



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AGROPECUARIAS

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO PARA SISTEMA DE ECOLOCACIÓN DE OBJETOS EN
DOS DIMENSIONES A TRAVÉS DE ULTRASONIDOS

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos establecidos
para optar por el título de Ingeniero en Sonido y Acústica

Profesor Guía
Miguel Ángel Chávez Avilés

Autor
Kevin Darío Brazales Zambrano

Año
2016

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

—Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.

Miguel Ángel Chávez Avilés
Master en Ingeniería de Edificaciones Sostenibles
CI.: 1710724848

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

—Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.

Kevin Darío Brazales Zambrano

CI.: 1724267958

AGRADECIMIENTOS

Principalmente agradezco a mis padres porque han sido los precursores de todos mis logros, es gracias a ellos que he podido dar este gran paso. Además debo agradecer a todas aquellas personas que hayan pasado por mi vida dejando una huella, aunque sea de manera fugaz. Tengo la certeza que de alguna manera han influido en mi progreso y desarrollo personal y es precisamente gracias a los momentos y experiencias que compartieron conmigo que he podido forjar mi camino.

DEDICATORIA

Dedico todo mi esfuerzo, entrega y trabajo a mis padres, ellos han sacrificado mucho para que pueda ser quien soy y su única satisfacción siempre ha sido verme feliz. Este gran mérito en mi vida va por ellos.

RESUMEN

El presente trabajo de titulación plantea el desarrollo de un prototipo de un ecolocalizador en dos dimensiones que detecte objetos dentro de un área específica. Para lo cual es indispensable el conocimiento y aplicación de las ciencias acústicas, matemáticas y electrónicas; dando lugar al análisis teórico, matemático y virtual del sistema previo a la fabricación. De modo que el dispositivo disponga de bases concretas para su funcionamiento.

El ecolocalizador construido ha sido capaz de detectar objetos puntuales y presentar resultados gráficos y numéricos sobre la posición en el espacio. Se comprobó su eficiencia por medio de prácticas experimentales sobre un plano físico acotado; para, finalmente describir la precisión del sistema en base a análisis estadísticos del muestreo de objetos.

El correcto funcionamiento del prototipo construido depende de factores como los componentes, las características de los obstáculos y el espacio destinado para su operación. Además se proponen recomendaciones para mejorar la eficiencia y versatilidad del sistema. Así se logrará obtener mayor conocimiento del tema y demostrar una aplicación artificial de la capacidad natural de detectar objetos por ultrasonidos.

ABSTRACT

The following degree project deals with the development of a two dimensional echolocation prototype who works on a specific surface. For which is important to knowledge about acoustic, math and electronic sciences, making possible the theoretical, mathematical and virtual analysis of the system before their building. So the device has concrete bases for their operation.

The system has been able to detect specific objects and display graphics and numerical results about the position in space. Efficiency was found by experimental practices on a limited physical plane, and finally to describe the accuracy of the system based on statistical analysis of sample objects.

The right performance of the prototype depends on factors such as components, features of the obstacles and the space for its operation. In addition, recommendations are proposed to improve the efficiency and versatility of the system. So it is possible to get greater knowledge of the topic, proving an artificial application from the natural skill to detect objects by ultrasound.

ÍNDICE

1. Capítulo I. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Alcance.....	3
1.4 Hipótesis.....	3
1.5 Objetivos.....	4
1.5.1 Objetivo General.....	4
1.5.2 Objetivos específicos.....	4
2. Capítulo II. Marco Teórico	5
2.1 Generalidades.....	5
2.2 Analogía con murciélagos.....	6
2.3 Aplicaciones.....	7
2.3.1 Primeros sistemas.....	7
2.3.2 Batimetría.....	8
2.3.3 Navegación aérea y robótica	9
2.3.4 Seguridad industrial.....	10
2.4 Principio de funcionamiento de un ecolocalizador.....	10
2.5 Método de análisis.....	12
2.5.1 Tiempo de vuelo TOF (time of flight)	12
2.5.2 Métodos de estimación del TOF.....	13
2.6 Tipos de ecolocalizadores.....	13
2.6.1 Ecolocalizador de un solo haz o monohaz.....	14
2.6.2 Ecolocalizador de múltiples haces o multihaz.....	14
2.7 Medidores de distancia por ultrasonido.....	15
2.8 Sistema de ecolocación en 3 dimensiones	18
3. Capítulo III. Desarrollo	22
3.1 Cálculos matemáticos y simulación virtual.....	22
3.1.1 Cálculos matemáticos.....	22

