

Universidad Politécnica del Estado de Morelos



Construcción y caracterización de un levitador acústico para
desplazar objetos sin contacto.

Tesis que para obtener el título de

INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

Presenta

Moisés Gamaliel Estrada Vergara

Directores de tesis

Dr. Víctor Ulises Lev Contreras Loera

M.C.E. Miguel Ángel Velasco Castillo

Estadía

Periodo: Enero-Abril Primavera 2022

Jiutepec, Morelos. 05 de abril de 2022

Tabla de contenido

Índice de figuras.....	i
Índice de tablas.....	ii
Lista de siglas y abreviaturas	iii
Agradecimientos	iv
Resumen	vi
Capítulo I. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	2
1.3 Justificación	2
1.4 Objetivo	3
1.5 Objetivos específicos.....	3
1.6 Hipótesis	3
1.7 Alcances.....	4
1.8 Limitaciones.....	4
1.9 Metodología	4
1.10 Entregables.....	5
1.11 Organización de la tesis	5
Capítulo II. Marco teórico.....	7
2.1. Levitación acústica y sus aplicaciones.....	7
2.1.1 Aplicaciones.....	11
2.2 Transductores en levitación acústica	12
2.3 Control de fase en arreglos de transductores.....	13
2.4 FPGA Cyclone IV.....	13
2.5 Módulo UART.	14
Capítulo III. Implementación del sistema de levitación.....	17
3.1 Construcción del levitador acústico.....	17
3.2 Programación del control de señales.	25
3.3 Control de señales para duplicar la amplitud de entrada.	31
3.4 Desarrollo de una interfaz gráfica de usuario para control de señales.	33
Capítulo IV. Pruebas y resultados del sistema de levitación.....	36
4.1 Modalidad: encendido-apagado (On-off) de transductores.....	36
4.2. Modalidad: control de fase de transductores	38
4.3. Desempeño del sistema.....	42
Capítulo V. Conclusiones y trabajos a futuro	44
5.1 Conclusiones.....	44

5.2 Trabajos a futuro	45
Referencias bibliográficas	47
Anexos	48

Índice de figuras

Figura 1.1. Metodología.....	4
Figura 2.1 Onda estacionaria.	7
Figura 2.2.....	8
Figura 2.3. Transductor MSO-A1040H07T.	12
Figura 2.4. Transmisión de datos en un módulo UART.	14
Figura 2.5. Formato de trama UART.....	15
Figura 3.1. Arquitectura física del sistema de levitación acústica.....	17
Figura 3.2. Arreglos de transductores dispuestos una geometría cilíndrica	18
Figura 3.3. Sistema de referencia del levitador acústico en coordenadas cilíndricas. (a) Coordenadas (r,θ,z) vistas de manera transversal mostrando el punto de origen del sistema. (b) Vista longitudinal del sistema de levitación que muestra las posiciones en z.	19
Figura 3.4. Transductores colocados para prueba siendo el receptor el transductor a prueba.....	20
Figura 3.5. Señal de salida y señal de referencia vistas en el osciloscopio.....	21
Figura 3.6. Superficies cilíndricas para los arreglos de transductores en impresión 3D.....	22
Figura 3.7. Transductores soldados en las superficies cilíndricas. (a) Referencia de los transductores soldados en conexión paralela. (b) Soldadura de los transductores vista desde la parte de los pines.....	22
Figura 3.8. Conexión con cable entre arreglos.	23
Figura 3.9. sistema de levitación armado y montado.	24
Figura 3.10. Movimiento angular del levitador desde una vista transversal y longitudinal.	24
Figura 3.11. Movimiento lineal del levitador.	25
Figura 3.12. Divisor de frecuencia a 40 kHz	26
Figura 3.13. Generador de señal push-pull de 40 kHz.....	26
Figura 3.14. Señal push-pull de 40 kHz.	27
Figura 3.15. Programación de desfases de 18°	29
Figura 3.16. Programación de desfases de 18° cuando el contador se supera.....	30
Figura 3.17. Máquina de estados para poder asignar los desfases a cada salida.	30
Figura 3.18. Asignación de pines en la FPGA.	31
Figura 3.19. Circuito integrado LN298N.	31
Figura 3.20. Puente H.....	32
Figura 3.21. Módulo controlador LN298N.....	32
Figura 3.22. Diseño de la interfaz gráfica.....	33
Figura 3.23. Programación para enviar los datos de forma serial.....	34
Figura 3.24. Velocidad de baudios aumentada 3 veces.	35
Figura 3.25. Diagrama de la máquina de estados para el UART.....	35
Figura 4.1. Esquema del desplazamiento de un objeto, encendiendo y apagando transductores en distintas posiciones del eje z (mm), para simplificar el diagrama se coloca un par de transductores por cada posición en z.....	37
Figura 4.2. Posiciones del objeto en traslación en el eje z encendiendo y apagando transductores.....	38

Figura 4.3. Diagrama que explica la aplicación de los desfases. (a) Para generar interferencia constructiva en un punto se deben desfasar las señales de los emisores (transductores) ya que se encuentran en diferentes posiciones, al hacer esto las señales llegaran en fase al mismo punto y se genera interferencia constructiva.....	39
Figura 4.4. Posiciones del objeto en traslación en el eje z controlando la fase de los transductores.	40

Índice de tablas

Tabla 2.1. Especificaciones de los transductores MSO-A1040H07T.....	13
Tabla 3.1. Desfases calculados para desplazar objetos hasta la mitad del levitador, las celdas amarillas representan los transductores encendidos y dentro de la misma se encuentra el desfase.	27
Tabla 3.2. Desfases calculados para desplazar objetos para la segunda mitad del levitador, las celdas amarillas representan los transductores encendidos y dentro de la misma se encuentra el desfase.	28
Tabla 4.1. Posiciones del objeto levitado en el eje z y movimiento que realiza entre cada transición de estados.	41

Lista de siglas y abreviaturas

UNAM-Universidad Nacional Autónoma de México

ICF-Instituto de Ciencias Físicas

LOA-Laboratorio de óptica y acústica

Upemor-Universidad Politécnica del Estado de Morelos

VHDL-Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language

FPGA-Field Programable Gate Array

Vpp-Volts pico pico

UART-Universal asynchronous receiver/transmitter

RMS-Root Mean Square

Rad-Radianes

ADC-Analog to Digital Converter

PC-Personal Computer

ADN-Ácido desoxirribonucleico

RAM-Random Access Memory

E/S-Entradas/salidas

SRAM-Static Random Access Memory

SPI-Serial Peripheral Interface

PLL-Phase-locked loop

LDO- Low Dropout

AHB-Automatic High Beam

PWM-Pulse Width Modulation

PHY-PHYsical layer

ICSP-In-Circuit Serial Programming

CA-Corriente alterna

CC-Corriente continua

EEPROM-Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

bps-bits por segundo

TTL-Transistor-transistor logic

DC-Direct current

PPS- Polyphenylen sulfide

EPS- Expanded Polystyrene

Agradecimientos

Agradezco principalmente a Dios por permitirme llegar a esta etapa de mi vida y dedico este trabajo de tesis a mi abuelo Gamaliel Estrada por haber creído en mí mucho más que cualquier otra persona, por haber estado ahí cuando los demás no estaban, por su apoyo incondicional para que pudiera iniciar y concluir la licenciatura, aunque hoy físicamente no está conmigo sé que llegar a ser como él, significará haber triunfado y este logro es un paso más. Le agradezco todo porque sin él nada de esto sería posible.

A mis papás Moisés y Sagrario por su apoyo incondicional a lo largo de esta etapa, por darme la oportunidad de poder continuar con mis estudios pensando en mi bienestar y por acompañarme en cada paso de mi vida.

A mis hermanos Viridiana y Gamaliel que me motivaron a continuar y siempre ver el lado positivo de la vida.

A mi abuela Graciela que me ha acompañado en cada uno de mis triunfos y logros. A mi novia Yesenia por ser parte importante de mi vida y ayudarme a seguir adelante cuando las cosas parecían complicadas y ayudarme a ser mejor cada día.

Al profesor M.C. Daniel Rojas por sus consejos y palabras de aliento para no desistir y continuar con mi carrera.

A mis incondicionales amigos Adrián, Alexis y Diana que en todo momento se preocuparon por mi bienestar, porque estuvieron para apoyarme y hacer más alegres mis días en la universidad.

Al Instituto de Ciencias Físicas UNAM por haberme permitido formar parte del grupo de trabajo del laboratorio de Óptica y Acústica.

A mi asesor Dr. Víctor Contreras, por darme la oportunidad de trabajar con él, por brindarme su amistad, tiempo, apoyo, guía, dedicación y paciencia para realizar este trabajo de tesis, por su disposición de compartir en todo momento su experiencia y conocimiento conmigo.

A mi asesor M.C.E. Miguel Ángel Velasco Castillo por su apoyo a lo largo de la carrera y su incondicional ayuda en la culminación de mis estudios profesionales para realizar esta tesis.

Al profesor Dr. Alfredo Gil Velasco, por su tiempo para realizar observaciones y sugerencias en este trabajo de tesis.

A mis compañeros de laboratorio, Kenia Zamora y Martín por apoyarme y aportar sus conocimientos durante la realización de este trabajo de tesis.

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.

Al técnico académico del ICF, Ing. Guillermo Bustos Maya, por haber realizado la manufactura de las piezas necesarias para este trabajo.

Resumen

La levitación acústica se refiere a la capacidad de suspender objetos en el aire mediante ondas sonoras emitidas por transductores ultrasónicos. Esto puede resultar útil cuando se necesita desplazar objetos sensibles como sustancias químicas que pueden reaccionar al contacto. Actualmente se han desarrollado cavidades planas, como el sistema LeviPath, que permite mover esferas de poliestireno utilizando levitación acústica. Este sistema consiste en dos arreglos planos opuestos de 16 transductores cada uno, que forman y cambian de posición una onda estacionaria al controlar electrónicamente la fase de cada transductor, permitiendo levitar y mover una o más esferas en 3 dimensiones. En este trabajo de tesis se construye un levitador acústico que permite desplazar objetos sin contacto, utilizando 84 transductores dispuestos en dos superficies cilíndricas para formar una cavidad. Esta configuración geométrica permite enfocar las ondas acústicas sobre el eje de simetría, lo que permite simplificar el control electrónico requerido para desplazar objetos dentro de la cavidad si se compara con el control de cavidades planas. Al controlar electrónicamente la fase de cada grupo de transductores colocados sobre el mismo plano transversal del cilindro, podremos mover la onda estacionaria de lugar y por consecuencia mover el objeto atrapado en los nodos de la onda.

Los resultados muestran que al tener un enfoque de onda geométrico y un control de fase específico de los transductores se pueden tener pasos o movimientos de 1 mm a lo largo del eje del cilindro, permitiendo levitar y desplazarse no solo esferas de poliestireno, sino también gotas de agua, líquido que tiene una densidad (1 g/cm^3) considerablemente mayor con respecto a la del poliestireno (0.01 g/cm^3). En conclusión, este sistema de levitación es capaz de desplazar objetos sin tocarlos teniendo un enfoque geométrico cilíndrico y controlando fases para la señal de los transductores. El enfoque geométrico permite concentrar la energía en un punto y generar ahí la onda estacionaria sin verse afectada por la directividad de los transductores y con un control de fase permite desplazar un objeto con pasos controlados de 1 mm.

Palabras clave: Levitación acústica, desplazar objetos sin contacto, transporte de objetos sin contacto, control de fase, enfoque geométrico.

Capítulo I. Introducción

En este capítulo se plasman las características del proyecto: problema que se pretende resolver, justificación, objetivos, alcances y limitaciones del proyecto, metodología de solución, los entregables y la organización de la tesis.

1.1 Antecedentes

En el laboratorio de óptica y acústica (LOA) del Instituto de Ciencias Físicas (ICF) de la UNAM se han desarrollado proyectos en conjunto con la Universidad Politécnica del Estado de Morelos (Upemor), el más reciente fue realizado en 2020 por Said Vara, estudiante de la carrera de Electrónica y Telecomunicaciones de Upemor asociado al LOA como tesista. En su trabajo de tesis, Said desarrolló un sistema de levitación acústica de arreglos de transductores que permite controlar la fase de la señal emitida para generar diferentes distribuciones de presión a diferencia de la distribución convencional que se obtiene cuando no hay control de fase, incluyendo las distribuciones asociadas a vórtices acústicos. A diferencia de la distribución convencional de onda estacionaria, estas distribuciones permiten levitar simultáneamente múltiples partículas de manera estable fuera del eje de simetría, además de levitar objetos de simetría no esférica; siendo estas las diferencias más notables con el trabajo que se muestra en esta tesis. Dentro de la implementación de este proyecto, se diseñó una interfaz gráfica para que los usuarios puedan manipular la fase de la señal que reciben los transductores. Posteriormente se desarrolló un programa en una FPGA para generar las señales de los transductores, incluyendo un programa en Python para interpretar y procesar los datos recibidos desde la interfaz gráfica. Finalmente, se implementó un sistema de amplificación de potencia para las señales de entrada de los transductores, debido a que la señal digital no cuenta con potencia suficiente para poder operar.

1.2 Planteamiento del problema

La levitación acústica representa una herramienta de gran potencial que puede usarse para distintas aplicaciones en diversas disciplinas como la biología, química y electrónica. Estas disciplinas comparten situaciones o problemas específicos, como el transporte de objetos milimétricos que pueden dañarse o contaminarse al tener contacto con superficies o contenedores. Por ejemplo, en disciplinas como la química, actualmente se analizan muestras en pequeños volúmenes que exigen la miniaturización de los instrumentos de diagnóstico. Una pipeta es lo que normalmente se utiliza en un experimento de química para transportar o mezclar muestras. Al tratarse de volúmenes muy pequeños, las muestras son susceptibles a ciertos problemas como, por ejemplo, pérdidas de muestra, sorción, reacciones químicas por contacto con otras sustancias, contaminación por contacto con un recipiente, etc. La necesidad de poder mantener una partícula fija en el medio sin tener contacto para evitar la contaminación o el daño es un problema que puede ser resuelto mediante la levitación acústica. En este trabajo de tesis se plantea como problema desarrollar un sistema de levitación acústica que permita, además de levitar, desplazar objetos milimétricos dentro de la cavidad acústica sin necesidad de contacto con superficies y uso de contenedores.

1.3 Justificación

El construir un sistema de levitación acústica que nos permita desplazar objetos milimétricos sin contacto, potencialmente traerá ventajas a distintas ramas de la ciencia. Por ejemplo, en química sería importante para poder analizar muestras delicadas sin ninguna alteración. Este sistema podría trasladar muestras sin tener contacto con ellas logrando un análisis de alta calidad, asegurando que la información necesaria se obtendrá de una manera eficaz y eficiente.

Existen distintas técnicas para transportar objetos milimétricos sin contacto. La levitación acústica es una de ellas y tiene múltiples ventajas, por ejemplo, la muestra levitada no requiere ninguna propiedad física específica, como carga eléctrica, un determinado índice de refracción, transparencia o una densidad

definida, lo que hace a la levitación acústica una técnica viable para resolver el problema planteado. Este sistema de levitación acústica tendrá ventajas sobre otros sistemas ya realizados como LeviPath (Omirou et al., 2015). Una de ellas es que este sistema contará con un enfoque geométrico, que permitirá reducir las conexiones electrónicas hasta en un 93%.

1.4 Objetivo

Construir y caracterizar un levitador acústico capaz de desplazar objetos milimétricos sin ningún tipo de contacto dentro de la cavidad acústica.

1.5 Objetivos específicos

- Construir dos arreglos de transductores de 6x7 colocados en una superficie cilíndrica.
- Armar un levitador acústico utilizando los arreglos de transductores, formando una cavidad cilíndrica.
- Programar una FPGA para generar una onda push-pull de 40 kHz capaz de variar la fase con una resolución de 18° o $\pi/10$ rad.
- Generar una señal para los transductores de hasta 30 Vpp.
- Desarrollar una interfaz gráfica que facilite la manipulación del sistema de levitación acústica.

1.6 Hipótesis

Un levitador acústico de arreglos de transductores de 6x7 distribuidos en una geometría cilíndrica permitirá generar una onda estacionaria enfocada con máxima presión acústica en el eje z de la cavidad cilíndrica. Al tener un enfoque geométrico cilíndrico; con un control electrónico específico de fase independiente para 6 grupos de 14 transductores que forman 6 planos transversales dispuestos en el eje z del cilindro, permitirá modificar la distribución de presión para desplazar la onda estacionaria dentro de la cavidad, y por consecuencia desplazar al objeto levitado en los nodos de la onda a lo largo del eje z del cilindro sin necesidad de tocarlo.

1.7 Alcances

- Se podrán levitar objetos manipulando fases, logrando desplazar un objeto milimétrico sin contacto en una cavidad ultrasónica de geometría cilíndrica.
- Se realizará una interfaz gráfica que permita al usuario modificar las variables principales para el desplazamiento de los objetos levitados.

1.8 Limitaciones

- El tiempo de entrega del proyecto debe ser en un plazo máximo de 6 meses.
- El sistema podría estar limitado a desplazar objetos de densidades del orden de 1 g/cm^3 .

1.9 Metodología

En esta sección se muestra la metodología a seguir para una posible solución al problema propuesto en este proyecto. En la figura 1.1 se muestra un diagrama que ilustra la metodología usada en este trabajo.

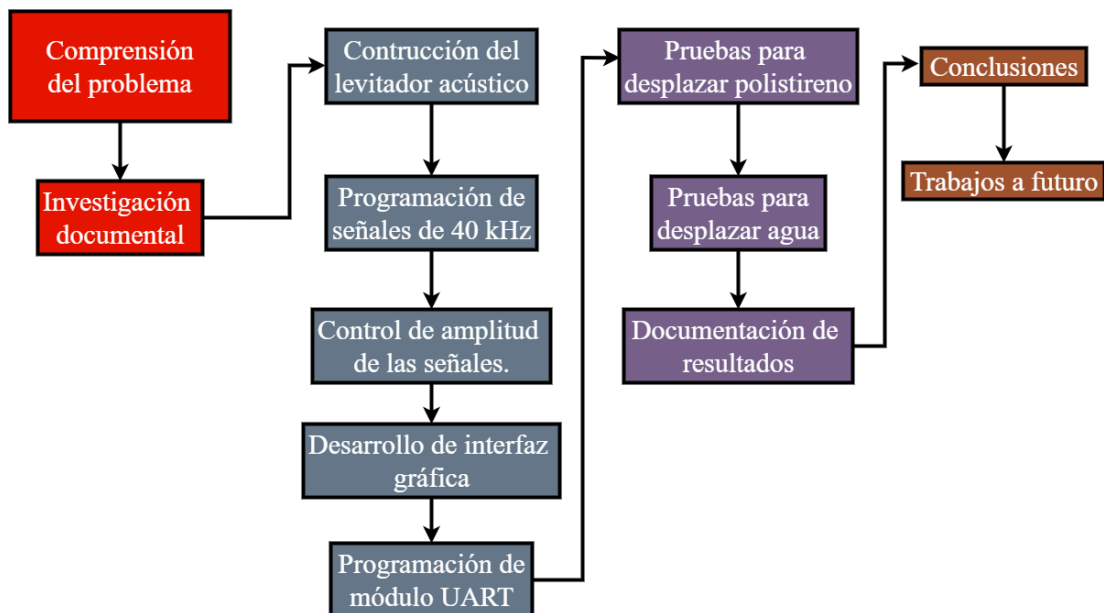


Figura 1.1. Metodología.

