inmersa en un campo acústico en un fluido ideal. La fuerza de radiación (F_{rad}) que actúa sobre la esfera pequeña se expresa en términos del potencial de la fuerza de radiación acústica (U), dada por:

$$U = 2\pi R^3 \left[\frac{f_1}{3\rho_0 c_0^2} \langle (p_1^{\text{in}})^2 \rangle - \frac{f_2 \rho_0}{2} \langle u_1^{\text{in}} u_1^{\text{in}} \rangle \right] \quad 13a$$

donde p_1^{in} y u_1^{in} son, respectivamente, la presión acústica incidente de primer orden y la velocidad de las partículas en la posición de la esfera. La ecuación (13a) es la famosa expresión de Gor'kov, que se ha utilizado ampliamente para obtener la fuerza de radiación que actúa sobre partículas levitantes en el aire, así como en

micropartículas en medios líquidos. los factores f_1 y f_2 dependen de las propiedades mecánicas de la esfera y el medio fluido y se calculan a través de las expresiones

$$f_1 = 1 - \frac{\rho_0 c_0^2}{\rho_p c_p^2} \quad 14a$$

$$f_2 = 2 \left(\frac{\rho_p - \rho_0}{2\rho_p + \rho_0} \right) \quad 15a$$

En las ecuaciones (14a) y (15a), ρ_p y c_p son la densidad de la esfera y la velocidad del sonido en la esfera, respectivamente. En la mayoría de los experimentos de levitación acústica en el aire, podemos suponer que la densidad de la esfera es mucho mayor que la densidad del aire, lo que lleva a $f_1 = f_2 = 1$. A partir del potencial (U) (también llamado potencial de Gor'kov), la fuerza de radiación acústica en la esfera pequeña se calcula a través de (Barmatz & Coilas, 1984)

$$F_{rad} = -\nabla U \quad 16a$$

Para explicar de una manera más sencilla el potencial de Gor'kov podemos recurrir a ecuaciones de física básica empezando con la ecuación de trabajo:

$$W = F \cdot d \quad 17a$$

Asumiendo a F como la fuerza de radiación acústica a W como potencial acústico U y sustituyendo la distancia d por x se obtiene: $U = F_{rad} \cdot x$. 18a

Se despeja la fuerza y nos queda como $F_{rad} = \frac{U}{x}$ 19a después es necesario utilizar gradiente para pasarlo a campos vectoriales obtenemos que:

$$F_{rad} = \frac{dU}{dx} i + \frac{dU}{dy} j + \frac{dU}{dz} k = -\Delta U \quad .20a$$

Schlieren

El término Schlieren proviene de la palabra alemana “schlieren” que significa no homogéneo, que en este caso son partículas de polvo en un líquido transparente, o cambios de densidad en algún flujo de fluido transparente. El famoso físico experimental Robert Hooke fue probablemente el primer científico en utilizar una configuración de tipo Schlieren, el objetivo de visualizar las diferentes densidades producidas por la combustión le llevo a diseñar el sistema mostrado en la figura 2.22, el cual está formado por una vela que funciona como fuente de luz, una segunda vela para producir las diferentes densidades del aire circundante debido al flujo de calor proveniente de la llama, una lente convergente o convexa y el uso del iris del propio sujeto como filtro.

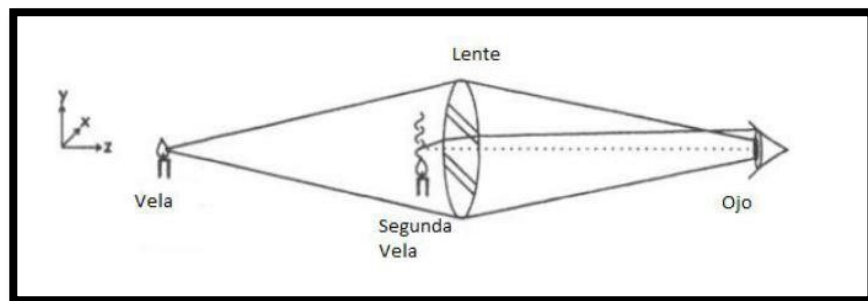


Figura 2.22 Sistema de schlieren propuesto por Robert Hooke.

En la actualidad esta técnica es muy sensible a las desviaciones del haz de luz incidente, por lo que permite la visualización de los cambios de densidad o índice de refracción, como se puede observar en la figura 2.24, en la que se muestra una imagen Schlieren de la llama y gases de un mechero (Barbón García et al., n.d.).

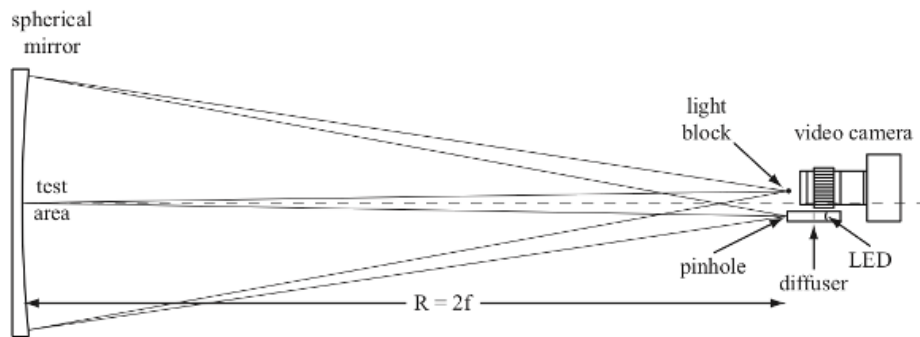


Figura 2.23 Imagen del cambio del índice de refracción de la llama generada por un encendedor obtenida mediante la técnica de schlieren.

La imagen observada en la figura 2.24 se logra gracias a que los sistemas modernos de schlieren son más precisos esto debido al uso de cámaras filtros de luz e iluminación mediante leds como el esquema mostrado en la figura 2.23

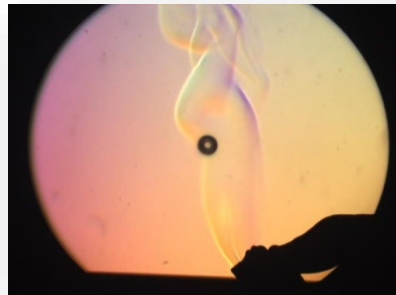


Figura 2.24 Esquema de un sistema de schlieren moderno.

Los sistemas de schlieren actualmente tienen múltiples aplicaciones su principal uso es la visualización de gases. Y diferentes tipos de ondas como las mostradas en la figura 2.25 el análisis de estas ondas es muy útil para comprender fenómenos en el campo de la acústica como es el de la levitación acústica o para confirmar teorías propuestas.

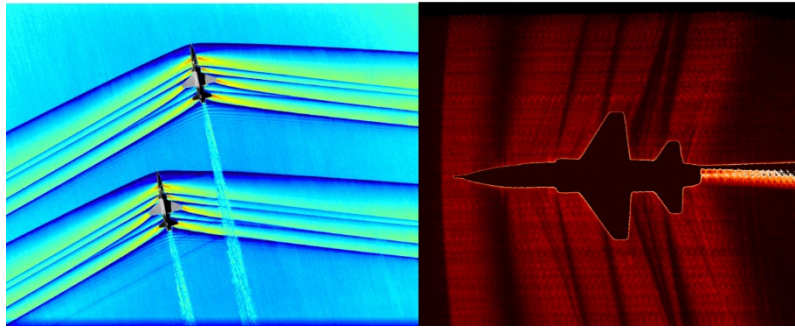


Figura 2.25 Imágenes tipo schlieren de aviones ultrasónicos obtenidas por la NASA.

Un claro ejemplo del uso de la técnica de schlieren es en el que trabaja la nasa (BOLONKIN, 2017) en el cual optimizando la técnica mediante el uso de tres cámaras acopladas a telescopios con filtros alfa de hidrogeno y utilizando el sol como fuente de luz (Matt Kamlet, 2017). han logrado observar las ondas de choque producidas por vuelos ultrasónicos, esto con el fin de minimizar el golpe sónico de las ondas de choque, este golpe sónico es el que restringe el vuelo de aeronaves supersónicas a distancias cercanas a la corteza terrestre así como la implementación de vuelos ultrasónicos comerciales (Peter Merlin, 2018).

A pesar de que la técnica no parece ser muy compleja hay varias ecuaciones que explican diversos fenómenos menos ocurridos durante la técnica de schlieren. Para presentar una deconstrucción más simple de la refracción de la luz de Schlieren, se asume un gradiente de índice de refracción vertical negativo $\partial n/\partial y < 0$, y ningún gradiente en las direcciones x o z . Una onda de luz plana, inicialmente vertical, se desplaza después de propagarse a través de un objeto schlieren. Si cubre una

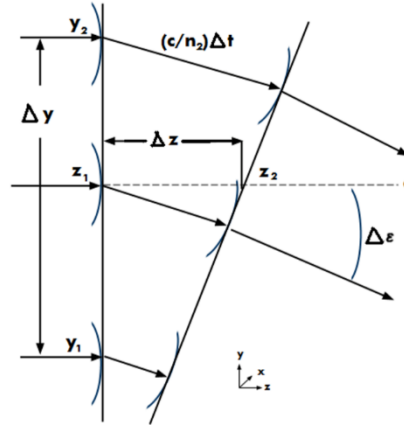


Figura 2.26 Diagrama de desviación de rayos de luz por un gradiente de índice de refracción dn / dy

distancia refracción, $\epsilon_y = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial y} dz$ es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz local. Examinando la Figura 2.26, encontramos:

$$\Delta \epsilon = \frac{c/n_2 - c/n_1}{\Delta y} \Delta t$$

diferencial en el tiempo diferencial, $\Delta z / \Delta t$, se refracta a través del ángulo diferencial $\Delta \epsilon$. El índice de refracción se define como $n = c / v$, donde n es el índice de

Combinando esta expresión con una expresión para el tiempo diferencial, $\Delta t = \Delta z \frac{n}{c}$, y simplificando los términos, encontramos:

$$\Delta \epsilon = \frac{n}{n_1 n_2} \frac{(n_1 - n_2)}{\Delta y} \Delta z$$

Podemos simplificar esto dejando que todas las diferencias finitas se acerquen a cero y simplificando $\frac{n}{n_1 n_2}$ a $\frac{1}{n}$, y obtenga:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} \quad 21a$$

relacionando la curvatura de un rayo refractado con la magnitud del gradiente de índice de refracción. Las imágenes de Schlieren se pueden encontrar integrando la curvatura de los rayos de luz en las inhomogeneidades ópticas en las direcciones apropiadas:

$$\varepsilon_y = \frac{1}{n} \int \frac{\partial n}{\partial y} dz \quad 22a$$

Estas ecuaciones también se pueden usar para encontrar el componente del gradiente 2D en la dirección x reemplazando las y 's por x 's. La ecuación 21a indica que no es el índice de refracción n el que causa la desviación de los rayos, sino el gradiente $\frac{\partial n}{\partial y}$ de este índice de refracción. Además, las ecuaciones 21 y 22 muestran que los reflejos de los rayos de luz se doblan hacia regiones de mayor índice de refracción (Mazumdar, 2013).

2.2 Conceptos básicos

Electrónica

Microcontroladores

Los microcontroladores son circuitos integrados tecnología VLSI que contiene una Unidad Central de Procesamiento (CPU), memoria para código, memoria para datos, además de otros recursos necesarios para el desarrollo de aplicaciones, como temporizadores, ADC, puertos I/O, etc. (S. Felipe, 2019).



Figura 2.27 Microcontrolador arduino mega.

En la actualidad los microcontroladores son utilizados para un sin fin de proyectos electrónicos que van desde encender un simple led hasta controlar robots avanzados. La familia de microcontroladores más utilizada en la actualidad son los de la familia arduino como el mostrado en la figura 2.27 ya que estos ofrecen una amplia gama de accesorios a un precio accesible así como bibliotecas fáciles de utilizar para su implementación en proyectos escolares.

PCB

Una tarjeta de circuito impreso o PCB (del inglés printed circuit board), es un dispositivo compuesto por trazas de material conductor laminado sobre una base no conductiva o material dieléctrico.

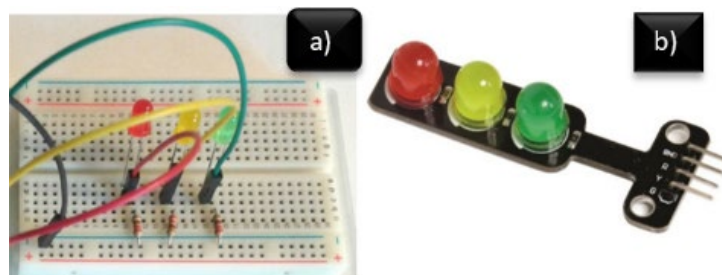


Figura 2.28 Circuito de semáforo a) circuito generado en una placa de pruebas b) circuito generado en un PCB

La tarjeta se usa para realizar interconexiones entre los componentes pero presenta muchas ventajas sobre tarjetas de prototipo, como una superficie para montar los componentes, conexiones fijas, mayor inmunidad a ruido, menor probabilidad de fallas, entre otras (Torres-Ortega, 2014) en la figura 2.28 podemos observar la diferencia entre el uso de una PCB y un circuito aun en un proyecto sencillo como el mostrado en esta figura es notoria la diferencia pero existen circuitos en los que resulta casi imposible omitir el uso de una PCB por la complejidad del circuito.

FPGA

Los Arreglos de Compuertas Lógicas Programables (FPGA por sus siglas en inglés) tal como su nombre lo indica son un arreglo matricial de bloques lógicos programables en cualquier espacio físico. Figura 2.29

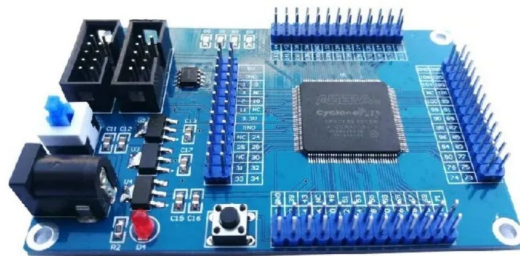


Figura 2.29 Placa con FPGA modelo cyclone IV de altera

Un FPGA es un dispositivo que se puede programar aun después de estar soldado en un circuito impreso, para que funcione de un modo determinado (Cristian Sisterna, 2016.).

