

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Sistema de detección en entornos de baja visibilidad con arreglos de transductores
ultrasónico y beamforming.

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Telecomunicaciones

Presentado por:

Miriam Elizabeth Mora Arteaga

Ricardo Miguel Vera Rosero

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2023

Dedicatoria

Querida mamá Aracely: A ti, mi eterna fuente de inspiración, quiero dedicarte estas líneas con amor y gratitud. Desde el primer día de mi travesía académica, has sido mi soporte, brindándome ánimo y recordándome lo inteligente que soy. Tu presencia es la luz que ilumina mi camino, y cada logro es también tuyo.

Queridos hermanos Naomi, Jeremy y mi sobrino

Axel: Son mi constante inspiración, que me motivan a superarme día a día. Deseo que sigan mis pasos en la búsqueda del conocimiento y la noble tarea de ser mejores personas. Recuerden que cada esfuerzo vale la pena, el camino al éxito está lleno de aprendizajes.

Y a ti, querida abuelita Esther: Tus cuidados y fuerza son mi refugio. Tus bonitos recuerdos me impulsan a seguir adelante. Llevas una parte de mi corazón en cada paso.

Hoy dedico este logro a todos ustedes, mi pilar.

Con todo mi amor,

Miriam Elizabeth Mora Arteaga.

Dedicatoria

A mis queridos padres, Guido y Soraya,
Este trabajo es un modesto tributo a la grandeza de su amor y sacrificio. Cada logro que celebro hoy es un testimonio de la dedicación que han depositado en mi educación. A ustedes, mis pilares inquebrantables, les dedico con profundo agradecimiento este logro. Su legado vive en cada paso que doy. Gracias por ser los faros que guían mi camino.

Agradecimientos

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a Dios por ser mi guía constante, por mostrarme el camino correcto, brindarme salud, inteligencia, perseverancia y la oportunidad de convertirme en profesional.

A ti, mamá Aracely, No tengo palabras suficientes para agradecerte. Gracias por nunca soltar mi mano en este proceso de culminar mi carrera. Estuviste presente en cada lágrima, alentándome, llenándome de ánimos y confiando en mi capacidad. Tu apoyo incondicional es el motor que impulsa mi éxito.

A mi enamorado y mejor amigo Diego Orellana, tu presencia ha sido mi mayor fortaleza. Aprecio profundamente tus consejos, apoyo incondicional, amor y la paciencia para ayudarme a no rendirme fácilmente. Gracias por enseñarme a confiar en mí misma.

A mis amigos y familiares, ustedes han sido mi refugio durante esta etapa académica. Cada palabra de ánimo ha hecho que todo sea más llevadero y menos complicado. Su amor y aliento han sido fundamentales en este viaje.

Con gratitud,

Miriam Elizabeth Mora Arteaga.

Agradecimientos

En primer lugar, agradezco a Dios, fuente de fortaleza y guía en cada paso de mi camino académico.

A mis amados padres, Guido y Soraya, les debo más de lo que las palabras pueden expresar. Su esfuerzo incansable y apoyo constante han sido el cimiento de mi educación. Cada sacrificio que han hecho ha contribuido a este momento culminante. Mi gratitud hacia ustedes es inmensurable.

A mis queridos hermanos, David y Tatiana, quienes siempre han estado a mi lado. Su ayuda, aliento y compañía han hecho este viaje más significativo. Gracias por ser mi red de apoyo incondicional.

A mi amada prometida, Elizabeth, mi roca en los momentos difíciles. Aprecio profundamente tu comprensión, paciencia y por no permitirme renunciar a mis sueños. Tu amor ha sido mi impulso y motivación constante.

A todos quienes han formado parte de mi trayectoria académica, ya sea con consejos, enseñanzas o simplemente con su presencia, les agradezco de corazón. Este logro es el resultado de la colaboración y el apoyo de muchos. ¡Gracias a todos por ser parte de mi camino!

Declaración Expresa

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución Miriam Elizabeth Mora Arteaga y Ricardo Miguel Vera Rosero damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Miriam Elizabeth Mora
Arteaga



Ricardo Miguel Vera
Rosero

Evaluadores

Ms.C. Verónica Soto Vera

Profesor de Materia

Herman Veriñaz Jadán, Ph.D.

Tutor de proyecto

Resumen

Este proyecto se enfoca en el desafío de detectar objetos en entornos de baja visibilidad, crucial para las operaciones de búsqueda y rescate. El objetivo principal es desarrollar una solución que emplee ondas ultrasónicas para la detección de objetos, ofreciendo así una herramienta valiosa tanto para la formación académica de los estudiantes como para aplicaciones prácticas en telecomunicaciones.

El proyecto se basó en el uso de transductores ultrasónicos, la implementación de arreglos en fase (phased arrays) y la aplicación de técnicas de procesamiento de señales. Este enfoque estuvo fundamentado en el aprovechamiento de recursos educativos abiertos, adaptando sus principios a nuestro contexto específico.

Los resultados demostraron la capacidad del sistema para detectar objetos en tiempo real, evidenciando su utilidad en condiciones de visibilidad limitada. Además, se desarrolló una interfaz de usuario intuitiva en Python, que facilita significativamente la interacción con el sistema y la interpretación de los datos recolectados.

El prototipo desarrollado es una herramienta flexible y económica, adecuada para su uso en contextos académicos y comerciales. Este trabajo proporciona una base para futuras investigaciones y el desarrollo de mejoras subsiguientes.

Palabras Clave: Ondas Ultrasónicas, Sistema de detección, Visibilidad, Arreglos de transductores

Abstract

This project focuses on the challenge of detecting objects in low-visibility environments, which is crucial for search and rescue operations. The main goal is to develop a solution that employs ultrasonic waves for object detection, thus offering a valuable tool for both the academic training of students and practical applications in telecommunications.

The project was based on the use of ultrasonic transducers, the implementation of phased arrays, and the application of signal processing techniques. This approach leverages open educational resources, adapting their principles to our specific context.

The results demonstrated the ability of the system to detect objects in real-time, highlighting its utility in limited visibility conditions. Furthermore, an intuitive user interface was developed in Python, significantly facilitating interaction with the system and the interpretation of the collected data.

The developed prototype is a flexible and cost-effective tool, suitable for use in both academic and commercial contexts. This work lays a foundation for future research and the development of subsequent improvements.

Keywords: *Ultrasonic Waves, Sensing System, Visibility, Transducer Arrays*

Índice general

Resumen	I
Abstract	II
Índice general	III
Abreviaturas	V
Simbología	VI
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	VIII
Índice de Anexos	IX
Capítulo 1	1
1.1. Introducción	2
1.2. Descripción del problema	3
1.3. Justificación del problema	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. Marco teórico	5
1.5.1. Detección de objetos	5
1.5.2. El sonido	6
1.5.3. Ondas ultrasónicas	7
1.5.4. Transductor ultrasónico	8
1.5.5. Beamforming	9
1.5.6. Phase array	9
1.5.7. Procesamiento de señales	10
Capítulo 2	13
2.1. Metodología	14

2.2.	Proceso de diseño	14
2.3.	Metodología de diseño.....	15
2.3.1.	Validación de requerimiento y limitaciones.....	15
2.3.2.	Hardware	15
2.3.3.	Software	23
Capítulo 3		25
3.1.	Resultados y análisis.....	26
3.2.	Implementación del sistema	26
3.2.1.	Sistema de prueba.....	26
3.2.2.	Sistema final.....	29
3.3.	Implementación del PCB.....	35
3.4.	Interfaz del usuario	36
3.5.	Análisis final.....	37
3.5.1.	Detección de objetos a diferentes distancias	37
3.6.	Análisis del costo.....	41
3.6.1.	Costo de elementos para la detección en entornos de baja visibilidad.....	41
3.6.2.	Costo de implementación	42
Capítulo 4		43
4.1.	Conclusiones y recomendaciones	44
4.1.1.	Conclusiones	44
4.1.2.	Recomendaciones.....	45
Referencias		46
Anexo		49

Abreviaturas

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

Tx Transmisión

Rx Recepción

PCB Placa de circuito impreso

CC Corriente continua

OPAMP Amplificador Operacional

ENA Habilitar

STBY En espera

COM Puerto de comunicación

3D Tridimensional

Simbología

Hz	Hercio
KHz	Kilo Hercios
MHz	Megahercios
m	Metro
cm	centímetro
v	Voltaje

Índice de figuras

Figura 1.1 Clasificación del sonido a partir de la frecuencia	8
Figura 2.1 Diagrama de flujo del sistema	14
Figura 2.2 Diseño mecánico del sensor ultrasónico	18
Figura 2.3 Sistema de transmisión	18
Figura 2.4 Sistema de recepción	20
Figura 2.5 Diagrama de flujo del sistema	23
Figura 2.6 Diagrama de flujo de la interfaz	24
Figura 3.1 Diagrama Esquemático del sistema de prueba	27
Figura 3.2 Prueba de calidad del sistema de prueba	28
Figura 3.3 Prueba de calidad del sistema de prueba	29
Figura 3.4 Diagrama esquemático del sistema final	30
Figura 3.5 Diagrama esquemático del sistema transmisor	32
Figura 3.6 Diagrama esquemático del sistema receptor	33
Figura 3.7 Prueba de calidad del sistema final	34
Figura 3.8 Pruebas del sistema final	34
Figura 3.9 Implementación PCB	35
Figura 3.10 Interfaz de usuario a) pantalla de inicio b) pantalla de escaneo	36
Figura 3.11 Objetos de prueba	37
Figura 3.12 Prueba 1	38
Figura 3.13 Prueba 2	39
Figura 3.14 Prueba 3	40

Índice de tablas

Tabla 1.1 Velocidades del sonido en diferente medio	7
Tabla 2.1 Requerimiento del sistema	15
Tabla 2.2 Características de un transductor ultrasónico.....	17
Tabla 2.3 Comparación entre Esp32 y Arduino uno R3	21
Tabla 2.4 Componentes relevantes del sistema.....	22
Tabla 3.1 Entrada/Salidas funciones	31
Tabla 3.2 Costo de elementos para la detección en entornos de baja visibilidad	41
Tabla 3.3 Costo de Implementación.....	42

Índice de Anexos

Anexo 1	Tabla de especificaciones del modelo CUSA-T80-18-2400-TH	50
Anexo 2	Tabla de especificaciones del modelo CUSA-R80-18-2400-TH	51
Anexo 3	Tabla de especificaciones del modelo TC78H621FNG	52
Anexo 4	Tabla de especificaciones del modelo Lm324.....	52
Anexo 5	Diagrama PCB de la cara superior	53
Anexo 6	Diagrama PCB de la cara inferior.....	53
Anexo 7	Pruebas finales del sistema implementado	54

Capítulo 1

1.1. Introducción

Las telecomunicaciones desempeñan un papel fundamental a nivel mundial, transformando no solo la manera en que se accede a la información y servicios de forma instantánea, sino también cómo se interactúa con el mundo. Esta revolución digital ha redefinido numerosos aspectos de la vida cotidiana, incluyendo la educación. En particular, ha promovido significativamente la educación a distancia, ampliando las oportunidades de aprendizaje más allá de las limitaciones geográficas y contribuyendo a democratizar el acceso al conocimiento. Además, las telecomunicaciones sirven como un motor económico vital, facilitando las operaciones globales de empresas y fomentando el crecimiento en diversos sectores [1].

La evolución de las telecomunicaciones impulsa innovaciones en diversos campos, extendiéndose más allá de las áreas tradicionalmente vinculadas con los principios de comunicación, tales como la gestión inteligente de redes y la ciberseguridad. Esta progresión también ha tenido un impacto significativo en dominios menos asociados directamente con las telecomunicaciones, como el desarrollo de sistemas de detección en entornos de visibilidad restringida. Dichos sistemas se aplican en sectores como la búsqueda y rescate, exploración submarina, y seguridad y defensa, donde tecnologías avanzadas como la visión nocturna, la termografía, el sonar y el radar son indispensables para garantizar la seguridad y eficacia ante la limitada visibilidad [2].

Considerando la incitación de visibilidad reducida, la exploración de tecnologías como los arreglos de transductores ultrasónicos y la técnica de beamforming se plantea como posibles soluciones. Estas tecnologías poseen el potencial de mejorar la precisión en la detección incluso en condiciones de visibilidad limitada, lo que podría resultar beneficioso en áreas como exploración submarina, búsqueda y rescate. Este enfoque podría contribuir a mejorar la seguridad y eficiencia en contextos con visibilidad reducida.

1.2. Descripción del problema

Los entornos ruidosos o con visibilidad limitada dificultan la percepción precisa, especialmente en áreas de exploración, búsqueda y rescate. Las soluciones convencionales basadas en visión óptica o radiofrecuencia a menudo enfrentan dificultades en estos ambientes debido a obstrucciones, interferencias o condiciones no ideales. Las ondas ultrasónicas surgen como una alternativa viable en este contexto. No obstante, su implementación exige conocimiento en técnicas especializadas de procesamiento de señales, el uso de arreglos en fase (phased arrays) y conformación de haces (beamforming).

En este trabajo, el problema a abordar es la brecha en la formación académica en el uso de arreglos en fase (phased arrays) y conformación de haces (beamforming) de ondas ultrasónicas. Específicamente, en aplicaciones para detección en entornos con visibilidad limitada como condiciones de poca luz, niebla, humo o cualquier situación donde la visión convencional se vea restringida.

1.3. Justificación del problema

La experiencia práctica en técnicas avanzadas de telecomunicaciones es importante para el desarrollo educativo de los profesionales. Al abordar esta brecha en su formación, no solo se enriquece su educación, sino que también se les dota de herramientas esenciales para afrontar los retos actuales en el mundo de las telecomunicaciones. Al desarrollar un prototipo que explora el uso de arreglos de fase y beamforming, se abren puertas a soluciones innovadoras. Estas propuestas pueden representar alternativas más eficientes y rentables en comparación con los métodos tradicionales, aportando beneficios tanto al sector educativo como profesional desarrollando versiones mejoradas orientadas a aplicaciones de exploración y rescate en las telecomunicaciones.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo general*

Diseñar e implementar un prototipo de sistema de detección ultrasónica, utilizando un arreglo de transductores ultrasónicos y explorando la aplicación de la técnica de beamforming.

1.4.2. *Objetivos específicos*

- Diseñar e implementar el sistema electrónico de detección ultrasónica, específicamente enfocándose en el ensamblaje de componentes electrónicos y la construcción del arreglo de transductores ultrasónicos.
- Desarrollar una interfaz de usuario en Python para visualizar en el computador las imágenes generadas por el sistema.
- Investigar la técnica de beamforming y su aplicabilidad en el sistema. Documentar los desafíos encontrados en su implementación, ofreciendo una base para futuros desarrollos.
- Elaborar un manual técnico que detalle la implementación, funcionamiento y pruebas del sistema.

1.5. Marco teórico

1.5.1. *Detección de objetos*

Es una tarea primordial en la visión por computadora, utilizada para identificar elementos específicos, como humanos, animales, autos o edificios, en imágenes digitales como fotos o cuadros de video. Su propósito principal es crear modelos computacionales que respondan a la pregunta fundamental de las aplicaciones de visión por computadora: “¿Qué objetos están presentes y dónde se encuentran?” [3].

1.5.1.1. Detección de objetos en entornos con visibilidad limitada. En entornos con visibilidad limitada, como condiciones de niebla o baja iluminación, la detección de objetos resulta indispensable para la seguridad y vigilancia. Este sistema de detección impulsa la investigación y desarrollo de algoritmos avanzados en el procesamiento de imágenes y visión por computadora. La visión artificial o por computadora es una rama de la ciencia que emplea técnicas para capturar, procesar y analizar imágenes de las máquinas, de tal manera que estas puedan ser analizadas por sistemas automatizados [4].

Este sistema es capaz de apoyar decisivamente a actividades en el marco de la robótica como una herramienta de respuesta a desastres naturales, aplicaciones de reconocimiento, búsqueda y rescate de supervivientes, logística, asistencia médica y evacuación de víctimas. Pero métodos convencionales como sistemas de visión nocturna pueden llegar a producir gigabytes de datos en imágenes sin garantías de que esa información sea la necesaria.

Por otra parte, un método diferente es la visión térmica, la cual puede ofrecer datos importantes en entornos de baja visibilidad, pero posee una escasa calidad o resolución de imagen. De acuerdo con el estudio de estos sistemas se ha buscado nuevos métodos para la detección de objetos, siendo el sonido una opción, ya que sus características, como la rápida propagación en diferentes medios, abre muchas posibilidades para el desarrollo de nuevas tecnologías según [5].