Se plantea como un problema hipotético la contaminación o daño ocasionado por desplazamiento con contacto de objetos milimétricos y se comienza a elaborar una investigación documental tomando como referencia artículos que presentan sistemas que permiten desplazar un objeto sin contacto mediante levitación acústica. En base a esto se plantea construir un sistema de levitación acústica que tenga el potencial de aplicarse a situaciones como el problema mencionado.

Se desea construir un sistema de levitación de geometría cilíndrica desarrollando un programa en una FPGA que permita generar señales de 40 kHz con desfases de 18° , ingresando posteriormente esta señal a un módulo controlador que permita tener una amplitud de salida de hasta 30 Vpp. También se desarrolla una interfaz gráfica para una mejor interacción del sistema con el usuario y se programa un módulo UART para la FPGA que permita comunicar la interfaz gráfica con el levitador acústico.

Una vez que el sistema se encuentre armado se realizan pruebas para encontrar errores o posibles fallas y así corregirlas para que el sistema funcione correctamente. Se comienzan las pruebas utilizando un material ligero como el poliestireno y al obtener resultados favorables se pasa a probar con un material más denso como el agua.

Finalmente, con las pruebas realizadas al sistema se puede concluir si se pudo solucionar de manera correcta el problema y se analizan las posibles mejoras que pueden ser implementadas en el sistema.

1.10 Entregables

Levitador acústico que pueda desplazar objetos milimétricos sin contacto.

Tesis para obtener el título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Interfaz gráfica de usuario para operar el levitador.

1.11 Organización de la tesis

El presente trabajo se compone de los cinco capítulos siguientes:

Capítulo I: Introducción.

En este capítulo se muestran los antecedentes de la solución a desarrollar, así como el problema que se va a resolver, justificando por qué se utilizará esta solución tomando en cuenta los objetivos que se desean alcanzar.

Capítulo II: Marco teórico.

En este capítulo se mostrarán todos los conceptos teóricos que son necesarios conocer para poder llevar a cabo el proyecto.

Capítulo III: Implementación del sistema de levitación.

En este capítulo se colocarán ilustraciones que ayuden a explicar acerca de cómo se realizó el desarrollo del sistema.

Capítulo IV: Pruebas y resultados del sistema de levitación.

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos después de haber desarrollado por completo el sistema y realizar las pruebas necesarias.

Capítulo V: Conclusiones y trabajos a futuro.

En este capítulo se mostrará si se alcanzaron los objetivos planteados y si la hipótesis propuesta se cumplió. También se analizarán las posibles mejoras que se pueden realizar a futuro al sistema de levitación.

Capítulo II. Marco teórico

En este capítulo se plasma el grupo central de conceptos y teorías que se utilizarán para desarrollar el proyecto, esto se refiere a las ideas básicas que formarán la base teórica que sustentará la investigación.

2.1. Levitación acústica y sus aplicaciones

En este sistema se implementa la levitación acústica mediante onda estacionaria. Las ondas estacionarias son ondas sonoras que se forman por la interferencia de dos ondas con los mismos parámetros de amplitud, frecuencia y longitud de onda que viajan en sentido opuesto a través de un medio como se muestra en la figura 2.1.

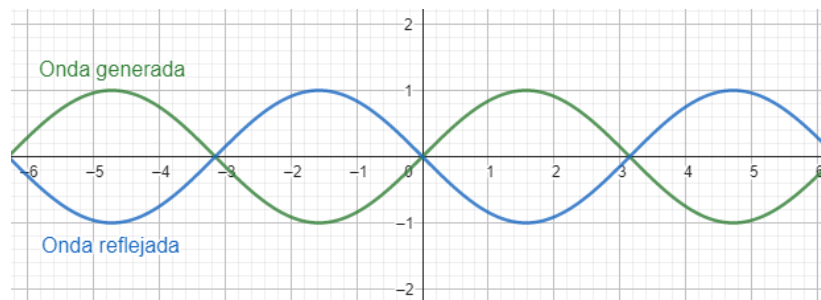


Figura 2.1 Onda estacionaria.

En una onda estacionaria se forman zonas de máximos y mínimos de presión, estos últimos son llamados nodos y representan las zonas donde es posible atrapar o levitar objetos pequeños comparados con la longitud de onda. Para generar una onda estacionaria dentro de una cavidad plana formada por dos emisores, la distancia de separación entre emisores debe ser múltiplo de media longitud de onda como se ilustra en la figura 2.2 (Torres Gallegos, 2009).

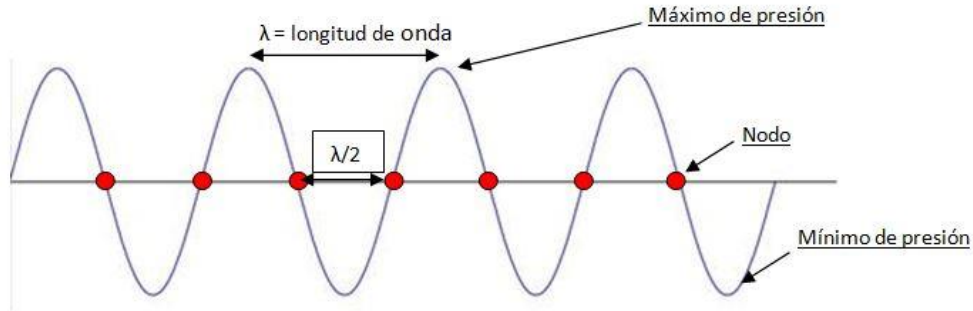


Figura 2.2

La levitación acústica permite manipular una amplia gama de materiales sólidos y líquidos, así como pequeños seres vivos. Esta característica hace de la levitación acústica una herramienta atractiva y de gran potencial para el manejo sin contacto de sustancias en ciencias diversas como la química analítica, la biología y la farmacología.

En la literatura científica se han reportado distintos levitadores acústicos para transportar sustancias líquidas y objetos sólidos sin la necesidad del uso de contenedores. Por ejemplo, Koyama y Nakamura en 2010 desarrollaron un sistema de levitación formado por un reflector plano y una placa metálica de geometría rectangular unida a dos transductores en sus extremos cambiando la fase relativa entre los transductores. La distancia aproximada entre ambas placas era de 17 mm y se utilizó una frecuencia de 22.5 kHz. El transporte sin contacto de las partículas atrapadas a lo largo de grandes distancias podía lograrse cambiando la diferencia de fase de conducción. La posición de las partículas atrapadas pudo controlarse con una precisión de 0,046 mm/grados, logrando atrapar y mover una gota de etanol.(Koyama & Nakamura, 2010)

Ochiai en 2014 empleó 4 matrices de transductores en fase en forma de cubo para manipular pequeños objetos sólidos y líquidos. Se utilizaron dos matrices opuestas entre sí para generar una onda estacionaria en su punto focal común. Dichas matrices se encontraban a una distancia de 200 mm cada una constaba de 285 transductores en un área cuadrada de 170 x 170 mm². La frecuencia utilizada fue de 40 kHz y la presión sonora en el pico del punto focal llegó hasta 2600 Pa (RMS).(Ochiai et al., 2014)

Watanabe en 2018 utilizó una matriz cuadrada de 7x7 con 49 transductores de 10mm a una frecuencia de 40 kHz y un reflector opuesto para levitar y fusionar

líquidos. Se consiguió levitar un par de gotas generando dos acoustic potential wells mediante el control de la fase de los transductores. Basándose en la estimación del potencial, se aclaró que la forma del potencial cambiaba de una forma doble a una única forma grande al disminuir la distancia entre los dos puntos focales, y las gotas levitadas se movían entonces hacia el centro y finalmente se fusionaban. Se considera que las condiciones en las que las gotas se unen pueden predecirse mediante el potencial de Gor'kov. En este sistema, el valor de la fase se calculó basándose en la disposición geométrica y la velocidad del sonido. En la ciencia se esperan más innovaciones, como la manipulación tridimensional, dotando a las gotas de un momento angular, y el ajuste de la fuerza de retención y la fuerza motriz, así como insertar y retirar las muestras del levitador, más adelante se mencionará como realizó este proceso Andrade, Camargo y Marzo en 2018. (Andrade et al., 2018; Watanabe et al., 2018)

Omirou, Marzo, Ann Seah y Subramanian en 2015 crearon un sistema modular para levitar objetos a través de trayectorias 3D llamado LeviPath. Dicho sistema consta de dos matrices opuestas de transductores que generan una onda estacionaria capaz de suspender objetos en el aire. Para controlar la onda estacionaria, el sistema emplea un novedoso algoritmo basado en la combinación de patrones básicos de movimiento. Este enfoque permite controlar varios transductores simultáneamente a lo largo de diferentes trayectorias en 3D. Gracias a los patrones y al uso de sólo dos matrices opuestas, el sistema es modular y puede escalar su espacio de interacción uniendo varios LeviPaths. (Omirou et al., 2015)

Andrade, Camargo y Marzo en 2018 presentaron un sistema de levitación de inyección automática sin contacto, este sistema realiza transporte, fusión y expulsión de gotas con un punto acústico multifocal, este sistema consiste en un arreglo de fases de 16x16 transductores de 9.8 mm de diámetro que funciona a 40 kHz sobre un reflector plano con una distancia de 110 mm. Esta distancia se seleccionó enfocando el arreglo sin el reflector en diferentes posiciones y así poder determinar en qué punto se obtiene la máxima amplitud de presión acústica. Esta distancia sigue siendo óptima cuando se incluye el reflector, ya que éste sólo actúa como espejo o reflector. La fase de emisión de cada transductor está controlada por un ordenador, que se comunica con la FPGA a través de

comunicación serie. La FPGA utilizada fue una Altera Cyclone IV-EP4CE6 para generar las señales de control. Los registros de desplazamiento de 1 a 8 en serie a paralelo multiplexan 32 entradas y salidas de la FPGA en 256 canales digitales independientes. Los controladores Mosfet MIC 4127 de Microchip amplifican las señales hasta 20 Vpp de ondas cuadradas, que se introducen en los transductores. El control de las señales genera desfases con resolución de $\pi/16$ rad. Para controlar independientemente la posición de levitación de dos gotas de líquido, los transductores se dividen en dos conjuntos, formando un patrón de ajedrez, cada conjunto de transductores generando un enfoque diferente. Al fijar el punto de enfoque en la superficie del reflector, la superposición de las ondas incidente y reflejada forma una onda estacionaria. La onda estacionaria tiene una serie de nodos de presión en los que las gotas de líquido pueden quedar atrapadas y desplazarse en dos dimensiones por encima de la superficie si la onda estacionaria se traslada. Los nodos que se emplean para levitar son los más bajos y están a 2,5 mm por encima del reflector. El sistema de levitación acústica es adecuado para levitar y manipular gotas de líquidos con diámetros que van de micrómetros a milímetros. (Andrade et al., 2018)

Beasley, Gatusch, Connolly-Taylor, Teng, Marzo y Nuñez-Yañez en 2019 presentaron una plataforma flexible y autónoma para la investigación de la levitación acústica. Esta plataforma permite conocer sus capacidades y limitaciones del sistema de levitación acústica para poder encontrar una mayor estabilidad para el sistema. Esta plataforma está basada en el SoC Xilinx Zynq que utiliza una matriz de emisores ultrasónicos. La plataforma emplea una ZedBoard de bajo costo y proporciona un movimiento rápido de los objetos levitados, así como la detección de objetos basada en el eco producido. El dispositivo Zynq posee distintas características que son benéficas para esta plataforma: aceleración por hardware para los cálculos de fase, gran número de E/S paralelas conectadas a través del conector FPGA Mezzanine (FMC), ADC integrados para capturar las señales de eco y facilidad de programación gracias a un flujo de diseño basado en C tanto para la PC como para la FPGA. (Beasley et al., 2019)

2.1.1 Aplicaciones

La levitación acústica ofrece control de la materia sin tener contacto con ella, de manera precisa y versátil, dicha materia no requiere características específicas. Potencialmente esto resulta útil para estudiar propiedades físicas, químicas o bioquímicas de la materia. Por medio de la levitación acústica se puede realizar un análisis, conocer reacciones químicas o bioquímicas cuando no se transporta la materia en un contenedor, entre otros.

En biología se puede utilizar cuando se cuenta con un número limitado de células ya que un levitador acústico es útil para el manejo sin contacto y de esta manera se generan pérdidas mínimas o casi nulas, un ejemplo de esto puede ser la transfección de material genético externo en el ADN. La química también se beneficia de este sistema pudiendo crear nuevos tipos de aleaciones ya que algunas de estas reacciones químicas implican cambios de fase como la encapsulación sólido-líquido. La electrónica también se puede beneficiar de esto cuando se quiere desplazar elementos muy pequeños, pudiendo hacerlo de manera más fácil y precisa. (Zang, 2020)

Se han realizado experimentos en química utilizando levitadores acústicos de un eje, en los que se genera una onda acústica estacionaria en una cavidad del levitador. Cuando se trabaja con un levitador acústico de un eje que opera a la frecuencia de ultrasonidos de 20-40 kHz, se puede lograr insertar gotas con un volumen de 0,5-6 μl . Esto permite el transporte de muestras sin contaminación de los contenedores y pérdidas por absorción/reacción con las paredes del contenedor. Cuando se combina con herramientas espectroscópicas, las muestras pueden estudiarse sin señales parásitas procedentes de la absorción y dispersión de la luz por los contenedores. Al utilizar la levitación acústica para el análisis de reacciones químicas, el desencadenamiento de las reacciones químicas puede realizarse fácilmente mediante la dosificación de los reactivos en la solución de las gotas levitadas. Uno de los primeros experimentos de este tipo fue realizado por Rohling combinando un levitador acústico de un eje con microbombas piezoeléctricas para la determinación de analitos en las gotas levitadas. Con el uso de las microbombas, se añadieron soluciones de reactivos y

disolventes con un volumen de 0,25- 1,5 nl a una gota levitada con un volumen inferior a 5,6 μ l. (Zang, 2020)

2.2 Transductores en levitación acústica

Un sensor ultrasónico es un transductor piezoeléctrico con la capacidad de convertir una señal eléctrica en vibraciones mecánicas, y las vibraciones mecánicas en una señal eléctrica. En resumen, el sensor ultrasónico es un dispositivo que funciona como altavoz y micrófono en una misma frecuencia. Los sensores ultrasónicos permiten la detección eficaz de posiciones, así como medir la distancia de un objeto sin la necesidad de tener contacto físico, esto es posible mediante la emisión y recepción de ondas de sonido ultrasónicas. Los transductores pueden llegar a ser comparados con otros dispositivos, tales como los sensores infrarrojos los cuales pueden utilizarse para la detección de obstáculos debido a su alta resolución, bajo costo y tiempos rápidos de respuesta. (Toa & Whitehead, 2019)

Los sensores ultrasónicos utilizados en este proyecto, a los que nos referimos simplemente como transductores, son desarrollados por Manorshi, una empresa dedicada a la fabricación de componentes acústicos. Los transductores utilizados son los MSO-A1040H07T que se muestran en la figura 2.3.



Figura 2.3. Transductor MSO-A1040H07T.

Estos transductores miden 10 mm de diámetro y 7 mm de alto. Trabajan a 40 kHz y se pueden alimentar con máximo 40 Vpp. En la tabla 2.1 se muestran algunas especificaciones de estos transductores.

Tabla 2.1. Especificaciones de los transductores MSO-A1040H07T.

Especificación	Valor
Frecuencia de operación	40±1 kHz
Directividad	80° ±15°
Voltaje máximo de entrada	40 Vpp
Material de la cubierta	Aluminio
Temperatura de operación	-20~+80°C

2.3 Control de fase en arreglos de transductores

La tecnología del control de fase de un arreglo de transductores posee una característica distintiva que le permite excitar de manera electrónica elementos individuales como los transductores. Cuando se genera un haz en fase mediante una interferencia constructiva, los elementos activos de un arreglo de transductores son activados a tiempos ligeramente diferentes ya que la señal se emite a un tiempo distinto, de esta misma manera la señal emitida se refleja a un tiempo distinto cuando toca el reflector, las señales recibidas por cada elemento activo del arreglo son retrasadas en tiempo, antes de ser sumadas. El resultado de esta suma es una interferencia totalmente constructiva. (Llogsa, s/f)

La fase de emisión de cada transductor está controlada por un ordenador, que se comunica con la placa de controladores (FPGA) mediante una comunicación en serie. La FPGA es un dispositivo lógico programable que contiene bloques de cuya interconexión y funcionalidad puede ser configurada de forma paralela, mediante un lenguaje de descripción especializado (VHDL), para generar las señales de control. (Andrade et al., 2018)

2.4 FPGA Cyclone IV

La nueva familia de dispositivos FPGA Cyclone IV de Altera amplía el liderazgo de la serie FPGA Cyclone en el suministro de las FPGA de menor costo y consumo del mercado, ahora con una variante de transceptor. Los dispositivos Cyclone IV están dirigidos a aplicaciones de gran volumen y sensibles a los costos, lo que permite a los diseñadores de sistemas satisfacer los crecientes requisitos de ancho de

banda al tiempo que se reducen los costos. (INTEL, 2009) Está construida sobre un proceso optimizado de bajo consumo, la familia de dispositivos Cyclone IV ofrece las dos variantes siguientes:

- Cyclone IV E-bajo consumo, alta funcionalidad con el menor costo.
- Cyclone IV GX-bajo consumo y costo de FPGAs con transceptores de 3.125 Gbps

Los dispositivos Cyclone IV E se ofrecen con un voltaje de núcleo de 1,0 V y 1,2 V.