Los FPGA tienen múltiples usos que van desde Sistemas de control de código abierto para robots de equilibrio automático (Cerezo et al., 2019) hasta su uso en pequeños Sistemas de comunicación satelital (Varnavas et al., n.d.).

En general los FPGA tienen una gama bastante amplia de aplicaciones que incluyen procesamiento de señales digitales, radio definida por software, prototipos ASIC, mecatrónica, sistemas de seguridad, reconocimiento de voz, criptografía, robótica, emulación de hardware informático, detección de metales y un rango de crecimiento de las áreas. Los sistemas basados en frecuencia a menudo involucran varias capas

de abstracción para ayudar a programar tareas y compartir recursos entre múltiples procesos.

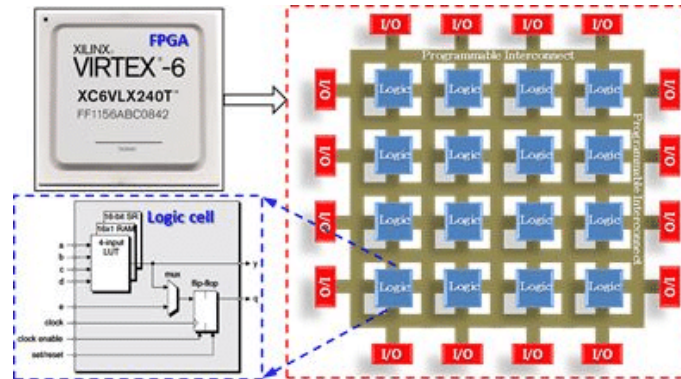


Figura 2.30 Esquema explicativo del funcionamiento de una FPGA.

El controlador de capa de control controla los recursos de hardware y el sistema operativo administra la memoria y el procesador en la figura 2.30 se puede observar el esquema de un FPGA mediante el cual se logra comprender las entradas y salidas múltiples así como sus celdas de compuertas lógicas (Jaffry, 2014).

Transductores

Un transductor es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra de diferente a la salida.

El nombre del transductor ya nos indica cual es la transformación que realiza, por ejemplo. Un transductor electroacústico es aquel dispositivo que transforma la electricidad en sonido, o viceversa (Romeo & Meza, n.d.).

En este caso nos enfocaremos en los traductores ultrasónicos como el mostrado en la figura 2.31 capaces de transformar la electricidad en ultrasonido en la actualidad esos transductores se utilizan como sensores de distancia automóbiles, para Producción de placas de circuitos impresos, Detección del nivel de llenado de productos a granel o como en este caso para la levitación de partículas sus múltiples usos hacen que sean de fácil acceso y económicos.



Figura 2.31 Sensor ultrasónico utilizado en proyectos escolares como robots.

Física

Acústica

La acústica es la Parte de la física que trata de la producción, control, transmisión, recepción y audición de los sonidos, ultrasonidos e infrasonidos (ESPAÑOLA, 2014).

Asi mismo esta ciencia estudia las variadas aplicaciones tecnológicas de las ondas sonoras. Lo que le da un carácter fuertemente multidisciplinario, abarcando cuestiones que van desde la física pura hasta la biología y las ciencias sociales.

Sintéticamente, las ondas sonoras se originan en la interacción entre la elasticidad (compresibilidad) y la inercia (segunda ley de Newton) de un medio (Miyara, 2003).

Todo fenómeno sonoro consta de tres momentos: la producción, la propagación y la recepción del sonido.

La producción: está unida al hecho de que un cuerpo, la fuente sonora, inicie unas vibraciones; de ello se deduce que la acústica estudia los movimientos vibratorios. La

propagación: es el fenómeno que ocurre desde la fuente emisora hasta la recepción del sonido este fenómeno necesita un medio material, ya sea gaseoso, sólido o líquido dependiendo del medio la onda sonora viajara más rápido o lento e incluso con algún tipo de interferencia conocida como ruido.

La recepción del sonido: que es todo el proceso de sensación acústica esta sensación dependerá del receptor ya que este puede percibir sonidos en ciertas frecuencias como se muestra en la figura 2.32 (Calle. et al., 2009).

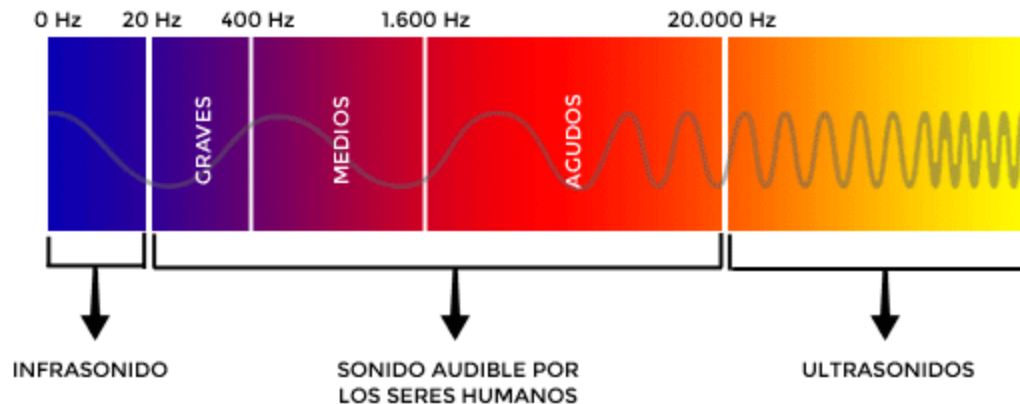


Figura 2.32 Espectro acústico

Así mismo dentro de la acústica entra el fenómeno de resonancia del cual se hablará más adelante así como de las características y componentes de una onda acústica.

Resonancia

La resonancia es el fenómeno que ocurre cuando la frecuencia de las vibraciones forzadas en un objeto es igual a la frecuencia natural se produce un aumento notable en amplitud. Resonar significa sonar de nuevo la masilla no resuena porque no es elástica y un pañuelo que se deja caer no resuena porque es demasiado blando. Para que un objeto resuene se requiere una fuerza que la devuelva a su posición original y energía suficiente para mantener la vibración (PAULG.HEWITT, 1987).

este fenómeno se puede demostrar con un experimento como el mostrado en la figura 2.33.

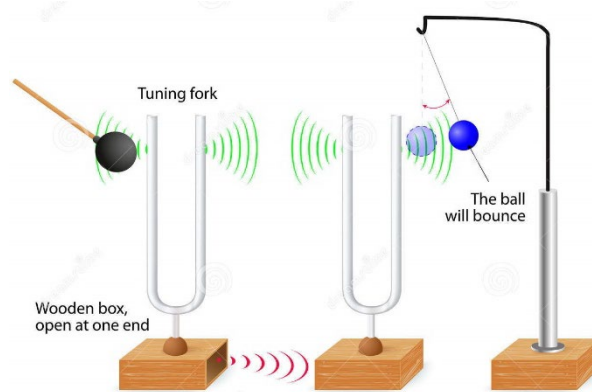


Figura 2.33 Experimento en el cual mediante una caja de resonancia se hace resonar otra misma que causa movimiento en una pelota comprobando así el fenómeno de resonancia.

El análisis de vibraciones y la presencia de resonancia en una estructura son factores importantes en la enseñanza de la ingeniería, ya que pueden provocar la falla de la estructura o la producción de ruidos molestos un claro ejemplo es el del puente de Tacoma mostrado en la figura 2.34 (Vázquez et al., 2005).

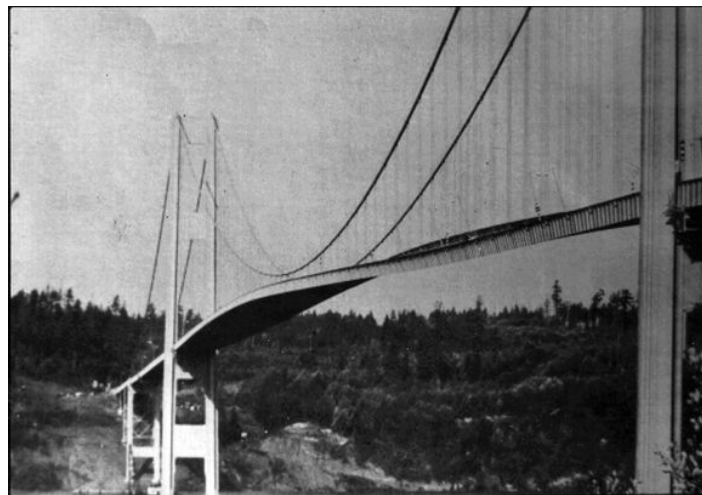


Figura 2.34 Fotografía del puente de Tacoma resonando.

En aplicaciones de ingeniería, las vibraciones de una barra, con diferentes condiciones de contorno, pueden utilizarse para simular la respuesta de diversas estructuras. Por ejemplo, se pueden modelar las vibraciones de una antena, los brazos de un robot, distintas componentes utilizadas en la construcción, las estructuras de

puentes y partes de instrumentos musicales. En un curso de física básica de nivel universitario, las vibraciones de una barra constituyen una opción, o un complemento, del sistema masa-resorte que se utiliza como prototipo para el estudio de la resonancia (Repetto & Welti, n.d.).

Frecuencia

La frecuencia se puede definir como el número de veces que se repite un proceso periódico por unidad de tiempo en el caso de las ondas la frecuencia se suele medir Hertz (REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, 2014).

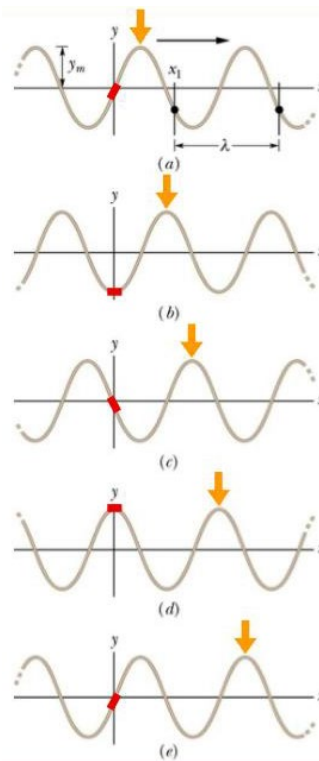


Figura 2.35 Desplazamiento de una onda.

También podemos comprender la frecuencia y otros términos de las ondas describiendo el desplazamiento de una onda como la mostrada en la figura 2.35 para eso se necesita una función que le dé la forma de la onda. Esto significa que necesitamos una relación en la forma $y = h(x, t)$, en la que y es el desplazamiento

transversal de cualquier elemento de cadena como una función h del tiempo t y la posición x del elemento a lo largo de la cadena.

Esta ecuación nos explica el desplazamiento de una onda viajera así mismo se pueden

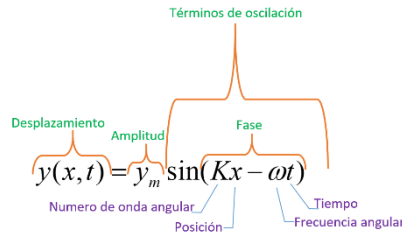


Figura 2.36 Ecuación de desplazamiento de una onda

comprender los conceptos de onda angular, posición, frecuencia angular, tiempo y amplitud de una forma matemática (walker, 2007).

Amplitud

La amplitud se puede definir como la distancia máxima desde la posición de equilibrio durante un ciclo de vibración (D.Blevins, 2015)

En la figura 2.35 se puede observar la amplitud de una onda y en la figura 2.36 se puede interpretar la amplitud como y_m .

Fase

Una onda con fase 0, debe comenzar en un ángulo 0 (amplitud 0 para el seno y 1 para el coseno). Si comienza en otro valor, hay que calcular el ángulo de comienzo. Fase de dos ondas. Cuando dos ondas sonoras coinciden en sus variaciones positivas y negativas, se dice que están en fase, cuando esto ocurre las ondas se suman aumentando su amplitud, pero sí coinciden de forma opuesta se dice que están fuera de fase esto puede ocasionar que las ondas disminuyan su amplitud o en caso de tener una amplitud igual ambas ondas estas se anularan. Si existe un retardo o adelanto entre ambas, se dice que existe un desplazamiento de fase. Esto se puede comprender viendo la figura 2.37 (*Fundamentos de acústica*, n.d.).

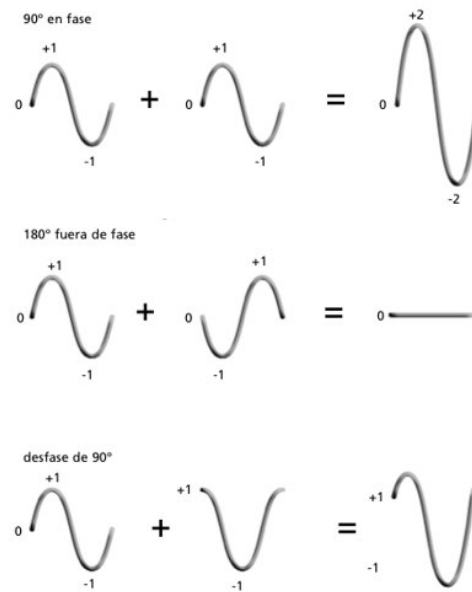


Figura 2.37 imagen que ayuda a comprender el desfase de una onda.

Longitud de onda

Se puede definir la longitud de onda como la distancia entre dos crestas consecutivas. Como todas las distancias, se mide en metros, aunque dada la gran variedad de longitudes de onda que existen suelen usarse múltiplos como el kilómetro (para ondas largas como las de radio y televisión) o submúltiplos como el nanómetro o el Angstrom (para ondas cortas como la radiación visible o los rayos X) La longitud de onda normalmente se explica con la letra griega λ misma que se puede apreciar en la figura 2.38 donde es mostrado un esquema de una onda con diferentes partes de la onda (Jonathan et al., 2009).

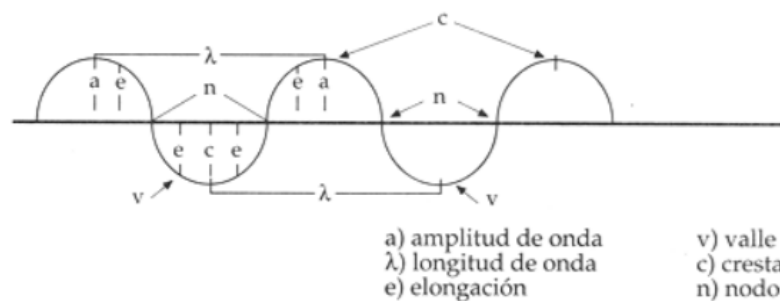


Figura 2.38 Descripción de las partes de una onda.