3.1.2	Simulación virtual.	27
3.2	Construcción del Prototipo	31
3.2.1	Modelos de prueba.	31
3.2.2	Modelo final.	34
3.3	Experimentación del sistema.....	38
3.3.1	Objetos estáticos.	38
3.3.2	Objetos aleatorios.....	40
3.3.3	Objetos en movimiento.....	42
4.	Capítulo IV. Resultados.....	44
4.1	Objetos estáticos.....	45
4.1.1	Cilindro de aluminio.	45
4.1.2	Ortoedro de aluminio	48
4.2	Objetos aleatorios.	51
4.2.1	Dos peluches:.....	51
4.2.2	Batería alcalina ortoédrica de 9 voltios:.....	51
4.2.3	Cilindro plástico:	54
4.2.4	Ortoedro de cartón:	57
4.3	Objetos en movimiento.	60
4.3.1	Cilindro de papel:.....	60
4.3.2	Cilindro de aluminio:	60
4.4	Discusión de los resultados.	61
5.	Conclusiones	66
6.	Recomendaciones	70
	REFERENCIAS	72
	ANEXOS	75

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La habilidad de localizar obstáculos por medio de ultrasonidos ha sido vital para algunos seres vivos como los murciélagos. Del mismo modo el ser humano practica la técnica, aunque con sonidos audibles. Lo cierto es que es una capacidad auditiva que mantiene a los organismos en contacto activo con su entorno. Asimismo conviene aplicarla sobre ciertas tareas donde la visión sea nula. De tal manera que desarrollarla, tanto natural como artificialmente, resulta ventajoso para el ser humano. Sin embargo, y a pesar de que las aplicaciones de ecolocación tuvieron su auge en tiempos de postguerra, no se han desarrollado plenamente en la actualidad; inclusive el tema ha sido ciertamente relegado en los estudios superiores.

1.1 ANTECEDENTES

De acuerdo a la Real Academia Española (2015) la ecolocación se define como: la “medida de la distancia de un objeto por el tiempo que pasa entre la emisión de una onda acústica y la recepción de la onda reflejada en dicho objeto.”

El principio de la ecolocación se basa en la reproducción de ondas sonoras, generalmente de frecuencias superiores al rango de audición humana (ultrasonido). Los obstáculos que se encuentren en el entorno provocarán que las ondas se reflejen en dirección opuesta y sean captadas con una diferencia de tiempo y variación espectral. La información pasa a ser procesada y analizada para finalmente ubicar los objetos dentro de un espacio.

Estudios como el que presenta la revista Interdisciplinaria, revelan que el ser humano presenta cualidades de ecolocación como una habilidad inconsciente, particularmente superior en las personas no videntes, con las que puede reconocer las características de las fuentes sonoras y localizarlas (Arias, Hug, Bermejo, Venturelli y Rabinovich, 2010, p. 337-338).

Sin embargo esta capacidad no es muy desarrollada por el hombre a

comparación de otros animales como los quirópteros quienes han evolucionado la técnica durante siglos, de manera que pueden navegar y vivir en profunda oscuridad sin visión alguna convirtiéndose en los maestros de la ecolocación, esto es debido a la precisión de direccionalidad e intensidad de las señales que emiten para ubicarse en el medio ambiente (Jakobsen, Brinkløv y Surlykke, 2013, p. 1).

Otra investigación, realizada por Davies, Maryanto y Rossiter (2013, p. 6-11), revela resultados de interés como el grado de exactitud de ecolocación que poseen diferentes especies de murciélagos, siendo superior en unos y casi nula en otros gracias a ciertos factores de evolución de audición ultrasónica.

Las posibles ventajas de la aplicación del sistema son otros ejemplos de los temas que van a la par con las investigaciones principales y necesarias para llevar a cabo el proyecto, principalmente en robótica, batimetrías y en personas no videntes en quienes resultaría benéfico localizar objetos por medio de señales sonoras (Thaler, 2013, p. 1-2).

Por otra parte, todo el proceso de ecolocación no podría cumplir con su objetivo sin el debido procesamiento de las señales ultrasónicas y el consecuente análisis de la información de las ondas receptadas (Matsuo, 2013, p. 2 y Jascha et al., 2014, p. 2-4).

1.2 JUSTIFICACIÓN.

El presente proyecto propone el desarrollo de un sistema que tenga la capacidad de localizar objetos por medio de la emisión y recepción de ultrasonidos. Corresponde a estudios que se han venido planteando por varios autores con diferentes propuestas, sin embargo este tipo de investigaciones y aplicaciones han sido un ámbito poco explorado dentro de los estudios de la carrera, dejando de lado las aplicaciones y ventajas del ultrasonido. Sin concebir que pudieran ser altamente potenciales para el desarrollo de nuevos métodos y tecnologías.