1.5.2. El sonido

El sonido constituye un acontecimiento físico ondulatorio provocado por oscilaciones de partículas, dicho de otra forma, es una forma de energía vibracional que se propaga a través de un medio, generalmente el aire, en forma de ondas auditivas. Estas ondas de presión son captadas por nuestros oídos y convertidas en señales eléctricas que el cerebro interpreta como sonidos. La frecuencia de estas vibraciones se traduce en nuestra percepción del tono, mientras que la amplitud determina el volumen del sonido [6].

1.5.2.1. Velocidad de propagación. Como se mencionó anteriormente, las ondas sonoras requieren de un medio para poder propagarse. Por lo tanto, las características de este medio como la temperatura, la humedad, densidad y elasticidad van a determinar la velocidad de propagación.

En el medio más común, es decir, el aire, el sonido se mueve aproximadamente a 340 m/s. Si se analiza la Tabla 1.1 se puede concluir que la proximidad de las partículas del medio facilita la propagación. Por eso en un medio gaseoso como el aire la velocidad de propagación es menor a un medio sólido donde las partículas están una junto a otra, asimismo se observa que, en el vacío, donde no existe un medio por el cual desplazarse, el sonido no se propaga [7].

Tabla 1.1

Velocidades del sonido en diferente medio

ESTADO	MEDIO	VELOCIDAD DEL SONIDO (m/s)
Gaseoso	Aire (20°C)	340
	Hidrogeno (0°C)	1286
	Oxigeno (0°C)	317
	Helio (0°C)	972
Líquido	Agua (25°C)	1493
	Agua de mar (25°C)	1533
Sólido	Aluminio	5100
	Cobre	3560
	Hierro	513
	Plomo	1322
	Caucho	54
Vacío	Vacío	0

Nota: Tabla extraída de [7]

1.5.3. Ondas ultrasónicas

El sonido, como fenómeno acústico, abarca un amplio rango de frecuencias, desde infrasonidos (por debajo de 20 Hz) hasta ultrasonidos (por encima de 20000 Hz). Mientras que el sonido audible se encuentra típicamente en el rango de 20 Hz a 20000 Hz [8] . El ultrasonido se extiende más allá de esta franja y se manifiesta en frecuencias que van desde unos pocos kilohercios hasta varios gigahercios como se observa en la Figura 1.1.

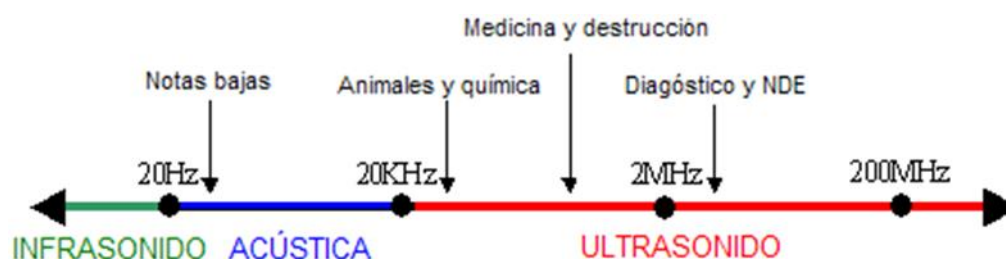
Este rango de ultrasonido ofrece aplicabilidad en áreas como la medicina, la industria y la detección de objetos. En medicina, por ejemplo, se emplea para realizar imágenes de órganos internos, controlar el desarrollo fetal y fragmentar cálculos renales. En la industria, se utiliza para inspeccionar la calidad de materiales y su soldadura, así como para medir el espesor de recubrimientos. Además, en la detección, los sistemas de ultrasonido pueden localizar objetos

sumergidos en el agua o detectar la presencia de obstáculos en vehículos autónomos. El ultrasonido, con su capacidad para abordar una amplia gama de frecuencias, se convierte en una herramienta importante para diversas aplicaciones tecnológicas y científicas [9].

Cuando las ondas de sonido chocan con un obstáculo impenetrable, rebota en la superficie del objeto, un fenómeno conocido como reflexión. Si el obstáculo es estacionario, como una pared, la velocidad de las ondas se mantiene constante. Por lo tanto, en la propagación del sonido, también se aplican las leyes de reflexión, asegurando que estas ondas sigan patrones predecibles cuando interactúan con objetos en su camino [10].

Figura 1.1

Clasificación del sonido a partir de la frecuencia



Nota: Imagen licenciada bajo CC BY-SA 3.0, obtenida de [11]

1.5.4. Transductor ultrasónico

Es un aparato capaz de cambiar una forma de energía por otra. Por ejemplo, un convertidor de ultrasonido, que altera la energía sonora a energía eléctrica en forma de onda y viceversa. Esta habilidad es la causa por la cual la mayoría de los convertidores de ultrasonido resultan adecuados para empleos de pulso-eco [12].

Este aparato opera como generador de ondas ultrasónicas cuando se activa adecuadamente mediante una fuente de energía eléctrica, entonces emite ondas ultrasónicas. Según el artículo elaborado por Bill Schweber se debe considerar opciones de detección adecuadas, muchas de las cuales pueden basarse en tecnologías bien establecidas para evitar la complejidad. Donde

menciona que la energía ultrasónica se utiliza ampliamente para detectar la presencia de objetos cercanos e incluso determinar su distancia, así como para medir caudales de fluidos [13].

1.5.5. *Beamforming*

El término "beamforming" es una adaptación léxica que surge de la conjunción de los términos ingleses "beam" (rayo) y "forming" (formación). En el ámbito de la ingeniería de comunicaciones, acústica y procesamiento de señales, se utiliza este concepto para hacer referencia a la transmisión y recepción direccionales de señales [14].

En esencia, beamforming representa una metodología en la que diversos sensores de una matriz o conjunto (array) registran la señal emitida por una fuente acústica. A través de operaciones matemáticas combinadas con retardos aplicados a las señales capturadas, logrando determinar el origen de dicha señal sonora. Esta metodología posibilita la localización de fuentes de ruido presentes en el espacio fundamentando el uso de patrones directivos en los sistemas receptores, posibilitando la captación selectiva de señales provenientes de ubicaciones particulares y reduciendo la influencia de señales no deseadas, clasificándose, por ende, como un tipo de filtrado espacial, en conjunto con técnicas temporales y frecuenciales [14, pp. 1,2].

Los sistemas ultrasónicos, ya sea en aplicaciones sonares con frecuencias bajas dentro del rango ultrasónico o en dispositivos médicos con frecuencias elevadas del orden de los MHz, se rigen por fundamentos físicos y algoritmos similares en su operatividad.

Para este contexto, el beamforming se aplica en la recepción de ondas planas, es decir, aquellas ondas que provienen de una región distante y se sitúan en el campo lejano de los transductores [14].

1.5.6. *Phase array*

Un arreglo de fases o phase array se refiere a una disposición específica de múltiples transductores, antenas o elementos emisores/receptores, organizados de manera que puedan

controlar la fase relativa de las ondas que emiten o reciben. Esto permite direccionar o enfocar las ondas emitidas en una dirección específica.

Generalmente, los arreglos consisten en un transductor compuesto entre 16 y hasta un máximo de 256 elementos individuales según se indica en [16]. Cada uno de estos elementos puede operar de forma independiente, permitiendo la generación de pulsos de manera separada. Por lo general, se organizan en una disposición lineal, formando así una matriz para su funcionamiento.

1.5.6.1. Principio de funcionamiento del phased array. Un conjunto de phased array funciona basándose en un principio físico que permite modificar las ondas sonoras, alterando el intervalo de tiempo entre secuencias de pulsos ultrasónicos. Esto ocasiona que los frentes de onda individuales producidos por cada componente de la matriz se combinen entre sí, logrando la adición o anulación de energía de manera predecible. Este proceso configura de manera efectiva la forma y dirección del haz de sonido [16, p. 18].

1.5.7. *Procesamiento de señales*

El procesamiento digital de señales aborda la descripción, cambio y manejo de señales discretas desde la perspectiva de la información que contienen. En el caso de numerosas señales provenientes de magnitudes del mundo real, como sonidos, temperatura o luz, se requiere un transductor o sensor capaz de convertir la magnitud física en una variable eléctrica, generalmente una tensión según [18].

1.5.7.1. Procesamiento digital de señales ultrasónicas. Señales ultrasónicas derivadas de la emisión y recepción de ondas ultrasónicas no solo permite visualizar, sino también entender de manera precisa los fenómenos que ocurren durante la transmisión de ultrasonidos. Esta técnica brinda una visión más profunda de cómo se comportan las ondas ultrasónicas al interactuar con la estructura interna, analizando la propagación de las ondas, su velocidad, las reflexiones o refracciones que surgen en la interfaz entre diferentes materiales presentes en la muestra.

En otras palabras, el procesamiento digital de estas señales no solo provee una imagen, sino que también revela información valiosa sobre la naturaleza de los materiales y sus características internas en función de la interacción con los ultrasonidos [19].

Capítulo 2

2.1. Metodología

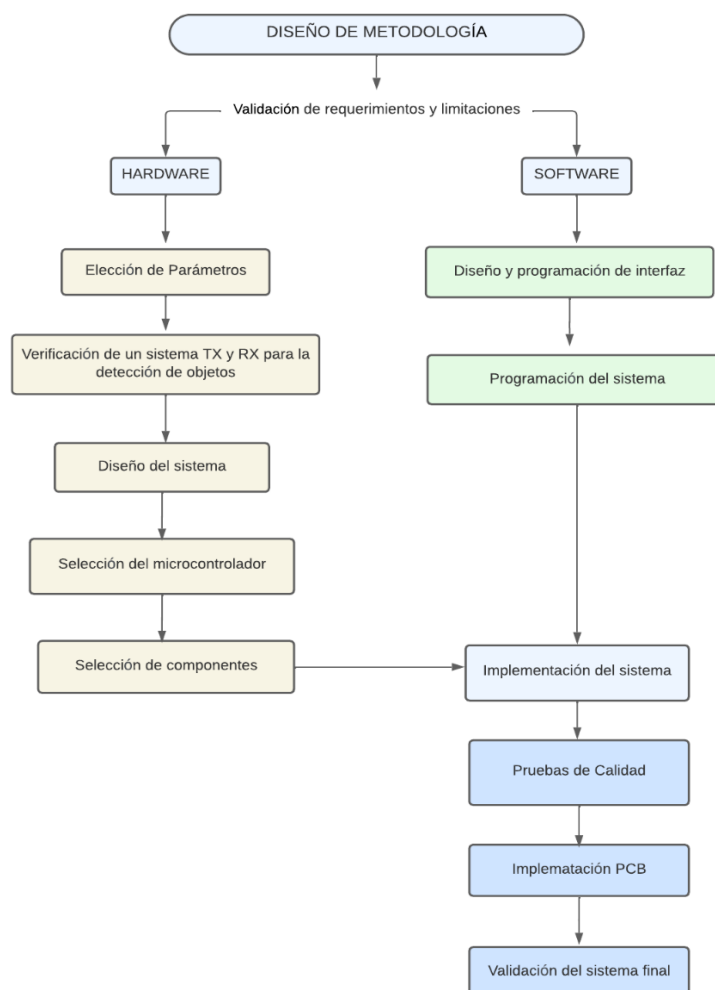
En este capítulo, se detalla la metodología empleada para el desarrollo del prototipo, con un enfoque centrado en identificar y seleccionar una solución funcional que cumpla con los requisitos y limitaciones establecidos para su diseño.

2.2. Proceso de diseño

El proceso de diseño se muestra en la Figura 2.1 y se describe en las secciones siguiente de este capítulo.

Figura 2.1

Diagrama de flujo del sistema



2.3. Metodología de diseño

2.3.1. Validación de requerimiento y limitaciones

Para iniciar la metodología de diseño, se analizó los requisitos específicos del sistema de detección en entornos de baja visibilidad, teniendo en cuenta el uso previsto. Los requerimientos de accesibilidad y desarrollo de guías instructivas del sistema se muestran en la Tabla 2.1

Tabla 2.1

Requerimiento del sistema

Accesibilidad	Facilitar un prototipo final manejable con una interfaz intuitiva que permita al usuario entender el sistema de una mejor manera.
Guías instructivas	Proporcionar un manual de conexiones, programación, funcionamiento y todo lo pertinente en el diseño e implementación del prototipo.

2.3.2. Hardware

Esta sección describe la parte física del diseño del sistema, abordando la selección de parámetros, microcontrolador, componentes electrónicos y la implementación del sistema. En este contexto, se determinó cómo llevar a cabo la configuración y elección adecuada de los elementos físicos necesarios para el funcionamiento del sistema, con el objetivo de garantizar un rendimiento eficiente y una implementación exitosa.

2.3.2.1. Selección de parámetros. Para el desarrollo del sistema, se consideraron parámetros clave para garantizar su eficacia y accesibilidad, tales como la frecuencia de operación ultrasónica, la resolución espacial, el alcance de detección y el consumo de energía.

2.3.2.1.1. Frecuencia de operación ultrasónica: El sistema utiliza un arreglo de transductores ultrasónicos. Estos dispositivos tienen la función de generar y detectar ondas ultrasónicas, operando a una frecuencia de 40 kHz [20].

2.3.2.1.2. Resolución espacial: Para intentar lograr una resolución espacial focalizada, se exploró la técnica de beamforming. Esta técnica se investigó en un arreglo de fase generado por un conjunto de transductores ultrasónicos ubicados linealmente, con una distancia mínima de separación, buscando obtener un haz más limpio y centrado. Se encontró que, teóricamente, a medida que se incrementa el número de transductores ultrasónicos en el conjunto, la resolución espacial mejora en distinguir detalles en la imagen [21].

2.3.2.1.3. Alcance de detección: De acuerdo con las especificaciones técnicas de los transductores son rango detectable es de 18 m. Sin embargo, para garantizar un nivel de confianza en el sistema de transductores ultrasónicos, se opera con un alcance mínimo de 30 cm y máximo de 180 cm [22].

2.3.2.1.4. Consumo de energía: El dispositivo opera eficientemente dentro de los límites de potencia proporcionados por un puerto USB de 5V del PC, lo cual es beneficioso para aplicaciones que demandan portabilidad y una autonomía prolongada.

2.3.2.2. Verificación del sistema de transmisión y recepción para la detección de objetos. En esta fase inicial, se examinaron las especificaciones técnicas del sistema de transmisión y recepción, dando un enfoque importante a la frecuencia de operación ultrasónica, señales detectadas, alcance de detección entre otros parámetros. Además, se llevó a cabo el análisis de las señales obtenidas tanto en el sistema de transmisión como recepción con la finalidad de tomar en cuenta este resultado como una alternativa inicial para la definición del prototipo final.

Durante el proceso de verificación, se evaluó la interfaz de usuario a partir de una aplicación de terceros [23] para comprobar según [24] el correcto funcionamiento del sistema donde se mostró la imagen en tiempo real de los objetos detectado. También se consideró el uso y funcionamiento de componentes específicos, como transductores, componentes electrónicos y microcontrolador, para comprender su contribución general en el sistema.

Asimismo, se identificaron limitaciones en el sistema receptor con respecto a la amplificación de señal, lo que facilitó la exploración de posibles mejoras y la optimización del diseño para superar estas limitaciones durante el desarrollo del sistema. Por lo tanto, esta etapa inicial proporcionó las bases esenciales para el diseño final. Los detalles de estas mejoras y la configuración final se presentan en la sección siguiente y en el Capítulo 3.

2.3.2.3. Diseño del sistema. El diseño del sistema final se conformó por un sistema de transmisión (Tx) y recepción (Rx). Donde el sistema Tx utilizó un conjunto de 8 transductores ultrasónicos, mientras que para el sistema de Rx se operó con un transductor ultrasónico.

A continuación, se describen los sistemas de Tx y Rx.