Al ofrecer un ahorro de energía y de costos sin sacrificar el rendimiento, junto con una opción de transceptor integrado de bajo costo, los dispositivos Cyclone IV son ideales para aplicaciones de bajo costo y de formato reducido en los sectores inalámbrico, de cable, de difusión, industrial, de consumo y de comunicaciones. (INTEL, 2009)

2.5 Módulo UART.

UART significa transmisor-receptor asíncrono universal y define un protocolo o un conjunto de reglas, para intercambiar datos en serie entre dos dispositivos. El UART es muy simple y solo utiliza dos cables entre el transmisor y receptor para transmitir y recibir en ambas direcciones. La comunicación en el UART en este caso fue simplex debido a que los datos se envían en una sola dirección y la conexión se realizó como se muestra en la figura 2.4.

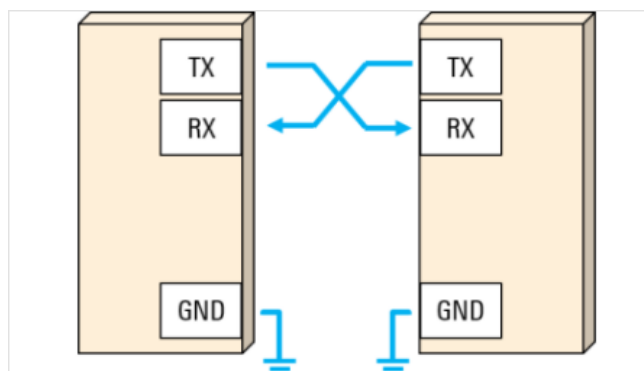


Figura 2.4. Transmisión de datos en un módulo UART.

Los datos en el UART se transmiten en la forma de tramas. Las tramas UART contienen bits de inicio y parada, bits de datos y un bit de paridad opcional. El formato de una trama se puede observar en la figura 2.5.

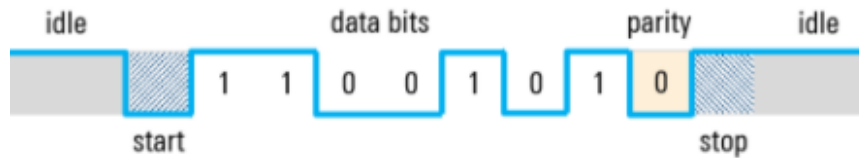


Figura 2.5. Formato de trama UART.

Bits de inicio y de parada

Ya que el UART es asíncrono, el transmisor necesita indicar que los bits de datos están llegando. Esto se logra utilizando el bit de inicio. El bit de inicio es una transición del estado alto o de reposo a un estado bajo, y seguido inmediatamente por bits de datos de usuario. Después de que se terminan los bits de datos, el bit de parada indica el fin de datos de usuario. El bit de parada es una transición de regreso al estado alto o de reposo o permanece en el estado alto por un tiempo de bit adicional.

Bits de datos.

Los bits de datos son los datos de usuario o bits útiles y vienen inmediatamente después del bit de inicio. Puede haber de 5 a 9 bits de datos de usuario, aunque de 7 o 8 bits es lo más común. Estos bits de datos normalmente se transmiten primero con el bit menos importante.

Bit de paridad.

Una trama UART puede también contener un bit de paridad opcional que puede usarse para la detección de errores. Este bit se inserta entre el final de los bits de datos y el bit de parada. El valor del bit de paridad depende del tipo de paridad que está siendo usado (par o impar):

En la paridad par, este bit se configura para que el total de números 1 en la trama será par.

En la paridad impar, este bit se configura para que el total de números 1 en la trama será impar.

Sincronización del UART.

Una de las grandes ventajas del UART es que es asíncrono: el transmisor y el receptor no comparten una señal de reloj común. Aunque esto simplifica el

protocolo, pone ciertos requisitos al transmisor y al receptor. Dado que no comparten un reloj, ambos terminales deben transmitir a la misma velocidad preestablecida para que tengan la misma sincronización de bits. Las velocidades de baudios del UART más comunes que se utilizan en estos días son 4800 bps, 9600 bps, 19.2K bps, 57.6K bps y 115.2K bps. Además de tener la misma velocidad en baudios, ambos lados de una conexión UART también deben utilizar los mismos parámetros y estructura de trama. (Rohde & Schwarz, s/f)

Capítulo III. Implementación del sistema de levitación

Este capítulo presenta el procedimiento para la construcción de un sistema de levitación acústica uniaxial de fase variable.

La arquitectura física del sistema representa la adecuación de todos los componentes físicos que intervienen en el sistema de levitación para su correcto funcionamiento. La arquitectura física del sistema se muestra en la figura 3.1.

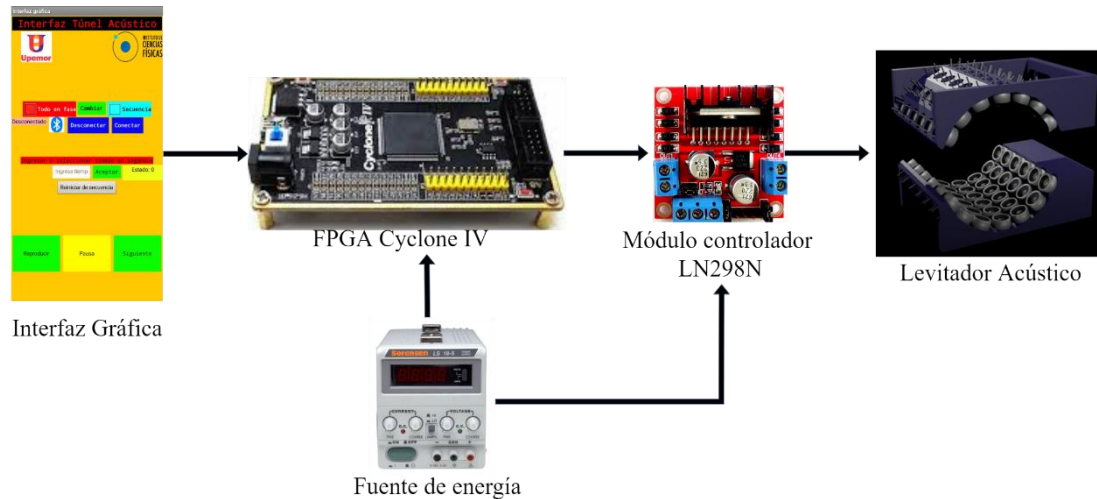


Figura 3.1. Arquitectura física del sistema de levitación acústica.

Dentro de estos bloques de la arquitectura física, se encuentra el desarrollo que incluye la programación para la FPGA que controla la fase de una señal de 40 kHz para los transductores, el módulo LN298N o puente “H” que con la señal proveniente de la FPGA genera una señal push-pull para los transductores, con una interfaz de usuario se controla el sistema permitiendo un manejo sencillo, se utiliza una fuente de energía que alimenta la FPGA y el módulo LN298N. En resumen, este sistema funciona mediante una secuencia de señales desfasadas que son generados por la FPGA permitiendo que un objeto se desplace dentro de un levitador acústico sobre el eje del mismo, la interfaz permite iniciar dicha secuencia de manera automática y manual, pausarla, reiniciarla o poner todo el sistema en la misma fase. Esto se explica más detalladamente a continuación.

3.1 Construcción del levitador acústico.

El sistema de levitación está formado por dos arreglos de transductores que operan a la misma frecuencia y están colocados en dos superficies cilíndricas que forman una cavidad concéntrica donde su separación, conocida como longitud de

cavidad es igual a dos veces el radio de curvatura del cilindro. Este sistema consta de 84 transductores (Manorshi, MSO-A1040H07T) de 10 mm de diámetro que trabajan a 40 kHz, distribuidos en dos arreglos simétricos de 6x7 dispuestos en una geometría cilíndrica como se muestra en la figura 3.2.

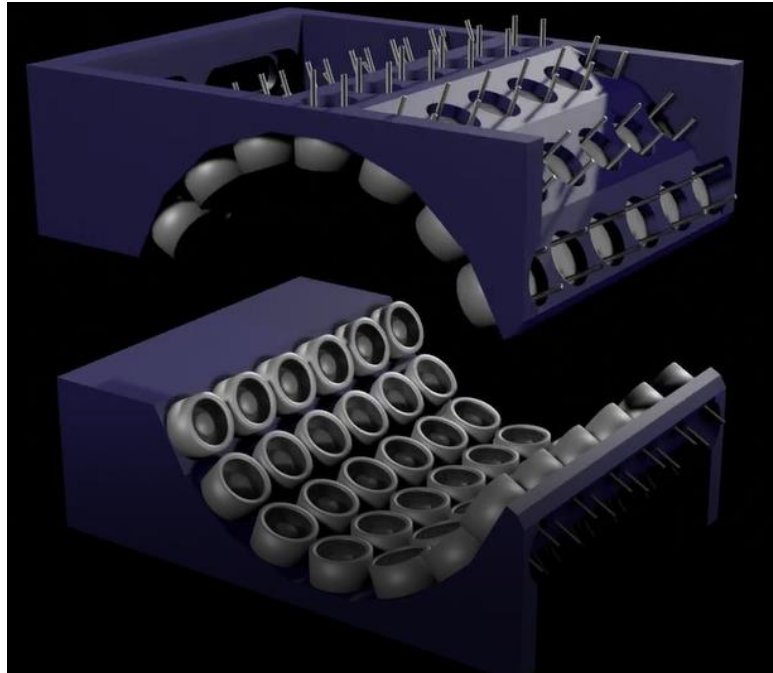


Figura 3.2. Arreglos de transductores dispuestos una geometría cilíndrica

El sistema de levitación forma una cavidad cilíndrica, por lo que resulta conveniente expresar un sistema de referencia en coordenadas cilíndricas que ayude a describir fácilmente el sistema de levitación. Este sistema de referencia se muestra en la figura 3.3 (a), donde r corresponde al radio, θ al ángulo y z a la longitud del cilindro.

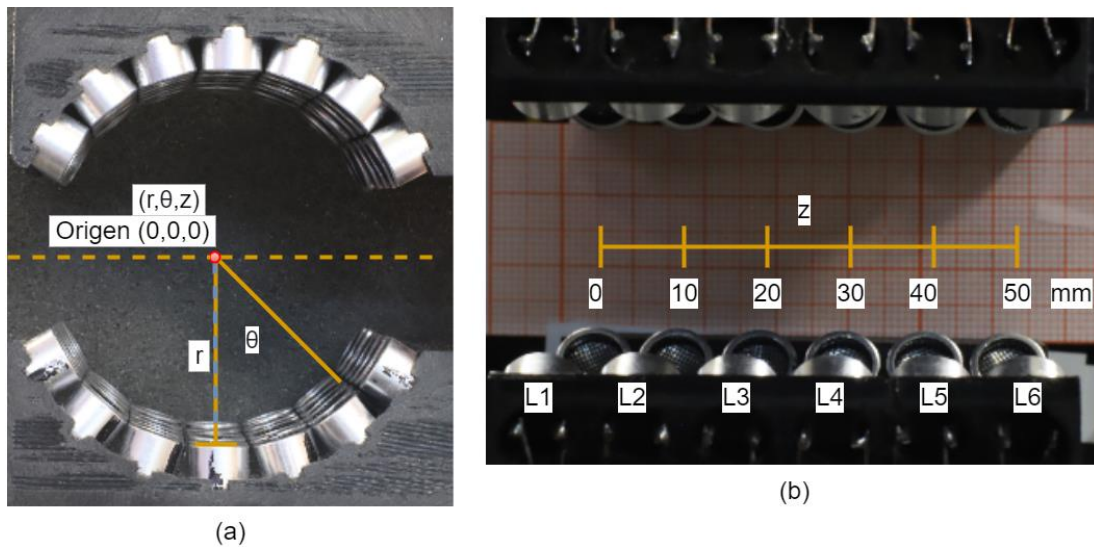


Figura 3.3. Sistema de referencia del levitador acústico en coordenadas cilíndricas. (a) Coordenadas (r, θ, z) vistas de manera transversal mostrando el punto de origen del sistema. (b) Vista longitudinal del sistema de levitación que muestra las posiciones en z .

La superficie cilíndrica donde se colocan los transductores tiene un radio de curvatura de 30 mm y una longitud del cilindro de 50 mm.

La figura 3.3 (b) ilustra el sistema de levitación desde una vista longitudinal identificando las posiciones de los transductores en el eje z . A todos los transductores que se ubican en un mismo plano z se les llamará líneas, teniendo un total de 6 líneas de transductores como se muestra en la figura 3.3 (b).

Para construir el sistema de levitación acústica se sigue un procedimiento que consta de seleccionar y soldar los transductores colocados en bases cilíndricas, para posteriormente montar los arreglos y así formar una cavidad que conforma el sistema de levitación.

Para seleccionar los transductores se realiza una prueba que ayuda a medir su polaridad, amplitud y desfase en la señal de emisión/recepción con respecto a una señal de referencia. Para esta prueba de transductores se genera una señal senoidal de referencia a una frecuencia de 40 kHz y amplitud de 3 Vpp utilizando un generador de señales (RIGOL, DG1022A) y se conecta a un canal del osciloscopio (TELEDYNE, T3DSO1104) para monitorearla como referencia. La señal de referencia también se conecta a un transductor que se utiliza como emisor. Los transductores que se van a probar se colocan como receptores. La

figura 3.4 muestra la manera en que quedan colocados los transductores para realizar dicha prueba.

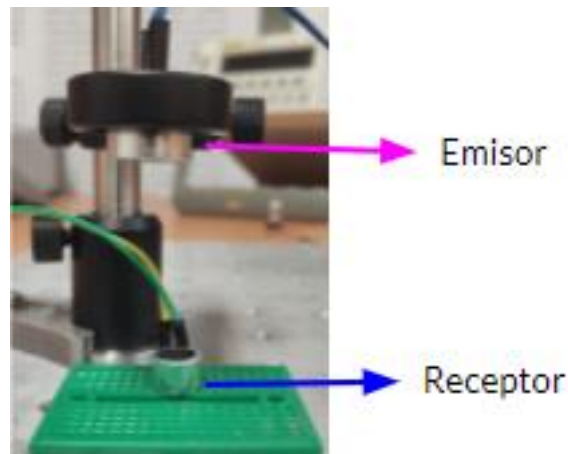


Figura 3.4. Transductores colocados para prueba siendo el receptor el transductor a prueba.

La salida del transductor que trabaja como receptor será conectada a otro canal del osciloscopio para visualizar la señal y determinar si es seleccionable, comparándola con la señal de referencia antes descrita. En la figura 3.5 se muestran dos señales, la señal de color morado corresponde a la señal de referencia y la señal de color azul a la salida del transductor que se está probando. Si ambas señales se encuentran en fase como en la figura 3.5 se puede decir que la polaridad del transductor es correcta de acuerdo a las conexiones que se hayan realizado con respecto al pin negativo y positivo, posteriormente se marca el pin positivo del transductor como un indicador de polaridad. Si la señal de salida se muestra desfasada 180° con respecto a la señal de referencia quiere decir que la polaridad del transductor está invertida, por lo que en este caso se marca como positivo el pin que está conectado al negativo de la señal. Estas pruebas deben ser realizadas en las mismas condiciones para todos los transductores, es decir, se debe tener la misma distancia entre el emisor y el receptor, así como la alineación. La marca en el pin positivo sirve de referencia para soldar todos los transductores con la misma polaridad y asegurar que ninguno genere interferencia destructiva al emitir una señal desfasada.

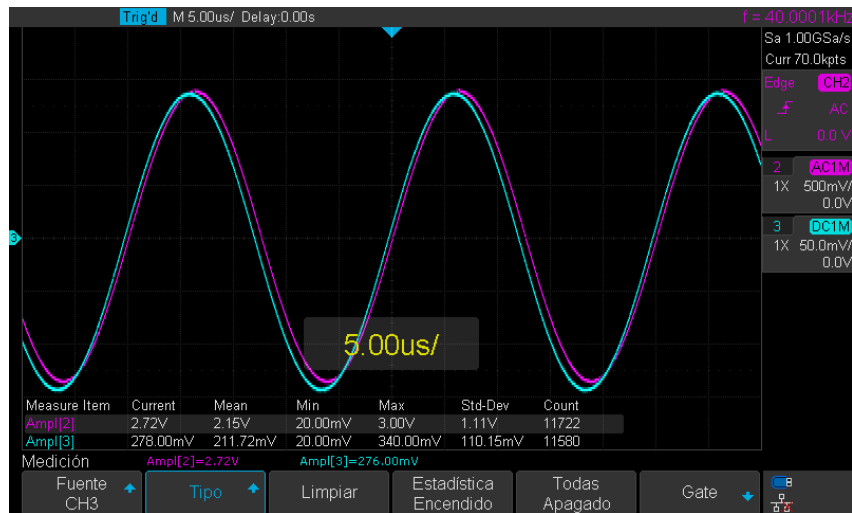


Figura 3.5. Señal de salida y señal de referencia vistas en el osciloscopio.

Para analizar la amplitud y la fase se hace una comparación similar a lo que se realizó para la polaridad. Para revisar la amplitud se compara la señal de referencia con la señal de salida del receptor. Cuando la señal de referencia tiene una amplitud de 3Vpp, se seleccionan transductores con una señal de salida de 300 mVpp a 350 mVpp. La amplitud en la señal del receptor se ve atenuada debido a que el emisor no propaga la señal en una sola dirección, el receptor se puede decir que trabaja como un sensor, por lo que solo captará una parte de la señal emitida. Para medir el desfase se vuelven a comparar ambas señales y se seleccionan los transductores que tienen un desfase no mayor de 10° aproximadamente con respecto a la señal de referencia. El realizar esta prueba permite seleccionar transductores que operan de manera similar, esto ayuda a que el sistema de levitación acústica tenga un desempeño óptimo.

La superficie cilíndrica de los arreglos en el sistema de levitación forma una cavidad cilíndrica, que nos permite desplazar un objeto o muestra a lo largo del eje z del cilindro. Una superficie cilíndrica permite tener un enfoque geométrico que concentra la energía sin verse afectada por la directividad de los transductores. Las superficies cilíndricas se diseñan y fabrican en impresión 3D por personal del ICF. El diseño terminado de la superficie cilíndrica para los arreglos se muestra en la figura 3.6.