Es por tanto que con la ejecución de este experimento se intenta alcanzar estas áreas del conocimiento acústico, reconociendo que existen aplicaciones del ultrasonido que pueden ser relevantes en varios campos en los que la detección de objetos, en espacios imposibilitados de seguimiento visual, sea imprescindible o simplemente facilite procesos.

1.3 ALCANCE.

La extensión del estudio comprende el diseño y construcción de un sistema de ecolocación de objetos dentro de un espacio limitado. Las pruebas de localización comprenden condiciones estáticas, así como también la detección de la trayectoria de objetos en movimiento.

El ensayo no exige ser reproducido en un laboratorio acústico anecoico, siempre y cuando el espacio destinado para la ecolocación esté libre de la influencia de factores externos que modifiquen los resultados finales como son objetos reflectantes a los alrededores inmediatos del sistema, una temperatura ambiente distinta de 20°C ($\pm 5^\circ\text{C}$), o una corriente de viento exagerada e inestable, entre otros. Así como también, se debe entregar al dispositivo una alimentación eléctrica de 3 voltios y 800 miliamperios de corriente continua (DC), con el fin de mantener la potencia ultrasónica de los transmisores al mismo nivel que en las pruebas. Cabe recalcar que para la ejecución de los ensayos fue necesario disponer de varios elementos instalados en un entorno físico, tales como el plano físico, los objetos de prueba y el propio sistema de ecolocación.

1.4 HIPÓTESIS.

Para la ejecución del proyecto se plantean las siguientes hipótesis que corresponden al correcto desempeño del sistema:

La transmisión de las ondas ultrasónicas genera reflexiones en los obstáculos del entorno, sin considerar la influencia de las demás superficies existentes como paredes, piso y techo; estas reflexiones son lo suficientemente efectivas

como para localizar objetos dentro de un espacio definido. Además, el sistema es capaz de mostrar la trayectoria de un objeto en movimiento dentro del campo de detección.

Las características del entorno en el que se realiza la detección no influyen significativamente en el correcto funcionamiento del sistema, siempre que no exista la influencia de factores externos como cambios bruscos de temperatura y velocidad del viento, ni objetos ajenos al ensayo dentro del campo de detección determinado.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo general.

Desarrollar el prototipo de un sistema de ecolocación para aplicarlo a la detección en dos dimensiones de objetos dentro de un espacio específico determinado por las capacidades de los elementos.

1.5.2 Objetivos específicos.

- Captar las reflexiones de las ondas ultrasónicas producidas en el objeto, por medio de transductores que permitan trabajar con las señales dentro del dominio eléctrico.
- Analizar la información obtenida por los sensores utilizando programación de microcontroladores y graficar la posición del objeto para ser proyectada en una pantalla gráfica.
- Evaluar el sistema en base a la comparación de los resultados obtenidos y la ubicación exacta de los objetos para determinar su precisión.
- Definir lineamientos técnicos que permitan reproducir fiel y exitosamente el experimento.
- Realizar la detección de objetos dentro de un entorno de características indeterminadas para la aplicación del sistema propuesto.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 GENERALIDADES.

El sentido de la audición se basa en la percepción sonora de magnitud, dirección y sentido de todo lo que conforma el paisaje sonoro que rodea a los seres vivos, así como también permite discriminar y diferenciar unos eventos de otros. Consecuentemente concede la facilidad para interactuar con el medio ambiente, lo cual se vuelve determinante para tomar decisiones. Esto se debe a que las señales acústicas transportan información que al ser percibida por un organismo, estos responden con un reflejo o una reacción, interactuando e integrándose con su entorno al generar actividad en respuesta al sonido, evitando ser solamente receptores pasivos (Nielbo, 2015, p. 1-2).

Consiguientemente gracias a la audición los seres vivos tienen la habilidad de localizar objetos a través de la percepción de sonidos que se reflejan en ellos. Incluso el ser humano es capaz de detectar auditivamente realizando este proceso, aunque no precisamente utilizando ultrasonidos como otras especies de animales; sino que distinguen sonidos audibles que permitan identificar la proximidad y las características de los obstáculos, principalmente el tamaño e incluso su forma; así como también, el entorno en el que se encuentran (Milne, Anello, Goodale y Thaler, 2014, p. 1).