2.3.2.3.1. Sistema (Tx). En esta etapa, se considera el uso de un arreglo de transductores ultrasónicos: CUSA-T80-18-2400-TH. Este tipo específico de transductor se seleccionó debido a sus características para la eficacia y el rendimiento óptimo en la transmisión de señales ultrasónicas, las características de transductor ultrasónico se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2

Características de un transductor ultrasónico

Características	Lámina de aluminio
	De tipo abierto
	Transmisor
	Alcance detectable 18 metros

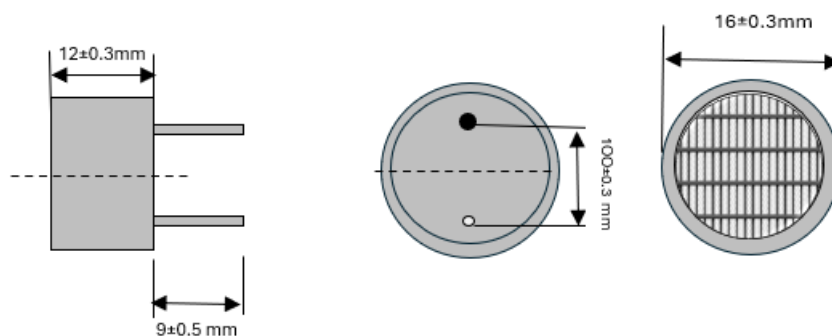
Nota: Extraído de [22].

Después de seleccionar el componente principal para el sistema de transmisión, se consideró la ubicación y distribución de dicho componente para garantizar su correcto funcionamiento en la generación y envío de señales ultrasónicas desde los transductores hacia el entorno donde se encuentra el objeto a detectar. En este proceso, se debió considerar tales dimensiones del componente. Observe en la Figura 2.2 las respectivas medidas del transductor que

sirvió como clave para la ubicación de cada componente y así poder obtener el arreglo de transductores deseado. [25].

Figura 2.2

Diseño mecánico del sensor ultrasónico

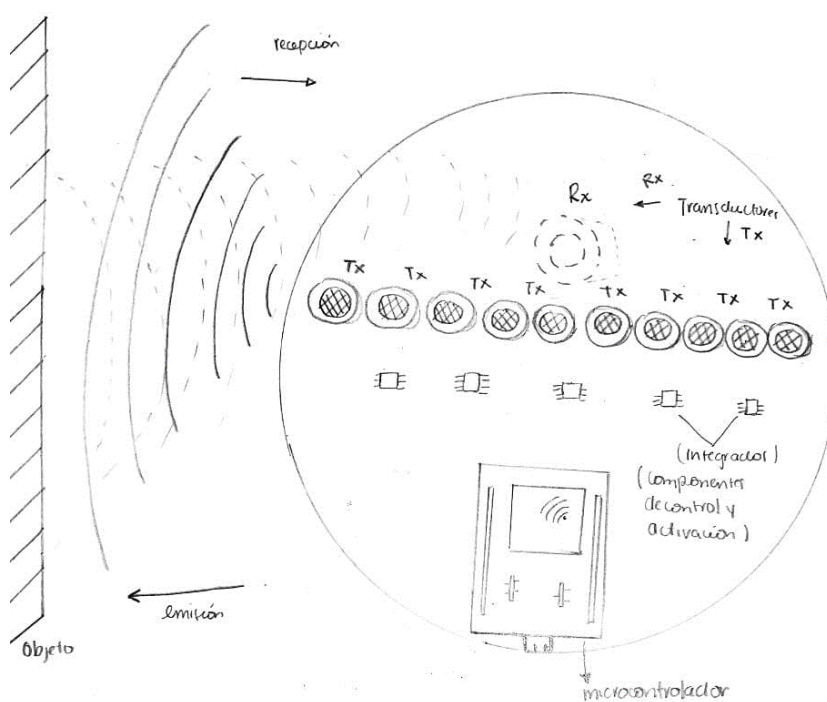


Nota: Imagen extraída de [25]

Después de haber realizado un análisis del componente principal, se analizó con el desarrollo de una alternativa de diseño para el sistema propuesto. Para una visualización de este diseño, observe la Figura 2.3.

Figura 2.3

Sistema de transmisión

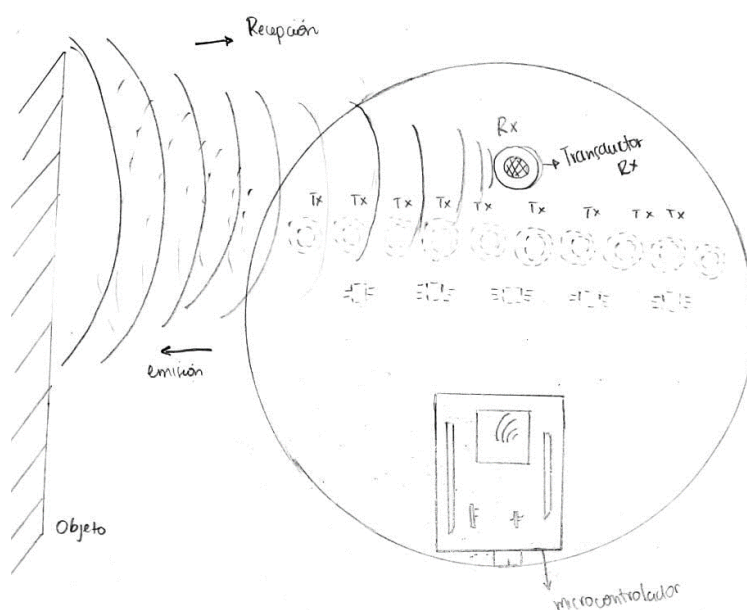


Conforme al artículo [21], el sistema fue diseñado para emitir señales en direcciones específicas usando un arreglo lineal de transductores ultrasónicos. Se optó por una disposición en la que los transductores se colocan lo más cerca posible entre sí, para minimizar la formación de lóbulos de rejilla durante la transmisión de la señal. Estos lóbulos, que surgen cuando el espaciado entre transductores es grande, son patrones de radiación indeseados que pueden aparecer además del lóbulo principal, reduciendo la eficacia de la transmisión dirigida.

Esta configuración de formación de haces lineales requiere alineación cuidadosa de los transductores, donde cada uno contribuye a la generación de un haz enfocado en una dirección específica.

De la misma manera es relevante mencionar que la cantidad de componentes para el arreglo fue importante para obtener una buena resolución espacial capaz de distinguir con claridad el objeto y un haz más focalizado en el área de estudio [21]. A partir de este detalle, se enfocó en un sistema de 8 transductores ultrasónicos con sus respectivos componentes de activación.

2.3.2.3.2. Sistema (Rx). El sistema receptor incluye un transductor ultrasónico de tipo CUSA-R80-18-2400-TH diseñado para recibir la señal emitida por un arreglo de transductores, tal como se observa en la Figura 2.4 el transductor Rx se encarga de recibir las señales emitidas por el arreglo de transductores.

Figura 2.4*Sistema de recepción*

Considerando la posible atenuación de la señal del transductor ultrasónico durante la transmisión, se incorporó un amplificador de señal en el sistema receptor. Esta medida, inspirada en estrategias documentadas en [21] y [23] fue necesaria para mejorar la señal recibida evitando la distorsión de señal y la presencia de ruido asegurando así una detección de objetos más precisa.

La alternativa de utilizar un amplificador de señal en lugar de un filtro se basó en la necesidad de aumentar la amplitud de la señal ultrasónica sin provocar distorsiones según [26]. Dado que el reto principal era la atenuación de la señal con la distancia y no la interferencia de frecuencias no deseadas, el amplificador se presentó como la opción más adecuada para cumplir con este requisito específico del sistema.

2.3.2.4. Selección del microcontrolador

Tabla 2.3

Comparación entre Esp32 y Arduino uno R3

Características	MODEMCU-32 30-PIN Esp32 WIFI	Arduino Uno R3
Arquitectura	ESP32	ATmega328P
Frecuencia de reloj	Hasta 240 MHz	16 MHz
Conectividad inalámbrica	Wi-Fi (802.11b/g/n), Bluetooth	No
Memoria Flash	4 MB (SPI Flash)	32 KB (Flash)
Memoria RAM	520 KB (interna)	2 KB (SRAM)
Entradas/Salidas (GPIO)	30	14 (6 PWM)
Interfaces	I2C, SPI, UART, GPIO, PWM	I2C, SPI, UART
Alimentación	2.2 - 3.6V	7 - 12V (recomendado), 6-20V (máximo)
Tamaño de memoria del programa	32KB	4MB
Canales ADC	8	18
Entorno de Desarrollo	Arduino IDE, PlatformIO, ESP-IDF (C/C++)	Arduino IDE
Precio USD	\$13,00	\$18.00
Razón de Elección	Mayor potencia de procesamiento y conectividad inalámbrica.	Limitaciones en memoria, potencia de procesamiento y falta de conectividad inalámbrica.

En la evaluación de microcontroladores para el proyecto, se comparó el MODEMCU-32 30-PIN Esp32 WIFI con el Arduino Uno, un estándar común en proyectos de electrónica y robótica, para determinar la mejor opción. La Tabla 2.3 resume diferentes características del MODEMCU-32 30-PIN Esp32 WIFI vs Arduino, donde el microcontrolador seleccionado fue el Esp32, debido a su mayor potencia de procesamiento, costo y una mayor cantidad de entradas/salidas (GPIO) necesarias para la comunicación con los demás elementos de control como

integrados y sensores. Por esta razón, no se optó por opciones más complejas como la Raspberry Pi, debido a su costo, ni por opciones más simples como el Esp8266, por su limitada cantidad de procesamiento que complica el uso de multitareas.

En la Tabla 2.4 se muestra los principales componentes del sistema, cuyas especificaciones se detallan a continuación.

Tabla 2.4

Componentes relevantes del sistema

Descripción	Modelo	Referencia
Transductor Ultrasónico	CUSA-T80-18-2400-TH	[25]
Transductor Ultrasónico	CUSA-R80-18-2400-TH	[26]
Dual-Bridge Driver IC	TC78H621FNG	[27]
Amplificador Operacional	Lm324	[28]

- **Transductores ultrasónicos**

Los modelos de transductores ultrasónicos usados son CUSA-T80-18-2400-TH y CUSA-R80-18-2400-TH y sus especificaciones técnicas están en Anexo 1 y Anexo 2.

- **Dual-bridge driver IC**

El TC78H621FNG es un circuito integrado de controlador de puente dual fabricado semiconductor & Storage. Está diseñado para controlar motores de corriente continua (CC) con escobillas o motores paso a paso. Las especificaciones de este circuito están en el Anexo 3.

- **Amplificador operacional**

El LM324 constituye un chip integrado que engloba cuatro amplificadores operacionales (OPAMP). La principal ventaja de este dispositivo reside en el uso de sus pines, ya que requiere únicamente dos pines para la alimentación [28]. Las características técnicas de este amplificador se detallan el Anexo 4.

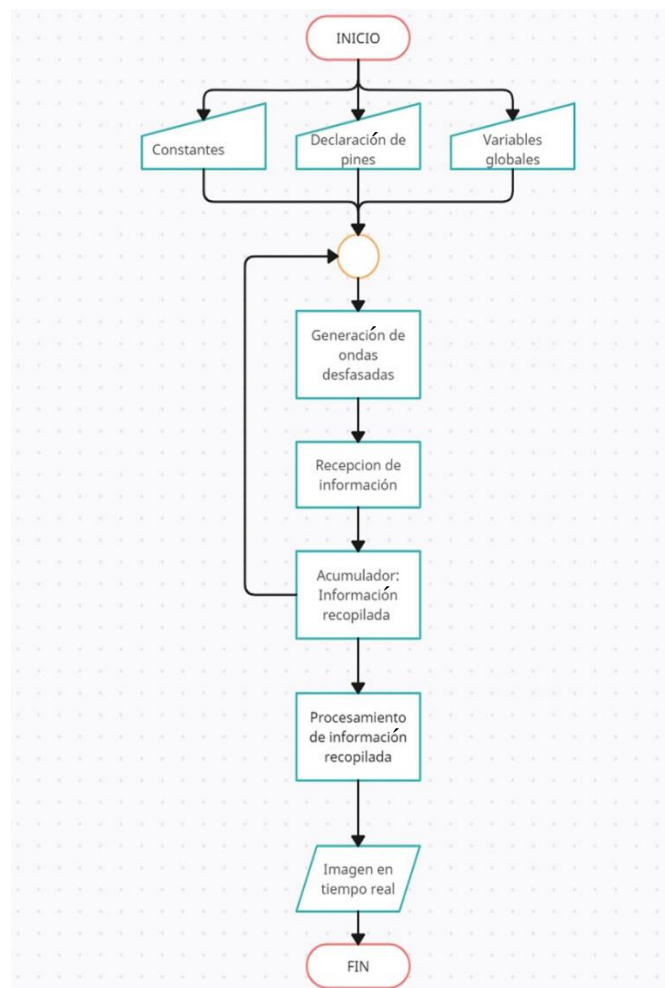
2.3.3. Software

El software se diseñó para facilitar la comunicación entre el microcontrolador, componentes de control y manejo de datos. Se estructuró en dos partes fundamentales: programación del sistema e interfaz de usuario.

2.3.3.1. Programación del sistema. En la programación del sistema, se definió un algoritmo de funcionamiento general según [24] que incluyó la declaración de variables y funciones encargadas de activar y controlar el sistema. Se puede observar en la Figura 2.5 un diagrama de flujo que proporciona una visión general de cómo se inició y concluyó el funcionamiento a lo largo de la ejecución de tareas establecidas.

Figura 2.5

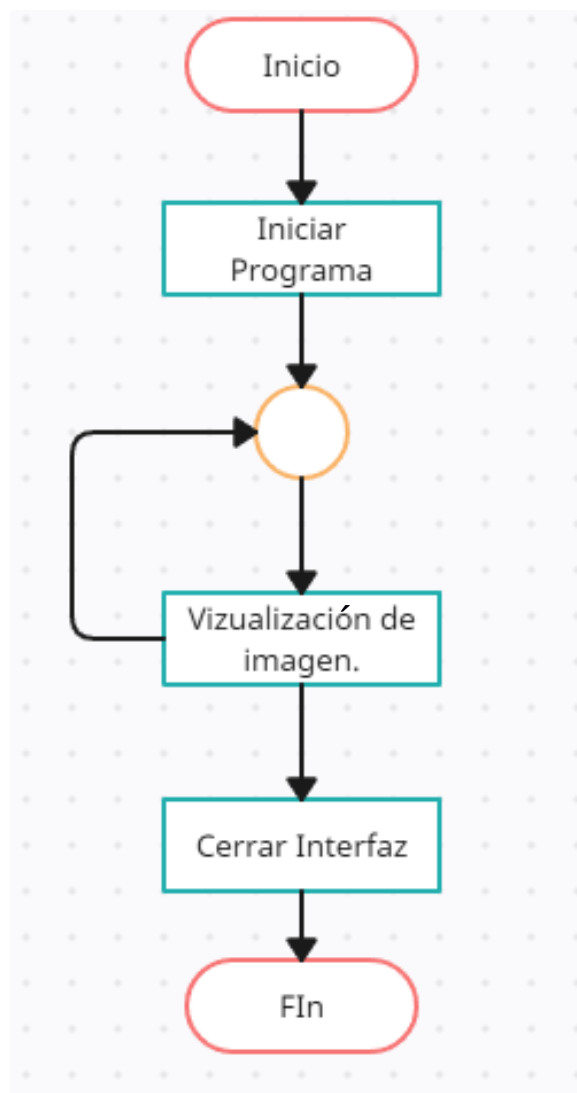
Diagrama de flujo del sistema



2.3.3.2. Diseño y programación de la interfaz. Esta fase, se enfocó en el diseño y programación de la interfaz, la cual brinda la interacción entre el usuario, los componentes externos y el sistema. Esto incluyó el cómo se vio la herramienta de trabajo en tiempo real con respecto a los datos tomados en la detección de objetos de manera intuitiva para el usuario. En la Figura 2.6 se puede apreciar una visión general de cómo se desarrolló la interfaz del sistema en la programación Python.