La longitud de onda está relacionada con la frecuencia f (inversa del período T por medio de la velocidad de propagación del sonido ($c = 342$ m/s), de manera que $c = \lambda f$.

Las ondas sonoras tienen longitudes de onda de entre 2 cm y 20 m aproximadamente. También podemos definir la longitud de onda como la distancia entre dos puntos que vibran del mismo modo (Ardizzi, 2011).

Onda estacionaria

Cuando se mueve el extremo de un resorte o cuerda de hule estirado se observa que si se le sacude con cierta fuerza la forma de onda parece estar inmóvil en la cuerda esta condición se produce por la interferencia entre ondas que se propagan en direcciones opuestas la onda que se desplaza hacia abajo y la que se refleja a este tipo de ondas se les conoce como ondas estacionarias incluso hay aparatos para estudiarlas como el mostrado en la figura 2.39



Figura 2.39 Aparato generador de ondas.

Estas ondas se propagan en dirección opuesta del extremo fijo de la cuerda la onda reflejada está 180° fuera de fase con la onda incidente, aplicando el principio de la superposición para analizar la situación en varios instantes, se descubre que el desplazamiento en cierta posición a lo largo de la cuerda es 0, siempre las posiciones de desplazamiento nulo recibe el nombre de nodos y los desplazamientos máximos se

conocen como antinodos mismos que observamos con anterioridad en la figura 2.10 las posiciones nodales no están en movimiento la energía es esencialmente estable en la cuerda a medida que las partículas de esta última vibran hacia arriba y hacia abajo en movimiento armónico simple.

Nótese que la distancia entre antinodos o nodos adyacentes es la mitad de la longitud de la onda estacionaria (wilson, 1991).

Programación

C++

C++ es un lenguaje de programación, creado a mediados de 1980 por Bjarne Stroustrup, como extensión del lenguaje C. Este lenguaje abarca tres paradigmas de la programación: 1. Programación Estructurada 2. Programación Genérica 3. Programación Orientada a Objetos En la actualidad, C++ es un lenguaje versátil, potente y general. Su éxito entre los programadores le ha llevado a ocupar el primer puesto como herramienta de desarrollo de aplicaciones, ya sea en Windows o GNU Linux (Linda I. Olivares Flores, 2008).

En general, un programa C++ suele estar escrito en diferentes ficheros. Durante el proceso de compilación estos ficheros serán combinados adecuadamente y traducidos a código objeto, obteniendo el programa ejecutable.

Aunque para programas sencillos, bastará un único fichero cuya extensión será: “.cpp”, “.cxx”, “.cc”, etc. (Benjumea & Roldán, 2017).

Java

Java es un lenguaje de programación creado por Sun Microsystems, (empresa que posteriormente fue comprada por Oracle) para poder funcionar en distintos tipos de procesadores. Su sintaxis es muy parecida a la de C o C++, e incorpora como algunas características propias que en otros lenguajes son extensiones: gestión de hilos, ejecución remota, etc

Existen varios programas que se han hecho con este lenguaje como los de la figura 2.41 El código Java, una vez compilado, puede llevarse sin modificación alguna sobre cualquier máquina, y ejecutarlo.

Esto se debe a que el código se ejecuta sobre una máquina hipotética o virtual, la Java



Figura 2.40 logos de programas generados en lenguaje de programación java

Virtual Machine, que se encarga de interpretar el código (ficheros compilados .class) y convertirlo a código particular de la CPU que se esté utilizando (siempre que se soporte dicha máquina virtual (Boyán Ivanov Bonev, 2012).

VDHL

VHDL es un lenguaje de descripción de circuitos electrónicos digitales que utiliza distintos niveles de abstracción. El significado de las siglas VHDL es VHSIC (Very High Speed Integrated Circuits) Hardware Description Language. Esto significa que VHDL permite acelerar el proceso de diseño. VHDL no es un lenguaje de programación, por ello conocer su sintaxis no implica necesariamente saber diseñar con él. VHDL es un lenguaje de descripción de hardware, que permite describir circuitos síncronos y asíncronos. Para realizar esto debemos: Pensar en puertas y biestables, no en variables ni funciones. Evitar bucles combinacionales y relojes condicionados. Saber qué parte del circuito es combinacional y cuál secuencial. ¿Por qué usar un lenguaje de descripción hardware? Poder descubrir problemas en el diseño antes de su implementación física. La complejidad de los sistemas electrónicos crece exponencialmente, es necesaria una herramienta que trabaje con el ordenador. Permite que más de una persona trabaje en el mismo proyecto. En particular VHDL

permite tanto una descripción de la estructura del circuito (descripción a partir de subcircuitos más sencillos), como la especificación de la funcionalidad de un circuito utilizando formas familiares a los lenguajes de programación (Sánchez-Élez, 2014).

VERILOG

En particular Verilog es un lenguaje para la descripción de sistemas digitales. Los sistemas pueden ser descritos en:

- Nivel estructural empleando elementos de librería o bien elementos previamente creados, se realiza la interconexión de unos con otros. Sería similar a una captura esquemática donde la función del diseñador es instanciar bloques y conectarlos entre sí.
- Nivel de comportamiento el diseñador describe la transferencia de información entre registros (nivel RTL: Register Transfer Level).

Estos dos niveles de descripción pueden mezclarse, dando lugar a los denominados diseños mixtos.

Existen multitud de lenguajes HDL en el mercado (de hecho, inicialmente cada fabricante disponía de su propio lenguaje), sin embargo, la necesidad de unificación ha hecho que en la actualidad solo existan dos grandes lenguajes: VHDL y Verilog. Ambos están acogidos a estándares IEEE (VHDL en 1987 y Verilog en 1995). Existen defensores y detractores de cada uno de ellos. Con carácter general se dice que es más fácil aprender Verilog al ser un lenguaje más compacto.

Verilog nació en 1985 como un lenguaje propietario de una compañía (Cadence Design System), pero en 1990 se formó OVI (Open Verilog International) haciendo dicho lenguaje de dominio público, permitiendo a otras empresas que pudieran emplear Verilog como lenguaje, con objeto de aumentar la difusión de dicho lenguaje. Uno de los aspectos que salta a la vista al contemplar un código Verilog es su similitud con el lenguaje C. Una de las mayores diferencias que presenta este lenguaje es que permite modelar sistemas digitales reales, que funcionan de forma paralela a diferencia

de la ejecución secuencial, típica de un sistema computacional (Chavez, 1999).

CAPÍTULO 3. DESARROLLO TEÓRICO/EXPERIMENTAL

3.1 Cronograma de Actividades

En la tabla 3.1 se presenta el Diagrama de Gantt del proyecto. El cual fue utilizado para realizar un manejo adecuado de tiempos para el proyecto y así tener un medio que regule el periodo de las actividades para acabar el proyecto en tiempo y forma.

Lamentablemente no se pudo cumplir este diagrama debido a las complicaciones por la pandemia covid-19 ya que desde la 4 actividad hubo retrasos ya que parte del material a utilizar provenía de china sitio donde la pandemia inicio desde diciembre del 2019 retrasando cada una de las actividades que se desarrollaron posteriormente pausando por completo la parte experimental y de caracterización por casi un año.



Tabla 3.1 Diagrama de Gantt.

3.2 Materiales y equipos

En la siguiente tabla 3.2 se presentan los materiales utilizados para llevar a cabo la manufactura del levitador acústico de fase variable.

Numero de material	Materiales	Descripción	Cantidad
1	Capacitores cerámicos	(MLCC) - SMD/SMT 25V 4.7uf	32 pzas.
2	Capacitores cerámicos	(MLCC) - SMD/SMT 25V 0.1uf	32 pzas.
3	Amplificador	Controladores de puertas 1.5A	32 pzas.
4	Adaptador jack	Dc barrel	1 pzas.
5	Conectores	Macho de 16 vías tipo MOLEX	8 pzas.
6	Pines	Macho-hembra	83 pzas.
7	Pines	90° macho macho	21 pzas.
8	Transductores	40khz	64 pzas.
9	Jumpers	20cm hembra-hembra	128 pzas.
10	PCB	Diseño mostrado en la figura 3.3	1 pza.
11	Acrílico	Lamina de 15X15 X0.05	1 pza.
12	Pegamento	Instantáneo	2gr.
13	Arduino	Nano	1 pza.
14	Arduino	Mega	1 pza.
15	FPGA	Alhambra II	1 pza.

Tabla 3.2 Materiales utilizados para la fabricación del levitador.

3.3 Herramientas computacionales

Durante el periodo de estancia en el ICF se utilizaron diferentes softwares que a continuación se mencionan junto con su uso:

- SolidWorks versión (2018)

SolidWorks es un software tipo CAD este software fue utilizado para hacer el modelado de los levitadores mostrado en la figura 3.1 (CASTILLO, 2015).

- Paquetería de office Word, Excel y Power point versión (2016)

La paquetería de office es un software tipo editores de texto en este caso se utilizó para redactar la tesis hacer gráficas y presentaciones útiles para el desarrollo de la misma (Microsoft, 2016).

- Arduino version (1.6.0)

Arduino es un software de programación en lenguaje C++, este se fue utilizado para programar los microcontroladores arduino nano y arduino mega (Banzi et al., 2007).

- Gerber Logix versión (3.5.0)

Gerber Logix es un software tipo CAD utilizado para la impresión y análisis de PCB's en este caso se utilizó para analizar y replicar la PCB realizada por el Dr. Asier Marzo Pérez utilizada para su software ultraino (Torrone, 2011).

- Dev-C++ versión (5.11)

Dev-C++ es un software de programación que fue utilizado para el análisis de los códigos obtenidos en el artículo pantallas acústicas (LÓPEZ, 2014).

- ISE desing suite versión (14.7)

ISE es un software utilizado para la programación en VHDL de FPGA's exclusivos de XILIN es este caso se usó para la programación de la FPGA Spartan 6 con la placa mojo v3 (Xilinx & Inc, 2012).

- Quartus ii versión (13.0)

Quartus es un software similar a ISE, pero diseñado para FPGA's de altera en este caso fue utilizado con la FPGA Cyclone IV con la placa HY-601 (Altera Corporation, 2010)

- Ice studio versión (0.5.0)

Ice studio es un software utilizado para la programación de FPGA's a diferencia de ISE y Quartus este cuenta con programación esquemática lo que lo vuelve más fácil de utilizar así como programación en verilog, este es software es exclusivo para placas de ice.(Gonzalez-Gomez, 2017).

- Java Development Kit versión (1.8)

El software de java fue utilizado para abrir algunos archivos .jar de un controlador de fase y estructura de transductores dado por el Dr. Asier Marzo Pérez utilizada para su software ultraino (Boyán Ivanov Bonev, 2012).

- Net beans version (8.0.1)

Net beans es un entorno de desarrollo integrado libre, hecho principalmente para el lenguaje de programación Java, fue utilizado para ejecutar el simulador de levitadores con fase variable (Juan Manuel Gimeno, 2013).

3.4 Metodología teórico/experimental

Diseño del levitador y sus componentes

Se realizó el diseño del levitador en SolidWorks para su posterior manufactura mostrado en la figura 3.1.

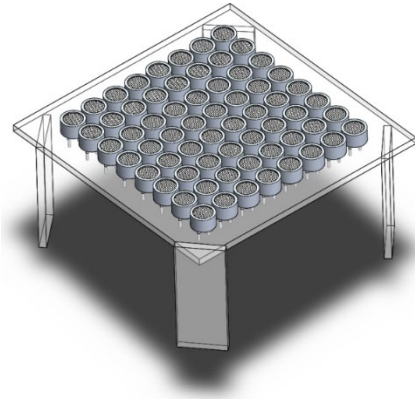


Figura 3.1 Modelo del levitador realizado en SolidWorks.

Mientras que en la figura 3.2 se observan los planos con las medidas necesarias para realizar el levitador ya sea mediante una impresora 3d o como en este caso a mano utilizando acrílico como material base, un cúter para cortar el acrílico y un taladro para realizar las perforaciones donde irán las puntas de los transductores ultrasónicos.

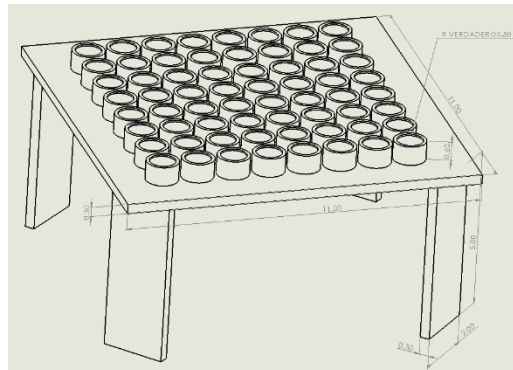


Figura 3.2 Planos para con medidas para el diseño del levitador

Se realizo el diseño de la placa con el esquema mostrado en la figura 3.3 posteriormente se procedió a la impresión de la PCB mediante la empresa JLCPCB la placa impresa se muestra en la figura 3.12

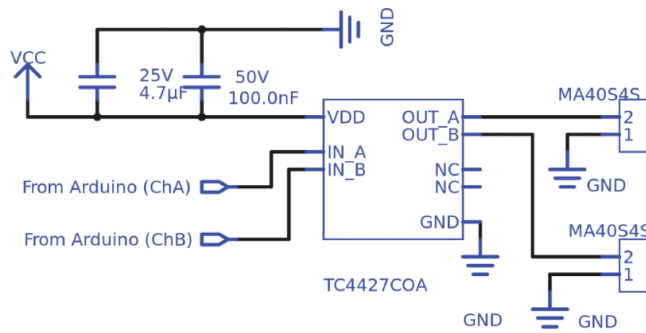


Figura 3.3 diagrama simplificado del pcb

Software

Posteriormente se empezó a utilizar el software ultraino el cual, para calcular el campo acústico en tiempo real, emplea un modelo de pistón de campo lejano de una sola frecuencia de cada transductor. La simulación descuida los reflejos y los efectos no lineales, su simplicidad permite que el software se ejecute en tiempo real, lo que facilita la exploración interactiva de los campos acústicos generados por cualquier matriz definida por el usuario.