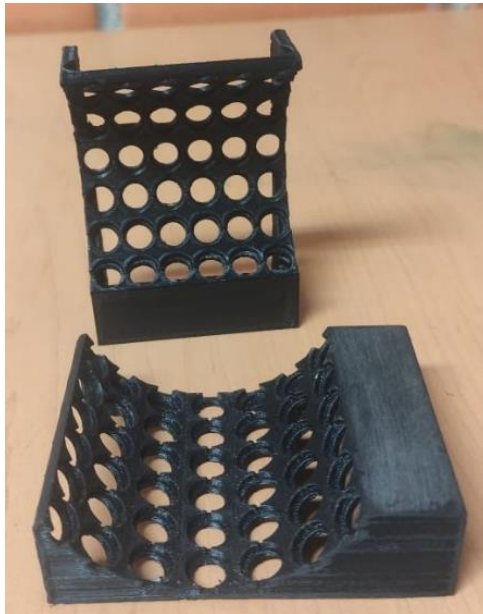


Figura 3.6. Superficies cilíndricas para los arreglos de transductores en impresión 3D.

Antes de fijar los transductores en las superficies, éstas se deben lijar para quitar cualquier imperfección de la impresión, por ejemplo, rebabas del material. En la figura 3.7 (a) y 3.7 (b) se muestran los transductores ya colocados sobre las superficies cilíndricas para posteriormente soldar de forma paralela los transductores de cada línea como se ilustra en la figura 3.7 (a).

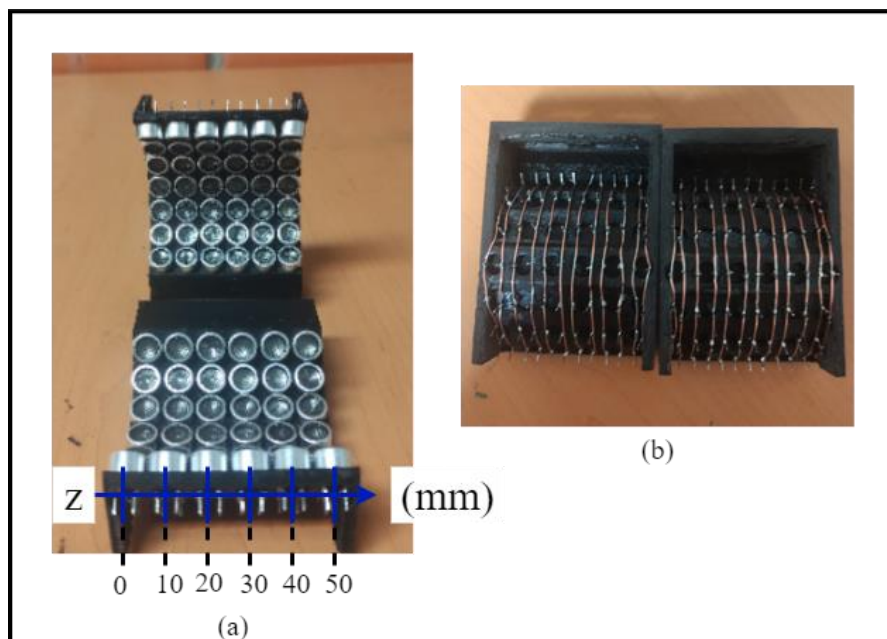


Figura 3.7. Transductores soldados en las superficies cilíndricas. (a) Referencia de los transductores soldados en conexión paralela. (b) Soldadura de los transductores vista desde la parte de los pines.

Para soldar los transductores se utiliza alambre esmaltado sin aislamiento calibre 24 de 0.5 mm de diámetro que al no tener aislante ocupa menos espacio, y al ser esmaltado se protege de daños que pudiera recibir por el contacto o rozamiento con objetos externos, otra característica relevante por la que se elige este alambre es porque puede conducir una corriente máxima de 1.5 A, suficiente para el consumo aproximado de 494 mA del sistema. Los transductores ya soldados con este alambre se muestran en la figura 3.7 (b).

Con cable AWG calibre 20 que soporta corriente de hasta 1.6 A se sueldan ambos arreglos para que tengan continuidad una línea completa de transductores, y se colocan los cables con los que se alimentará el levitador, tal y como se muestra en la figura 3.8.

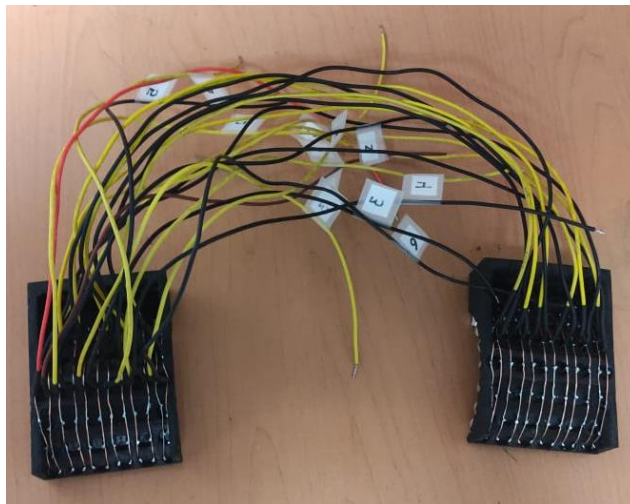


Figura 3.8. Conexión con cable entre arreglos.

Posteriormente se ensambla el sistema de levitación al colocar los arreglos en una geometría concéntrica como se muestra en la figura 3.9.

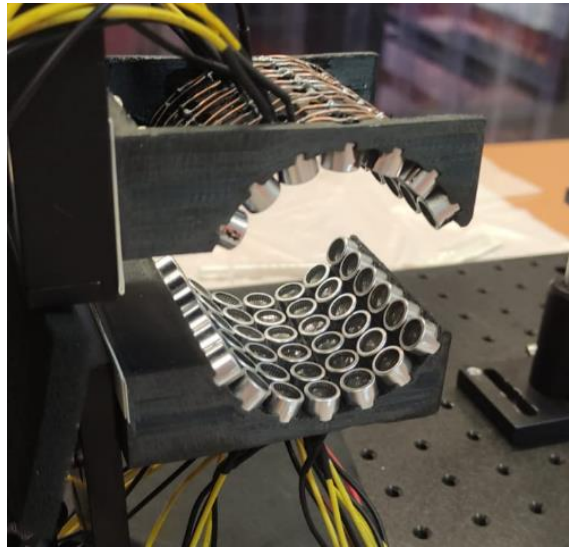


Figura 3.9. sistema de levitación armado y montado.

Para lograr la geometría concéntrica el sistema debe ser alineado en sus 5 grados de libertad, es decir, en sus dos direcciones angulares y en los 3 ejes coordenados cartesianos como se ilustra en las figuras 3.10 y 3.12 respectivamente.

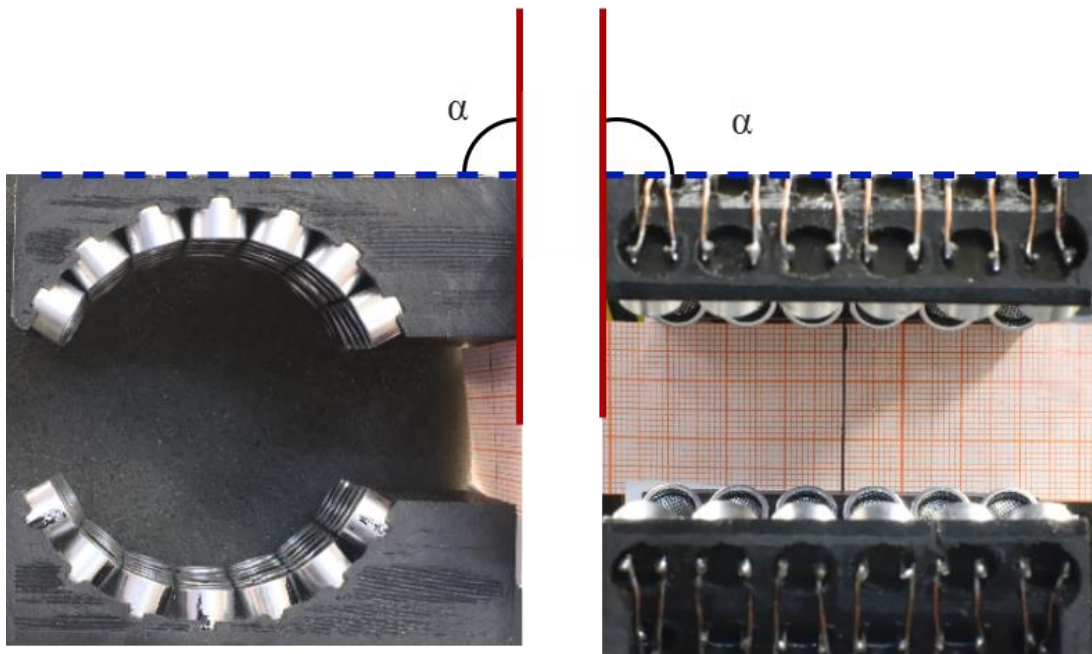


Figura 3.10. Movimiento angular del levitador desde una vista transversal y longitudinal.

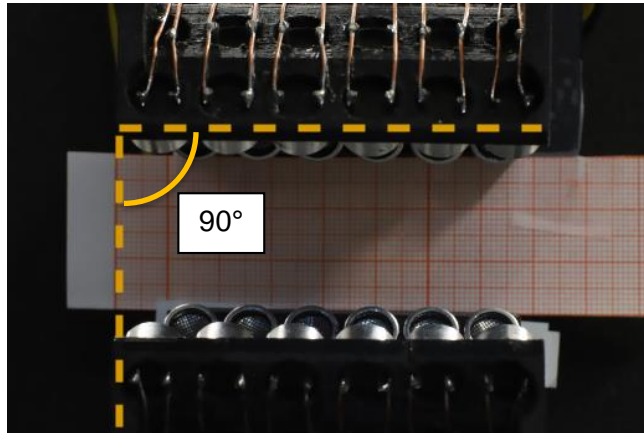


Figura 3.11. Movimiento lineal del levitador.

Para verificar la alineación angular se utiliza un nivel de burbuja que permite saber si el sistema está desalineado. Para la alineación lineal se utiliza una escuadra que permite generar un ángulo de 90° con respecto a la placa donde se montó el levitador, para esto es importante haber retirado las imperfecciones de las superficies cilíndricas impresas en 3D.

3.2 Programación del control de señales.

Para generar las señales de los transductores de 40 kHz, se utiliza una FPGA Cyclone IV EP4CE6E22C8N programada en lenguaje VHDL utilizando el software Quartus II 13.0sp1 web edition que es el recomendado por el fabricante. Se elige esta FPGA ya que permite hasta 144 salidas digitales, y al trabajar con circuitos digitales permite ejecutar distintos bloques de programación en paralelo a una velocidad de 50 MHz. El programa comienza generando un divisor de frecuencia, esto debido a que el reloj interno de la FPGA trabaja a 50 MHz y los transductores trabajan con una señal de 40 kHz. Para generar este divisor de frecuencia se debe saber cuántos tics o pulsos de 50MHz hay que tener para obtener una señal de 40 kHz, esto se obtiene mediante la siguiente relación:

$$\frac{\text{Frecuencia del reloj interno}}{\text{Frecuencia deseada}} = \frac{50 \text{ MHz}}{40 \text{ KHz}} = 1250 \text{ tics}$$

Para programar estas señales se utiliza una estructura de selección *if* cuya función es realizar o no una determinada acción basándose en el resultado de la evaluación de una expresión. La estructura de selección *if* se ejecuta de la siguiente manera: si la evaluación de la expresión es verdadera entonces se

ejecuta la sentencia o acción. De esta manera se realiza la programación para generar el divisor de frecuencia comenzando con un contador que llegue hasta 1250, este contador se irá incrementando cada que se detecte un pulso positivo del reloj interno, en la figura 3.12 se muestra como se realiza la programación de este divisor.

```
if(rising_edge(clk)) then
    if(contador>1249) then
        contador<=0;
    else
        contador<=contador+1;
    end if;
end if;
```

Figura 3.12. Divisor de frecuencia a 40 kHz

La onda generada con este divisor de frecuencia debe tener la mitad de su ciclo de trabajo en estado alto o positivo y la otra mitad en estado bajo o negativo. Para esto se genera una estructura de selección donde clk40KHz es la salida positiva y nclk40KHz la salida negativa correspondiente a la señal push-pull de 40 kHz como se ve en la figura 3.13. Esta estructura de selección manda un estado alto y uno bajo a la mitad del conteo (625) en las salidas antes mencionadas, generando la señal push-pull de 40 kHz requerida para los transductores.

```
if(contador<624) then
    clk40KHz<='1';
    nclk40KHz<='0';
else
    clk40KHz<='0';
    nclk40KHz<='1';
end if;
```

Figura 3.13. Generador de señal push-pull de 40 kHz.

Nótese que el contador llega hasta 1249 y la condición para la estructura de selección hasta 624 debido a que en circuitos digitales los contadores comienzan a contar a partir de 0.

Para poder comprobar que la señal se generó correctamente, se conectan las salidas de la FPGA a un canal del osciloscopio y se observa el comportamiento de la señal, el resultado se puede observar en la figura 3.14 donde se nota que la frecuencia es de 39.96 kHz cercana a los 40 kHz deseados. La amplitud obtenida es de 6.64 Vpp esto debido a que en cada salida hay 3.3 Vp, y al generar la señal

push-pull se obtiene la amplitud mencionada ya que la onda se genera de -3.3 Vp a 3.3 Vp .

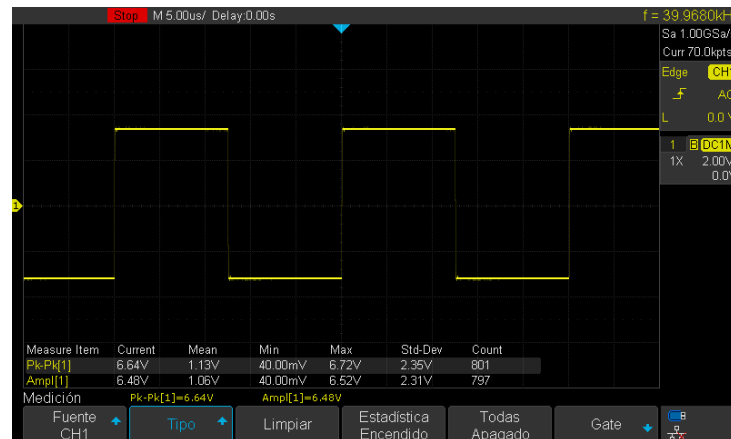


Figura 3.14. Señal push-pull de 40 kHz.

En las tablas 3.1 y 3.2 se muestran los desfases que fueron calculados para este sistema de levitación, estos cálculos fueron proporcionados por el asesor externo de este trabajo. Estos desfases están expresados en grados.

Tabla 3.1. Desfases calculados para desplazar objetos hasta la mitad del levitador, las celdas amarillas representan los transductores encendidos y dentro de la misma se encuentra el desfase.

Estado	A (z=0)	B (z=10)	C (z=20)	D (z=30)	E (z=40)	F (z=50)
0	0	270	90			
1	0	288	108			
2	0	306	162			
3	0	324	162			
4	0	342	198			
5	0	342	216			
6	0	0	252			
7	0	0	270			
8	0	0	306			
9	324	0	288			
10	288	0	288			
11	288	0	324			
12	306	0	0			
13	270	0	0			
14	252	0	0			
15	234	0	0	234		
16	234	0	0	270		
17	198	324	0	270		
18	180	306	0	288		
19	144	288	0	288		
20	144	288	0	288	144	
21	126	288	0	324	162	
22	108	270	0	324	180	
23	72	252	0	324	198	
24	0	252	0	324	234	
25		234	0	0	234	

Tabla 3.2. Desfases calculados para desplazar objetos para la segunda mitad del levitador, las celdas amarillas representan los transductores encendidos y dentro de la misma se encuentra el desfase.

Estado	A (z=0)	B (z=10)	C (z=20)	D (z=30)	E (z=40)	F (z=50)
26		234	324	0	252	0
27		198	324	0	252	72
28		180	324	0	270	108
29		162	324	0	288	126
30		144	288	0	288	144
31			288	0	288	144
32			288	0	306	180
33			270	0	324	198
34			270	0	0	234
35			234	0	0	234
36				0	0	252
37				0	0	270
38				0	0	306
39				324	0	288
40				288	0	288
41				288	0	324
42				306	0	0
43				270	0	0
44				252	0	0
45				216	342	0
46				198	342	0
47				162	324	0
48				162	306	0
49				108	288	0
50				90	270	0

Los desfases calculados que se muestran se programan en VHDL. Se generan con una resolución de 18° . Para generar desfases de 18° o de $\frac{\pi}{10}$ rad primero se debe saber a cuantos tics equivale un desfase de 18° . Se sabe que una señal de 40 kHz necesita 1250 tics lo que es equivalente a 2π rad o 360° , por lo tanto, para saber a cuantos tics equivale 18° se realiza la siguiente conversión:

$$\frac{\pi}{10} * \frac{1250 \text{ tics}}{2\pi} = \frac{1250 \text{ tics}}{20} \approx 62 \text{ tics} = 18^\circ$$

Con esto se obtiene que se necesitan aproximadamente 62 tics para poder generar un desfase de 18° . Para programar estos desfases se utiliza nuevamente una estructura de selección IF,

En la figura 3.15 se muestran como ejemplo los tres primeros desfases, de 18° , 36° y 54° . La variable "contador" corresponde al contador generado para la señal de 40 kHz, la constante "desfase" es el número de tics para un desfase de 18° (62 tics), "mc" también corresponde a una constante que se refiere al número de tics que hay en medio ciclo de la señal de 40 kHz (625 tics). Esta estructura de selección simple dice en la primera evaluación que la señal se comenzará a generar después de que el contador supere los 62 tics, y que la señal se seguirá

generando hasta que en la segunda evaluación supere los 625 tics correspondientes al medio ciclo de la onda sumando los 62 tics desfasados del inicio, para así tener un ciclo completo de la onda. Para los desfases posteriores se multiplica la constante “desfase” por el número consecutivo, es decir, $\text{desfase} \cdot (n+1)$.

```

if(contador>desfase and contador<mc+desfase) then ---18°
    clk18<='1';
    nclk18<='0';
else
    clk18<='0';
    nclk18<='1';
end if;

-----
if(contador>desfase*2 and contador<desfase*2+mc) then ---36°
    clk36<='1';
    nclk36<='0';
else
    clk36<='0';
    nclk36<='1';
end if;

-----
if(contador>desfase*3 and contador<desfase*3+mc) then ---54°
    clk54<='1';
    nclk54<='0';
else
    clk54<='0';
    nclk54<='1';
end if;

-----

```

Figura 3.15. Programación de desfases de 18°.