Figura 2.6

Diagrama de flujo de la interfaz



Capítulo 3

3.1. Resultados y análisis

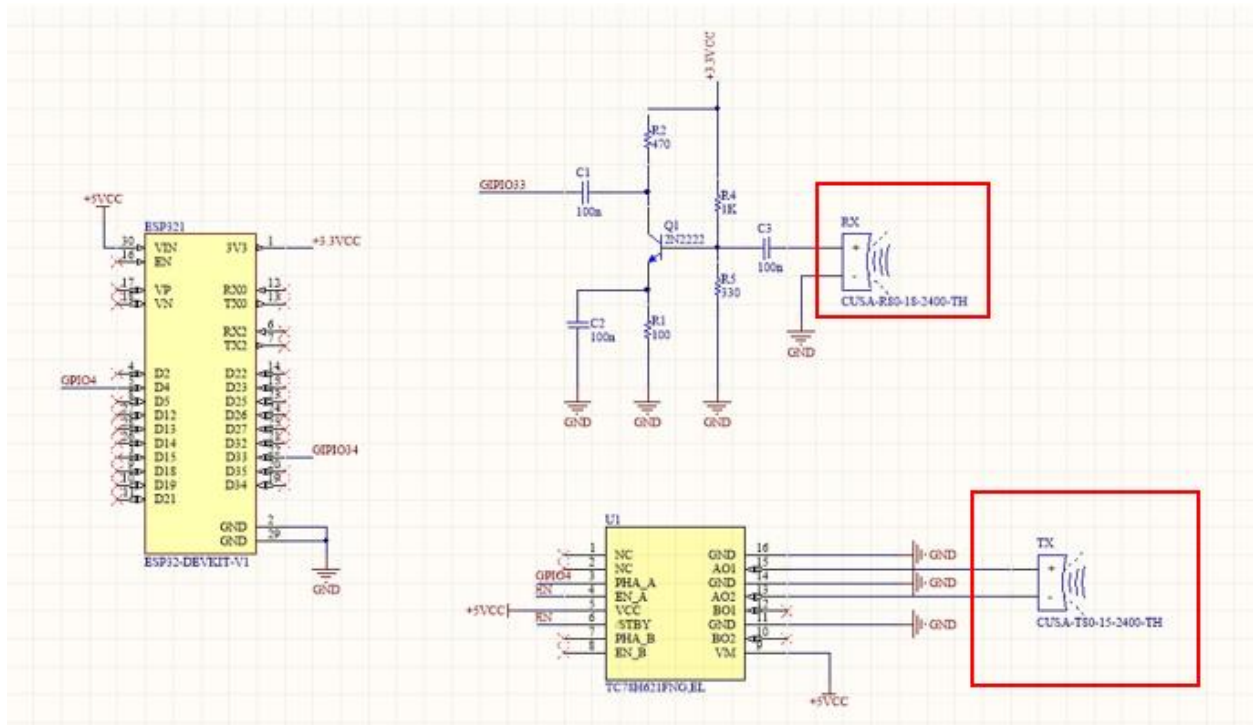
En este capítulo, se presentará los resultados obtenidos a partir de la alternativa de diseño propuestas en el capítulo 2, en relación con la implementación del prototipo final. Se llevó a cabo un análisis detallado del sistema en diversas secciones, destacando la validez del método final. Para ello, se examinó los aspectos necesarios que contribuyen al logro del objetivo, abarcado desde el estudio de un sistema básico de emisión y recepción de ondas ultrasónicas hasta el lenguaje de programación requerida por la interfaz y prototipo.

3.2. Implementación del sistema

La implementación del sistema se divide en dos fases: el estudio preliminar a través de un sistema de prueba y el desarrollo del prototipo final. Esta estructura permite una comprensión detallada del funcionamiento, sentando las bases para el diseño eficaz del prototipo.

3.2.1. Sistema de prueba

Al comprender el funcionamiento de un sistema de transmisión y recepción con ondas ultrasónicas fue posible explorar diversas aplicaciones y su operación fundamental con el fin de centrarse en la detección de objetos en baja visibilidad. Esta etapa resultó importante para la creación del prototipo final del proyecto, considerando los parámetros finales y las alternativas mencionadas en el capítulo 2. En la Figura 3.1 se aprecia el diagrama esquemático del sistema implementado.

Figura 3.1*Diagrama Esquemático del sistema de prueba*

En la Figura 3.1, el módulo de transmisión, se empleó un controlador de circuito integrado de puente dual TC78H621FNG para activar el transductor ultrasónico Tx a través de los pines A01 y A02, los cuales son alimentados con un voltaje VCC de 5V proveniente del microcontrolador ESP32. Asimismo, la activación del integrado envía una señal al ESP32 mediante el pin PHA_A, conectado al pin GPIO34 del microcontrolador. Es importante destacar que el “Pin_EnableA” permite encender el sistema de transmisión (Tx).

Por otro lado, en el sistema (Rx), se implementó inicialmente un amplificador de señal utilizando un transistor 2n2222 a un voltaje de alimentación de 3.3V. Esta etapa fue indispensable para comprender el funcionamiento del amplificador al recibir y expandir la señal. Sin embargo, al implementar este sistema, el envío de múltiples señales desde los transductores Tx hacia un único receptor evidenció la incapacidad del sistema para amplificar señales débiles, por lo que hubo que reemplazar el sistema amplificador, como se explica en la sección del sistema final.

3.2.1.1. Pruebas de calidad. El control de calidad del sistema de prueba se enfocó en analizar las señales de entrada y salida de los dos transductores ultrasónicos, conforme al diagrama esquemático diseñado. En la Figura 3.2, se observa la señal receptora afectada por un ruido no deseado, generado por la presencia de un objeto intruso, en este caso, la mano. Esta distorsión en la señal se debió a la interrupción de la comunicación ultrasónica entre los sistemas Tx y Rx. La interferencia ocurría al introducir un objeto, como la mano, que interrumpía la conexión entre los dos sistemas validados, provocando una distorsión en la señal.

Figura 3.2

Prueba de calidad del sistema de prueba

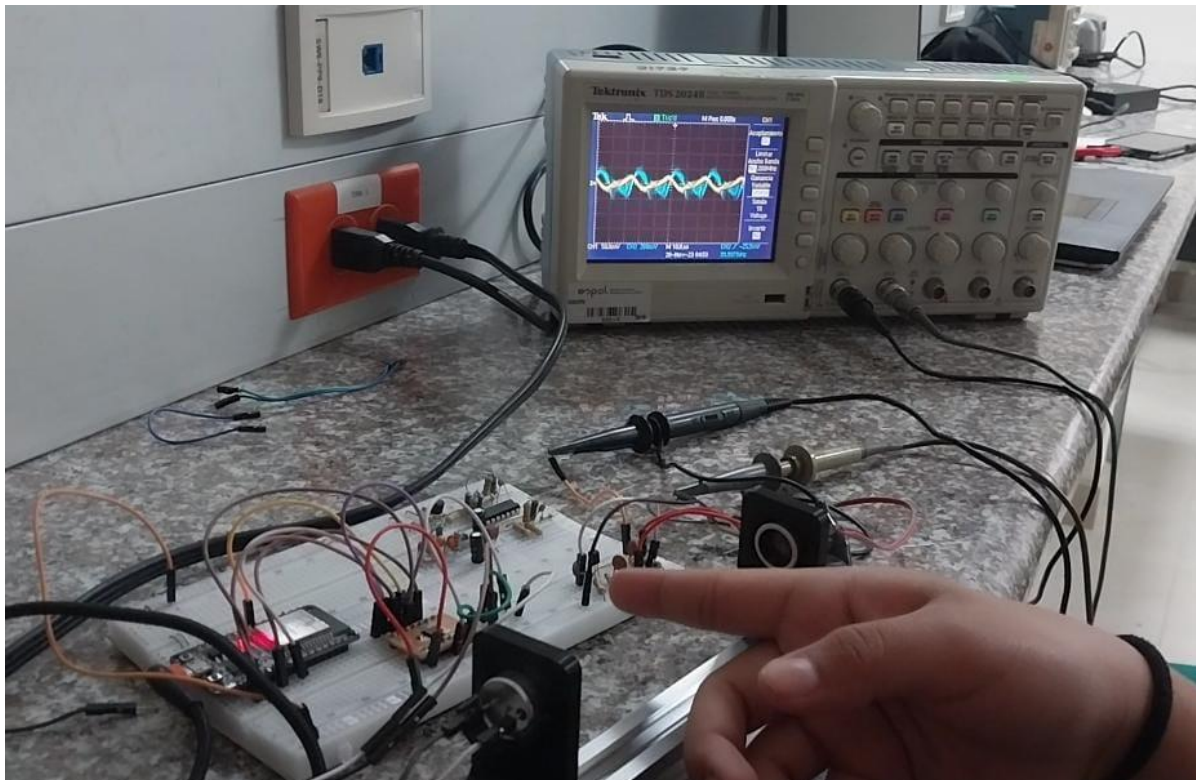
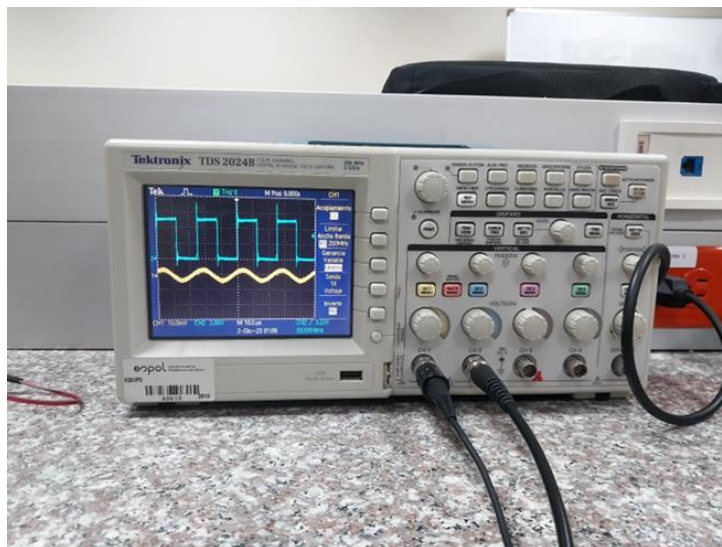
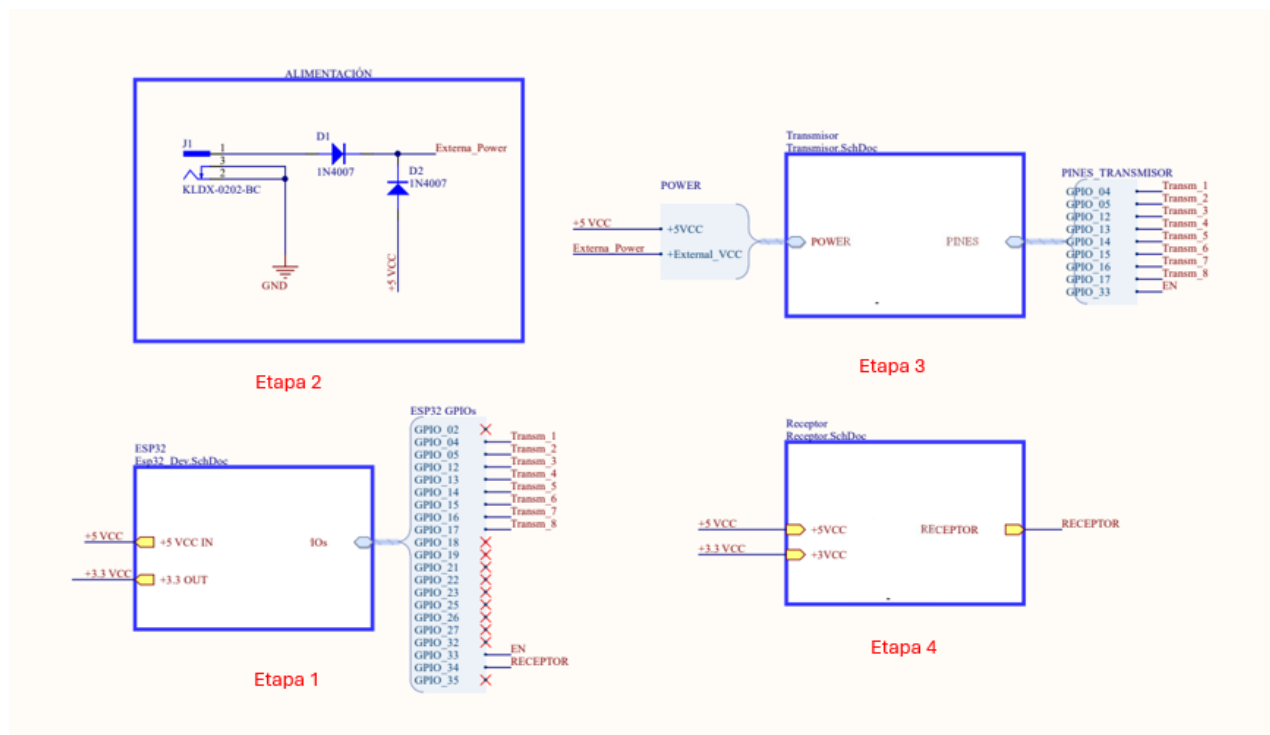


Figura 3.3*Prueba de calidad del sistema de prueba*

En la Figura 3.3 se observa la onda de transmisión, que ingresaba al sistema en forma cuadrada y la onda de salida en el receptor. En este último, se implementó un circuito amplificador de señales de baja potencia con la finalidad de mejorar la señal recibida. Como consecuencia de esta amplificación, se obtuvo una onda sinusoidal expandida. Cabe destacar que, en ese momento, la señal transmitida era de 40 kHz.

3.2.2. Sistema final

Para el diseño y posterior implementación del prototipo final, se llevó a cabo un estudio minucioso sobre el funcionamiento del ultrasonido y los diversos sistemas existentes para la detección de objetos mediante ondas ultrasónicas. Se inspiró en la guía práctica "DIY probe scanner by Bitluni", ayudando a comprender de manera clara cómo diseñar el prototipo final basada en [21]. Se centró en mejorar el producto utilizando componentes más accesibles y adaptado a un enfoque diferente para poner en marcha el sistema, cumpliendo con el mismo objetivo de detectar objetos en sistemas de baja visibilidad [23].

Figura 3.4*Diagrama esquemático del sistema final*

Para diseñar el sistema final, se dividió el prototipo en diferentes etapas, tal como se observa en la Figura 3.4. En la primera, se considera la alimentación del prototipo proveniente del microcontrolador ESP32, que opera a 5 V. Además, se dispone de una fuente de alimentación auxiliar externa para el circuito electrónico, como podría ser un cargador de 5 V, en caso de no querer utilizar la conexión directa del Esp32. La segunda etapa se enfoca en las conexiones y distribución de pines del Esp32, tanto para el sistema de transmisión como para el de recepción y alimentación. Esta fase se encargó de asignar tareas de acuerdo con las funciones de cada conexión física atribuida. Por otro lado, las etapas 3 y 4 no menos importantes se centraron en los dos sistemas Tx y Rx del prototipo final.

3.2.2.1. Sistema de transmisión (Tx). El diseño final del sistema transmisor consta de 4 integrados de activación TC18H621FNG conectados al microcontrolador, estos componentes fueron los encargados de la activación y encendido de los transductores ultrasónicos, de acuerdo con las funciones de entrada y salida. La Tabla 3.1 muestra los pines de entrada y salida y la Figura 3.4 las conexiones de los pines.