Indudablemente el hombre no posee el mismo desarrollo evolutivo que otras especies animales que dependen de esta capacidad para sobrevivir; sin embargo las personas no videntes tienden a desarrollar esta destreza con mayor precisión por objeto de supervivencia, movilidad e identificación de obstáculos. Inclusive pueden generar sus propios impulsos sonoros para producir reflexiones y aplicar el método de localización por audición mencionado, tales sonidos como zumbidos, chasquidos, silbidos, arrastrar los pies, zapateos, golpeteos de caña, entre otros. En adición, se ha demostrado que el método de la ecolocación proporciona ventajas en la vida cotidiana en las personas no videntes de tal manera que aquellas que lo usan tienden a ser más independientes y exitosas que aquellos que no lo practican. De todos

modos, todo tipo de persona vidente o no vidente puede perfeccionar esta habilidad (Thaler, 2013, p. 1-2).

2.2 ANALOGÍA CON MURCIÉLAGOS.

Los murciélagos poseen la habilidad excepcional de detectar los objetos y obstáculos que los rodean utilizando su audición ultrasónica. Entender exactamente cómo utilizan este sentido sigue siendo un misterio en algunos aspectos como la manera de interpretar la información que reciben de los ecos provenientes de reflexiones. Sucede que las señales resultantes son abundantes y su espectro frecuencial se vuelve complejo. Por lo tanto los murciélagos deben desarrollar una sensibilidad especial para analizar los ecos percibidos. Conjuntamente son capaces de diferenciar el entorno acústico que les rodea y las características de los objetos que detectan. También pueden identificar la diferencia de fase de los ecos que reciben con una precisión de microsegundos (Schörnich, 2008, p. 9-10, 47-48).

Generalmente pueden receptor señales de ecos en un rango de 30 a 40 grados a cada extremo del eje central. Los ultrasonidos que producen son muy variables en cuanto a intensidad, frecuencia (tonos desde los 20 a los 120kHz) y duración de pulso, los cuales pueden ser de frecuencia modulada (duración de 2 a 5 ms), de frecuencia constante (duración de 10 a 50 ms) o una mezcla de ambos (Racey, 2015, p. 4).

Por otra parte, esta destreza excepcional les permite movilizarse por la noche, localizar presas y predadores con facilidad y precisión. Así como también la usan para comunicarse entre ellos y distinguirse del resto. La diferencia radica en la tonalidad de las ondas sonoras que producen, siendo de más baja frecuencia las señales destinadas para la comunicación, incluso pueden ser percibidas por el ser humano (Racey, 2015, p. 5).

2.3 APLICACIONES.

2.3.1 Primeros sistemas.

A principios del siglo pasado se empleó la ecolocación para rastrear objetos en las profundidades de los océanos (aeronaves desaparecidas o submarinos por ejemplo). Para lo cual fueron desarrollados sistemas de sondas a base de ecos por el científico alemán Alexander Behm quien usaba cartuchos explosivos como fuentes sonoras. La necesidad de rastrear objetos subacuáticos nace como resultado del hundimiento del Titanic y los inicios de la Primera Guerra Mundial. Posteriormente y durante la Segunda Guerra Mundial también se dispuso de estas técnicas mejoradas, considerando métodos de estimación de tiempo de vuelo según la correlación de las señales, dichas técnicas fueron clasificadas por medidas de seguridad durante los tiempos de guerra (Mollén, 2015, p. 4-5).

Estos sistemas tuvieron su auge en tiempos de post-guerra, los cuales funcionaban con una simple onda de amplitud modulada que proporcionaba una imagen geométrica del fondo asumiendo una profundidad marítima plana. Además no alcanzaban profundidades muy bajas debido al uso de muy altas frecuencias (200kHz a 1.4MHz), lo que reducía la resolución y la confiabilidad del sistema. Posteriormente se mejoró el sistema para tener mayor cobertura en su detección y realizar mapeos en el interior del mar; sin embargo, la resolución se mantenía reducida (GeoHab Backscatter Working Group, 2015, p. 7).

El desarrollo industrial permitió obtener mayor resolución en la captación y en los resultados mostrando mosaicos ejemplares del fondo marino. Se llegó a normalizar la cobertura a 45° de detección logrando gráficos más realistas. Es entonces que esta técnica pasó de ser una operación cualitativa descriptora de una superficie como plana, a ser a un completo análisis cuantitativo basado en procesos matemáticos. Actualmente se hace uso de transductores de onda múltiple o multihaz para conseguir información topográfica de las profundidades acuáticas, mientras que los sensores de un solo haz o monohaz son usados

para cuantificar solamente distancias unidimensionales (GeoHab Group, 2015, p. 8).