A partir del desfase de 198° en la segunda evaluación del *if* el contador de 1250 se supera, es decir, que $\text{desfase} \cdot 10 + \text{mc}$ es mayor que 1250 por lo tanto no se tiene una onda completa. Para solucionarlo se modifica la segunda evaluación cambiando el “AND” por un “OR” como se muestra en la figura 3.16, ya que con esto el *if* realizará la acción cuando solo se cumpla una de las dos evaluaciones, mientras que con el “AND” se tienen que cumplir ambas evaluaciones para que se pueda ejecutar la acción. Utilizando un “OR” se tiene la señal con un ciclo de trabajo completo.

```

-----
if(contador>desfase*10 and contador<desfase*10+mc) then ---180°
  clk180<='1';
  nclk180<='0';
else
  clk180<='0';
  nclk180<='1';
end if;
-----
if(contador>desfase*11 or contador<desfase*11-mc) then ---198°
  clk198<='1';
  nclk198<='0';
else
  clk198<='0';
  nclk198<='1';
end if;
-----
if(contador>desfase*12 or contador<desfase*12-mc) then ---216°
  clk216<='1';
  nclk216<='0';
else
  clk216<='0';
  nclk216<='1';
end if;
-----

```

Figura 3.16. Programación de desfases de 18° cuando el contador se supera.

Máquina de estados

En la figura 3.17 se muestra la manera en que se estructura la máquina de estados en VHDL que permite ir asignando los desfases a cada una de las salidas. Cada estado es un conjunto de desfases que han sido calculados previamente y se asignan a cada línea de transductores del levitador. En las tablas 3.1 y 3.2 se muestran los desfases calculados, cada fila de las tablas corresponde a un estado, en total se tienen 51 ya que se cuenta con un estado central.

```

PROCESS (presente,reset)
BEGIN
  IF (reset='0') THEN

    SiguienteEstado <= s0;

  ELSE
    CASE presente IS
      WHEN Estado0 =>
        A<=clk40khz;
        B<=clk270;
        C<=clk90;
        D<='0';
        E<='0';
        F<='0';

        An<=nclk40khz;
        Bn<=nclk270;
        Cn<=nclk90;
        Dn<='0';
        En<='0';
        Fn<='0';
        SiguienteEstado<=Estado1;

```

Figura 3.17. Máquina de estados para poder asignar los desfases a cada salida.

A continuación, en la figura 3.18 se muestra como fueron asignados los pines en la FPGA. Clock y reset son entradas que corresponden al reloj interno y a un botón de reinicio respectivamente. Los pines de salida de A-An hasta F-Fn poseen la

señal digital push-pull de 40 kHz que serán las destinadas a las líneas de transductores que se muestran en la figura 3.7 (b). Los pines A-An corresponden a la línea 1, B-Bn a la línea 2, C-Cn a la línea 3, D-Dn a la línea 4, E-En a la línea 5 y F-Fn a la línea 6.

out	A	Output	PIN_31
out	An	Output	PIN_51
out	B	Output	PIN_33
out	Bn	Output	PIN_53
out	C	Output	PIN_38
in	clock	Input	PIN_23
out	Cn	Output	PIN_55
out	D	Output	PIN_42
out	Dn	Output	PIN_59
out	E	Output	PIN_44
out	En	Output	PIN_66
out	F	Output	PIN_49
out	Fn	Output	PIN_68
in	reset	Input	PIN_88

Figura 3.18. Asignación de pines en la FPGA.

3.3 Control de señales para duplicar la amplitud de entrada.

En esta sección se muestra como son conectados los circuitos de control, para poder duplicar las señales de entrada hasta 30 Vpp. Para esto se utiliza el circuito integrado LN298N mostrado en la figura 3.19. Este circuito integrado es un controlador de alto voltaje y alta corriente diseñado para aceptar niveles lógicos de TTL. Este controlador fue seleccionado debido a que tiene alta inmunidad al ruido y posee dos puentes H completos que permite controlar dos salidas, por lo que para controlar las 6 líneas se necesitan 3 circuitos integrados LN298N.

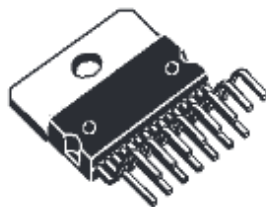


Figura 3.19. Circuito integrado LN298N.

Un puente H se construye con 4 interruptores como se ve en la figura 3.20. Cuando los interruptores S1 y S4 están cerrados, haciéndolo girar en un sentido.

Abriendo los interruptores S1 y S4 (y cerrando S2 y S3), el voltaje se invierte, permitiendo invertir la polaridad de la salida.

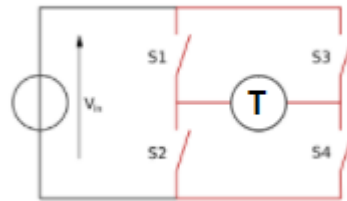


Figura 3.20. Puente H.

En la figura 3.21 se muestra cómo está conformado un controlador LN298N. Se utiliza una fuente de alimentación, conectada a la entrada de 12 VDC utilizando el Jumper para habilitar el regulador interno. De esta forma la entrada de 5 VDC no debe estar conectada a ninguna fuente. Este pin proporciona 5 VDC-500 mA a través del regulador interno; este pin se utilizó como una salida de 5VDC para alimentar la FPGA.

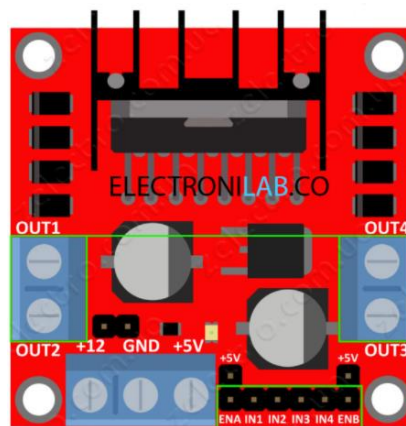


Figura 3.21. Módulo controlador LN298N.

Los pines de entrada IN1 e IN2 corresponden a los pines de salida OUT 1 y OUT2 respectivamente. Lo mismo pasa para IN3 e IN4 con OUT3 y OUT4. La inversión de polaridad de la señal resulta útil para lo que se necesita ya que en la asignación de pines “A” corresponde a medio ciclo de la señal de 40 kHz y “An” corresponde al medio ciclo restante de la señal, los mismo pasa para las 5 salidas restantes. La salida “A” se conectó al pin de entrada IN1 y la salida “An” al pin de entrada IN2, permitiendo que las salidas OUT1 y OUT2 generen una señal push-pull. Esto ocurre ya que “A” manda el primer medio ciclo de la señal a IN1 y lo que se obtiene en la salida es la parte positiva de la señal push-pull. Cuando “An” manda el medio

ciclo restante a IN2 la polaridad en la salida se invierte y esto genera la parte negativa de la señal push-pull.

3.4 Desarrollo de una interfaz gráfica de usuario para control de señales.

La interfaz gráfica se programó en MIT App inventor. MIT App Inventor es un entorno de desarrollo de software actualmente mantenido por el Instituto de Tecnología de Massachusetts y originalmente creado por Google Labs para la elaboración de aplicaciones destinadas al sistema operativo Android. En la figura 3.22 se muestra la interfaz gráfica de usuario para el control del sistema de levitación acústica. (Official Google Blog, 2010)



Figura 3.22. Diseño de la interfaz gráfica.

El botón de “ajuste L. Cavidad” permite asignar a todos los transductores una señal en fase para poder ajustar la longitud de cavidad. El botón de “Desplazamiento” permite desplazar el objeto mediante la máquina de estados programada para la FPGA y en el campo de texto el usuario indica el tiempo entre la transición de un estado a otro en un rango de 1-20s. Los botones en la parte inferior permiten pausar, reproducir la secuencia y pasar al siguiente estado.

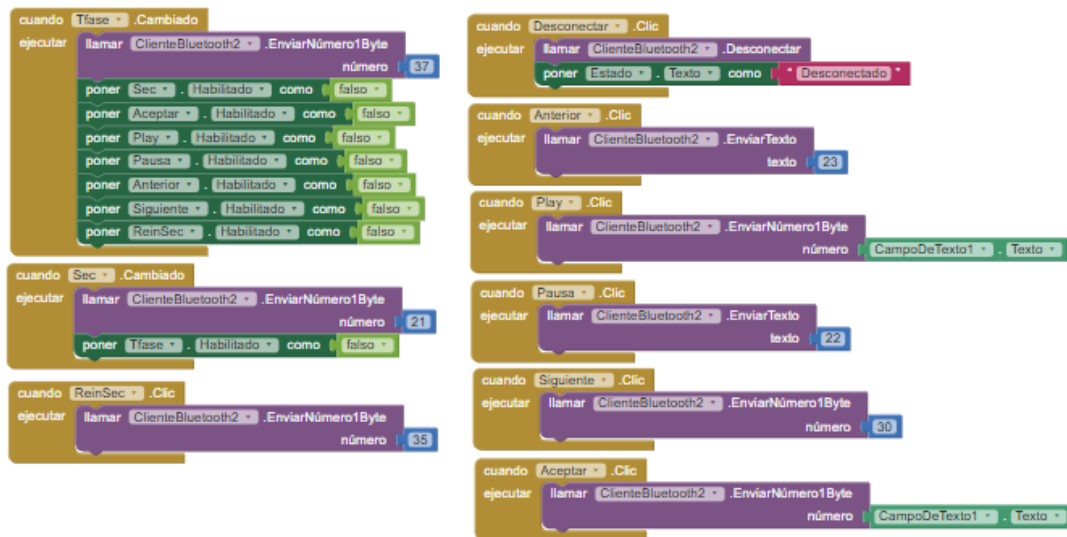


Figura 3.23. Programación para enviar los datos de forma serial.

En la figura 3.23 se muestra la programación con bloques que se hizo para enviar los datos de manera serial, cada que se presiona un botón se envía un dato, lo que nos permite realizar distintas acciones en el sistema, como las descritas en el párrafo anterior. Se utiliza comunicación serie ya que requiere de menos cables conductores que la comunicación en paralelo, de igual manera la comunicación serie permite enviar y recibir datos al mismo tiempo, al contrario de la comunicación paralela.

A continuación, se explica la programación necesaria para comunicar la FPGA con otro dispositivo como un celular o una computadora y así utilizar la interfaz gráfica. Para esto se programa en VHDL un módulo UART. Como ya se mencionó en el capítulo II para enviar datos a través de un módulo UART se necesita de un bit de inicio y de parada, así como de los bits de datos. Para este módulo se eligió una velocidad de baudios de 9600 bps debido a que es la más común y no se necesitan enviar muchos datos por lo que esta velocidad es ideal. Se envían 10 bits, un bit de inicio, 8 bits de datos y un bit de parada. En la figura 3.24 se muestra cómo se van capturando los datos, la señal de Rx es una señal de 9600 bps, la que se encuentra debajo de ella es una señal con la frecuencia aumentada tres veces. Esto se realizó debido a que de esta manera se pudo muestrear en el bit de en medio, asegurando la recepción de los datos capturándolos justo a la mitad de su contenido.

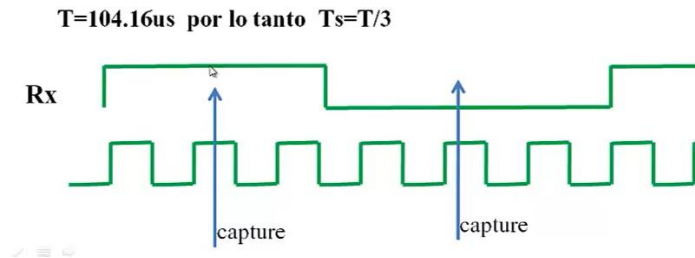


Figura 3.24. Velocidad de baudios aumentada 3 veces.

Para ir capturando estos datos se implementó una máquina de estados en VHDL como se muestra en la figura 3.24, que permitie capturar y almacenar los datos recibidos.

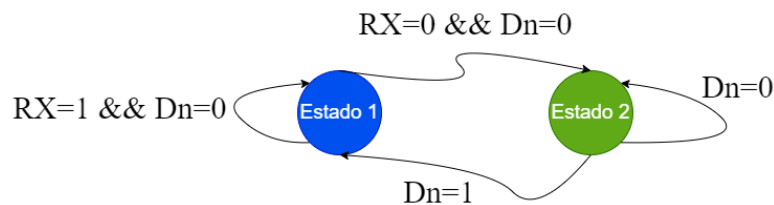


Figura 3.25. Diagrama de la máquina de estados para el UART.

Esta máquina de estados es controlada por dos señales, RX que es la señal que permite saber cuándo se están recibiendo los datos, cuando está en un estado alto quiere decir que no se están recibiendo datos. Dn es una señal que permite saber cuándo se terminan de recibir los bits y se pueden recibir más, cuando Dn está en un estado alto quiere decir que se han recibido todos los bits.

La máquina de estados se mantendrá en el estado 1 mientras no se estén recibiendo datos. Cuando RX cambia a un estado bajo quiere decir que se están recibiendo datos pero que aún no se terminan de recibir ya que Dn se mantiene en un estado bajo por lo que se pasa al estado 2. La máquina de estados se mantendrá en el estado 2 mientras no se terminen de recibir los bits, es decir, que Dn se encuentra en un estado bajo. Cuando se terminan de recibir los datos Dn cambia a un estado alto para indicarlos y se retorna al estado 1 repitiéndose nuevamente el mismo proceso.

Capítulo IV. Pruebas y resultados del sistema de levitación

En este capítulo se muestran las pruebas realizadas al sistema de levitación y los resultados obtenidos. Se realizan pruebas en dos modos diferentes para desplazar objetos sin contacto. Encendiendo y apagando transductores, y controlando la fase de los mismos.

4.1 Modalidad: encendido-apagado (On-off) de transductores

Esta modalidad consiste en encender y apagar secuencialmente líneas de transductores para cambiar la posición de la onda estacionaria a lo largo del eje z , y así trasladar un objeto a lo largo del eje con pasos de 5 mm. Para trasladar un objeto de esta manera se realiza una secuencia de “estados”. Un estado es una configuración o condición única de información en un tiempo determinado del programa. Para esta modalidad un estado contiene información de las líneas de transductores que estarán encendidas. Los estados realizan una transición consecutiva de un estado a otro en un tiempo determinado por el usuario. En la figura 4.1 se muestra un diagrama que explica la secuencia para mover un objeto. La traslación se hace a lo largo del eje z partiendo de $z=5$ mm hasta $z=45$ mm realizando movimientos o pasos de 5 mm. En la figura 4.1 para simplificar el diagrama se muestran solo los transductores ubicados en $\theta=0^\circ$ y $\theta=180^\circ$. Estos transductores son representativos de todos los demás ya que, debido a la simetría del sistema, los transductores restantes de cada línea se encuentran a la misma distancia del punto focal correspondiente.

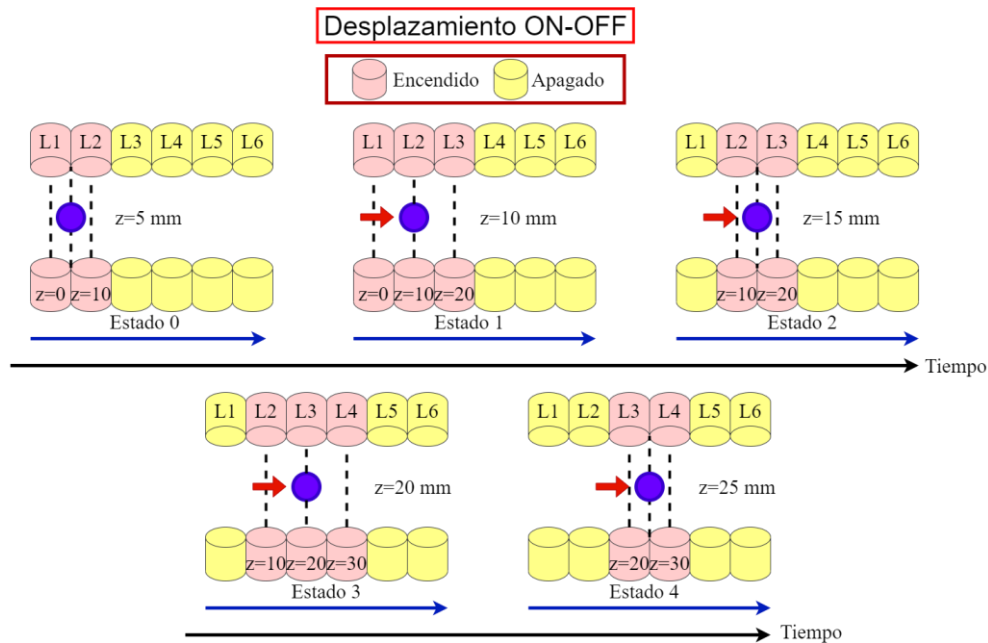


Figura 4.1. Esquema del desplazamiento de un objeto, encendiendo y apagando transductores en distintas posiciones del eje z (mm), para simplificar el diagrama se coloca un par de transductores por cada posición en z .

En la figura 4.1 en el estado 0 se encuentran encendidas las líneas 1 y 2. Por lo que la onda estacionaria residirá dentro de esa sección de la cavidad cilíndrica y los nodos por simetría de la onda se ubicarán en el centro de la sección ($z = 5$ mm). En el estado 1 se encienden las líneas 1, 2 y 3 por lo que la onda estacionaria ahora estará centrada en $z = 10$ mm, esto ocasionará que los nodos de la onda se muevan 5 mm y por consecuencia el objeto levitado también. El objeto se irá moviendo conforme avance la secuencia mostrada en la figura 4.1. Esta secuencia permite ir moviendo el objeto en intervalos de 5 mm para cada cambio de estados consecutivos. En la figura 4.1 solo se muestra hasta el estado 5, que se toma como el estado central y ubica el objeto en $z=25$ mm. Sin embargo, el sistema funciona hasta el estado 9, que corresponde a una posición de levitación en $z=45$ mm.