Tabla 3.1

Entrada/Salidas funciones

Entradas			Salidas		Modo
/STBY	EN_A/EN_B	PHA_A/PHB_B	AO1/BO1	AO2/B02	
H	H	H	L	H	Operación
H	H	L	H	L	Operación
H	L	H OR L	OFF (Alta impedancia)		Pare
L	H OR L	H OR L	OFF (Alta impedancia)		Comienzo

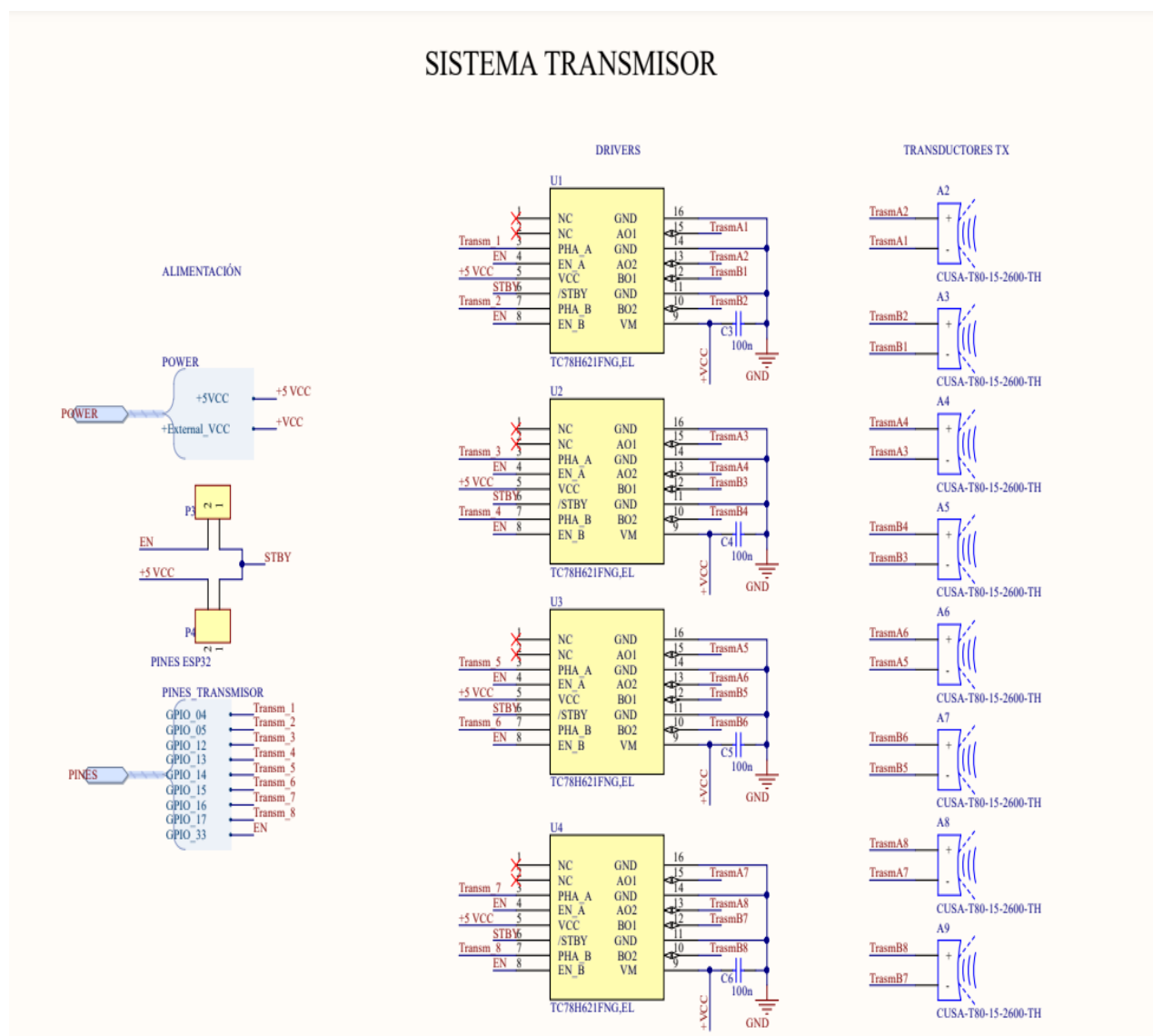
Nota: Extraída de [27]

Se procedió a entender las conexiones del componente, como se muestra en la Figura 3.5. Este componente estaba conformado por sus respectivos pines de alimentación, activación, standby y sentido de inicio para dos cargas, en este caso, los transductores ultrasónicos. Los pines de activación de la carga eran (EN_A/EN_B). Además, para proporcionar el sentido de inicio e indicar cuál de los transductores se encendía primero, se utilizaban los pines PHA_A/PHB_B de los integrados. Estos estaban conectados a 8 puertos físicos del Esp32, encargado de ejecutar la activación de cada transductor, según un desfase de encendido mediante un lazo de tiempo muy pequeño. También es relevante señalar que la puesta en marcha del pin STBY tiene dos encendidos de prueba, ya sea mediante la ejecución del pin "EN" o la conexión directa del voltaje de alimentación del pin VCC del Esp32.

Por otro lado, para encender los transductores ultrasónicos transmisores se utilizaron los pines (AO1/BO1-AO2/B02) del integrado. De esta manera, se configuró el sistema transmisor, activando cada transductor según la configuración establecida en un determinado barrido de ejecución.

Figura 3.5

Diagrama esquemático del sistema transmisor



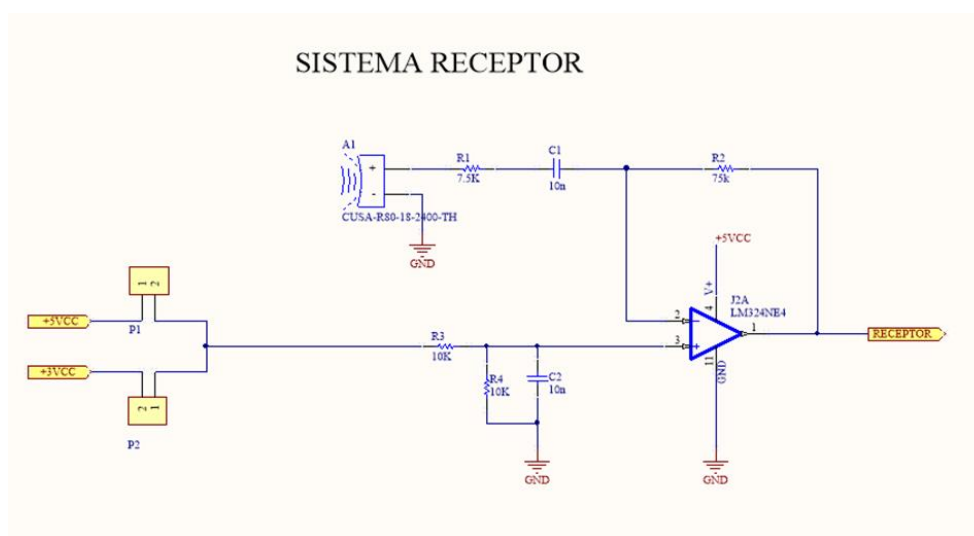
3.2.2.2. Sistema Recepción (Rx). Para la configuración final del sistema receptor, se llevaron a cabo diferentes pruebas con el objetivo de obtener resultados satisfactorios. Se encontró una dificultad al intentar recibir las señales generadas por el arreglo de transductores ultrasónicos debido a que eran 8 transductores Tx contra un transductor Rx. Durante el estudio del sistema Rx, se hizo énfasis en el diseño de un amplificador de señal x10. Inicialmente, se planteó el diseño de un amplificador con el transistor 2N2222, pero se detectaba una señal débil y la presencia de ruido blanco.

Al analizar esta situación, se consideró implementar un filtro de pasa banda para reducir el ruido que existía al detectar la imagen del objeto en tiempo real. Sin embargo, los resultados fueron insatisfactorios, ya que el filtro aplicado en consideración al alcance, ubicación y componentes utilizados generaba más ruido e interferencias dentro del área analizada.

Ante estas dos situaciones, y en base a la guía práctica de estudio mencionada anteriormente, se generó la alternativa de utilizar uno de los amplificadores operacionales del LM324, como se observa en el diagrama esquemático mostrado en la Figura 3.6. El amplificador operacional, con su alta ganancia de voltaje, resultó beneficioso para amplificación de las señales débiles presentes.

Figura 3.6

Diagrama esquemático del sistema receptor



3.2.2.3. Pruebas de calidad. Durante el control de calidad del sistema final, se consideró la implementación del sistema y los resultados obtenidos mediante la interfaz proporcionada por terceros. En la Figura 3.7, se puede observar el prototipo final, que constaba de 8 transductores ultrasónicos encargados de la transmisión y uno encargado de la recepción, cada uno con su respectivo circuito electrónico, tal como se detalló en la descripción de los sistemas.

Figura 3.7

Prueba de calidad del sistema final

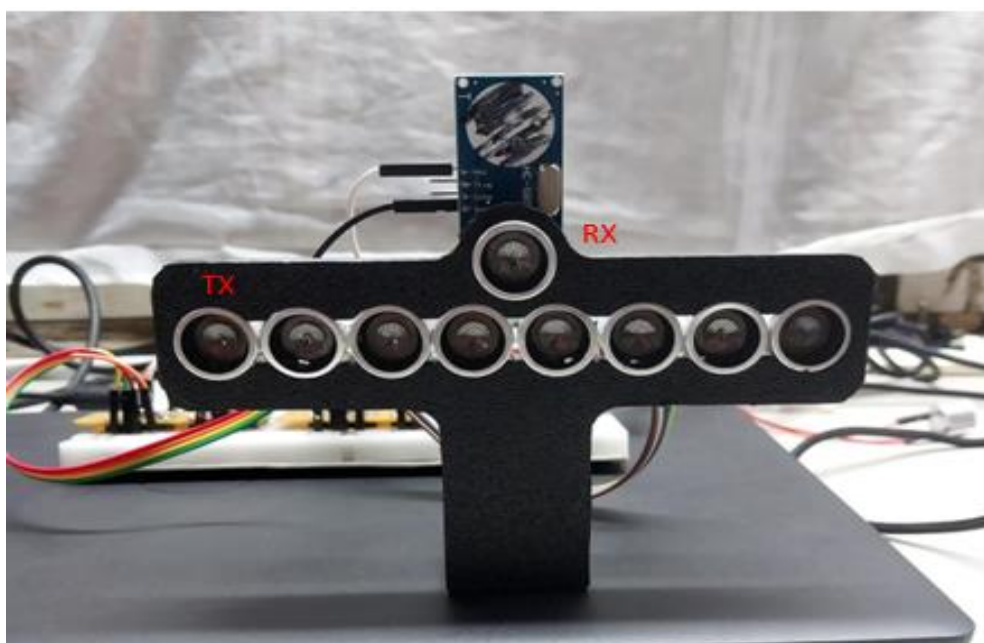
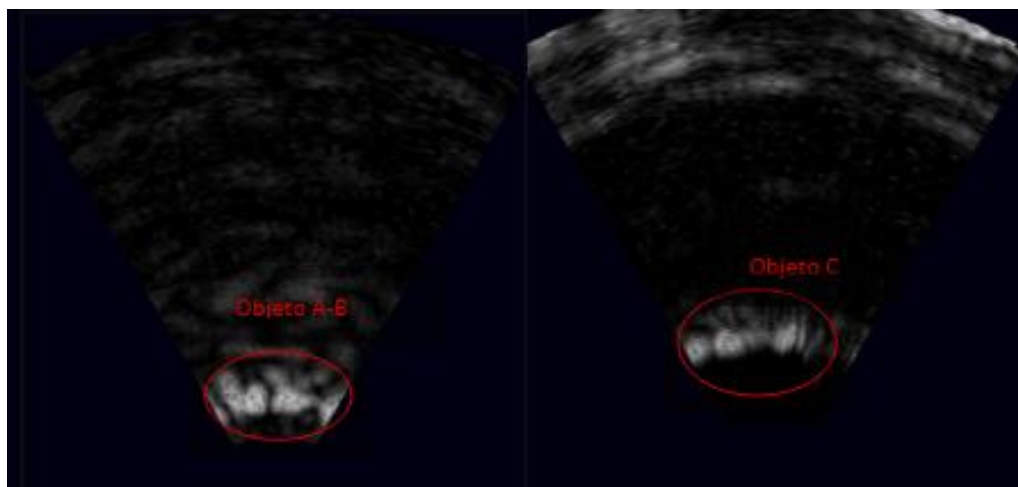


Figura 3.8

Pruebas del sistema final



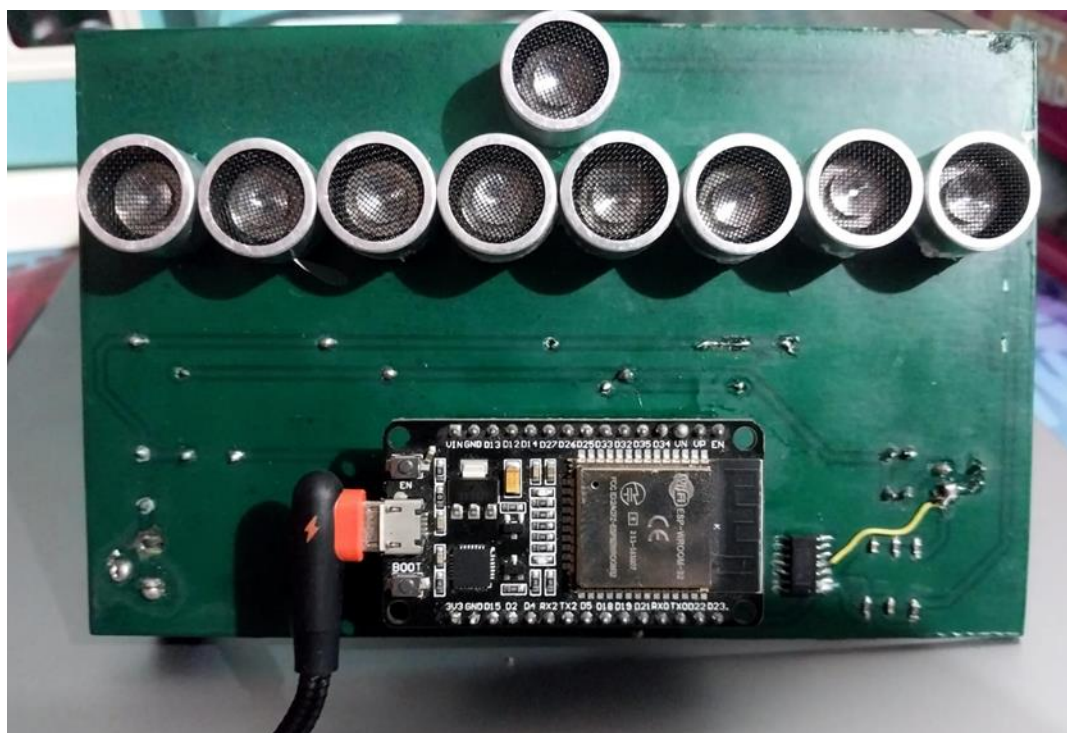
En la Figura 3.8 se puede observar la sombra del y los objetos detectados a través de una interfaz de terceros [23] donde se logró distinguir con claridad la cantidad e intensidad de los objetos identificados. En la figura izquierda, se identifica dos objetos A-B detectados a la misma distancia de 40 cm, mientras que, en la figura derecha, se mostraba la detección de un objeto C identificado por la intensidad de la sombra a 60 cm. Es importante señalar que las demás sombras no marcadas correspondían a objetos identificados de manera involuntaria, como paredes, lluvia o fuertes vientos, que generaban escenarios de detección falsos.

3.3. Implementación del PCB

En esta etapa, se diseñó el PCB e implementó del prototipo final. En la Figura 3.9 se visualiza la distribución de cada componente, desde los pines para la fuente externa hasta la posición de cada uno de los transductores con su respectivo sistema de funcionamiento, según el diseño específico que se detalla en el Anexo 5 y Anexo 6.

Figura 3.9

Implementación PCB



3.4. Interfaz del usuario

Se diseñó la interfaz del usuario de manera en el software de Python para facilitar el manejo y comprensión del usuario. En la página principal se encuentran los datos del proyecto, facultad, botón de inicio y selección de puerto COM, así como también los nombres de los autores como se observa en la Figura 3.10.

Los botones “COM” e “Iniciar” cumplen una respectiva función. El botón COM es el encargado de activar el puerto seleccionado para obtener el envío de bits del prototipo a la interfaz y se pueda observar la imagen del objeto detectado en tiempo real a través del procesamiento de las señales digitales recibidas. Mientras que el botón iniciar da el paso a visualizar dicha imagen en la interfaz.

Como segundo plano en la interfaz del usuario se tiene la pestaña donde se visualizará el objeto detectado y su respectivo botón “BACK” que cumplirá la función de regresar a la pantalla inicial como se observa en apartado b de la Figura 3.10.

Figura 3.10

Interfaz de usuario a) pantalla de inicio b) pantalla de escaneo



3.5. Análisis final

3.5.1. Detección de objetos a diferentes distancias

Para el análisis final se realizó pruebas de los 3 objetos que se observan en la Figura 3.11. En el Anexo 7, se muestran las imágenes detalladas de los elementos usados en las pruebas de detección.