La presión acústica compleja P en el punto r debido a una fuente de pistón que emite a una frecuencia única puede modelarse como

$$P(r) = P_0 A \frac{D_f(\theta)}{d} e^{i(\varphi+kd)}$$

donde P_0 es una constante que define la potencia de amplitud del transductor

y A es la amplitud pico a pico de la señal de excitación. D_f es una función de directividad de campo lejano que depende del ángulo θ entre el transductor normal y

r . Aquí, $D_f = \frac{2J_1(ka \sin\theta)}{ka \sin\theta}$, que es la función de directividad de una fuente de pistón

circular, donde J_1 es una función de Bessel de primer orden del primer tipo y a es el radio del pistón. Esta función de directividad se puede simplificar como

$D_f = \text{sinc}(ka \sin\theta)$. El término $\frac{1}{d}$ explica la divergencia, donde d es la distancia de

propagación en el espacio libre. $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ es el número de onda y λ es la longitud de onda (8,6 mm en el aire a 25 ° C). φ es la fase inicial del pistón. Para una matriz de múltiples fuentes de pistón, el campo total se puede obtener mediante la suma de la contribución de cada fuente.

Para calcular la fuerza ejercida sobre una esfera debido a un campo de presión complejo, podemos usar el gradiente negativo del potencial de Gor'kov $F = -\nabla U$

$$U = 2K_1(|p|^2) - 2K_2(|px|^2 + |py|^2 + |pz|^2)$$

$$K_1 = \frac{1}{4}V\left(\frac{1}{c_0^2\rho_0} - \frac{1}{c_s^2\rho_s}\right)$$

$$K_2 = \frac{3}{4}V\left(\frac{\rho_0 - \rho_s}{\omega^2\rho_0(\rho_0 + 2\rho_s)}\right)$$

donde V es el volumen de la partícula esférica, ω es la frecuencia de las ondas emitidas, ρ es la densidad y c es la velocidad del sonido (con los subíndices 0 y s que se refieren al medio anfitrión y al material de partículas sólidas, respectivamente) p es la presión compleja y px , py , pz son, respectivamente, sus derivadas espaciales sobre x , y y z (Marzo et al., 2018).

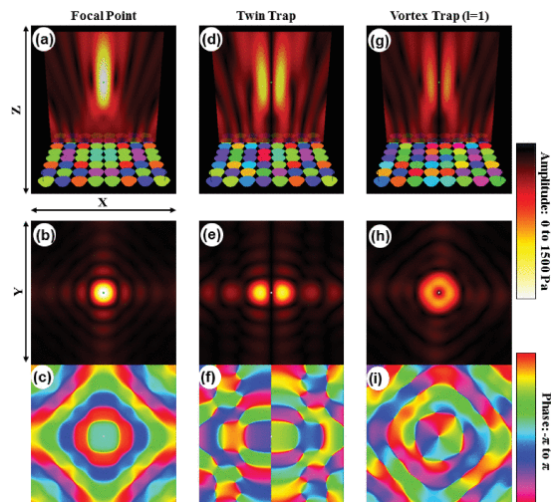


Figura 3.4 Diferentes campos generados con una matriz plana de 8×8 . (a) - (c) Punto de enfoque. (d) - (f) Trampa doble. (g) - (i) Trampa de vórtice de carga topológica $l = 1$. (a), (b), (d), (e), (g) y (h) Campos de amplitud. (c), (f) y (i) Campos de fase. (a), (d) y (g) Vista frontal. (b), (c), (e), (f), (h) y (i) Vista superior.

Mediante el software se observó la simulación de los campos acústicos generados por el LAFV como los de la figura 3.4 en los cuales se observan campos de amplitud y fase estos campos pueden observarse tridimensionalmente.

Para hacer funcionar el levitador se necesitan dos códigos el primero es para el arduino mega el cual es utilizado para la manipulación de las partículas levitadas mediante el software ultraino parte de este se muestra en la figura 3.5

```
DriverMEGA Arduino 1.6.0
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
DriverMEGA
/*Please do not forget to in the public interface of Program Files (x86)\Arduino\hardware\arduino\avr\cores\arduino\HardwareSerial.h
add the following inline functions

inline bool _dataAvailable() {return _rx_buffer_head != _rx_buffer_tail; }
inline byte _peekData() { return _rx_buffer[_rx_buffer_tail]; }
inline void _discardByte() { _rx_buffer_tail = (_rx_buffer_index_t) (_rx_buffer_tail + 1) % SERIAL_RX_BUFFER_SIZE; }
*/

#include <avr/sleep.h>
#include <avr/power.h>

#define N_PATTERNS 32

#define N_PORTS 10
#define N_DIVS 10

//ports A C L E E F H D G J

#define COMMAND_SMITCH 0b00000000
#define COMMAND_DURATION 0b00110000
#define MASK_DURATION 0b00111111
#define COMMAND_COMMITDURATIONS 0b00010000

#define WAIT(a) __asm__ __volatile__ ("nop")
#define OUTPUT_WAVE(pointer, d) PORTA = pointer[d*N_PORTS + 0]; PORTC = pointer[d*N_PORTS + 1]; PORTL = pointer[d*N_PORTS + 2]; PORTE = 1

static byte bufferA[N_PATTERNS * N_DIVS * N_PORTS];
static byte bufferB[N_PATTERNS * N_DIVS * N_PORTS];

void setup()
{
  //set as output ports A C L E E F H D G J
  DDRA = DDRC = DDLE = DDLE = DDRK = DDRP = DDRH = DDRD = DDRG = DDRJ = 0xFF;
  //low signal on all of them
  PORTA = PORTC = PORTE = PORTK = PORTP = PORTH = PORTD = PORTG = PORTJ = 0x00;

  //clear the buffers
  for (int i = 0; i < N_PATTERNS * N_DIVS * N_PORTS; i++)

```

Figura 3.5 Parte del código para el arduino mega encargado de controlar los transductores

El segundo código es el que controla al arduino nano encargado de realizar la asignación de transductores una parte de este código se muestra en la figura 3.6

```

PhaseDetector Arduino 1.6.0
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
PhaseDetector
void setup() {
  //config pins
  pinMode(2, INPUT_PULLUP); //Sync (from the board) -> E2 (PBD)

  //set the ADC reference to 5v
  //analogReference(EXTERNAL);

  //set the ADC as fast as possible, setting the prescale to 16
  ADCSRA = bit(ADSC0) | bit(ADIFSC1) | bit(ADIFSC2); // clear prescaler bits
  ADCSRA = bit(ADIFSC1); // 4
}

//initialize serial
Serial.begin(1000000);
}

#define N_SAMPLES 32
void loop() {
  int sample[N_SAMPLES];

  //wait for one byte from the serial to start capture
  if(Serial.available() > 0) {
    while (PIND & 0x0000100); //wait for the sync to go up
    while (!(PIND & 0x0000100)); //wait for the sync to go down

    //capture samples
    for(int i = 0; i < N_SAMPLES; ++i) {
      sample[i] = analogRead(AD);
    }

    //send them
    for(int i = 0; i < N_SAMPLES; ++i) {
      Serial.write( (sample[i] >> 8) & 0xFF );
      Serial.write( (sample[i] & 0xFF) );
      //Serial.println(sample[i]);
    }

    Serial.read(); //discard the serial byte
  }
}

```

Figura 3.6 Parte del código para el arduino nano encargado de la asignación de los transductores

Posteriormente se llegó a una colaboración con el Dr. Asier Marzo para la realización de un código en VHDL que funcione con su software ultraino y con una FPGA de la marca altera modelo cyclone IV EP4CE6E22C8N en una placa HY-601 mostrada en la Figura 2.29 el esquemático del código se puede observar en la figura 3.7.

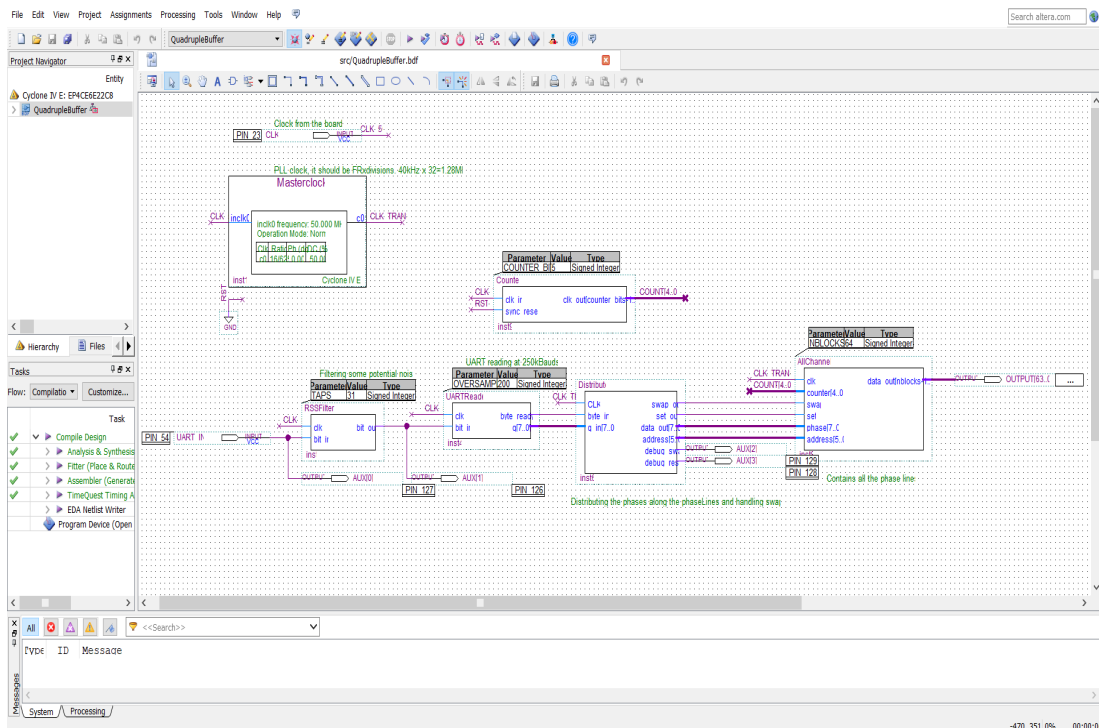


Figura 3.7 Esquema del código VHDL para la FPGA

Manufactura del levitador

Para realizar la manufactura del levitador se utilizó el modelo presentado en la figura 3.1 y 3.2 mediante el cual se midió, se cortó y se perforo la placa de acrílico obteniendo el modelo de la figura 3.8

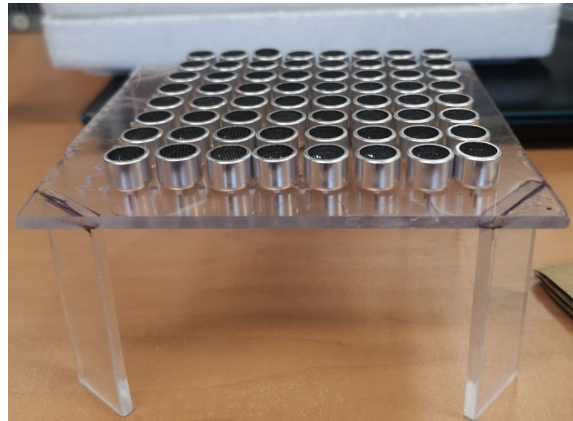


Figura 3.8 Base de acrílico para el levitador con los transductores puestos

Posterior mente se determinó la polaridad de los transductores del levitador mediante el uso de un multímetro y un plumón permanente de color negro dejando marcado el pin positivo de cada transductor esto se ilustra en la figura 3.9 se coloca el multímetro en voltaje si este da un valor negativo el pin unido con la punta negativa del multímetro será el polo positivo y si el voltaje es positivo el pin unido a la punta positiva del multímetro será el polo positivo.

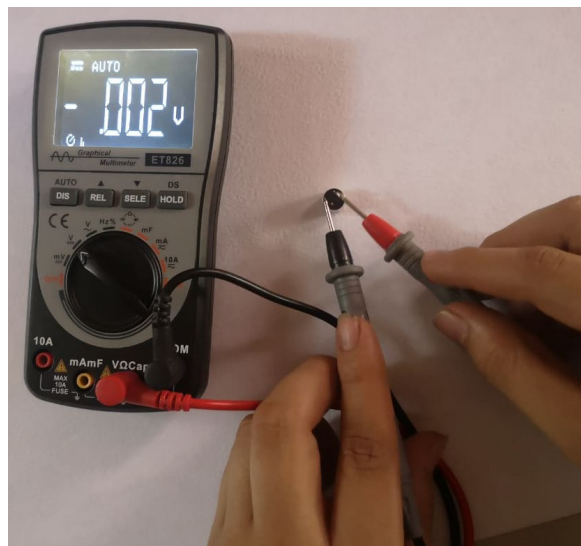


Figura 3.9 Multímetro utilizado para determinar la polaridad de los transductores

se soldaron los materiales del 1-9 de acuerdo con la tabla 3.2 en la PCB al ser materiales SMD surface-mount technology, se necesitó usar una punta delgada este proceso es mostrado en la figura 3.10 así como una comparación del tamaño de los componentes SMD con una moneda de 1mxn\$

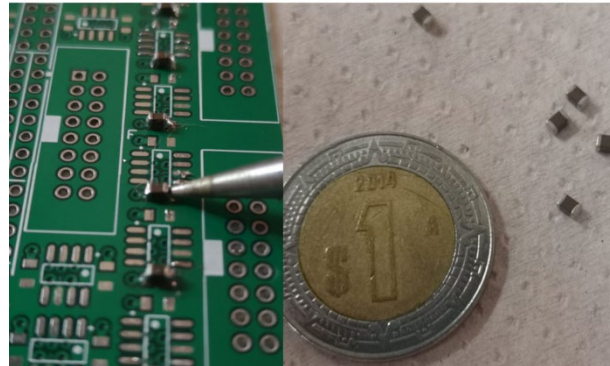


Figura 3.10 proceso de soldar capacitores a la pcb y comparación de su tamaño con una moneda

Después de soldar todos los componentes a la tabla la pcb se ve como en la figura 3.11 en la cual se ilustran los componentes

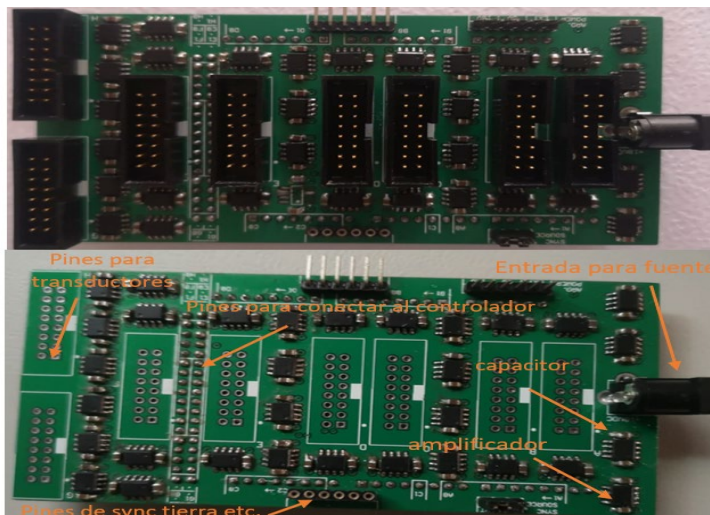


Figura 3.11 pcb terminada y pcb con descripción de los componentes soldados

ya que los componentes de la pcb están soldados se conectan los cables de los transductores y se carga el código mostrado en la figura 3.7 al arduino mega y este se conecta a la PCB por la parte inferior.