Esta forma de trasladar un objeto resulta útil para desplazar objetos de baja densidad como una esfera de poliestireno ya que al desplazarse se genera una menor cantidad de movimiento a comparación de un objeto con mayor densidad como una gota de agua. Cuando el objeto da un paso a la siguiente posición este llega con un momento lineal que depende de la velocidad y de la masa, por lo tanto, entre mayor sea el momento se necesita una mayor fuerza acústica para

mantener levitado de manera estable el objeto. Por lo tanto, con un objeto más denso como una esfera de PPS que tiene una densidad de $\approx 0.9 \text{ g/cm}^3$, al tener pasos tan grandes para desplazarse y una densidad mayor, el momento será aún más grande y al no generar la fuerza suficiente para mantener al objeto levitado este caerá.

En la figura 4.2 lo que se muestra es una superposición de fotos que permite observar las distintas posiciones que tiene una esfera de poliestireno dentro de la cavidad si se traslada encendiendo y apagando líneas de transductores, se colocó una hoja milimétrica en el fondo para tener una referencia aproximada de la posición, sin embargo, esta puede variar. Si se desea desplazar el objeto en 3 dimensiones o sobre los tres ejes del cilindro, se debe controlar la fase de los transductores independientemente, esto no está incluido dentro de este trabajo ya que los objetivos son otros.

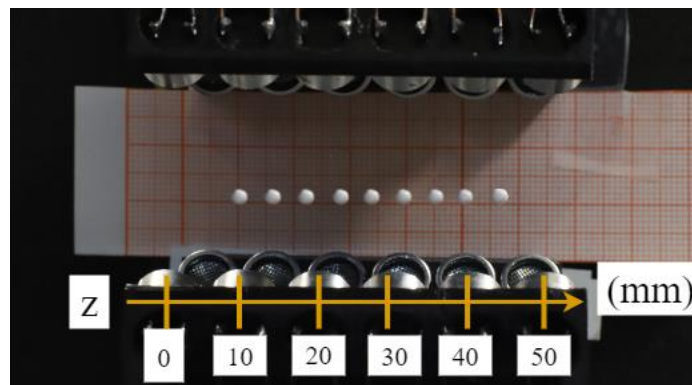


Figura 4.2. Posiciones del objeto en traslación en el eje z encendiendo y apagando transductores.

4.2. Modalidad: control de fase de transductores

La modalidad de control de fase de transductores consiste en trasladar un objeto a lo largo del eje z controlando la fase de las líneas de transductores para realizar movimientos de 1 mm y tener mayor estabilidad del objeto desplazado a comparación de la modalidad on-off descrita en la sección anterior. Cada posición a partir del origen en la que se puede ubicar el objeto en el eje z cuando se está trasladando se le llama “estado”. Un estado posee información de las líneas de transductores que estarán encendidos y su desfase según sea el caso de donde se quiera ubicar el objeto, la asignación de información a los estados se muestra en las tablas 3.1 y 3.2. El control de fase de los transductores permite concentrar la energía y generar la onda estacionaria con eje en un plano z específico. Se

toma como ejemplo el estado “0” que es el estado inicial. Para este ejemplo, se encienden las líneas de transductores 1, 2 y 3 con desfases distintos para cada una al encontrarse a una distancia diferente del punto donde se quiere generar la onda estacionaria. No sirve de mucho encender las líneas de transductores siguientes debido a la directividad de 80° con la que cuentan los transductores. Entonces, las líneas de transductores que se encienden dependen de en qué plano z se quiere generar la onda estacionaria. De igual manera los desfases dependen de la distancia que hay entre la línea de transductores y el plano z donde se desea levantar al objeto. Por ejemplo, para levantar en el plano $z = 0$, se generan señales con desfases electrónicos en las primeras 3 líneas de transductores como se muestra en la figura 4.3 (a). Estos desfases denominados en este sistema como Φ_n permiten que las señales de transductores ubicados a una distancia diferente que L_1 puedan llegar en fase a ese mismo punto. Es por eso que L_2 correspondiente a la distancia de la línea 2 al punto de origen sería igual a $L_1 + \Phi_1$, es decir, la distancia L_1 más el desfase Φ_1 permiten al transductor emitir una señal que llegue en fase a ese punto y por lo tanto genera una interferencia constructiva, lo mismo pasa para la línea 3 solo que al estar a una distancia L_3 del punto de origen el desfase será distinto.

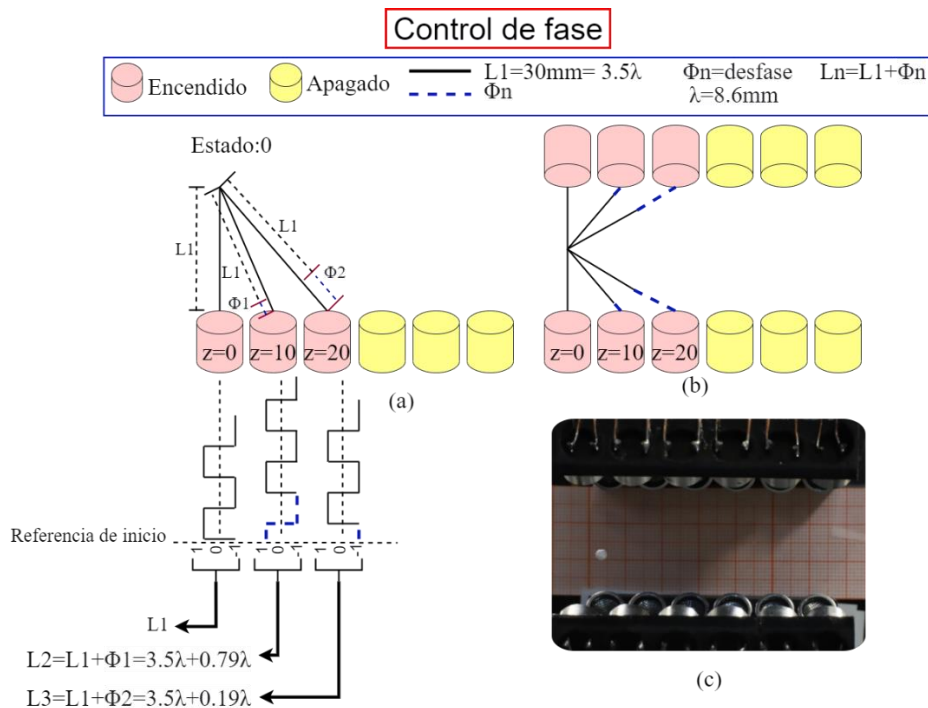


Figura 4.3. Diagrama que explica la aplicación de los desfases. (a) Para generar interferencia constructiva en un punto se deben desfase las señales de los emisores (transductores) ya que se encuentran en

diferentes posiciones, al hacer esto las señales llegaran en fase al mismo punto y se genera interferencia constructiva.

En la figura 4.3 (c) se muestra una esfera de poliestireno levitada acústicamente con control de fase en el estado 0, este se considera como el estado y el punto de origen. A partir del estado 0 o posición $(r,0,0)$ se comienza una secuencia consecutiva de 50 estados que permite desplazar un objeto con movimientos de 1 mm hasta la posición $(r,0,50)$.

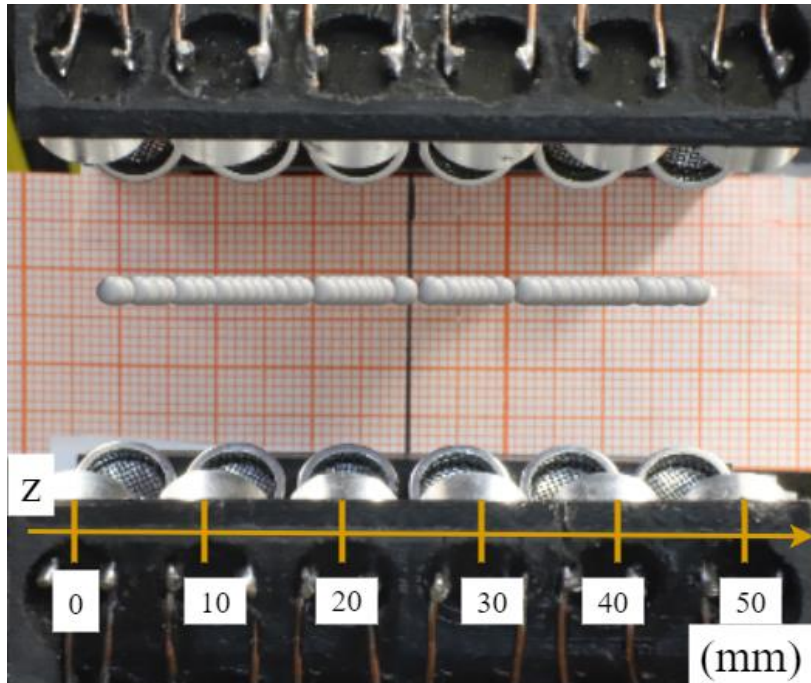


Figura 4.4. Posiciones del objeto en traslación en el eje z controlando la fase de los transductores.

En la figura 4.4 se muestra una superposición de fotos que ilustra 51 posiciones distintas en el eje z que tendrá el objeto transportado con control de fase de los transductores con movimientos o pasos de 1 mm. Se puede apreciar que los movimientos no son siempre de 1 mm y que existe simetría en los movimientos el sistema si se toma como posición central $z=25$ mm. Si se analizan las fotos superpuestas en la figura 4.4 se observa cuánto avanza aproximadamente el objeto en cada estado y a que ubicación del eje z se mueve, este análisis de la traslación del objeto se puede ver en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Posiciones del objeto levitado en el eje z y movimiento que realiza entre cada transición de estados.

Estado	Posicion en Z (mm)	Movimiento (mm)	Estado	Posicion en Z (mm)	Movimiento (mm)
0	0	0	26	29	1
1	1	2	27	30	1
2	1	0	28	30.5	0.5
3	3	2	29	31	0.5
4	4.5	1.5	30	32	1
5	5.5	1	31	32	0
6	7	1.5	32	32	0
7	8	1	33	33	1
8	9	1	34	36	3
9	10	1	35	37	1
10	11	1	36	38	1
11	12	1	37	39	1
12	13	1	38	40	1
13	14	1	39	41	1
14	14	0	40	42	1
15	15.5	1.5	41	43	1
16	16.5	1	42	44	1
17	19.5	3	43	45	1
18	20.5	1	44	45	0
19	21.5	1	45	47	2
20	21.5	0	46	47	0
21	22.5	1	47	48	1
22	23	0.5	48	48	0
23	24	1	49	50	2
24	25	1	50	50	0
25	28	3			

En la tabla 4.1, se muestra la posición en el eje z para cada estado y la distancia que se desplaza el objeto entre cada transición de estado. Estas mediciones se obtuvieron a partir de fotografías tomadas al objeto levitado en cada estado, colocando una hoja milimétrica en el fondo para una mejor referencia del desplazamiento que realiza el objeto como se muestra en la figura 4.4.

En la tabla 4.1, y en la figura 4.4 se observa que los pasos del objeto no son siempre de 1 mm, generando inestabilidad cuando se desplazan muestras de agua u objetos que se asemeje a su densidad (1 g/cm^3) al necesitar más fuerza para poder detenerla. Una posible causa de que los pasos no sean siempre de 1 mm es el cálculo de los desfases para los estados, puede existir un ligero error en los cálculos que repercute en la ubicación donde se desea generar la onda estacionaria.

4.3. Desempeño del sistema

Un sistema de levitación con dos arreglos de transductores dispuestos en superficies cilíndricas ofrece la ventaja de que, al formar una cavidad con un enfoque geométrico de las ondas a lo largo del eje del cilindro, se obtiene una mayor presión acústica comparado con una superficie plana, esto debido a que en una superficie plana el enfoque de la presión acústica se ve afectado por la directividad de los transductores. Otra ventaja que da tener un enfoque geométrico en cada línea de transductores es que, no es necesario controlar de manera independiente todos los transductores del arreglo, basta con controlar sólo las líneas y así reducir las conexiones electrónicas hasta en un 93% a comparación de un control independiente.

Para un desempeño óptimo del sistema se debe ajustar la distancia que hay entre los arreglos que emiten y reflejan las ondas acústicas, esta distancia se conoce como longitud de cavidad. Si la superficie de la cavidad fuera plana, para formar la cavidad resonante, la longitud de la cavidad debe ajustarse a un tamaño múltiplo de media longitud de onda, asociada a la vibración de los emisores ultrasónicos. (Contreras, V. 2021). Para este sistema esto no aplica ya que las superficies de la cavidad tienen forma cilíndrica. Existe una correlación inversa entre la corriente total consumida y la presión acústica del sistema de levitación en función de la longitud de cavidad. Entonces, cuando tengamos un mínimo de corriente se tendrá un máximo de presión acústica (Contreras, V., & Marzo, A. 2021). Por lo tanto, para ajustar la longitud de cavidad se realiza un monitoreo de la corriente total consumida por el sistema con un multímetro digital (Keithley, 2110). Para realizar este monitoreo se asigna una señal con la misma fase a todos los transductores. Con 8 VDC de entrada se encuentra una corriente mínima de 494 mA y una longitud de cavidad de aproximadamente 61 mm. Ajustar la longitud de cavidad es importante ya que esto permite generar la onda estacionaria. Con la longitud de cavidad ajustada y la modalidad de control de fase de los transductores, es posible desplazar gotas de agua que tienen una densidad de 1 g/cm^3 . Para transportar gotas de agua es necesario colocarlas inicialmente en el estado 6 ya que en los estados anteriores no se cuenta con la presión suficiente para levitarla y desplazarla, esto ocurre a causa de que la presión se ve afectada por la directividad de los transductores. Así mismo, es necesario un

voltaje mínimo de 12 VDC en la entrada del sistema para poder desplazar las gotas.

Comparando este sistema con sistemas como el LeviPath desarrollado por Omirou, T., Marzo, A., Seah, S. A., & Subramanian, S. en 2015. Se puede decir que el sistema implementado es más eficiente. Tener un enfoque geométrico ofrece una mayor potencia en el sistema pudiendo levitar y desplazar objetos más densos que una esfera de poliestireno utilizando una menor cantidad de transductores y por consecuencia reducir conexiones y disminuir la complejidad de programación. Una ventaja del LeviPath sobre este sistema cilíndrico es que puede desplazar objetos en tres dimensiones mientras que el sistema implementado en este proyecto lo hace solo en una dimensión.

Respecto al sistema que inyecta, transporta, fusiona y expulsa gotas desarrollado por Andrade, M. A. B., Camargo, T. S. A., & Marzo, A. en 2018 la principal ventaja es la reducción en las conexiones eléctricas de los transductores y el desplazamiento de gotas de agua con una menor cantidad de transductores. Una de las principales desventajas con respecto a este sistema es la inyección, desplazamiento y expulsión automática de gotas, así como movimientos en dos dimensiones.

Dentro de lo esperado en este sistema se deben desplazar gotas de agua con pasos de 1 mm, utilizando un control electrónico de fase de los transductores. La gota se debe desplazar en una dimensión y en una dirección a lo largo del eje de un levitador de geometría cilíndrica. Todo esto se pudo lograr a excepción de los pasos de 1 mm, dado que en algunas ocasiones se tienen pasos diferentes, tanto mayor como menor de lo esperado que es 1 mm esto se atribuye al cálculo de los desfases, pero no está comprobado.

Capítulo V. Conclusiones y trabajos a futuro

5.1 Conclusiones

En este trabajo de tesis se desarrolló un sistema de levitación acústica con el que es posible desplazar objetos milimétricos. Se construyeron dos arreglos de transductores de 6x7 colocados en dos superficies cilíndricas que forman una cavidad concéntrica. El transporte se realiza paralelamente al eje de simetría de la cavidad debido al control de fase de 6 líneas de 14 transductores. Para el control electrónico se programaron en una FPGA señales push-pull de 40 kHz capaces de variar su fase con una resolución de 18° controlando su amplitud hasta 30 Vpp. Para el desplazamiento del objeto se programó una secuencia de estados que asigna las señales para las líneas del levitador y poder mover los nodos a lo largo del eje z de la cavidad y transportar un objeto sin contacto. Se desarrolló una interfaz gráfica para operar al sistema que permite variar el tiempo de la transición de estados, pausar o reproducir la transición, pasar al siguiente estado de forma manual y controlar en fase a todos los transductores del sistema para facilitar el ajuste de la longitud de cavidad. El control electrónico de la fase de los transductores permitió desplazar gotas de agua o esferas de PPS a lo largo del eje de simetría de la cavidad sin necesidad de tocar la muestra. Sin embargo, se presentaron algunas irregularidades en la posición que se ubicaba el objeto o la muestra dentro de la cavidad en algunos estados. En los estados 22, 28 y 29 el objeto se mueve en pasos de aproximadamente 0.5 mm, en los estados 4, 6 y 15 los pasos son de 1.5 mm aproximadamente, en los estados 1, 3, 42, 45 y 49 el objeto se desplaza aproximadamente 2 mm, los pasos más largos son en los estados 25 y 34 donde el objeto se desplaza 3 mm y finalmente en los estados 2, 14, 20, 31, 32, 44, 46, 48 y 50 el desplazamiento es prácticamente nulo. Esto genera problemas en la estabilidad con los objetos de densidad mayor o igual que 0.9 g/cm^3 , ya que los pasos esperados son de 1 mm, y al ser mayores se necesita una mayor cantidad de fuerza para estabilizar la muestra. Esto puede atribuir a que posiblemente exista un error en el cálculo de los desfases calculados o a que probablemente la resolución de los desfases sea muy alta y deba reducirse a un valor menor. Para solucionar esto se recomienda recalcular los desfases para cada estado o mejorar la resolución de los mismos. Con esto se puede decir que

los objetivos planteados se cumplieron, cumpliendo primeramente con el objetivo principal que es construir un sistema de levitación acústica capaz de desplazar objetos sin contacto, dentro de este objetivo existen objetivos específicos que también se cumplieron, inicialmente se construyó dos arreglos de transductores de 6x7 colocados en una superficie cilíndrica para posteriormente con estos armar un levitador acústico formando una cavidad cilíndrica, se programaron las señales push-pull de 40 kHz en una FPGA capaces de variar la fase con una resolución de 18° o $\pi/10$ rad, esta misma señal se puede ampliar hasta 30 Vpp y finalmente se desarrolló una interfaz gráfica que facilita la manipulación del sistema de levitación acústica, todo esto en conjunto permite cumplir con el objetivo general.

En la siguiente sección se muestran algunos trabajos más específicos que se pueden realizar en un futuro.