Figura 3.11

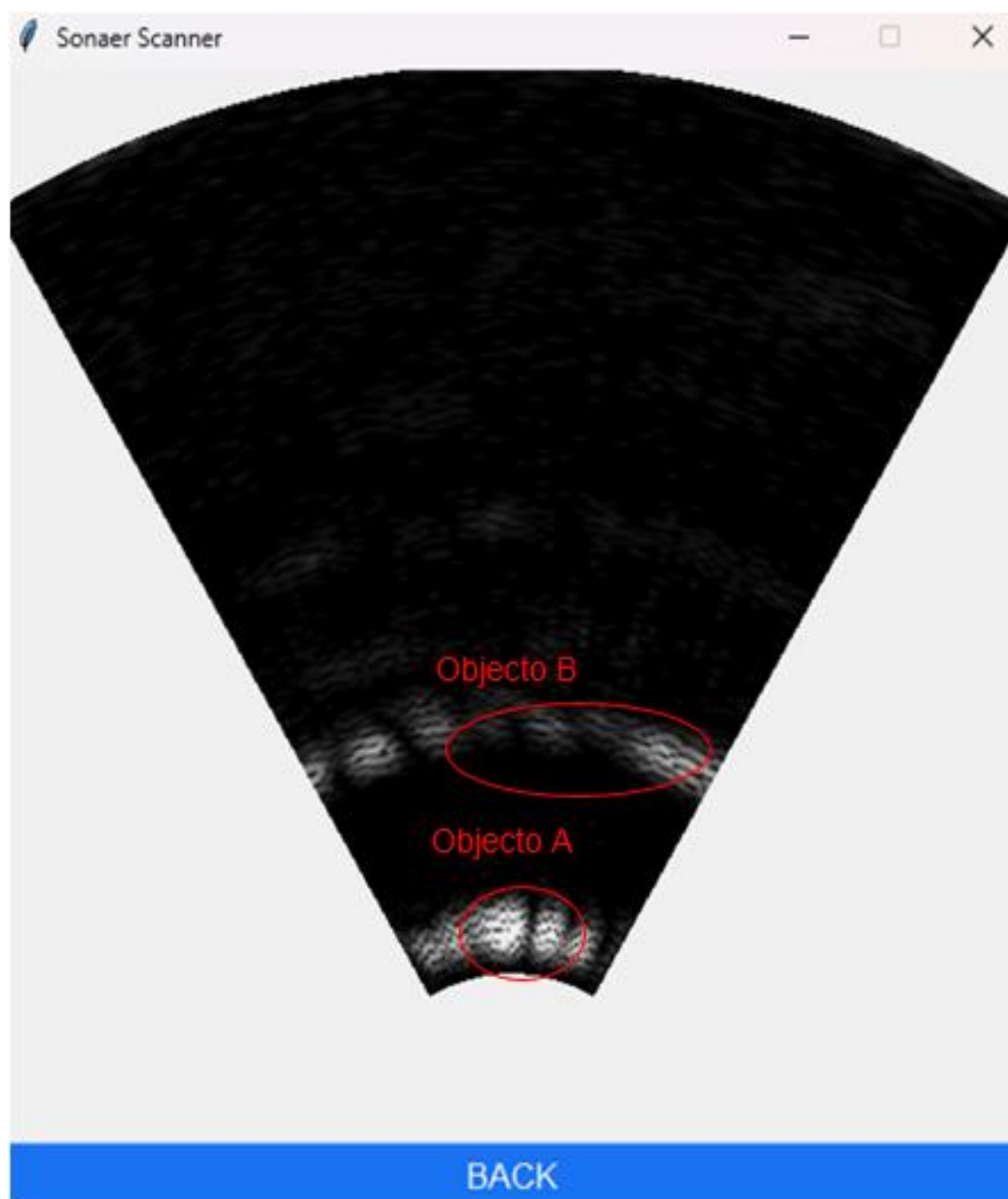
Objetos de prueba



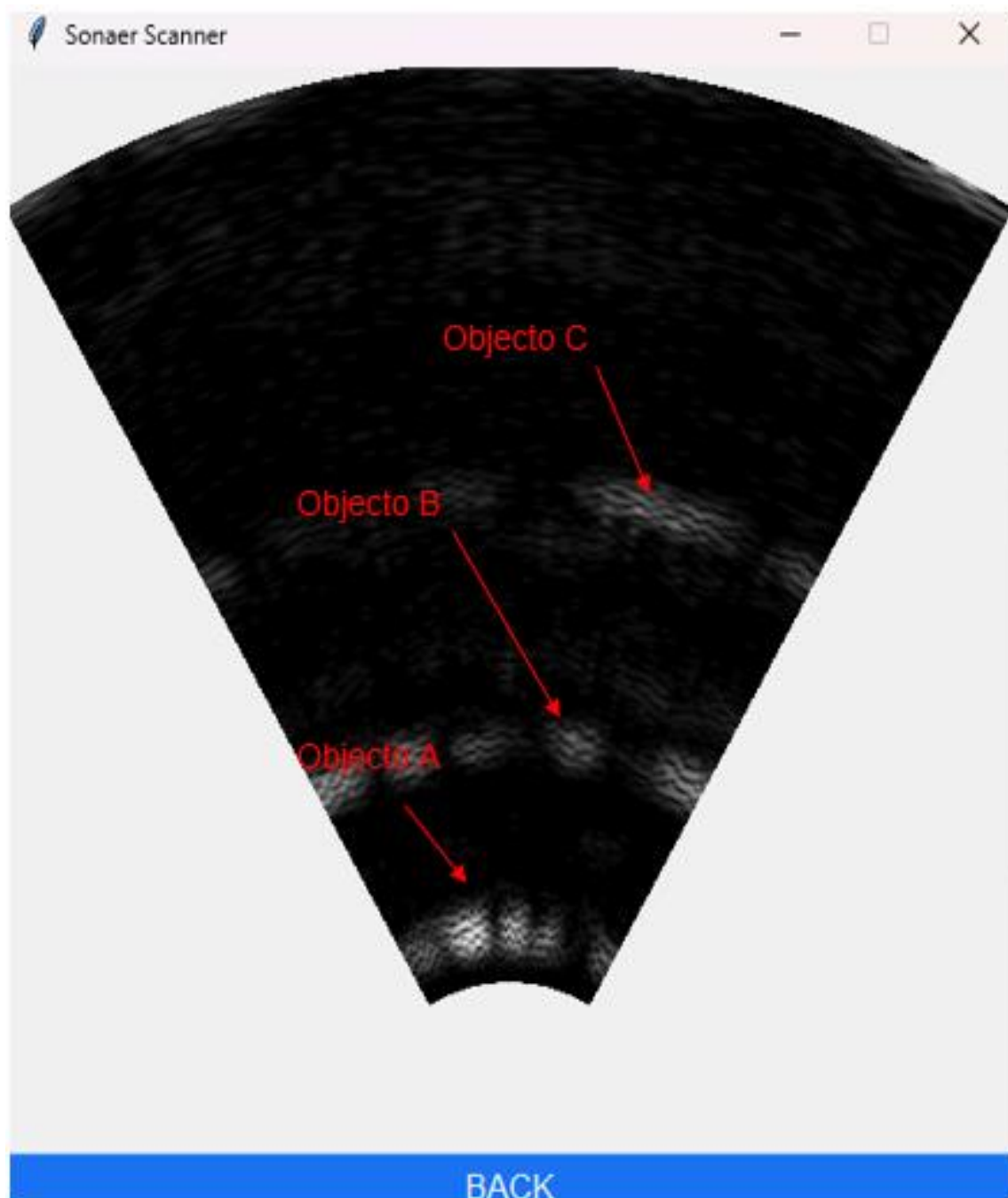
Para la primera prueba, se ubicó el objeto A a una posición de 30 cm, obteniendo una detección de objeto al inicio de la interfaz, según se observa en la Figura 3.12. Es necesario mencionar que el prototipo empieza a detectar desde una distancia de 30 cm a 180 cm.

Figura 3.12*Prueba 1*

Para la segunda prueba se toma como referencia el objeto A para ubicar el objeto B a una distancia de 20 cm (referencia del objeto A), obteniendo como resultado dos sombras que simulan la ubicación de los objetos dentro del entorno como se observa en la Figura 3.13.

Figura 3.13*Prueba 2*

Para la prueba final se ubicó 3 objetos: A, B y C a una distancia referencial desde la ubicación del prototipo tomando como medidas 30 cm, 50 cm y 100 cm y teniendo como resultado la aparición de tres sombras en diferentes franjas que simulan la detección de los objetos en tiempo real como se observa en la Figura 3.14.

Figura 3.14*Prueba 3*

3.6. Análisis del costo

En este apartado se muestran los costos involucrados para la implementación en físico del Sistema de detección en entornos de baja visibilidad con arreglos de transductores ultrasónico expuesto en este capítulo.

3.6.1. Costo de elementos para la detección en entornos de baja visibilidad

En la Tabla 3.2 se presenta los costos de los elementos utilizados en la construcción de la placa PCB del sistema de detección en entornos de baja visibilidad la cual contiene un sistema transmisor y un sistema receptor con su respectiva parte amplificadora encargada de aumentar la amplitud de la señal de entrada del receptor. Se incluyen los elementos externos de la placa como integrados de activación y amplificación, alimentación y control del sistema.

Tabla 3.2

Costo de elementos para la detección en entornos de baja visibilidad

Descripción	Cantidad	Precio
MODEMCU-32 30-Pin Esp32 Wifi	1	\$ 18,00
Dual-Bridge Driver IC (TC78H621FNG)	4	\$ 7,00
Sensor Ultrasónico CUSA-T80-18-2400-TH	8	\$ 4,00
Sensor Ultrasónico CUSA-R80-18-2400-TH	1	\$ 28,00
Amplificador Operacional Lm324	1	0.50
Resistencia 75K Ω	2	0.40
Resistencia 7.5K Ω	2	0.40
Resistencia 10K Ω	2	0.40
Capacitor 1nF	3	0.75
Total	\$	59,45

3.6.2. Costo de implementación

En la Tabla 3.3 se presenta la recopilación total del costo que refleja la implementación y diseño del prototipo en físico.

Tabla 3.3

Costo de Implementación

Descripción	Cantidad	Precio
Placa PCB	1	\$ 50,00
Soporte 3D para prototipo final	1	\$ 80,00
Total		\$ 130,00

Capítulo 4

4.1. Conclusiones y recomendaciones

4.1.1. Conclusiones

- El sistema electrónico de transmisión y recepción ultrasónica fue ensamblado con éxito, integrando los componentes electrónicos y construyendo un arreglo funcional de transductores ultrasónicos. De la misma manera, el sistema de recepción del prototipo final se concluyó satisfactoriamente a partir de la implementación de un circuito amplificador de señal $\times 10$. Este circuito, aprovechando uno de los amplificadores operacionales del LM324, mejoró la amplificación de las señales débiles detectadas y evitó problemas en el procesamiento de datos para la generación de la imagen. En comparación con otros sistemas amplificadores probados, este se mostró más estable bajo las condiciones definidas para el proyecto, dando como resultado un sistema con menos ruido e interferencias.
- Desarrollar una interfaz de usuario en Python facilitó la visualización de imágenes en tiempo real generadas por el sistema de detección implementado. La interfaz es intuitiva y fácil de entender, proporcionando una experiencia satisfactoria para el usuario.
- El sistema de transmisión y recepción implementado fue capaz de detectar objetos a distintas distancias de 20, 50, 80, 120 y 150 cm. Sin embargo, aunque se integró un algoritmo de beamforming en el sistema, no se logró la verificación completa del funcionamiento. Se reconoció que la elección adecuada de transductores es crucial para la efectividad del beamforming. No obstante, el sistema final constituye una base sólida para el desarrollo de futuras mejoras.

4.1.2. Recomendaciones

- Entender el comportamiento del sonido en altas frecuencias y sus principales características más relevantes para aplicar de manera eficiente en el funcionamiento del sistema de detección de objetos y evitar ruidos que afectan a su rendimiento.
- En cuanto a la obtención de señales y pruebas en los sistemas de recepción y transmisión, se aconseja evitar la conexión de varios canales del osciloscopio, ya que esto puede generar demasiada presencia de ruido al interactuar con el prototipo que provocara la distorsión de las ondas obtenidas.
- Para mejorar la versatilidad del sistema final, se recomienda explorar la implementación de una comunicación inalámbrica entre el sistema y el computador. Esto evitará limitaciones al explorar ciertas áreas, ya que la conexión por medio de un cable puede restringir el movimiento y la estabilidad del sistema.
- En el proceso de realizar pruebas de detección de objetos, es recomendable explorar áreas abiertas para evitar interferencias presentes en entornos cerrados.

Referencias

- [1] UIT, «Importancia de las telecomunicaciones,» de *Sobre la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)*, Dubai, 2023.
- [2] «IT.sitio,» 23 Mayo 2013. [En línea]. Available: <https://www.itsitio.com/ec/beam-forming-que-es-y-como-funciona/>. [Último acceso: 10 Octubre 2023].
- [3] G. Boesch, «Object Detection in 2023: The Definitive Guide,» *VISO.ai*, n° <https://viso.ai/deep-learning/object-detection/>, 2023.
- [4] M. C. D. J. William Giovanni Vargas, «Análisis de objetos translúcidos usando técnicas de visión por computador,» *Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial. Maestría en Automatización y Sistemas de Control*, n° <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/29955>, Junio 2019.
- [5] R. A. M. J. M. y. A. G. Álvaro Galán, «Análisis de técnicas de aumento de datos y entrenamiento en YOLOv3 para detección de objetos en imágenes RGB y TIR del UMA-SAR Dataset,» *Universidade da Coruña, Servizo de Publicacións. Comité Español de Automática.*, n° <https://hdl.handle.net/10630/22812>, p. 9, 2021.
- [6] F. Miyara, *Acústica y sistemas de sonido*, UNR Editora (Universidad Nacional de Rosario), 2006.
- [7] A. M. J. Jaramillo, *ACUSTICA: La ciencia del Sonido*, Medellin, Colombia: Editorial ITM, 2007.
- [8] R. Pujol, «Cochlea,» 6 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://www.cochlea.org/es/sonidos/campo-auditivo-humano>. [Último acceso: Octubre 2023].
- [9] A. M. L. L. V. M. M. a. A. C. J. Calderón, «Sonido, Ultrasonido y Cavitación,» *Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional. Unidad Legaria. Legaria 694*, vol. Vol. 13, p. 5, 2019.
- [10] A.-G. L. B. M. P. C. Vargas A, «Principios físicos básicos del ultrasonido, sonoanatomía,» *Instituto Nacional de Cardiología Ignacio Chávez*, n° <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=19129>, p. 13, 2008.
- [11] C. V. A. R. F. R. V. M. Melissa Ruiz, «Sonido,» Blog, 20 Septiembre 2010. [En línea]. Available: https://fisica.uc.cl/images/Lab_4_-_Ultrasonidos.pdf. [Último acceso: Febrero 2024].
- [12] O. M. Carlos RUBIO, «Fabricación de Transductores Ultrasónicos para Equipos automatizados,» *Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI); Querétaro, México*, Vols. %1 de %2e-Journal of Nondestructive Testing. Vol. 15(9)., n° <https://www.ndt.net/?id=9633>, p. 15, 2010.
- [13] B. Schweber, «Aspectos básicos de la aplicación de transductores ultrasónicos para detectar objetos o el flujo de fluidos,» *Colaboración de Editores de DigiKey de América del Norte*, n°

- <https://www.digikey.es/es/articles/the-basics-of-applying-ultrasonic-transducers-for-sensing-objects-or-fluid-flow>, p. 5, 2023.
- [14] J. Machín Mindán, «Beamforming, localización de fuentes sonoras mediante arrays de micrófonos,» *Editorial Universidad Politecnica de valencia*, nº <http://hdl.handle.net/10251/74764>, p. 44, 2016.
- [15] G. A. Cucho Padín, «Estudio de un sistema de generación de imágenes acústicas aplicable a la supervisión submarina de las conchas de abanico,» *Repositorio de tesis PUCP*, nº <http://hdl.handle.net/20.500.12404/278>, p. 149, 2011.
- [16] O. M. Fuquen Sanabria, «Metodología para la inspección de soldadura de aceros austeníticos mediante ultrasonido (técnica) phased array,» *Bogotá*, nº <https://hdl.handle.net/10901/9857>, p. 81, 2014.
- [17] P. E. Guzman, «Ingenieros Especialistas,» 1 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.ingenierosespecialistas.com/2018/11/ultrasonic-phased-array-paut.html>. [Último acceso: 2 Febrero 2024].
- [18] J. G. S. MARCELINO MARTÍNEZ SOBER.ANTONIO J. SERRANO LÓPEZ, «INTRODUCCIÓN. AL PROCESADO DIGITAL DE SEÑALES,» nº <http://ocw.uv.es/ingenieria-y-arquitectura/1-1/tema1.pdf>, p. 8, 2009-2010.
- [19] L. M. d. R. J. L. S. E. Beatriz Calleja, «PROCESADO DIGITAL DE SEÑALES ULTRASÓNICAS PARA LA DETERMINACIÓN DE CONSTANTES ELÁSTICAS DINÁMICAS EN MATERIALES ROCOSOS,» *Sociedade Portuguesa de Acústica*, nº <http://hdl.handle.net/10261/8152>, p. 12, 2008.
- [20] «Solectro,» Placas de desarrollo, 12 Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://solectroshop.com/es/blog/como-funciona-el-sensor-de-ultrasonidos-medidor-de-distancia--n99>. [Último acceso: Noviembre 2023].
- [21] U. d. T. Departamento de Ingeniería de la Información y Ciencias de la Computación, «Guía práctica para la formación de haces de ultrasonido: patrón de haz y análisis de reconstrucción de imágenes,» *Aplicado Ciencias*, p. 15, 2018.
- [22] Cuidevices, «Ultrasonic,» cuidevices, Oswego, 2022.
- [23] A. Taylo, Bitluni, 19 Febrero 2022. [En línea]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=z4uxC7ISd-c&ab_channel=bitluni. [Último acceso: Octubre 2023].
- [24] Bitluni, «Github,» 19 Febrero 2022. [En línea]. Available: <https://github.com/bitluni/SonarScannerV1/blob/main/ArraySweepESP32/ArraySweepESP32.ino>. [Último acceso: Diciembre 2023].