2.3.2 Batimetría.

Se refiere a las técnicas que se utilizan para estudiar las profundidades acuáticas y se implementó la ecolocación dentro de estas técnicas con un gran aporte más realista, que actualmente proporciona detecciones de movimiento y mayor resolución angular y espacial; el alcance es mayor pero aun limitado. La clave radica en analizar las propiedades de las ondas recibidas y aplicar las correcciones debidas para obtener mayor precisión y resultados detallados del ecosistema subacuático (GeoHab Group, 2015, p. 8).

Particularmente se realiza el mapeo del fondo marino y de sus especies obteniendo muestras de distancias hacia ellos. Las distancias son calculadas a partir de la recepción de las reflexiones de las señales ultrasónicas emitidas hacia las profundidades. Los sistemas dispuestos para estas aplicaciones reciben el nombre de ecosondas, las cuales generalmente se instalan en la parte inferior de los barcos en el primer tercio de la longitud del mismo, evitando filtraje de ruido de motores, hélices y del movimiento del agua (Manik, 2015, p. 1 y Ballesteros y Garcia, 2010, p. 31).

Por otro lado, representa uno de los métodos más costo-efectivos para la detección y mapeo marino, ya que incluso permite caracterizar la textura del sedimento. Para lograr plenos resultados se deben atender consideraciones como son la impedancia, densidad y la velocidad del sonido que, por ejemplo, se aproxima a 1435m/s en agua dulce y a 1500m/s en agua salada; así como también consideraciones del sedimento si se desea describir sus materiales componentes (Manik, 2015, p. 2 y Ballesteros y Garcia, 2010, p. 32).

Las principales ventajas que presentan los ecolocalizadores por sobre otros métodos batimétricos están relacionadas con el alcance, la velocidad de muestreo y el tiempo casi inmediato para obtener resultados. Además, el

sistema es menos invasivo para el hábitat submarino, sin la necesidad de extraer ejemplares físicos. Por otra parte, la sonda puede presentar datos en una extensa resolución espacial, tanto vertical como horizontal (Manik, 2015, p. 2).

2.3.3 Navegación aérea y robótica

Es posible encontrar mayor cantidad de aplicaciones de los sistemas de ecolocación tales como radares, sonares, sistemas vehiculares contra colisiones y dentro de sistemas de acústica y robótica. Dentro de la navegación robótica se utilizan también sistemas láser, sensores infrarrojos y cámaras de visión pero presentan desventajas para su adquisición y operación como por ejemplo el costo elevado, el tiempo que demoran en procesar información y la complejidad de los métodos computacionales; no así sucede con sistemas ultrasónicos que resultan ser mejor opción en las situaciones mencionadas, además que permiten su uso en condiciones de visión nula o en presencia de gases nocivos (Thong-un, Hirata y Kurosawa, 2015, p. 1).

De igual manera que dentro de aplicaciones batimétricas, para el uso de estos sistemas en la robótica también se deben tomar consideraciones acústicas, generalmente son de atención los efectos de la radiación, la frecuencia de resonancia de los sensores, la frecuencia de las señales y la atenuación de las mismas debido a la distancia que recorren. Esta última imposibilita el uso de frecuencias demasiado elevadas ya que se atenúan fácilmente en el aire (Sarabia, Llata, Robla, Torre-Ferrero y Oria, 2013, p. 15465).

Por lo tanto conviene trabajar con señales de frecuencias ultrasónicas bajas, sin embargo estas no resultan ser tan direccionales como se necesita para alcanzar el objetivo. Este detalle principalmente ha impedido un desarrollo exhaustivo de aplicaciones aéreas de ecolocalizadores a comparación de los sistemas para otros medios como son los líquidos o sólidos (Sarabia et al., 2013, p. 15466-15467).