5.2 Trabajos a futuro

- Recalcular los desfases asignados a los estados.
Descripción: es muy probable que recalculando los desfases el objeto que se desplaza haga movimientos de 1 mm exactamente ya que la interferencia totalmente constructiva se generaría exactamente cada milímetro, ya que algunos lo que mejorará la estabilidad del sistema.
- Programar el sistema para que los objetos se puedan transportar en ambas direcciones del eje z.
Descripción: esto será de gran utilidad sobre todo para cuando se trabaja con muestras líquidas, ya que permitirá manipular dos gotas y analizarlas o incluso mezclarlas.
- Diseñar un sistema de alimentación específico para el sistema.
Descripción: con esto se puede hacer un sistema más compacto y fácil de usar al no requerir de equipos externos como una fuente de voltaje o un multímetro para ajustar la longitud de cavidad.
- Programar el sistema para que realice la transición de estados en el tiempo que el usuario desee.
Descripción: cuando se quiere transportar objetos o muestras con una densidad igual o mayor a 1 g/cm^3 , los movimientos que realiza el objeto

generan inestabilidad en el mismo, para hacer el siguiente movimiento es recomendable dejar que se estabilice. Hay objetos que tardan hasta un minuto en hacerlo por lo que poder cambiar libremente el tiempo entre cada transición para realizar un movimiento será de gran ayuda.

Referencias bibliográficas

- Andrade, M. A. B., Camargo, T. S. A., & Marzo, A. (2018). Automatic contactless injection, transportation, merging, and ejection of droplets with a multifocal point acoustic levitator. *Review of Scientific Instruments*, 89(12).
<https://doi.org/10.1063/1.5063715>
- Beasley, W., Gatusch, B., Connolly-Taylor, D., Teng, C., Marzo, A., & Nunez-Yanez, J. (2019). *High-Performance Ultrasonic Levitation with FPGA-based Phased Arrays*. <http://arxiv.org/abs/1901.07317>
- INTEL. (2009). *Cyclone IV E FPGA*.
<https://www.intel.la/content/www/xl/es/products/details/fpga/cyclone/iv/e.html>
- Koyama, D., & Nakamura, K. (2010). Noncontact ultrasonic transportation of small objects over long distances in air using a bending vibrator and a reflector. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 57(5), 1152–1159. <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2010.1527>
- Llogsa. (s/f). *Transductores de arreglos de fase*. www.llogsa.com
- Mcdonough, C., Barmatz, M., & Jackson, H. (1995). *Computing Microwave Force Via Boltzmann-Ehrenfest Principle*.
- Ochiai, Y., Hoshi, T., & Rekimoto, J. (2014). Three-dimensional mid-air acoustic manipulation by ultrasonic phased arrays. *PLoS ONE*, 9(5).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097590>
- Official Google Blog. (2010, julio 12). *App Inventor para Android*.
- Omirou, T., Marzo, A., Seah, S. A., & Subramanian, S. (2015). Levipath: Modular acoustic levitation for 3D path visualisations. *Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings, 2015-April*, 309–312.
<https://doi.org/10.1145/2702123.2702333>
- Rohde & Schwarz. (s/f). *Entendiendo el UART*.
- Toa, M., & Whitehead, A. (2019). *Ultrasonic Sensing Basics Application Report Ultrasonic Sensing Basics*. www.ti.com
- Torres Gallegos Edgar Augusto. (2009). *Efectos físicos en cavidades cilíndricas usadas en dispositivos de levitación acústica*.
- Watanabe, A., Hasegawa, K., & Abe, Y. (2018). Contactless fluid manipulation in air: Droplet coalescence and active mixing by acoustic levitation. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28451-5>
- Zang, D. (2020). Acoustic levitation: From physics to applications. En *Acoustic Levitation: From Physics to Applications*. Springer Singapore.
<https://doi.org/10.1007/978-981-32-9065-5>

Anexos

Anexo A: Código en VHDL para secuencia de estados y recibir datos.

```
LIBRARY ieee;
USE ieee.std_logic_1164.all;
use ieee.numeric_std.all;

ENTITY interfaz IS
  PORT (
    reset : in std_logic := '0';
    clock: in std_logic;
    --
    clk40kHz,clk18,clk36,clk54,clk72,clk90,clk108,clk126,clk144,clk162,clk180,cl
    k198,clk216,clk234,clk252,clk270,clk288,clk306,clk324,clk342,clk360: out
    std_logic
    r0,r1,r2,r3,r4,r5,r6,r7:in std_logic;
    An,Bn,Cn,Dn,En,Fn: OUT STD_LOGIC;
    A,B,C,D,E,F,clk40kHz: OUT STD_LOGIC
  );
END interfaz;

ARCHITECTURE BEHAVIOR OF interfaz IS
  TYPE estados IS
(s0,s1,s2,s3,s4,s5,s6,s7,s8,s9,s10,s11,s12,s13,s14,s15,s16,s17,s18,s19,s20,
s21,s22,s23,s24,s25,s26,s27,s28,s29,s30,s31,s32,s33,s34,s35,s36,s37,s38,
s39,s40,s41,s42,s43,s44,s45,s46,s47,s48,s49,s50);
  signal presente,siguiente : estados;
  signal conteo: integer range 0 to 1249:=0;
  signal rxop:std_logic_vector(7 downto 0);
  signal salida1,salida2: std_logic;
  signal
  clk18,clk36,clk54,clk72,clk90,clk108,clk126,clk144,clk162,clk180,clk2
  16,clk234,clk252,clk270,clk288,clk306,clk324,clk342,clk360: std_logic;
```

```
signal
nclk18,nclk36,nclk54,nclk72,nclk90,nclk108,nclk126,nclk144,nclk162,nclk18
0,nclk198,nclk216,nclk234,nclk252,nclk270,nclk288,nclk306,nclk324,nclk34
2,nclk360: std_logic;
constant desfase:integer:=123/2;
constant ms:integer:=625;
```

```
    signal recibido:integer; --recibe dato de interfaz
    signal tfase:integer:=37;--datos interfaz
    signal sig:integer:=30;--datos interfaz
    signal reinicio:integer:=35;--datos interfaz
    signal pausa:integer:=22;--datos interfaz
    signal anterior:integer:=23;--datos interfaz
```

```
signal t:integer:=0;
signal temp:integer:=0;
signal tiempo:integer:=1;
signal frecuencia:std_logic;
constant freq:integer:=50000000;
signal res:std_logic; --Constante auxiliar para obtener las opciones provenientes
de la app
```

```
begin
```

```
-----
process(clock,conteo,r0,r1,r2,r3,r4,r5,r6,r7,recibido)
```

```
    variable r:std_logic_vector(7 downto 0);
```

```
        begin
            r(0):=r0;
            r(1):=r1;
            r(2):=r2;
            r(3):=r3;
```

```

r(4):=r4;
r(5):=r5;
r(6):=r6;
r(7):=r7;
rxop(7 downto 0)<=r(7 downto 0); --datos recibidos de la interfaz grafica

```

```

    recibido<=to_integer(unsigned(rxop)); --Convierte los bits de la app a
entero sin signo

```

```

-- tiempo<=recibido mod pot; --Obtiene el ciclo de trabajo
seleccionado en la app

```

```

    if (recibido>=0 and recibido<20) then
        tiempo<=recibido;
    else
        tiempo<=600;
    end if;

```

```

    end process;

```

----- Divisor de frecuencia 40 kHz

```

process(clock,conteo)
    begin

        if(rising_edge(clock)) then

            if(conteo>1249) then
                conteo<=0;
            else
                conteo<=conteo+1;
            end if;

            if(conteo<625) then

```



```
    clk54<='0';
    nclk54<='1';
end if;
```

```
if(conteo>desfase*4 and conteo<desfase*4+ms) then --72°
    clk72<='1';
    nclk72<='0';
else
    clk72<='0';
    nclk72<='1';
end if;
```

```
if(conteo>desfase*5 and conteo<desfase*5+ms) then --90°
    clk90<='1';
    nclk90<='0';
else
    clk90<='0';
    nclk90<='1';
end if;
```

```
if(conteo>desfase*6 and conteo<desfase*6+ms) then --108°
    clk108<='1';
    nclk108<='0';
else
    clk108<='0';
    nclk108<='1';
end if;
```

```
if(conteo>desfase*7 and conteo<desfase*7+ms) then --126°
    clk126<='1';
    nclk126<='0';
else
    clk126<='0';
```

```
        nclk126<='1';
    end if;
```

```
    if(conteo>desfase*8 and conteo<desfase*8+ms) then --144°
        clk144<='1';
        nclk144<='0';
    else
        clk144<='0';
        nclk144<='1';
    end if;
```

```
    if(conteo>desfase*9 and conteo<desfase*9+ms) then --162°
        clk162<='1';
        nclk162<='0';
    else
        clk162<='0';
        nclk162<='1';
    end if;
```

```
    if(conteo>desfase*10 and conteo<desfase*10+ms) then --180°
        clk180<='1';
        nclk180<='0';-----*_*_*_
*todo ok hasta aquí:)
    else
        clk180<='0';
        nclk180<='1';
    end if;
```

```
    if(conteo>desfase*11 or conteo<desfase*11-ms) then --198°
        clk198<='1';
        nclk198<='0';
    else
        clk198<='0';
```

```
        nclk198<='1';
    end if;
```

```
    if(conteo>desfase*12 or conteo<desfase*12-ms) then --216°
        clk216<='1';
        nclk216<='0';
    else
        clk216<='0';
        nclk216<='1';
    end if;
```

```
    if(conteo>desfase*13 or conteo<desfase*13-ms) then --234°
        clk234<='1';
        nclk234<='0';
    else
        clk234<='0';
        nclk234<='1';
    end if;
```

```
    if(conteo>desfase*14 or conteo<desfase*14-ms) then --252°
        clk252<='1';
        nclk252<='0';
    else
        clk252<='0';
        nclk252<='1';
    end if;
```

```
    if(conteo>desfase*15 or conteo<desfase*15-ms) then --270°
        clk270<='1';
        nclk270<='0';
    else
        clk270<='0';
        nclk270<='1';
    end if;
```

end if;

if(conteo>desfase*16 or conteo<desfase*16-ms) then --288°

clk288<='1';

nclk288<='0';

else

clk288<='0';

nclk288<='1';

end if;

if(conteo>desfase*17 or conteo<desfase*17-ms) then --306°

clk306<='1';

nclk306<='0';

else

clk306<='0';

nclk306<='1';

end if;

if(conteo>desfase*18 or conteo<desfase*18-ms) then --324°

clk324<='1';

nclk324<='0';

else

clk324<='0';

nclk324<='1';

end if;

if(conteo>desfase*19 or conteo<desfase*19-ms) then --342°

clk342<='1';

nclk342<='0';

else

clk342<='0';

nclk342<='1';

end if;

```
if(conteo>desfase*20 or conteo<desfase*20-ms) then --360°
    clk360<='1';
    nclk360<='0';
else
    clk360<='0';
    nclk360<='1';
end if;
end process;
```

```
process (tiempo,temp)
begin
    if(recibido=pausa)then
    temp<=180000000000;
    elsif (tiempo=1/10)then
    temp<=5000000;
    elsif (tiempo=1/5)then
    temp<=10000000;
    elsif (tiempo=3/10)then
    temp<=15000000;
    elsif (tiempo=2/5)then
    temp<=20000000;
    elsif (tiempo=0)then
    temp<=25000000;
    elsif (tiempo=3/5)then
    temp<=30000000;
    elsif (tiempo=7/10)then
    temp<=35000000;
    elsif (tiempo=4/5)then
    temp<=40000000;
    elsif (tiempo=9/10)then
    temp<=45000000;
```

```

        else
            temp<=(tiempo*freq);

        end if;

    end process;

```

```

process(clock,t,tiempo,recibido)

```

```

    begin

        if(rising_edge(clock)) then
            if(t>temp-1) then --0.5 SEG 2499999
                t<=0;
            else
                t<=t+1;
            end if;

            if(t<(temp/2)-1 or recibido=sig) then -->499999999
                frecuencia<='1';

            else
                frecuencia<='0';
            end if;
        end if;
    end process;

```

```

PROCESS (frecuencia,presente)

```

```

BEGIN

```

```

    IF (rising_edge(frecuencia)) THEN
        presente <= siguiente;
    end if;

```

```
END IF;  
END PROCESS;
```

```
PROCESS (presente,reset)
```

```
BEGIN
```

```
IF (reset='0') THEN
```

```
siguiente <= s0;
```

```
elsif (recibido=tfase) then
```

```
A<=salida1;
```

```
B<=salida1;
```

```
C<=salida1;
```

```
D<=salida1;
```

```
E<=salida1;
```

```
F<=salida1;
```

```
An<=salida2;
```

```
Bn<=salida2;
```

```
Cn<=salida2;
```

```
Dn<=salida2;
```

```
En<=salida2;
```

```
Fn<=salida2;
```

```
ELSE
```

```
CASE presente IS
```

```
WHEN s0 =>
```

```
A<=salida1;
```

```
B<=clk270;
```

```
C<=clk90;
```

```
D<='0';
```

```
E<='0';
```

```
F<='0';
```

```
An<=salida2;  
Bn<=nclk270;  
Cn<=nclk90;  
Dn<='0';  
En<='0';  
Fn<='0';  
Siguiente<=s1;
```

```
WHEN s1 =>
```

```
A<=salida1;  
B<=clk288;  
C<=clk108;  
D<='0';  
E<='0';  
F<='0';
```

```
An<=salida2;  
Bn<=nclk288;  
Cn<=nclk108;  
Dn<='0';  
En<='0';  
Fn<='0';
```

```
Siguiente<=s2;
```

```
WHEN s2 =>
```

```
A<=salida1;  
B<=clk306;  
C<=clk162;  
D<='0';  
E<='0';  
F<='0';
```

```
An<=salida2;
Bn<=nclk306;
Cn<=nclk162;
Dn<='0';
En<='0';
Fn<='0';
```

```
Siguiente<=s3;
```

```
WHEN s3 =>
```

```
A<=salida1;
B<=clk324;
C<=clk162;
D<='0';
E<='0';
F<='0';
```

```
An<=salida2;
Bn<=nclk324;
Cn<=nclk162;
Dn<='0';
En<='0';
Fn<='0';
```

```
Siguiente<=s4;
```

```
WHEN s4 =>
```

```
A<=salida1;
B<=clk342;
C<=clk198;
D<='0';
```

```
E<='0';
```

```
F<='0';
```

```
An<=salida2;
```

```
Bn<=nclk342;
```

```
Cn<=nclk198;
```

```
Dn<='0';
```

```
En<='0';
```

```
Fn<='0';
```

```
Siguiente<=s5;
```

```
WHEN s5 =>
```

```
A<=salida1;
```

```
B<=clk342;
```

```
C<=clk216;
```

```
D<='0';
```

```
E<='0';
```

```
F<='0';
```

```
An<=salida2;
```

```
Bn<=nclk342;
```

```
Cn<=nclk216;
```

```
Dn<='0';
```

```
En<='0';
```

```
Fn<='0';
```

```
Siguiente<=s6;
```

```
WHEN s6 =>
```

```
A<=salida1;
```

```
B<=salida1;
```

```
C<=clk252;
```

D<='0';

E<='0';

F<='0';

An<=salida2;

Bn<=salida2;

Cn<=nclk252;

Dn<='0';

En<='0';

Fn<='0';

Siguiente<=s7;

WHEN s7 =>

A<=salida1;

B<=salida1;

C<=clk270;

D<='0';

E<='0';

F<='0';

An<=salida2;

Bn<=salida2;

Cn<=nclk270;

Dn<='0';

En<='0';

Fn<='0';

Siguiente<=s8;

WHEN s8 =>

A<=salida1;

B<=salida1;

```
C<=clk306;  
D<='0';  
E<='0';  
F<='0';
```

```
An<=salida2;  
Bn<=salida2;  
Cn<=nclk306;  
Dn<='0';  
En<='0';  
Fn<='0';
```

```
Siguiente<=s9;
```

```
WHEN s9 =>
```

```
A<=clk324;  
B<=salida1;  
C<=clk288;  
D<='0';  
E<='0';  
F<='0';
```

```
An<=nclk324;  
Bn<=salida2;  
Cn<=nclk288;  
Dn<='0';  
En<='0';  
Fn<='0';
```

```
Siguiente<=s10;
```

```
WHEN s10 =>
```


A<=clk288;

B<=salida1;

C<=clk288;

D<='0';

E<='0';

F<='0';

An<=nclk288;

Bn<=salida2;

Cn<=nclk288;

Dn<='0';

En<='0';

Fn<='0';

Siguiente<=s11;

WHEN s11 =>

A<=clk288;

B<=salida1;

C<=clk324;

D<='0';

E<='0';

F<='0';

An<=nclk288;

Bn<=salida2;

Cn<=nclk324;

Dn<='0';

En<='0';

Fn<='0';

Siguiente<=s12;

```
        WHEN s12 =>
A<=clk306;
    B<=salida1;
    C<=salida1;
    D<='0';
    E<='0';
    F<='0';

    An<=nclk306;
    Bn<=salida2;
    Cn<=salida2;
    Dn<='0';
    En<='0';
    Fn<='0';

    Siguiente<=s13;
```

```
        WHEN s13 =>
A<=clk270;
    B<=salida1;
    C<=salida1;
    D<='0';
    E<='0';
    F<='0';

    An<=nclk270;
    Bn<=salida2;
    Cn<=salida2;
    Dn<='0';
    En<='0';
    Fn<='0';
```

Siguiente<=s14;

WHEN s14 =>

A<=clk252;

B<=salida1;

C<=salida1;

D<='0';

E<='0';

F<='0';

An<=nclk252;

Bn<=salida2;

Cn<=salida2;

Dn<='0';

En<='0';

Fn<='0';

Siguiente<=s15;

WHEN s15 =>

A<=clk234;

B<=salida1;

C<=salida1;

D<=clk234;

E<='0';

F<='0';

An<=nclk234;

Bn<=salida2;

Cn<=salida2;

Dn<=nclk234;

En<='0';

Fn<='0';

Siguiente<=s16;

WHEN s16 =>

A<=clk234;

B<=salida1;

C<=salida1;

D<=clk234;

E<='0';

F<='0';

An<=nclk234;

Bn<=salida2;

Cn<=salida2;

Dn<=nclk234;

En<='0';

Fn<='0';

Siguiente<=s17;

WHEN s17 =>

A<=clk198;

B<=clk324;

C<=salida1;

D<=clk270;

E<='0';

F<='0';

An<=nclk198;

Bn<=nclk324;

Cn<=salida2;

Dn<=nclk270;