- [25] Cuidevices, «CUSA-T80-18-2400-TH,» <https://www.cuidevices.com/product/sensors/ultrasonic-sensors/ultrasonic-transmitters/cusa-t80-18-2400-th#specifications>, USA, 2022.
- [26] «OpenHardware & OpenSource,» 22 Enero 2014. [En línea]. Available: https://uglyduck.vajn.icu/ep/archive/2014/01/Making_a_better_HC_SR04_Echo_Locator.html. [Último acceso: Febrero 2024].
- [27] Cuidevices, «CUSA-R80-18-2400-TH,» 8 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://www.cuidevices.com/product/resource/cusa-r80-18-2400-th.pdf>. [Último acceso: Octubre 2023].
- [28] Alldatasheet, «Toshiba_TC78H621FNG,» 10 Abril 2017. [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1465439/TOSHIBA/TC78H621FNG.html>. [Último acceso: Octubre 2023].
- [29] Alldatasheet, «Onsemi,» Octubre 2021. [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1454698/ONSEMI/LM324.html>. [Último acceso: Noviembre 2023].

Anexo

Anexo 1

Tabla de especificaciones del modelo CUSA-T80-18-2400-TH

Parámetro	Descripción	Min	Tipo	Max.	Unidades
Tipo	Trasmisor				
Tensión De Funcionamiento	40kHz			150	Vp-p
Frecuencia			40		kHz
Nivel De Presión De Sonido	10 V, 30 cm, Onda sinusoidal	115			dB
Directividad			80		Degree
Capacidad	1kHz	1.920	2.400	2.800	pF
Rango Detectable		0,2		18	M
Dimensiones	Ø1.6 x 12,0				Mm
Material	Aluminio				
Temperatura De Funcionamiento		-20		70	°C
RoHS	Si				

Nota: Extraída de [25]

Anexo 2

Tabla de especificaciones del modelo CUSA-R80-18-2400-TH

Parámetro	Descripción	min	Tipo	máx..	Unidades
Tipo	Receptor				
Tensión De Funcionamiento	39kHz			150	Vp-p
Frecuencia		38	39	40	kHz
Sensibilidad	10 V, 30 cm, Onda sinusoidal	-68			dBv/uMbar
Directividad			80		Degree
Capacidad	1KHz	1.920	2.400	2.880	pF
Rango Detectable		0,2		18	M
Dimensiones	Ø16 x 12,0				Mm
Material	Aluminio				
Temperatura De Funcionamiento		-20		70	°C
RoHS	Si				

Nota: Extraído de [26]

Anexo 3*Tabla de especificaciones del modelo TC78H621FNG*

Características	Descripción
Voltaje de fuente de alimentación para el motor	VM=18 V (máx.)
Voltaje de fuente de alimentación para control	VCC=6 V (máx.)
Corrientes de Salida	IOUT=1,1 A (máx.)
Resistencia de Salida ON	Ron (suma superior e inferior) = 0,8 Ω
Resistencias desplegadas internas en las entradas	200 K Ω
Paquete pequeño	P-TSSOP16-0505-0.65-001
Circuito de protección de conducción cruzada incorporado	

Nota: Extraído De [27]**Anexo 4***Tabla de especificaciones del modelo Lm324*

Características técnicas	
Voltaje de alimentación DC (sencilla):	3V ~ 32V
Voltaje de alimentación DC (Dual):	$\pm 1.5V \sim \pm 15V$
Amplificadores Operacionales por Integrado:	4
Voltaje Offset de entrada típico:	1.5 mV
Ancho de Banda (GBP):	1.2 MHz

Nota: Extraído de [28]

Anexo 5

Diagrama PCB de la cara superior

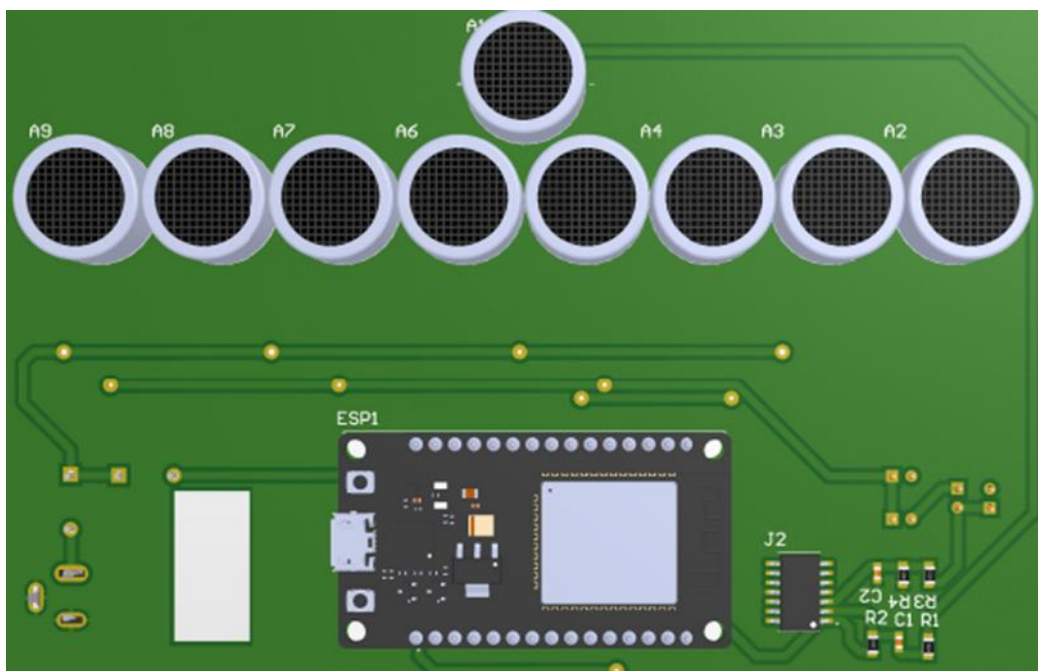
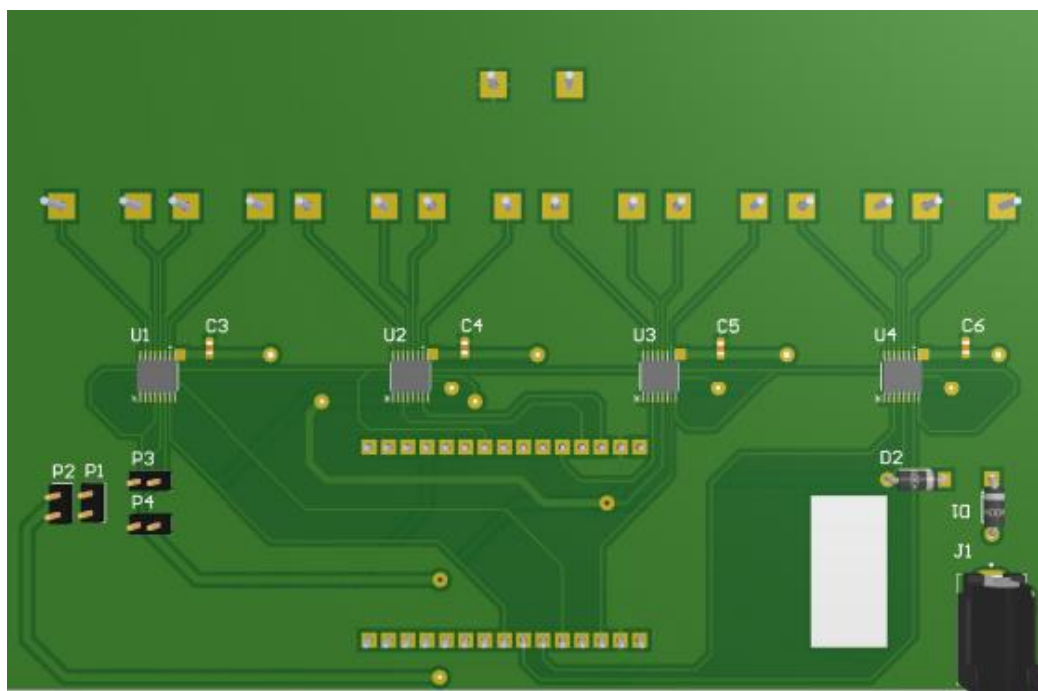
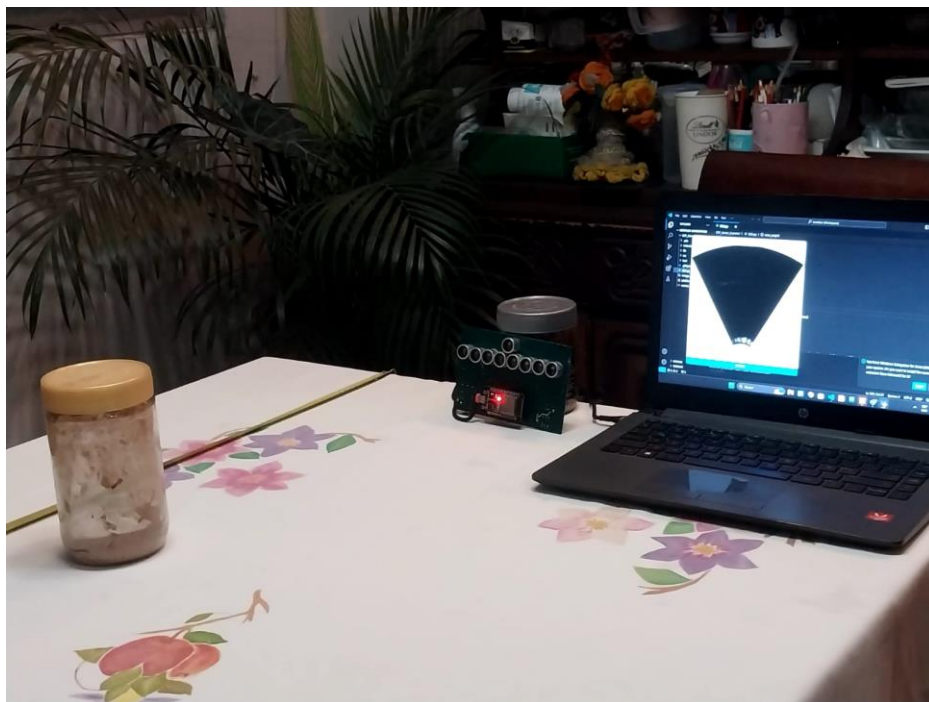
**Anexo 6**