2.3.4 Seguridad industrial.

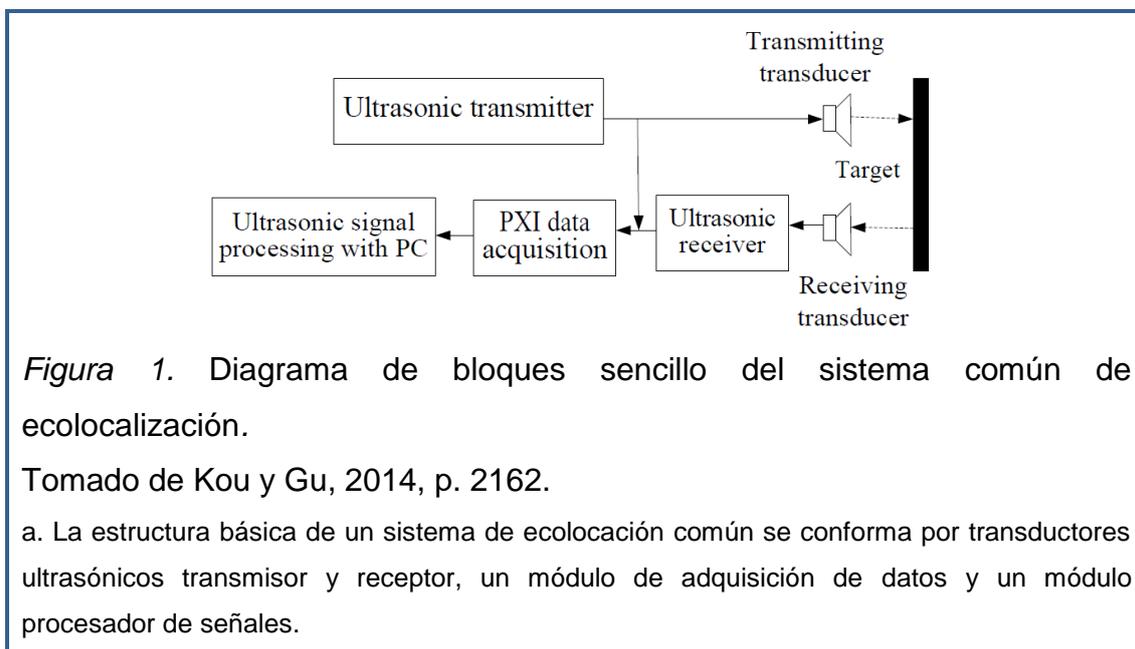
Dentro de temas concernientes a construcción y seguridad industrial se encuentran aplicaciones que requieren una gran precisión a largo alcance, por ejemplo en sistemas de alerta de seguridad en torres de grúas con el fin de evitar colisiones. El mayor inconveniente que se presenta es precisamente la falta de precisión a largo alcance, debido a la distancia que debe recorrer el ultrasonido sin atenuarse, desviarse o volverse inestable (Kou y Gu, 2014, p. 2161).

Por lo tanto, los métodos y herramientas que trabajan óptimamente a una distancia límite inferior a 20 metros no son útiles en estas situaciones y se deben plantear otros modelos de cálculo e interpretación para esta clase de sistemas. Se suele recurrir a combinaciones de métodos de cálculo para mayor precisión en la lectura de los picos de los ecos recibidos, vinculado con la más exacta descripción de la envolvente de la señal que se pueda conseguir (Kou y Gu, 2014, p. 2161).

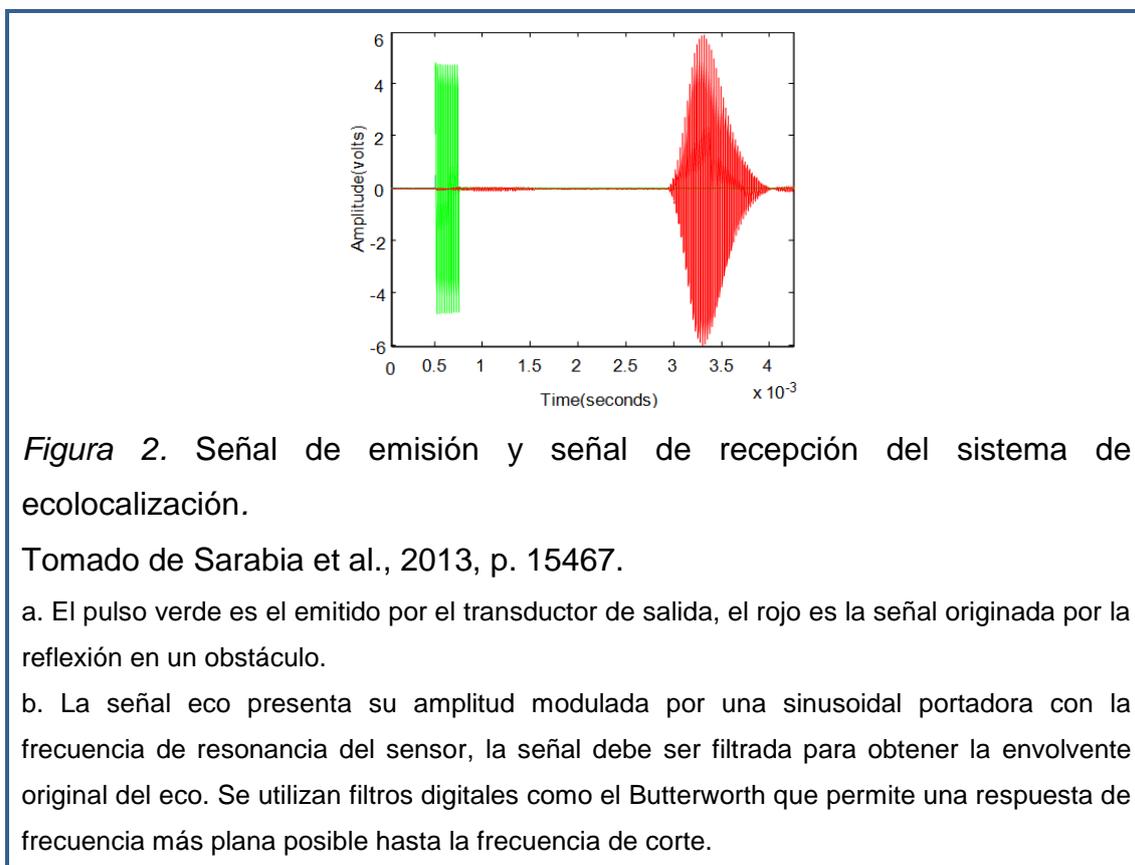
2.4 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN ECOLOCALIZADOR.