En<='0';

Fn<='0';

Siguiente<=s18;

WHEN s18 =>

A<=clk180;

B<=clk306;

C<=salida1;

D<=clk288;

E<='0';

F<='0';

An<=nclk180;

Bn<=nclk306;

Cn<=salida2;

Dn<=nclk288;

En<='0';

Fn<='0';

Siguiente<=s19;

WHEN s19 =>

A<=clk144;

B<=clk288;

C<=salida1;

D<=clk288;

E<='0';

F<='0';

An<=nclk144;

Bn<=nclk288;

Cn<=salida2;

Dn<=nclk288;

En<='0';

```
Fn<='0';
```

```
Siguiente<=s20;
```

```
WHEN s20 =>
```

```
A<=clk144;
```

```
B<=clk288;
```

```
C<=salida1;
```

```
D<=clk288;
```

```
E<=clk144;
```

```
F<='0';
```

```
An<=nclk144;
```

```
Bn<=nclk288;
```

```
Cn<=salida2;
```

```
Dn<=nclk288;
```

```
En<=nclk144;
```

```
Fn<='0';
```

```
Siguiente<=s21;
```

```
WHEN s21 =>
```

```
A<=clk126;
```

```
B<=clk288;
```

```
C<=salida1;
```

```
D<=clk324;
```

```
E<=clk162;
```

```
F<='0';
```

```
An<=nclk126;
```

```
Bn<=nclk288;
```

```
Cn<=salida2;
```

```
Dn<=nclk324;  
En<=nclk162;  
Fn<='0';
```

```
Siguiente<=s22;
```

```
WHEN s22 =>
```

```
A<=clk108;  
B<=clk270;  
C<=salida1;  
D<=clk324;  
E<=clk180;  
F<='0';
```

```
An<=nclk108;  
Bn<=nclk270;  
Cn<=salida2;  
Dn<=nclk324;  
En<=nclk180;  
Fn<='0';
```

```
Siguiente<=s23;
```

```
WHEN s23 =>
```

```
A<=clk72;  
B<=clk252;  
C<=salida1;  
D<=clk324;  
E<=clk198;  
F<='0';
```

```
An<=nclk72;  
Bn<=nclk252;  
Cn<=salida2;  
Dn<=nclk324;  
En<=nclk198;  
Fn<='0';
```

```
Siguiente<=s24;
```

```
WHEN s24 =>
```

```
A<=salida1;  
B<=clk252;
```

```
C<=salida1;  
D<=clk324;  
E<=clk234;  
F<='0';
```

```
An<=salida2;  
Bn<=nclk252;  
Cn<=salida2;  
Dn<=nclk324;  
En<=nclk234;  
Fn<='0';
```

```
Siguiente<=s25;
```

```
WHEN s25 =>
```

```
A<='0';  
B<=clk234;  
C<=salida1;
```



```
D<=salida1;
E<=clk234;
F<='0';
```

```
An<='0';
Bn<=nclk234;
Cn<=salida2;
Dn<=salida2;
En<=nclk234;
Fn<='0';
```

```
Siguiente<=s26;
```

-----segunda mitad-----

```
WHEN s26 =>
```

```
A<='0';
B<=clk234;
C<=clk324;
D<=salida1;
E<=clk252;
F<=salida1;
```

```
An<='0';
Bn<=nclk234;
Cn<=nclk324;
Dn<=salida2;
En<=nclk252;
Fn<=salida2;
```

```
Siguiente<=s27;
```

```
WHEN s27 =>
```

```
A<='0';
```

```
B<=clk198;  
C<=clk324;  
D<=salida1;  
E<=clk252;  
F<=clk72;
```

```
An<='0';  
Bn<=nclk198;  
Cn<=nclk324;  
Dn<=salida2;  
En<=nclk252;  
Fn<=nclk72;
```

```
Siguiente<=s28;  
WHEN s28 =>
```

```
A<='0';  
B<=clk180;  
C<=clk324;  
D<=salida1;  
E<=clk270;  
F<=clk108;
```

```
An<='0';  
Bn<=nclk180;  
Cn<=nclk324;  
Dn<=salida2;  
En<=nclk270;  
Fn<=nclk108;
```

```
Siguiente<=s29;  
WHEN s29 =>
```

```
A<='0';  
B<=clk162;  
C<=clk324;  
D<=salida1;  
E<=clk288;  
F<=clk126;
```

```
An<='0';  
Bn<=nclk162;  
Cn<=nclk324;  
Dn<=salida2;  
En<=nclk288;  
Fn<=nclk126;
```

```
Siguiente<=s30;  
WHEN s30 =>
```

```
A<='0';  
B<=clk144;  
C<=clk288;  
D<=salida1;  
E<=clk288;  
F<=clk144;
```

```
An<='0';  
Bn<=nclk144;  
Cn<=nclk288;  
Dn<=salida2;  
En<=nclk288;  
Fn<=nclk144;
```

```
Siguiente<=s31;  
WHEN s31 =>
```

```
A<='0';  
B<='0';  
C<=clk288;  
D<=salida1;  
E<=clk288;  
F<=clk144;
```

```
An<='0';  
Bn<='0';  
Cn<=nclk288;  
Dn<=salida2;  
En<=nclk288;  
Fn<=nclk144;
```

```
Siguiente<=s32;  
WHEN s32 =>
```

```
A<='0';  
B<='0';  
C<=clk288;  
D<=salida1;  
E<=clk306;  
F<=clk180;
```

```
An<='0';  
Bn<='0';  
Cn<=nclk288;  
Dn<=salida2;  
En<=nclk306;  
Fn<=nclk180;
```

```
Siguiente<=s33;
```

```
WHEN s33 =>
```

```
A<='0';
```

```
B<='0';
```

```
C<=clk270;
```

```
D<=salida1;
```

```
E<=clk324;
```

```
F<=clk198;
```

```
An<='0';
```

```
Bn<='0';
```

```
Cn<=nclk270;
```

```
Dn<=salida2;
```

```
En<=nclk324;
```

```
Fn<=nclk198;
```

```
Siguiente<=s34;
```

```
WHEN s34 =>
```

```
A<='0';
```

```
B<='0';
```

```
C<=clk270;
```

```
D<=salida1;
```

```
E<=salida1;
```

```
F<=clk234;
```

```
An<='0';
```

```
Bn<='0';
```

```
Cn<=nclk270;
```

```
Dn<=salida2;
```

```
En<=salida2;
```

```
Fn<=nclk234;
```

```
Siguiente<=s35;
```

```
WHEN s35 =>
```

```
A<='0';
```

```
B<='0';
```

```
C<=clk234;
```

```
D<=salida1;
```

```
E<=salida1;
```

```
F<=clk234;
```

```
An<='0';
```

```
Bn<='0';
```

```
Cn<=nclk234;
```

```
Dn<=salida2;
```

```
En<=salida2;
```

```
Fn<=nclk234;
```

```
Siguiente<=s36;
```

```
WHEN s36 =>
```

```
A<='0';
```

```
B<='0';
```

```
C<='0';
```

```
D<=salida1;
```

```
E<=salida1;
```

```
F<=clk252;
```

```
An<='0';
```

```
Bn<='0';
```

```
Cn<='0';
```

```
Dn<=salida2;
```

```
En<=salida2;
```

```
Fn<=nclk252;
```

```
Siguiente<=s37;
```

```
WHEN s37 =>
```

```
A<='0';
```

```
B<='0';
```

```
C<='0';
```

```
D<=salida1;
```

```
E<=salida1;
```

```
F<=clk270;
```

```
An<='0';
```

```
Bn<='0';
```

```
Cn<='0';
```

```
Dn<=salida2;
```

```
En<=salida2;
```

```
Fn<=nclk270;
```

```
Siguiente<=s38;
```

```
WHEN s38 =>
```

```
A<='0';
```

```
B<='0';
```

```
C<='0';
```

```
D<=salida1;
```

```
E<=salida1;
```

```
F<=clk306;
```

```
An<='0';
```

```
Bn<='0';
```

```
Cn<='0';
```

```
Dn<=salida2;
```

```
En<=salida2;
```

Fn<=nclk306;

Siguiente<=s39;

WHEN s39 =>

A<='0';

B<='0';

C<='0';

D<=clk324;

E<=salida1;

F<=clk288;

An<='0';

Bn<='0';

Cn<='0';

Dn<=nclk324;

En<=salida2;

Fn<=nclk288;

Siguiente<=s40;

WHEN s40 =>

A<='0';

B<='0';

C<='0';

D<=clk288;

E<=salida1;

F<=clk288;

An<='0';

Bn<='0';

Cn<='0';

Dn<=nclk288;


```
En<=salida2;  
Fn<=nclk288;
```

```
Siguiente<=s41;  
WHEN s41 =>
```

```
A<='0';  
B<='0';  
C<='0';  
D<=clk288;  
E<=salida1;  
F<=clk324;
```

```
An<='0';  
Bn<='0';  
Cn<='0';  
Dn<=nclk288;  
En<=salida2;  
Fn<=nclk324;
```

```
Siguiente<=s42;  
WHEN s42 =>
```

```
A<='0';  
B<='0';  
C<='0';  
D<=clk306;  
E<=salida1;  
F<=salida1;
```

```
An<='0';  
Bn<='0';  
Cn<='0';
```

```
Dn<=nclk306;  
En<=salida2;  
Fn<=salida2;
```

```
Siguiente<=s43;  
WHEN s43 =>
```

```
A<='0';  
B<='0';  
C<='0';  
D<=clk270;  
E<=salida1;  
F<=salida1;
```

```
An<='0';  
Bn<='0';  
Cn<='0';  
Dn<=nclk270;  
En<=salida2;  
Fn<=salida2;
```

```
Siguiente<=s44;  
WHEN s44 =>
```

```
A<='0';  
B<='0';  
C<='0';  
D<=clk252;  
E<=salida1;  
F<=salida1;
```

```
An<='0';  
Bn<='0';
```

```
Cn<='0';  
Dn<=nclk252;  
En<=salida2;  
Fn<=salida2;
```

```
Siguiente<=s45;  
WHEN s45 =>
```

```
A<='0';  
B<='0';  
C<='0';  
D<=clk216;  
E<=clk342;  
F<=salida1;
```

```
An<='0';  
Bn<='0';  
Cn<='0';  
Dn<=nclk216;  
En<=nclk342;  
Fn<=salida2;
```

```
Siguiente<=s46;  
WHEN s46 =>
```

```
A<='0';  
B<='0';  
C<='0';  
D<=clk198;  
E<=clk342;  
F<=salida1;
```

```
An<='0';
```

```
Bn<='0';  
Cn<='0';  
Dn<=nclk198;  
En<=nclk342;  
Fn<=salida2;
```

```
Siguiente<=s47;  
WHEN s47 =>
```

```
A<='0';  
B<='0';  
C<='0';  
D<=clk162;  
E<=clk342;  
F<=salida1;
```

```
An<='0';  
Bn<='0';  
Cn<='0';  
Dn<=nclk162;  
En<=nclk342;  
Fn<=salida2;
```

```
Siguiente<=s48;  
WHEN s48 =>
```

```
A<='0';  
B<='0';  
C<='0';  
D<=clk162;  
E<=clk306;  
F<=salida1;
```

```
An<='0';  
Bn<='0';  
Cn<='0';  
Dn<=nclk162;  
En<=nclk306;  
Fn<=salida2;
```

```
Siguiente<=s49;  
WHEN s49 =>
```

```
A<='0';  
B<='0';  
C<='0';  
D<=clk108;  
E<=clk288;  
F<=salida1;
```

```
An<='0';  
Bn<='0';  
Cn<='0';  
Dn<=nclk108;  
En<=nclk288;  
Fn<=salida2;
```

```
Siguiente<=s50;  
WHEN s50 =>
```

```
A<='0';  
B<='0';  
C<='0';  
D<=clk90;  
E<=clk270;  
F<=salida1;
```

```

An<='0';
Bn<='0';
Cn<='0';
Dn<=nclk90;
En<=nclk270;
Fn<=salida2;

Siguiente<=s0;

```

```

end case;
end if;
end process;

```

```

end behavior;

```

Anexo B: Código en Verilog para comunicación serial.

```

module serial_rx(clk,reset,rx,suart);//modulo para recepcion de datos en serie
//entradas y salidas
input clk,reset,rx;//reloj interno-reinicio general-recibir
output reg [0:7]suart;//arreglo para almacenar datos
//señales
reg [1:0] state,nexstate;//registros de 2 bits para->estado-
estadosiguiente
parameter ini1=3'b00;//estado 1**3 bits
parameter ini0=3'b01;//estado 2**3 bits
reg control=0;// Envia '1' cuando se detecta el bit de inicio y permite
recibir los bits
reg dn=0;//indicador de cuando se terminan de recibir los bits--> '0'
significa que aun no termina de enviar los datos
reg [8:0] tempi=9'b000000000;//señal temporal para el registro de
corrimento
reg [3:0] j=4'b0000;//contador de cuantos bits llegan

```

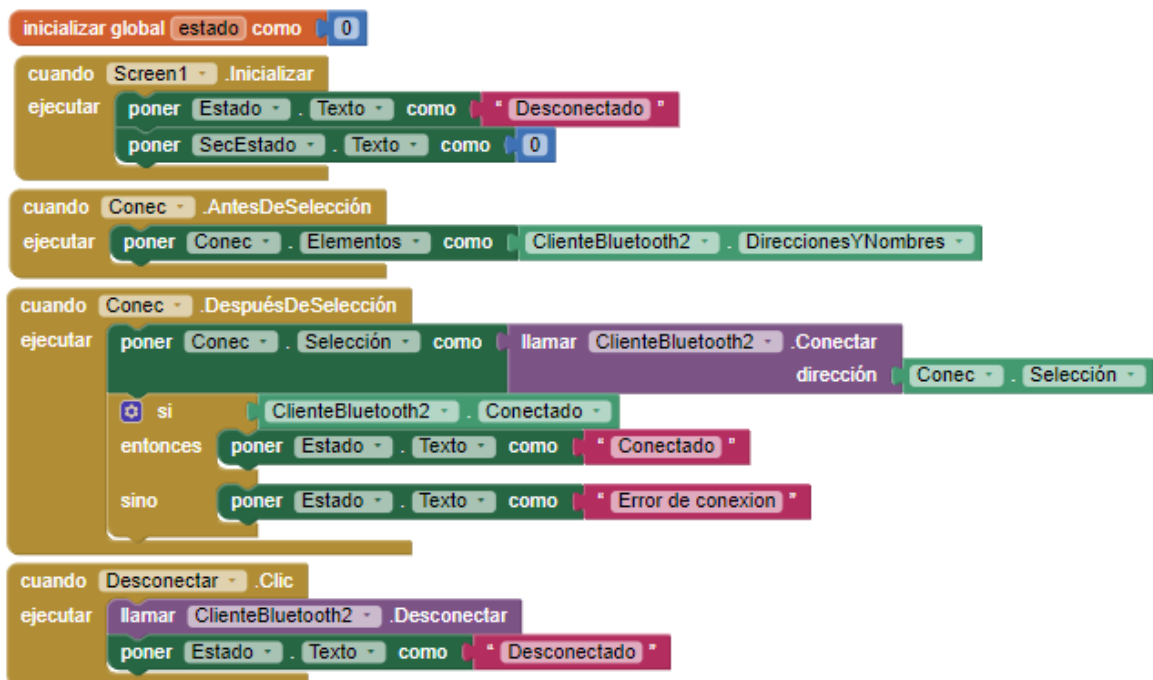


```

        j=0;
        dn=1;
        suart<=tempi[8:1];
        end
    else
        begin
            j=j+1;
            dn=0;
        end
    else
        dn=0;
    end
endmodule

```

Anexo C: Programa en bloques para interfaz gráfica.



```

cuando Tfase .Cambiado
ejecutar
  llamar ClienteBluetooth2 .EnviarNúmero1Byte
  número 37
  poner Sec .Habilitado como falso
  poner Aceptar .Habilitado como falso
  poner Play .Habilitado como falso
  poner Pausa .Habilitado como falso
  poner Siguiente .Habilitado como falso
  poner ReinSec .Habilitado como falso

```

```

cuando Cambiar .Clic
ejecutar
  poner Aceptar .Habilitado como cierto
  poner Play .Habilitado como cierto
  poner Pausa .Habilitado como cierto
  poner Siguiente .Habilitado como cierto
  poner ReinSec .Habilitado como cierto
  poner Tfase .Habilitado como cierto
  poner Sec .Habilitado como cierto
  poner Tfase .Verificado como falso
  poner Sec .Verificado como falso

```

```

cuando Sec .Cambiado
ejecutar
  llamar ClienteBluetooth2 .EnviarNúmero1Byte
  número 21
  poner Tfase .Habilitado como falso

```

```

cuando Siguiente .Clic
ejecutar
  llamar ClienteBluetooth2 .EnviarNúmero1Byte
  número 30
  poner global estado a tomar global estado + 1
  poner SecEstado .Texto como tomar global estado
  si tomar global estado = 50
  entonces poner global estado a 0

```

```

cuando ReinSec .Clic
ejecutar
  llamar ClienteBluetooth2 .EnviarNúmero1Byte
  número 35
  poner global estado a 0
  poner SecEstado .Texto como tomar global estado

```

```

cuando Reloj1 .Temporizador
ejecutar
  poner global estado a tomar global estado + 1
  poner SecEstado .Texto como tomar global estado
  si tomar global estado = 50
  entonces poner global estado a 0

```

```

cuando Aceptar .Clic
ejecutar
  llamar ClienteBluetooth2 .EnviarNúmero1Byte
  número CampoDeTexto1 .Texto
  poner Reloj1 .TemporizadorHabilitado como cierto
  poner Reloj1 .IntervaloDelTemporizador como
  si CampoDeTexto1 .Texto = 0
  entonces 0.5 x 1000
  si no CampoDeTexto1 .Texto x 1000

```

```

cuando Pausa .Clic
ejecutar
  llamar ClienteBluetooth2 .EnviarNúmero1Byte
  número 22
  poner Reloj1 .TemporizadorHabilitado como falso

```

```

cuando Play .Clic
ejecutar
  llamar ClienteBluetooth2 .EnviarNúmero1Byte
  número CampoDeTexto1 .Texto
  poner Reloj1 .TemporizadorHabilitado como cierto
  poner Reloj1 .IntervaloDelTemporizador como
  si CampoDeTexto1 .Texto = 0
  entonces 0.5 x 1000
  si no CampoDeTexto1 .Texto x 1000

```