Diagrama PCB de la cara inferior

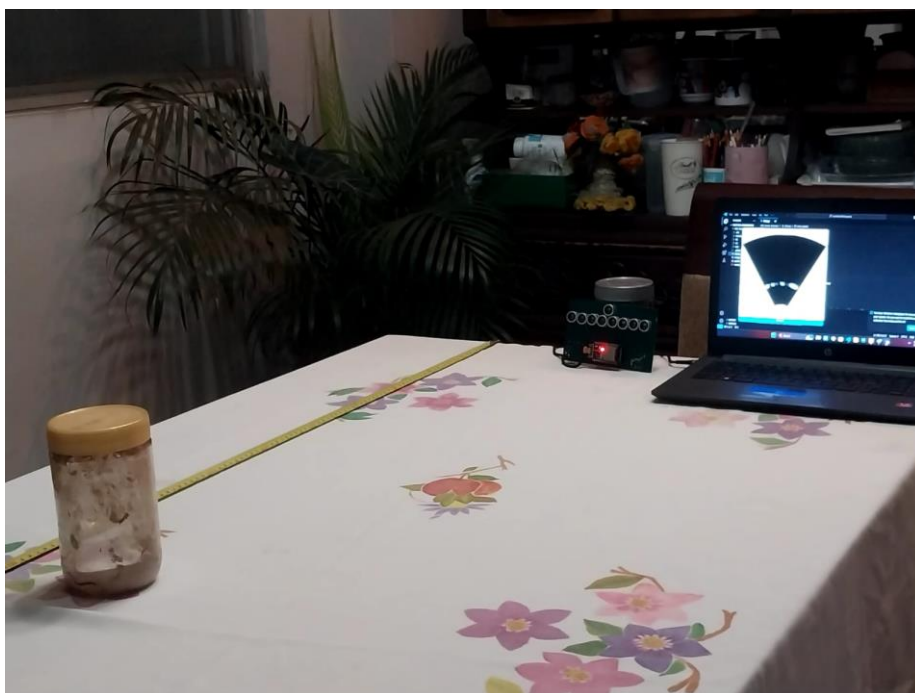


Anexo 7*Pruebas finales del sistema implementado*

Detección de Objeto a 30 cm



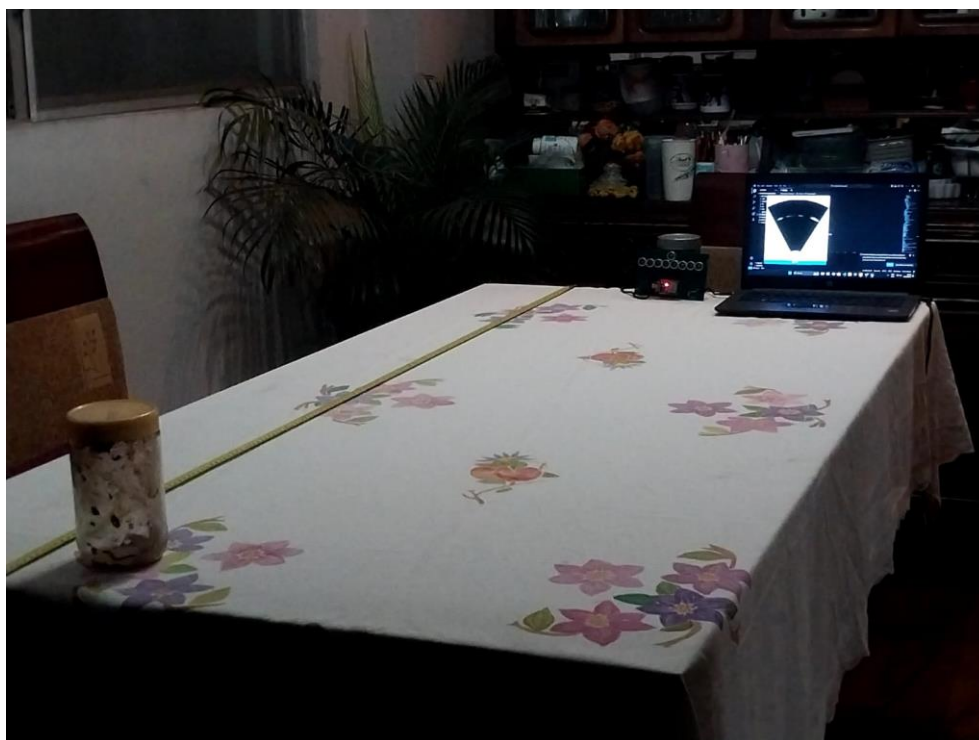
Detección de Objeto a 50 cm



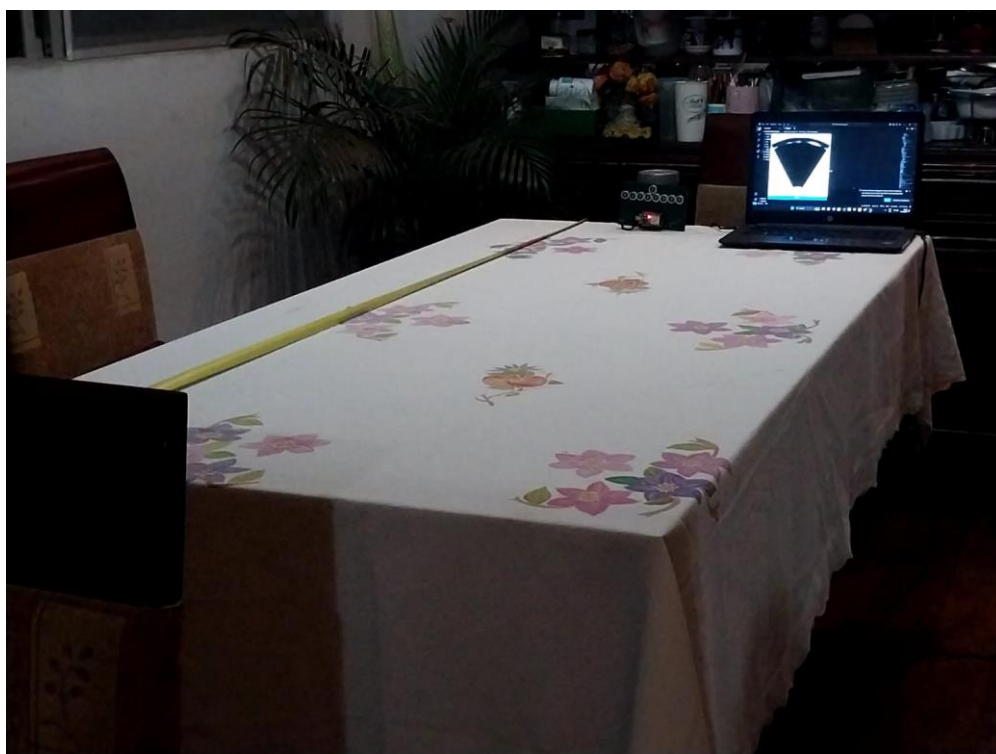
Detección de Objeto a 80 cm



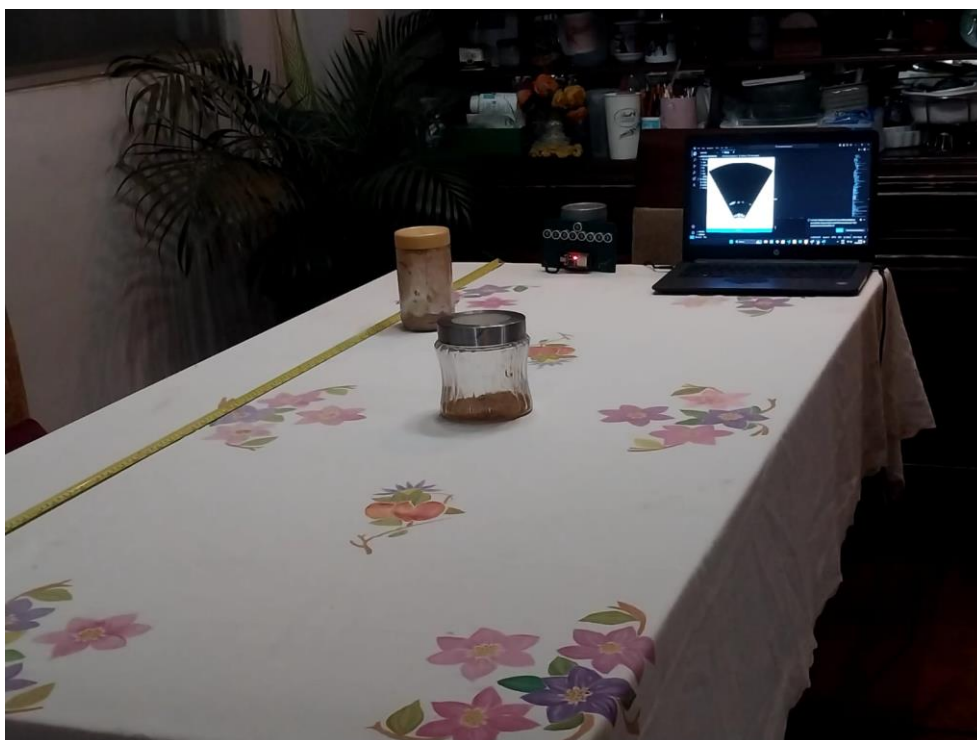
Detección de Objeto a 100 cm



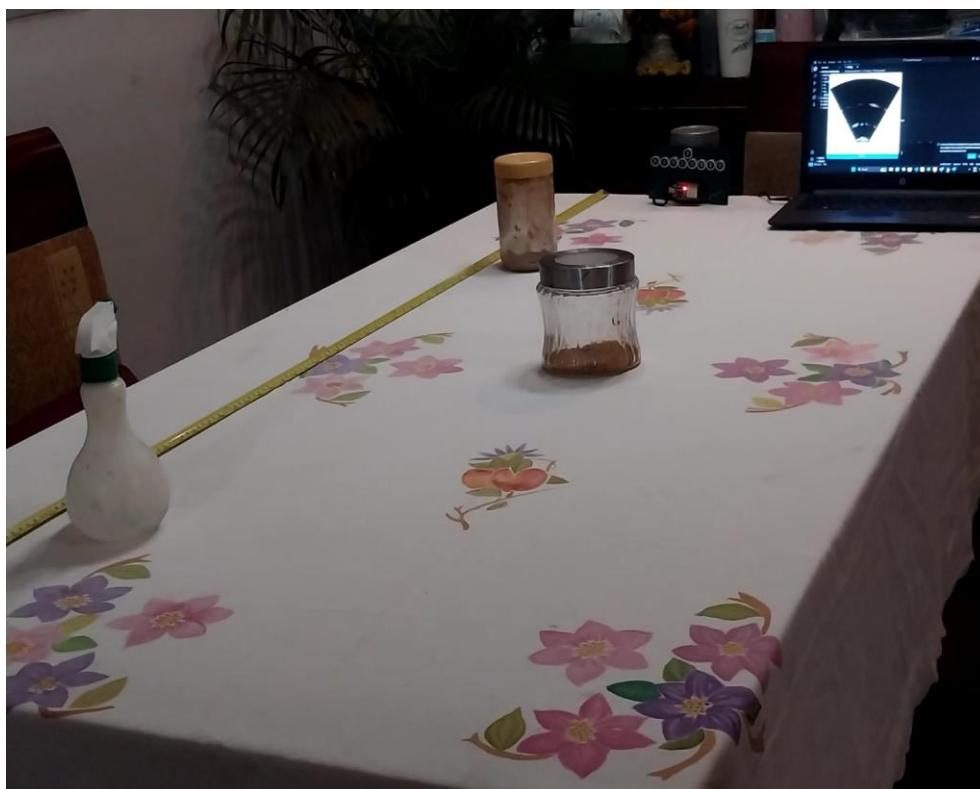
Detección de Objeto a 150 cm



Detección de Objeto a 180 cm



Detección de Objeto a 30 y 80 cm



Detección de Objeto a 30, 80, 120 cm

Código de Interfaz

```

from multiprocessing import Process, Queue
import threading
import cv2
import math
import serial
import time
import numpy as np
from tkinter import *
import sys
import glob
from PIL import Image, ImageTk

incoming_serial_queue = Queue()
kil_queue = Queue()
Image_data = None
port_selected = Queue()
enable_read = Queue()
port_close = Queue()
PORT = 'COM7'
BAUDRATE = 921600
ports = []
depth = 256
distance = 1000
start = 80
maxx = 64
xs = 512
ys = 512

def serial_ports():
    """ Lists serial port names

    :raises EnvironmentError:
        On unsupported or unknown platforms
    :returns:
        A list of the serial ports available on the system
    """
    if sys.platform.startswith('win'):
        ports = ['COM%s' % (i + 1) for i in range(256)]
    elif sys.platform.startswith('linux') or sys.platform.startswith('cygwin'):
        # this excludes your current terminal "/dev/tty"
        ports = glob.glob('/dev/tty[A-Za-z]*')
    elif sys.platform.startswith('darwin'):
        ports = glob.glob('/dev/tty.*')
    else:
        raise EnvironmentError('Unsupported platform')

    result = []

```

```

for port in ports:
    try:
        s = serial.Serial(port)
        s.close()
        result.append(port)
    except (OSError, serial.SerialException):
        pass
return result

def serial_read(incoming_serial_queue,port_selected, enable_read, port_close):
    print("Init SerialRead Process")
    reader = None
    EnableRead = False

    while True:
        if not port_close.empty():
            if reader != None:
                reader.close()
                port_close.get()
        if not port_selected.empty():
            if reader != None:
                reader.close()
            PORT = port_selected.get()
            print("PORT: ",PORT)
            try:
                reader = serial.Serial(PORT, BAUDRATE, timeout=3)
            except:
                print("Exist a problem with SERIAL PORT!")
                continue

        if not enable_read.empty():
            EnableRead = enable_read.get()

        if EnableRead:
            try:
                line = reader.read_until(b'\r\n')
                data = str(line,'utf-8')
                # add data to queue
                if len(data)>1:
                    incoming_serial_queue.put(data)
            except:
                continue

def renderData(arrayData):
    distanceR = distance / 2
    startR = start / 2
    totalR = startR + distanceR

```

```

mm2pix = ys / totalR
data2mm = distanceR / depth
data2pix = data2mm * mm2pix
startPix = startR * mm2pix
totalPix = totalR * mm2pix
x0 = xs * 0.5
y0 = ys - 1
image = np.zeros((xs, ys, 4), dtype=np.uint8)

for y in range(0,ys):
    for x in range(0,xs):
        dx = x - x0
        dy = y - y0
        d = math.sqrt(dx * dx + dy * dy)
        a = ((math.atan2(dy, dx) + math.pi * 0.5) / (math.pi / 180 * 60) + 0.5) * maxx
        a0 = math.floor(a)
        aS = a - a0
        v = 0
        alpha = 0
        if a0 >= 0 and a0 < maxx:
            col0 = arrayData[a0]
            col1 = arrayData[a0 + 1] if (a0 < maxx - 1) else col0
            i = (d - startPix) / data2pix
            i0 = math.floor(i)
            is1 = i - i0
            if i0 >= 30 and i0 < depth:
                v00 = col0[i0]
                v10 = col1[i0]
                v01 = v00
                v11 = v10

            if i0 < depth - 1:
                v01 = col0[i0 + 1]
                v11 = col1[i0 + 1]

            v = (v00 * (1 - aS) + v10 * aS) * (1 - is1) + (v01 * (1 - aS) + v11 * aS) * is1
            alpha = 255

        image[x, y, 0] = v
        image[x, y, 1] = v
        image[x, y, 2] = v
        image[x, y, 3] = alpha

    return image

def items_selected(event):
    global btn_OPEN
    btn_OPEN['state'] = NORMAL

```

```

selected_indices = listbox.curselection()
selected_langs = [listbox.get(i) for i in selected_indices]
if len(selected_langs)>0:
    global PORT
    PORT = selected_langs[0]

def refresh_ports(port_close):
    port_close.put(True)
    time.sleep(0.2)
    listbox.delete(0,END)
    ports = serial_ports()
    for port in ports:
        listbox.insert(END, port)
    listbox.config(yscrollcommand = scrollbar.set)
    scrollbar.config(command = listbox.yview)

def get_image(incoming_serial_queue):
    while True:
        if not incoming_serial_queue.empty():
            t0 = time.time()
            value = incoming_serial_queue.get()
            arr = value.split()
            line = arr[0]
            if len(line) < 16: continue
            global maxx
            maxx = int(line[:4], base=16)
            global depth
            depth = int(line[4:8], base=16)
            global start
            start = int(line[8:12], base=16)
            global distance
            distance = int(line[12:16], base=16)
            if maxx == 0 or depth == 0 or maxx > 64 or depth > 256:continue
            print("xres:%d yres:%d start:%d distance:%d " % (maxx, depth, start ,distance))
            arrayData = []
            p = 16
            for i in range(maxx):
                a = []
                for j in range(depth):
                    if(p >= len(line)): continue
                    h = int(line[p:p+1], base=16)*16
                    p+=1
                    a.append(h)
                arrayData.append(a)

            global Image_data
            Image_data = renderData(arrayData)
            t1 = time.time()

```

```

        print("t:%f"%(t1-t0))

def image_show():
    if not Image_data is None:
        image = cv2.rotate(Image_data, cv2.ROTATE_90_CLOCKWISE)
        img = Image.fromarray(image)
        imgTk = ImageTk.PhotoImage(image=img)
        label_image.imgtk = imgTk
        label_image.configure(image=imgTk)
    global id
    id = win.after(10,image_show)

def view_page1(enable_read):
    enable_read.put(False)
    page_ports.pack(side=LEFT)
    label_com.pack()
    label_image.pack_forget()
    listbox.pack(side=LEFT, fill=BOTH)
    scrollbar.pack(side=LEFT, fill=BOTH)
    btn_BACK.pack_forget()
    btn_REFRESH.place(x=4,y=415)
    btn_OPEN.place(x=52,y=415)
    win.geometry("915x440")
    page2.pack_forget()
    page1.pack()
    frame = cv2.imread('image.jpg')
    img = cv2.cvtColor(frame,cv2.COLOR_BGR2RGB)
    img = Image.fromarray(img)
    imgTk = ImageTk.PhotoImage(image=img)
    label1.imgtk = imgTk
    label1.configure(image=imgTk)
    label1.pack()
    btn_OPEN['state'] = DISABLED
    global id
    if id != None:
        print("After Cancel")
        win.after_cancel(id)

def view_page2(port_selected, enable_read):
    port_selected.put(PORT)
    enable_read.put(True)
    win.geometry("512x540")
    btn_BACK.pack(side="bottom", fill="both")
    page_ports.pack_forget()
    label_com.pack_forget()
    listbox.pack_forget()
    scrollbar.pack_forget()
    btn_REFRESH.place_forget()

```

```

btn_OPEN.place_forget()
page1.pack_forget()
page2.pack()
page_ports.pack_forget()
label_image.pack(side="top")
global id
id = win.after_idle = win.after(10,image_show)

def close():
    _kill.put(True)
    print("Exit")
    win.destroy()

def gui_tk(port_selected, enable_read, port_close, incoming_serial_queue,kil_queue):
    print("Init GUI Process")

    global ports
    ports = serial_ports()
    global win
    win = Tk()

    global page1
    page1 = Frame(win)
    global page2
    page2 = Frame(win)

    global label1
    label1 = Label(page1)
    global label_image
    label_image = Label(page2)
    global btn_BACK
    btn_BACK = Button(win, text="BACK", font=('bold',12),bg='#1872f2',fg='white',width=8, command=
lambda:view_page1(enable_read))
    global page_ports
    page_ports = Frame(win)
    global label_com
    label_com = Label(page_ports, text= "SELECT PORT:", font=("Calibri", 11, "bold"))
    global listbox
    listbox = Listbox(page_ports,width=12,height=21)
    global scrollbar
    scrollbar = Scrollbar(page_ports)
    for port in ports:
        listbox.insert(END, port)
    listbox.config(yscrollcommand = scrollbar.set)
    scrollbar.config(command = listbox.yview)

    global btn_REFRESH

```

```

    btn_REFRESH = Button(win, text="Refresh!", font=('bold',7),bg='#1872f2',fg='white',width=6, command=
lambda:refresh_ports(port_close))
    global btn_OPEN
    btn_OPEN = Button(win, text="Open", font=('bold',7),bg='#1872f2',fg='white',width=7, command=
lambda:view_page2(port_selected, enable_read))
    listbox.bind('<<ListboxSelect>>', items_selected)

    global id
    id = None
    win.title("Sonaer Scanner")
    win.resizable(False,False)
    view_page1(enable_read)
    thread = threading.Thread(target=get_image, args=(incoming_serial_queue,))
    thread.daemon = 0
    thread.start()
    global _kill
    _kill = kil_queue
    win.protocol("WM_DELETE_WINDOW", close)
    win.mainloop()

if __name__ == '__main__':
    kill_all = False
    global p1
    p1 = Process(target=serial_read,args=(incoming_serial_queue,port_selected, enable_read, port_close))
    global p2
    p2 = Process(target=gui_tk,args=(port_selected,enable_read,port_close,incoming_serial_queue, kil_queue))
    p1.start()
    p2.start()
    while True:
        if not kil_queue.empty():
            p1.kill()
            p2.kill()
            break
        time.sleep(2)
    p1.join()
    p2.join()
    exit()

```