Así mismo se realizó el arreglo mostrado en la figura 3.12 con el fin de detectar la fase de los transductores así como la asignación de pines.

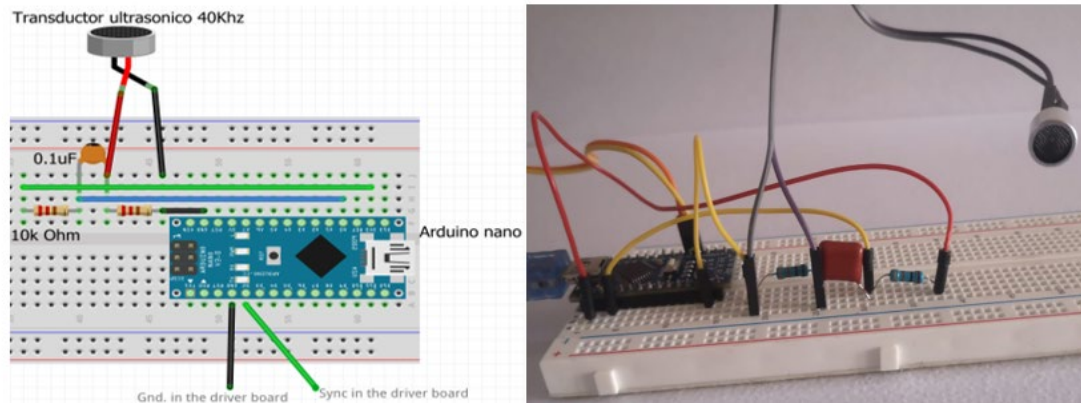


Figura 3.12 diagrama y arreglo electrónico para realizar la asignación de pines.

Es necesario conectar el sync y la tierra a la placa. Mediante el software y el transductor del arreglo se va realizando la asignación transductor por transductor, esto es necesario para que el software reconozca la posición y fase de cada transductor del levitador para poder hacer el cambio de fase de cada uno y así lograr la manipulación de las partículas levitadas

Lamentablemente el software ultraino al momento de realizar la asignación de pines termina colapsando y resulta inutilizable se trató de modificar el código, pero no se consiguió una levitación estable ya que los cambios de fase no se realizan con los patrones que deberían ser los correspondientes obteniendo fuerzas acústicas en diferentes direcciones dando como resultado que la partícula al ser colocada sea expulsada en direcciones al azar como se muestra en la figura 3.13

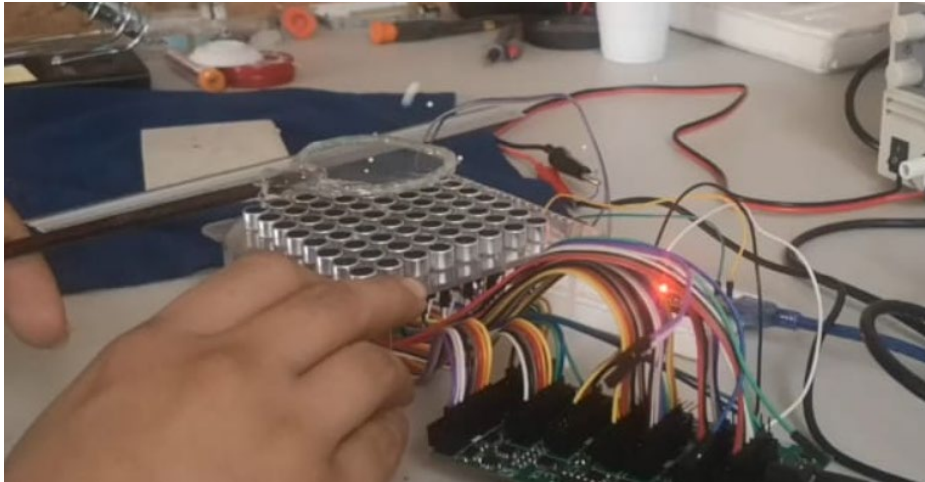


Figura 3.13 levitador plano 8x8 utilizando ultraino expulsando partícula de poliestireno.

Debido a esto se procedió a verificar los parámetros encontrando dos fallas una en el software que ha sido actualizado recientemente por las múltiples fallas el cual permitió realizar la asignación después de una actualización, pero continuo sin realizar los desfases de la forma adecuada la segunda falla fue en los amplificadores previamente soldados los cuales resultaron ser extremadamente sensibles a la estática modificando o anulando las señales recibidas del controlador.

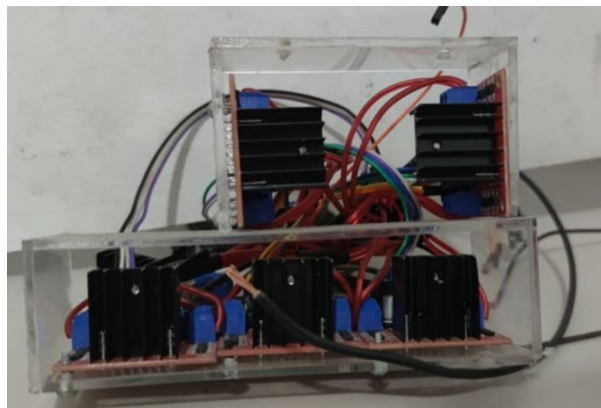


Figura 3.14 estructura de acrílico para acomodar de forma más compacta los módulos amplificadores L298N.

Se procedió a cambiar los amplificadores de la placa por el módulo amplificador L298N conocido como puente H se hizo un módulo en lugar de la pcb con acrílico como el mostrado en la figura 3.14

Teniendo las señales correctamente amplificadas se procedió a cambiar la estructura del levitador por una cóncava con un Angulo de concavidad de 30° y un reflector de aluminio con la misma concavidad figura 3.15 teniendo así un mejor punto focal y centralizando las fuerzas acústicas.



Figura 3.15 levitador cóncavo con reflector de aluminio levitando una esfera de poliestireno.

Debido a la falla del software ultraino se procedió a mandar una señal de 40kzh a cada transductor mediante la fpga alhambra II de forma independiente logrando así la levitación de una esfera de poliestireno expandido cómo se muestra en la figura 3.15 Observando el comportamiento correcto del código realizado en la fpga y el comportamiento correcto de los amplificadores L298N así que se decidió utilizar estos mismos amplificadores con un arreglo diferente e implementando ultraino el arreglo utilizado fue el tractor beam levitador que ya se ha reportado con anterioridad mismo que se puede observar en la figura 3.16



Figura 3.16 tractor beam funcionando con ultraino mismo que se observa en la pantalla del fondo

Con este se logró levitar, pero ultraino siguió sin funcionar adecuadamente ya que no se realizaban los cambios de fase de manera adecuada evitando así la manipulación tridimensional de la partícula levitada por lo cual se decidió ya no utilizar este software y empezar a implementar uno propio se realizó la programación de la fpga alhambra II para los desfases se puede observar un esquema de la misma en la figura 3.17



Figura 3.17 Esquema de programación de la fpga alhambra II cada bloque se encuentra programado en verilog.

Con esta fpga se lograron obtener 150 desfases y se logró Levitar en el levitador plano de 8x8 como se muestra en la figura 3.18

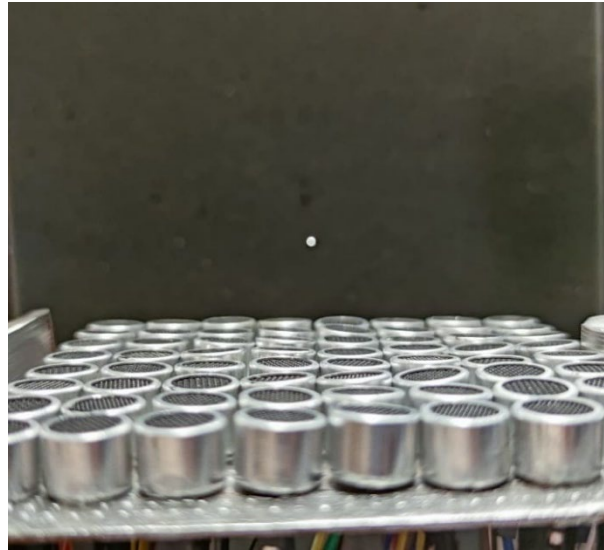


Figura 3.18 Levitador plano 8x8 funcionando con la fpga alhambra II.

Lamentablemente por cuestiones temporales no se logró la realización de una interfaz con el usuario para realizar la manipulación de las fases en vivo lo que evito la manipulación de la partícula.

3.5 Técnicas de caracterización

Se caracterizaron los consumos de voltaje/amperaje en los diferentes levitadores como se observa en las tablas 3.3,3.4 y 3.5

Ultraino levitador 8x8

Voltaje	Amperaje
12	.29
14	.34

Tabla 3.3 consumos de voltaje y amperaje del levitador plano utilizando ultraino junto con los amplificadores TC4427A.

Ultraino tractor beam

Voltaje	Amperaje
---------	----------

12	.48
14	.50

Tabla 3.4 Consumo del levitador tractor beam con amplificadores I298n.

FPGA ALHAMBRA II Levitador 8x8

Voltaje	Amperaje
12	.87
14	.97

Tabla 3.5 Consumo del levitador plano 8x8 con amplificadores I298N y alhambra II.

De estas tablas se puede concluir que los amplificadores smd TC4427A no estaban suministrando el amperaje necesario para la levitación mientras que los amplificadores L298N funcionaron sin problemas.

Además de los consumos energéticos se observaron mediante osciloscopios las diferentes señales obtenidas en la figura 3.19 se puede observar la señal obtenida del micro controlador como se puede observar es una señal cuadrada con una frecuencia de 40 kHz que es la misma a la que funcionan los transductores.

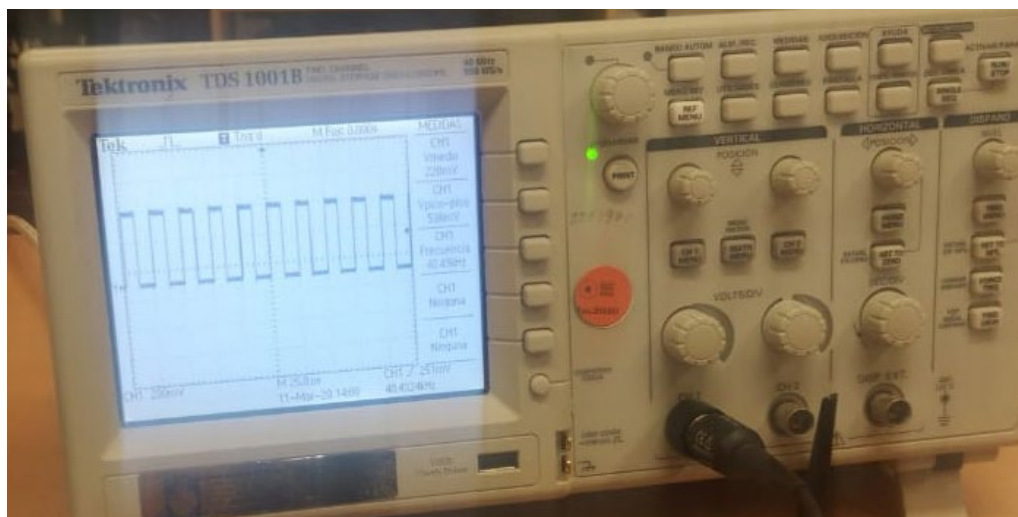


Figura 3.19 osciloscopio de la marca teltronix mostrando las señales cuadradas salidas del microcontrolador.

Por otra parte, en la figura 3.20 se puede observar la señal que sale de los transductores esta resulta ser senoidal a la misma frecuencia este cambio lo realizan en automático los transductores ultrasónicos.

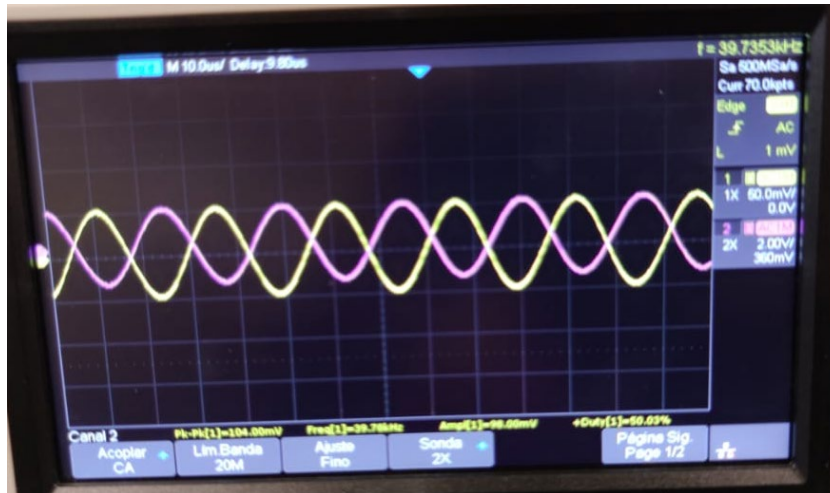


Figura 3.20 osciloscopio de la marca teledyne mostrando las señales senoidales salidas de los transductores ultrasónicos.