El principio general del proceso para la detección de objetos se basa en la emisión de señales ultrasónicas, producidas desde un procesador a través de un circuito que impulsa al transductor emisor a transmitir las señales. Posteriormente se reflejan las señales en un obstáculo objetivo y después de transcurrir un periodo de tiempo específico, retornan al sistema en forma de ecos y son captados por un transductor receptor. Las señales receptadas se transforman en impulsos eléctricos, se amplifican y se representan numéricamente; la información es procesada dentro de un módulo computacional por medio de cálculos matemáticos que finalmente arrojan resultados y el análisis del escenario. Es entonces que el análisis de tiempo de vuelo resultante entre los pulsos emitido y receptado, proporciona la distancia específica al obstáculo mencionado (Kou y Gu, 2014, p. 2163 y Sarabia et al., 2013, p. 15466-15468).

En la Figura 1 se aprecia un diagrama de bloques de la estructura de un sistema común de ecolocación.



En la Figura 2 se explica en detalle el comportamiento de los pulsos.



2.5 MÉTODO DE ANÁLISIS.

2.5.1 Tiempo de vuelo TOF (time of flight)

Se describe, según Barshan y Ayrulu (2000, p. 1), como el periodo de tiempo transcurrido desde el punto de partida de la señal transmitida y el punto de llegada de la señal eco. A partir de este intervalo se aplica el modelo matemático de movimiento rectilíneo uniforme que relaciona las variables de velocidad, distancia y tiempo como se ve a continuación:

$$v = \frac{d}{t} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Dónde:

v: Velocidad.

d: Distancia.

t: Tiempo.

Entonces, se toma la velocidad del sonido en el medio de propagación para el cálculo, despejando la variable de distancia y reemplazando el TOF se encuentra el valor de la distancia deseada, según el siguiente modelo:

$$d = c \times \text{TOF} / 2 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde:

c: Velocidad del sonido en el medio.

d: Distancia entre obstáculo y sistema.

TOF: Tiempo de vuelo.

Cabe recalcar que el valor de TOF representa el tiempo total que incluye el viaje de ida y de retorno de la señal. Además se asume que cada viaje tiene la misma duración ya que las variables de velocidad del sonido y distancia se mantienen constantes en este transcurso. Por lo tanto se utiliza la mitad del TOF para poder realizar el cálculo y se lo divide para dos, ya que se debe tomar únicamente el tiempo que demoró la señal en ir de sistema a obstáculo o

viceversa (Barshan y Ayrulu, 2000, p. 1-2).

La precisión del sistema depende de la efectividad de la estimación del tiempo de vuelo y del valor de velocidad del sonido considerado. Se han desarrollado varios métodos para la estimación de este tiempo para ser aplicado a ecolocalizadores (Barshan y Ayrulu, 2000, p. 2).

2.5.2 Métodos de estimación del TOF.

Una vez que se ha emitido un pulso y este se ha reflejado, retorna al sistema junto con ruido proveniente de otras fuentes sonoras y de las características acústicas del entorno. Por lo tanto, la estimación del tiempo de vuelo, debe ser determinada en conjunto con algún método que permita distinguir únicamente la señal eco de todo el ruido exterior que se filtra por el receptor (Mollén, 2015, p. 8).

Los métodos de cálculo más comunes son: lectura del umbral y el de correlación cruzada. Habitualmente se utilizan para medidas de distancia corta, los cuales se describen junto con otros métodos en los **Anexos** (Anexo 1. Métodos de estimación del TOF) (Kou y Gu, 2014, p. 2162).