Lamentablemente no se pudieron obtener imágenes de schlieren debido a cuestiones de la pandemia COVID 19 pero se espera que las imágenes obtenidas fueran lo más similares a las del simulador ultraino.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Resultados y discusión

Los resultados de las optimizaciones realizadas en los levitadores acústicos de fase variable han sido relevantes para el ámbito de investigación se han modificado los controladores las interfaces la resolución de fase la amplitud y estructura en la que se montan los traductores todos estos cambios efectuados se ven reflejados en la siguiente tabla 4.1 en la cual se muestran los trabajos publicados desde el 2013 hasta el 2019

	Carter Ultrahaptics	Ochial Pixie Dust	Inoue	Marzo TinyLev	Marzo Ultraino	Beasley	Strobino	Zehnter with Matlab
year	2013	2014	2016	2017	2017	2019	2019	2019
device(s)	CPLD	FPGA	FPGA	Arduino Nano	Arduino Mega	SoC FPGA	SoC FPGA	FPGA
clock rate	400 MHz	50 MHz	N/A	16 MHz	16 MHz	100 MHz	50 MHz	81.92 MHz
amplifier	N/A	L293DD	NJM2670	L297N	TC4427	TC4427A	MAX17079GTL+	MIC4127
voltage	≤ 15 V	≤ 24 V	≤ 24 V	≤ 70 V	≤ 17 V	≤ 16 V	≤ 18 V	≤ 20 V
transducer	320	285	249	72	64	64	88	100
emitting freq.	40 kHz	40 kHz	40 kHz	40 kHz	40 kHz	40 kHz	40 kHz	40 kHz
calculation	SW	HW	HW	HW	SW	HW	HW	SW
interface	Ethernet	USB	EtherCAT	N/A	USB-UART	USB-UART	Avalon [®]	USB-SPI
update rate	N/A	1 kHz	11 kHz	N/A	≤ 0.1 kHz	≥ 6.49 kHz	≥ 1 kHz	≤ 1 kHz
phase res.	$\pi/25$	$\pi/8$	N/A	$\pi/12$	$\pi/5$	$\pi/128$	$\pi/625$	$\pi/1024$
amp res.	N/A	3 bit	N/A	fixed	3 bit	fixed	fixed	10 bit
open source	N/A	N/A	N/A	yes	yes	yes	yes	yes
extendable	yes	no	yes	no	yes	N/A	N/A	yes

Tabla 4.1 En esta tabla se pueden observar los diferentes proyectos realizados desde el 2013 hasta el 2019.

Como se observa en la tabla existen varias publicaciones acerca de los levitadores acústicos de fase variable cada uno tiene un enfoque diferente así como sus características el presentado por ultrahaptics en 2013 es un módulo ultrasónico comercial enfocado a sensaciones táctiles para recreación como puede ser la realidad virtual se muestra un esquema en la figura 4.1 estas sensaciones tiene como objetivo simular objetos cotidianos o por ejemplo en un juego de realidad virtual simular la interacción con el entorno.

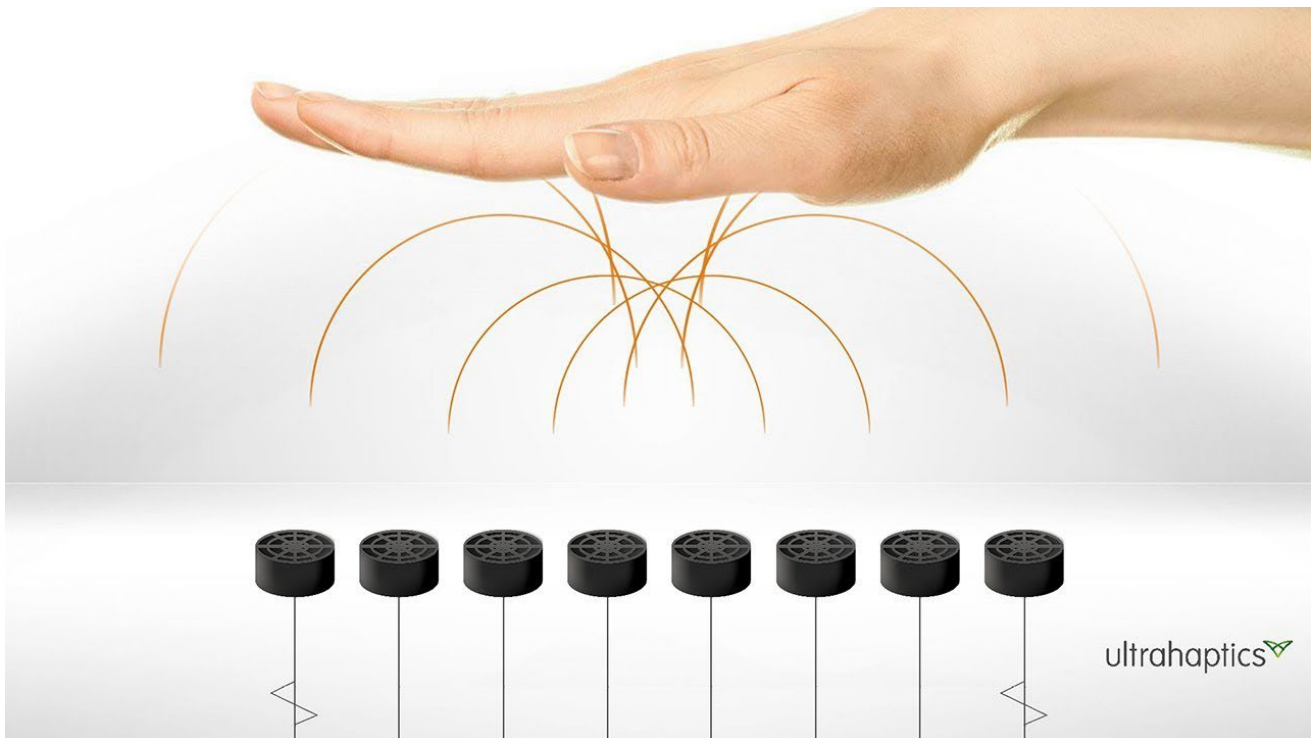


Figura 4.1 Imagen ilustrativa de los amplificadores emitiendo presión acústica hacia una mano produciendo una sensación táctil.

Este dispositivo no cuenta con información abierta acerca de su funcionamiento debido a que fue desarrollado por una empresa de carácter privado pero enfoca la presión acústica de acuerdo a un software controlado por el usuario dando así sensaciones táctiles a diferencia de nuestro código de la fpga alhambra II este utiliza cpld y no menciona el uso de amplificadores pero su programación resulta compleja comparada con las demás opciones además de limitarse a arreglos planos debido a sus aplicaciones.

Posterior mente en la tabla se muestra el pixi dust que podría considerarse la primer holografía acústica ya que este modelo de levitador es capaz de levitar múltiples partículas en direcciones predeterminadas por el usuario así como iluminarlas formando de esta manera hologramas acústicos como el mostrado en la figura 4.2 sus fines de este levitador también se enfocan a fines recreacionales como el ultrahaptics pero al nivel prototipo ya que los softwares utilizados no son fáciles de interactuar con el público en general sin embargo esta tecnología es de las más avanzadas entre los de la tabla a comparación del levitador propuesto en esta tesis contiene un mayor número de transductores y una fase de $\pi/8$ dando como resultado una manipulación de partículas en un mayor espacio y una precisión mayor del movimiento limita su funcionalidad a su arreglo en específico y el costo de elaboración resulta sumamente mayor comparado con el propuesto.



Figura 4.2 poliestireno levitado e iluminado generando una holografía acústica de forma de s. Inoue es un investigador con diversas publicaciones acerca de la levitación acústica y el desarrollo del levitador mostrado en la figura 4.3

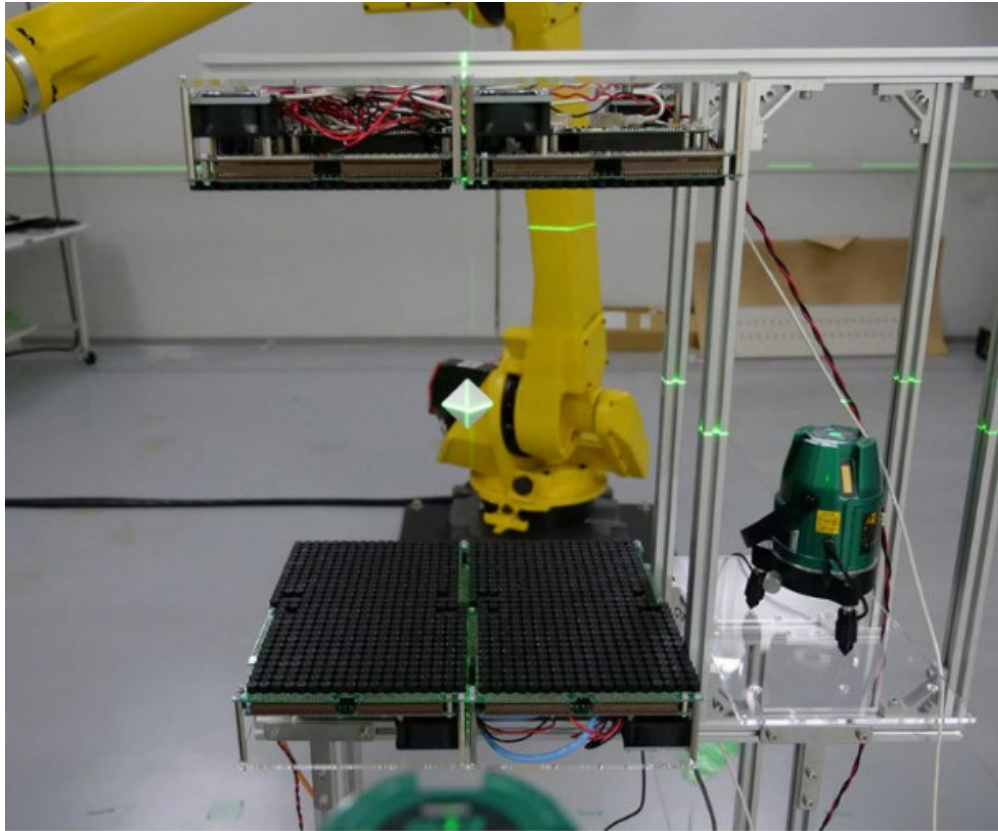


Figura 4.3 Levitador desarrollado por inoue de 1992 transductores.

En este podemos observar que utiliza 1992 transductores divididos en 4 secciones inferiores y 4 secciones superiores ejerciendo así una presión acústica superior sobre los demás de la lista este tiene enfoque en investigación generando un campo de levitación estático para cuerpos rígidos a diferencia del resto es que es que arreglo más grande de transductores lo que incrementa considerablemente el costo de elaboración y está limitado a objetos estáticos aunque de un volumen mayor al resto de las partículas levitadas por los demás levitadores propuestos.

Las siguientes dos posiciones en la tabla son para el Dr. Asier marzo con el tiny lev conocido como el rayo tractor acústico y el ultraino que es capaz de funcionar con diferentes arreglos de transductores este es el modelo que se intentó replicar en nuestro caso en la figura 4.4 lamentablemente el software trabaja con versiones anteriores de arduino y con librerías de java desarrolladas por el Dr. Asier lo puede

llegar a presentar fallos o dificultades para modificar el código mismo que resulta muy extenso tal como ocurrió en el caso de esta tesis sin embargo es el que resulta más apto para cuestiones de investigación como la aplicación de la técnica de LIBS por su interfaz con el usuario y su flexibilidad para adaptarse a diferentes aplicaciones

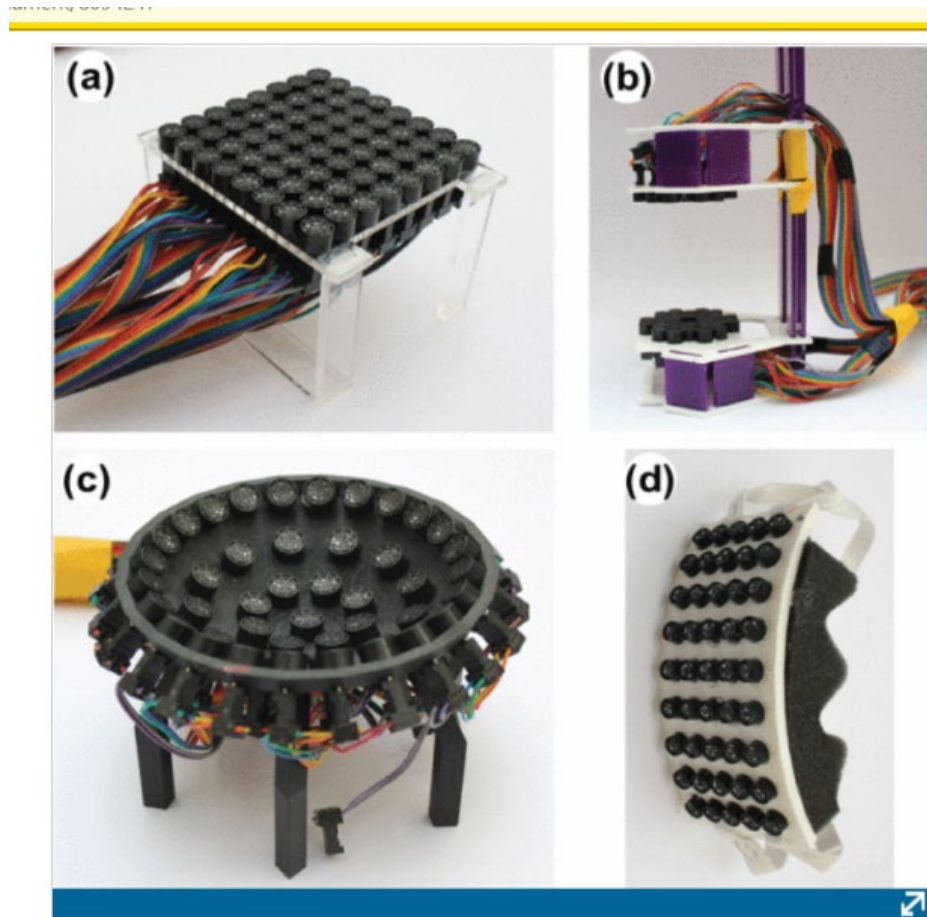


Figura 4.4 Diferentes arreglos de transductores con aplicaciones distintas todos desarrollados por el Dr. Asier marzo.

Los diferentes arreglos mostrados en la figura 4.4 pueden tener múltiples usos como manipulación sin contacto de partículas, holografía acústica y sensaciones táctiles aunque cada una con limitaciones ya que no tiene un enfoque específico además de tener una resolución de fase de $\pi/5$ lo que limita su exactitud y estabilidad al momento de la manipulación de partículas aun que al utilizar un arduino mega como microcontrolador y arreglos que se pueden generar de forma casera resulta más

económico aunque la parte de la elaboración de la tarjeta amplificadora resulta difícil o casi imposible realizarla sin fallas al no tener equipo especializado en cambio los amplificadores propuestos en el levitador de esta tesis son más económicos y fáciles de cambiar en caso de falla así como una manipulación más apta para los usuarios ya que el de nosotros cuenta con una resolución de $\pi/150$.

William Beasley presenta una plataforma flexible y autónoma basada en el xilin Zynq SoC que utiliza una serie de emisores ultrasónicos. La plataforma emplea un ZedBoard y proporciona un movimiento rápido de los objetos levitados, así como detección de objetos basada en el eco producido (Beasley et al., 2019). al igual que con la de Asier puede funcionar con diferentes arreglos de los transductores en la figura 4.2 se puede observar un esquema de la programación y funcionamiento de su levitador planteado según el artículo High-Performance Ultrasonic Levitation with FPGA-based

Phased Arrays El levitador muestra características especiales como una resolución de $\pi/128$ la implementación de una fpga xilin de bajo costo y flexibilidad de arreglos.

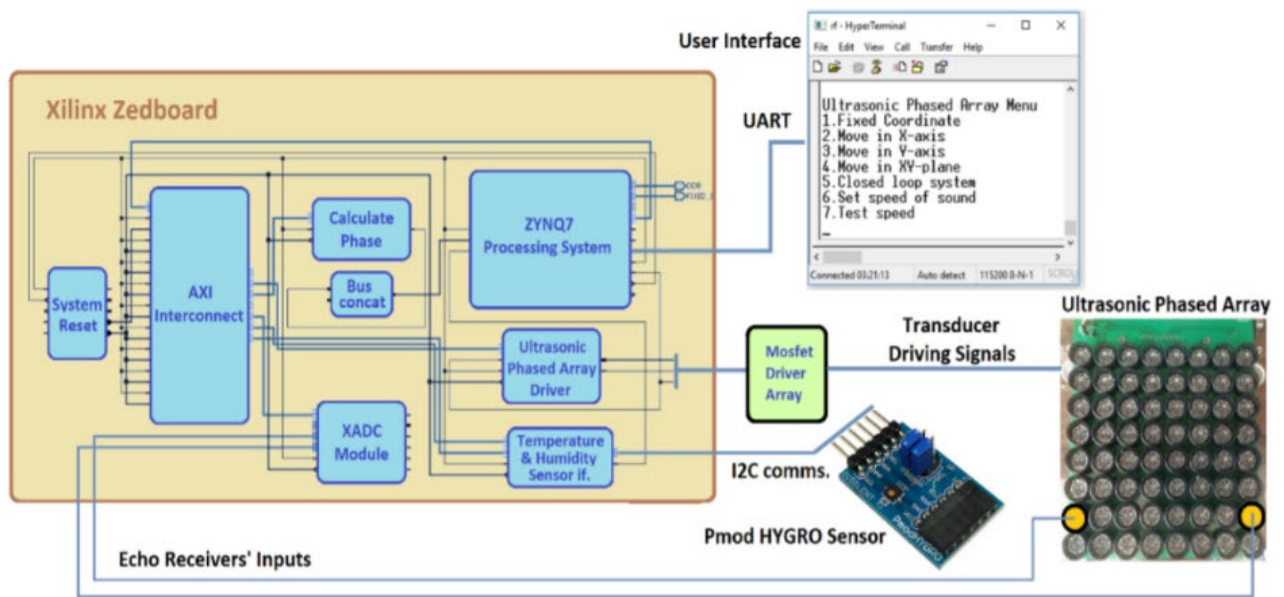


Figure 1: Overview of full system

Figura 4.5 Estructura de la programación de la fpga y del funcionamiento del levitador propuesto por el Dr. William.

Esta resulta una buena opción para levitadores utilizados en el área de investigación, pero la dificultad de su uso resalta en su manufactura programación ya que la pcb utilizada es compleja de realizar y sus componentes tienen que ser ensamblados mediante maquinas especializadas y la parte del software es programada en xilin debido a la fpga utilizada lo que dificulta un poco su manipulación para usos específicos.

Por otra parte strobino es una investigación tipo open source desarrollado en Linux con un arreglo bastante estable en los movimientos asi como en mantener la partícula levitada esto se debe a la resolución de $\pi/625$ este movimiento se puede observar su página de git lab el arreglo utilizado se puede observar en la figura 4.6 sin embargo la fpga utilizada es de alto costo y no existe posibilidad de cambiar el arreglo de transductores además de que los amplificadores son componentes smd y la placa tiene una figura irregular lo que incrementa su costo el diseño resulta útil al tener pestañas a los 4 lados optimizando asi la estabilidad del objeto levitado.

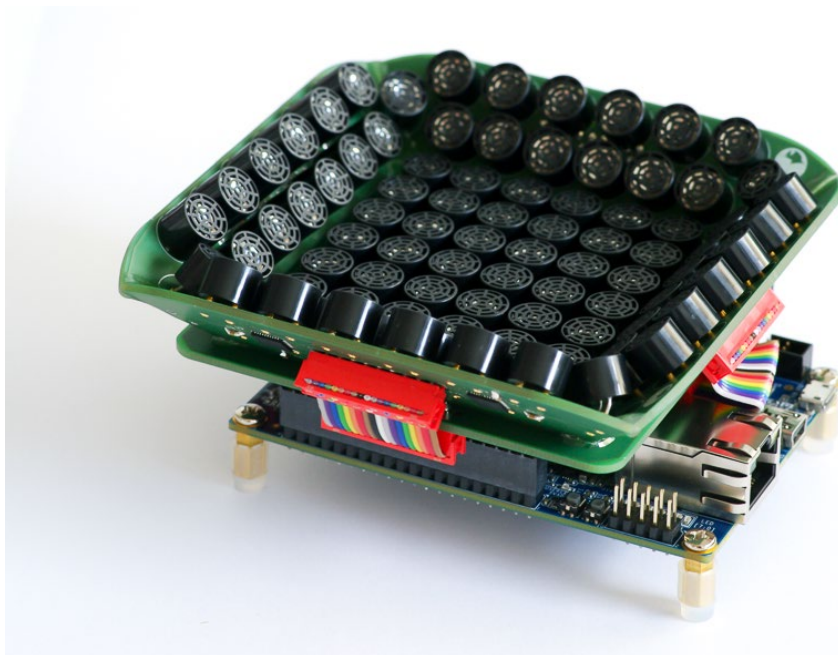


Figura 4.6 Estructura del levitador strobino

El ultimo levitador planteado de la lista es el de Sebastián zenhnter el cual utiliza formulas en mat lab para generar los dedos acústicos y un arreglo que se puede

observar en la figura 4.7 este es el que cuenta con mayor resolución de fase entre todos llegando a $\pi/1024$ debido a la programación en math lab así como una fpga de altas prestaciones con el desarrollo de una pcb especial para este levitador la cual incorpora los amplificadores, la fpga, el módulo FTDI, y la conexión con los transductores en una sola placa lo que incrementa su costo pero se obtienen resultados de levitación precisos aun que al igual que la mayoría limita la estructura de la base de los amplificadores.

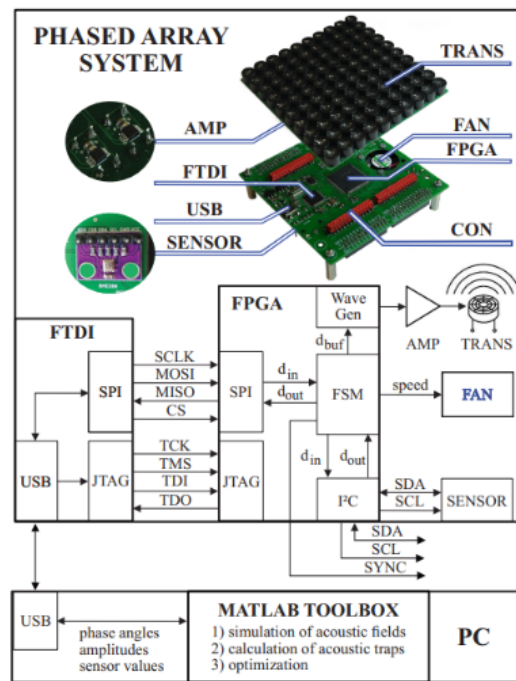


Figura 4.7 Diagrama de funcionamiento del levitador del Dr. zenhnter

Por otra parte, el levitador propuesto por nosotros tendría arreglos de transductores flexibles así como un código intuitivo para programar la fpga desarrollado en bloques amplificadores capaces de soportar hasta 35v y manipularlos con facilidad así como ser económicos al igual que la fpga la cual fue la ice zum alambra II figura 4.8

misma que es open source facilitando su programación la cual es principalmente en bloques que se desarrollan en lenguaje verilog la resolución en nuestro caso es definida por el usuario pero estaría limitada al reloj de la fpga el cual es de 12mhz las desventajas de nuestro sistema propuesto es la limitación de transductores a 20 como

máximo en caso de ser necesaria la manipulación de las partículas levitadas en caso de ser estáticas la resolución se vería reducida a $\pi/10$ pero con transductores ilimitados.

En nuestro caso no se logró los cambios de fase de forma automática, pero se pueden ir programando en cuestión de desfases de micro segundos individuales por cada transductor siendo el usuario el que defina la fase de igual manera el levitador comenzó siendo plano de 8x8 y se cambió por el cóncavo con reflector para lograr una levitación de una forma más fácil y estable cambiando los dedos acústicos por una onda estacionaria.



Figura 4.8 FPGA alhambra II esta fpga es open source y se ha ido innovando de manera acelerada en su programación haciéndola cada vez más amigable.

A lo largo de esta tesis se adquirieron experiencias de áreas de conocimiento específico necesarias para la construcción de todas las partes que conforman al dispositivo y llegar así a la realización de las pruebas en el laboratorio.

La principal contribución de esta tesis es la elaboración de un levitador acústico de fase variable capaz de levitar partículas en diferentes direcciones manipulando las fases este dispositivo es económico comparado con los antes mencionados y con un código tipo open source lo que lo convierte en una de las mejores opciones para su

implementación en trabajos de investigación ya sea con fines de holografía, sensaciones táctiles, manipulación de sustancias sin contacto, o cualquier otro uso que se le dese dar.

Durante la estancia en el instituto de ciencias físicas se lograron utilizar múltiples arreglos algunos con fase variable otros en fase en la siguiente tabla se comparan todos los levitadores utilizados durante dicha estancia.

Nombre del levitador	Numero de transductores	controlador	Tipo de onda o trampa
nanolev	2	Arduino nano	estacionaria
Tiny lev	18	Alhambra II	Estacionaria
Tractor beam	30	Arduino mega	twin
Plano 8x8	64	Alhambra II	vortex

Tabla 4.2 Levitadores utilizados durante esta tesis.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Para el desarrollo de un levitador acústico de fase variable es necesario considerar varios aspectos a desarrollar por ejemplo los amplificadores cada uno tiene ventajas y desventajas

Los amplificadores smd

Ventajas

- Placa menor tamaño
- Tener más cantidad de amplificadores
- Menos calentamiento

Desventajas

- Se necesita una pcb
- Dificultan para repararlos
- Costo mayor
- Voltaje y corriente limitados

Los módulos amplificadores

Ventajas

- Fáciles de manipular
- Soportan altos voltajes
- Menor costo

Desventajas

- Módulos muy grandes

Otro aspecto importante a tomar en cuenta es el arreglo de los transductores existen infinidad de arreglos que pueden modificar los siguientes parámetros

- Estabilidad de levitación
- Tipo de onda generada
- Margen de manipulación de las partículas

El tipo de arreglo a utilizar dependerá completamente de la aplicación

- los arreglos cóncavos con reflectores o capas superiores brindan una mayor estabilidad para usos como libs
- los arreglos planos o cóncavos de sin reflector o sin arreglo superior funcionan mejor para manipulación sin contacto
- los arreglos planos de dos capas son útiles para holografía acústica

Otro aspecto importante a tomar en consideración es el controlador y la programación este aspecto resulta más complejo porque depende de la experiencia del usuario sin embargo los controladores propuestos e implementados hasta ahora son los siguientes

- Arduino en sus variantes nano, uno y mega
- Fpga acopladas a placas con procesadores cortex o placas generadas por los creadores los levitadores
- Raspberry pi o variantes
- Módulos CPLD

Para seleccionar el controlador correcto es necesario que cumpla con ciertos requisitos como es el número de salidas entradas las frecuencias a utilizar y un precio accesible fuera de la programación del controlador suele ser necesario realizar una interfaz con el usuario en caso de realizar manipulación por que de lo contrario se tendrían que ir modificando el código fuente y para realizarlo sería necesario conocer toda la estructura del levitador.

5.2 Recomendaciones

Existen varias recomendaciones a tomar en cuenta al momento de la elaboración de un levitador acústico de fase variable estas dependerán de la aplicación que se les dese dar y de los recursos que allá disponibles en caso de que los recursos económicos no se ven limitados la mejor opción sería ocupar una pcb extensible

como la de ultraino con amplificadores smd que cuenten con un soporte de alto voltaje y amperaje que no tengan tendencias a calentarse, la pcb tendría que tener las entradas del controlador independientes para poder utilizar el controlador que sea más acorde a las necesidades del usuario.

Dejando así la opción de uso de una fpga e ir actualizando los microcontroladores a futuro ilimitando así la capacidad de actualizaciones de hardware y software en la parte del arreglo dependería completamente del uso como se menciona con anterioridad en la parte de resultados se recomienda el uso de aluminio como material base para los transductores debido a su disipación de calor o en su defecto una impresión 3d en PLA ahorrando costos y evitando problemas de conductividad como software a utilizar se recomienda el que maneje el usuario con mayor destreza.

REFERENCIAS

- Abad, J. R. (2012). *Levitador electrostático*.
<http://zaguan.unizar.es>
- Altera Corporation. (2010). *Introduction to the Quartus® II Software*. www.altera.com
- Andrade, M. A. B., Pérez, N., & Adamowski, J. C. (2015). Particle manipulation by a non-resonant acoustic levitator. *Applied Physics Letters*, 106(1).
<https://doi.org/10.1063/1.4905130>
- Andrade, M. A. B., Pérez, N., & Adamowski, J. C. (2018). Review of Progress in Acoustic Levitation. In *Brazilian Journal of Physics* (Vol. 48, Issue 2, pp. 190–213). Springer New York LLC. <https://doi.org/10.1007/s13538-017-0552-6>
- Ardizzi, N. A. (2011). *Fundamentos del Sonido: Frecuencia, Periodo, Longitud de onda*.
- Ashkin, A., Dziedzic, J. M., & Of, both N. (1987). *NON-DESTRUCTIVE OPTICAL TRAP FOR BIOLOGICAL PARTICLES AND METHOD OF DONG SAME*.
- AUGUSTO, T. G. E. (2009). *Efectos físicos en cavidades cilíndricas usadas en dispositivos de levitación acústica T*.
- Banzi, M., Barragin, H., Cuartielles, D., Todd, T. I., & Mellis, K. D. (2007). *Manual de Programación Arduino*.
<http://www.arduino.cc><http://www.wiring.org.co><http://www.arduino.cc/en/Booklet/HomePage><http://cslibrary.stanford.edu/101/><http://creativecommons.org/licenses/by-nc/>
- Barbón García, D., Tutor, V., & Briz del Blanco, D. (n.d.). *DISEÑO Y MONTAJE DE UN SISTEMA SCHLIEREN PARA LA VISUALIZACIÓN DE GASES*.
- Barmatz, M., & Coilas, P. (n.d.). *Acoustic radiation potential on a sphere in plane, cylindrical, and spherical standing wave fields a)*.
- Barmatz, M., & Coilas, P. (1984). *Acoustic radiation potential on a sphere in plane, cylindrical, and spherical standing wave fields a)*.
- Beasley, W., Gatusch, B., Connolly-Taylor, D., Teng, C., Marzo, A., & Nunez-Yanez, J. (2019). High-performance ultrasonic levitation with FPGA-based phased arrays. *ArXiv*. <https://doi.org/10.475/123>
-

- Benjumea, V., & Roldán, M. (2017). *Fundamentos de Programación con el Lenguaje de Programación C++*.
- BOLONKIN, A. (2017). *Launch and flight in space without rockets (v.2)*. LULU COM.
- Boyán Ivanov Bonev. (2012). *Introducción al lenguaje Java*.
- Brandt, E. H. (n.d.). *Levitation in Physics*.
- Brandt, E. H. (2001). Suspended by sound. *NATURE*.
- Calle., J. M. M., Vicente., L. R., Miñarro., J. R., Peña., J. L. S. E., Pascual., I. S., & Gato., J. V. (2009). *Física Y Química*. 1(2), 3–4.
- CASTILLO, R. J. J. F. L. ; F. D. DEL. (2015). *MANUAL DE PRÁCTICAS DE CAD UTILIZANDO EL PROGRAMA SOLIDWORKS 2014*".
- Cerezo, J. O., Morales, E. C., & Plaza, J. M. C. (2019). Control system in open-source FPGA for a self-balancing robot. *Electronics (Switzerland)*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/electronics8020198>
- Chavez, J. (1999). *Manual de Verilog*. 1–34.
- Chen, Z., Zang, D., Zhao, L., Qu, M., Li, X., Li, X., Li, L., & Geng, X. (2017). Liquid Marble Coalescence and Triggered Microreaction Driven by Acoustic Levitation. *Langmuir*, 33(25), 6232–6239. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.7b00347>
- Contreras, V., Valencia, R., Peralta, J., Sobral, H., Meneses-Nava, M. A., & Martinez, H. (2018). Chemical elemental analysis of single acoustic-levitated water droplets by laser-induced breakdown spectroscopy. *Optics Letters*, 43(10), 2260. <https://doi.org/10.1364/ol.43.002260>
- Cristian Sisterna, Ms. (n.d.). *FIELD PROGRAMMABLE GATE ARRAYS (FPGAS)*.
- David Octavio Medrano, D. F. R. (2010). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN LEVITADOR ACÚSTICO, MEDIANTE EL PRINCIPIO DE ONDA ESTACIONARIA, APLICADO A TRANSPORTE SIN CONTACTO*. 125.
- De Seversky, A. F. (1964). *IONOCRAFT*.
- E.G.Lierke, R.Grossbach, K.FIOge1, P. C. (1983). Acoustic Positioning for Space Processing of Materials Science Samples in Mirror Furnaces. *Ultrasonics*, 1–11.
- ESPAÑOLA, R. A. (2014). *REAL ACADEMIA ESPAÑOLA*. <https://dle.rae.es/acústico#0gTxC5ksinlinck>
- Felipe, M. C., & Espinosa, S. (2019). *INTRODUCCIÓN A LOS*
-

MICROCONTROLADORES Microcontroladores.

Fundamentos de acústica. (n.d.).

Gonzalez-Gomez, J. (2017). *Electrónica digital para todos.*

<https://github.com/Obijuan/digital-electronics-with-open-FPGAs-tutorial/wiki/Video-1:-Electrónica-digital-para-todos>

Hirayama, R., Martinez Plasencia, D., Masuda, N., & Subramanian, S. (2019). A volumetric display for visual, tactile and audio presentation using acoustic trapping.

Nature, 575(7782), 320–323. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1739-5>

Jaffry, S. (2014). *Development of Wave Propagation Imaging Technology using Field Programmable Gate Array (FPGA) Device to Device discovery View project.*

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35812.17289>

John L. Watkins; Martin B. Barmatz. (1991). *MOTION MEASUREMENT OF ACOUSTICALLY LEVITATED OBJECT.*

<https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19930015412>

Jonathan, P., Barrera, T., Luis, R., Mondragón, P., Fernando, L., Mendieta, T., Manuel Juárez, J., Alejandro, S., Araujo, C., Roberto, A., Ornelas, S., Cervantes Pérez, R., & Rodríguez Hernández, J. (2009). *GUÍA DE ESTUDIO DE FÍSICA II.*

Juan Manuel Gimeno, J. L. G. (2013). *Introducción a Netbeans.* 15–55.

<https://doi.org/10.1111/j.1399-5618.2008.00597.x>

LINARES, R. N. (2009). *Balance de un siglo de superconductividad y superconductores.*

Linda I. Olivares Flores. (2008). *Manual de Programación en Lenguaje C++.*

LÓPEZ, N. D. V. (2014). *TUTORIAL DEV-C ++ ELABORADO.*

www.gnu.org/home.es.html

Marzo, A., Corkett, T., & Drinkwater, B. W. (2018). Ultraino: An Open Phased-Array System for Narrowband Airborne Ultrasound Transmission. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 65(1), 102–111.

<https://doi.org/10.1109/TUFFC.2017.2769399>

Marzo, A., & Drinkwater, B. W. (2019). Holographic acoustic tweezers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(1), 84–89.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1813047115>

- Marzo, A., Seah, S. A., Drinkwater, B. W., Sahoo, D. R., Long, B., & Subramanian, S. (2015). Holographic acoustic elements for manipulation of levitated objects. *Nature Communications*, 6. <https://doi.org/10.1038/ncomms9661>
- Mathiak, G., Egry, I., Hennet, L., Thiaudière, D., Pozdnyakova, I., & Price, D. (2005). Aerodynamic levitation and inductive heating - A new concept for structural investigations of undercooled melts. *International Journal of Thermophysics*, 26(4), 1151–1166. <https://doi.org/10.1007/s10765-005-6708-6>
- Matt Kamlet. (2017). *NASA Flights Advance Celestial Schlieren Imagery for Supersonic Aircraft*.
- Mazumdar, A. (2013). *PRINCIPLES AND TECHNIQUES OF SCHLIEREN IMAGING SYSTEMS*.
- Melde, K., Mark, A. G., Qiu, T., & Fischer, P. (2016). Holograms for acoustics. *Nature*, 537(7621), 518–522. <https://doi.org/10.1038/nature19755>
- Microsoft. (2016). *Manual de paqueteria de office*.
- Miles', C. A., Morleyl, M. J., Hudson', W. R., Mackey, B. M., Miles, C. A., Morley, M. J., & Hudson, W. R. (1995). Principles of separating micro-organisms from suspensions using ultrasound. In *Journal of Applied Bacteriology* (Vol. 78).
- Miyara, F. (2003). *INTRODUCCIÓN A LA ACÚSTICA*.
- Murillo, R. A. V. (2017). *SISTEMA DE LEVITACIÓN ULTRASÓNICA PARA ANÁLISIS ESPECTROSCÓPICO DE MUESTRAS LÍQUIDAS Como Requisito para obtener el grado de: Maestro en Optomecatrónica*.
- Ozcelik, A., Rufo, J., Guo, F., Gu, Y., Li, P., Lata, J., & Huang, T. J. (2018). Acoustic tweezers for the life sciences. In *Nature Methods* (Vol. 15, Issue 12, pp. 1021–1028). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41592-018-0222-9>
- Pack, A., Kremer, K., Albrecht, N., Simon, K., & Kronz, A. (2010). Description of an aerodynamic levitation apparatus with applications in Earth sciences. *Geochemical Transactions*, 11. <https://doi.org/10.1186/1467-4866-11-4>
- PAULG.HEWITT. (1987). FISICA CONCEPTUAL. In *Informes de la Construcción* (Vol. 39, Issue 389). <https://doi.org/10.3989/ic.1987.v39.i389.1660>
- PERALES PALACIOS, F. J. (n.d.). Analisis de contenidos en optica geometrica. 1987.
- Perren, G. (2003). *ESTUDIO DE LAS APLICACIONES PRÁCTICAS DE LA*
-

LEVITACIÓN MAGNÉTICA.

- Peter Merlin, P. A. (2018). *Schlieren Images Reveal Supersonic Shock Waves*.
https://www.nasa.gov/centers/armstrong/features/shock_and_awesome.html
- Quiroga, J. (2014). Estudio preliminar de microfluidos y microrreactores para la degradación catalítica tipo fenton del "Direct blue 71." *Números*.
http://www.academia.edu/download/38646977/Estudio_preliminar_de_microfluidos_y_microrreactores_para_la_degradacion_catalitica_tipo_fenton_del_Direct_blue_71.pdf
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. (2014). *REAL ACADEMIA ESPAÑOLA*.
[https://dle.rae.es/?w=frecuencia sin pdf](https://dle.rae.es/?w=frecuencia%20sin%20pdf)
- Repetto, C. E., & Welti, R. (n.d.). *Measurements of resonant frequencies, loss factor and dynamic Young modulus of cantilever beams*.
<https://www.researchgate.net/publication/289407515>
- Rey, C. A., Merkley, D. R., Hammarlund, G. R., & Danley, T. J. (n.d.). *Acoustic Levitation Technique for Containerless Processing at High Temperatures in Space*.
- Rhim, W. K., Ohsaka, K., Paradis, P. F., & Erik Spjut, R. (1999). Noncontact technique for measuring surface tension and viscosity of molten materials using high temperature electrostatic levitation. *Review of Scientific Instruments*, 70(6), 2796–2801. <https://doi.org/10.1063/1.1149797>
- Romeo, I., & Meza, A. (n.d.). *Transductores*.
- Sahoo, D. R., Nakamura, T., Marzo, A., Omirou, T., Asakawa, M., & Subramanian, S. (2016). JOLED: A mid-air display based on electrostatic rotation of levitated Janus objects. *UIST 2016 - Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, 437–448. <https://doi.org/10.1145/2984511.2984549>
- Sánchez-Élez, M. (2014). *Introducción a la Programación en VHDL*.
http://www.dacya.ucm.es/marcos/index_docen_archivos/intvhdl.pdf
- Sepúlveda, K. V., Ricárdez Vargas, I., & Ramos García, R. (2007). *Pinzas ópticas: las delicadas manos de la luz*.
- Toledo, R. S., Cruz, G. V., Zaldo, A. F., Lunazzi, J. J., & Magalhães, D. S. F. (2009). El holograma y su utilización como un medio de enseñanza de la física en ingeniería.
-

Revista Brasileira de Ensino de Física, 31(1). <https://doi.org/10.1590/S1806-11172009000100007>

- Torregrosa, J. M., Alís, J. C., & Carbonell, R. V. (2007). *Planificando la enseñanza problematizada: el ejemplo de la óptica geométrica en educación secundaria*. <https://www.researchgate.net/publication/39437017>
- Torres-Ortega, H. (2014). *Guía de diseño de PCB con EAGLE Introducción y recomendaciones generales*. www.hetpro.com.mx
- Torrone, P. (2011). *Convert PDF to Gerber and NC Drill formats Drill formats*. <http://swannman.wordpress.com/projects/pdf2gerb/>
- Vargas, I. R. (2007). *Nuevas técnicas de micromanipulación en pinzas ópticas*.
- Varnavas, K., Herbert Sims, W., & Casas, J. (n.d.). *The Use of Field Programmable Gate Arrays (FPGA) in Small Satellite Communication Systems*. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150009433>
- Vázquez, J. H., Rodrigues, H. F., & Irigoien, J. A. (2005). *ESTRUCTURAS Y EFECTOS DINÁMICOS DEL VIENTO*. 9–12.
- Xie, W. J., & Wei, B. (2001). Parametric study of single-axis acoustic levitation. *Applied Physics Letters*, 79(6), 881–883. <https://doi.org/10.1063/1.1391398>
- Xilinx, & Inc. (2012). *ISE In-Depth Tutorial UG695 (v14.1)*. <http://www.xilinx.com/warranty.htm#critapps>.
-

ANEXO A.