2.6 TIPOS DE ECOLOCALIZADORES.

En general, los sistemas de ecolocación se componen por transductores que pueden ser piezoeléctricos (simples, de menor voltaje y costo, ancho de banda limitado), electrostáticos (alta sensibilidad y ancho de banda, voltaje elevado para operar, más costosos), y actualmente pueden ser también transductores piezoeléctricos de fluoruro de polivinilideno (PVDF, menor sensibilidad, para distancias cortas) (Sarabia et al., 2013, p. 15466-15467).

Por otra parte, los ecolocalizadores se pueden clasificar de acuerdo a la cantidad de haces que transmiten, como se observa en la siguiente figura:

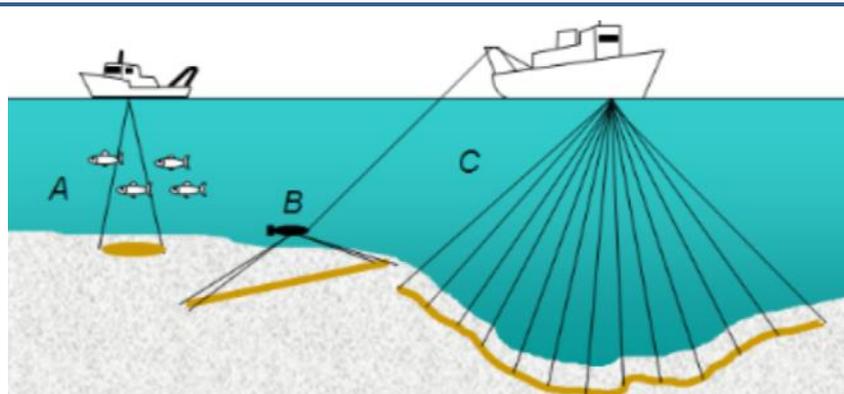


Figura 3. Tipos de ecolocalizadores según el número de haces, aplicados a batimetrías.

Tomado de GeoHab Group, 2015, p. 14.

- a. Ecolocalizador de un solo haz.
- b. Ecolocalizador monohaz en escaneo lateral.
- c. Ecolocalizador multihaz.

2.6.1 Ecolocalizador de un solo haz o monohaz.

Estos sistemas emiten una sola señal por medio de un transductor, esta se refleja en una superficie frontal y retorna para su análisis. El uso primordial es la medición de distancias hacia un objeto o superficie, como para calcular la distancia de la profundidad del fondo acuático. El sencillo método de cálculo se basa en el tiempo de vuelo de las señales para obtener la distancia total hacia el objetivo (Mollén, 2015, p. 7-8).

Para lograr un detalle más preciso se practica un barrido lateral con el monohaz, lo cual presenta un modelamiento a manera de ecografía, pero no describe la posición de objetos dentro del campo. Es por esto que actualmente el sistema monohaz ha sido reemplazado por sistemas multihaz; sin embargo, puede ser útil para descripciones simples de distancias (GeoHab Group, 2015, p. 8 y Ballester y Garcia, 2010, p. 33).

2.6.2 Ecolocalizador de múltiples haces o multihaz.

Como su nombre lo indica, este dispositivo transmite múltiples señales de una misma frecuencia a diferentes angulaciones, dispuestas de modo que forman

una especie de patrón polar en la reproducción de ondas a manera de abanico. El método de detección se basa en el mismo principio que en los sistemas de monohaz, pero se diferencia en las técnicas para la estimación del tiempo de vuelo, que suelen ser de correlación por medio de interpolación de señales (Ballester y Garcia, 2010, p. 34).

Este ecolocalizador presenta varias ventajas a comparación de los anteriores: principalmente son superiores en la cobertura de la superficie de detección, consecuentemente en la rapidez del proceso y la disminución de los costos de operación. Conjuntamente, los resultados que presentan son más precisos y posibilitan el análisis y la descripción más detallada de las superficies y obstáculos presentes. Es extremadamente útil para ecosondas de batimetrías (GeoHab Group, 2015, p. 8 y Ballester y Garcia, 2010, p. 34).

2.7 MEDIDORES DE DISTANCIA POR ULTRASONIDO.

Actualmente existen en el mercado dispositivos ecolocalizadores monohaz portátiles que miden distancias en una dimensión por medio de ultrasonido. Estos aparatos integran en su circuito un chip microcontrolador que basa su funcionamiento en procesos y cálculos matemáticos con palabras digitales, al igual que un computador.

Para la detección de distancia simplemente se requiere que el microcontrolador pueda enviar y recibir información, y la suficiente capacidad de almacenamiento y procesamiento de cálculos programables para cumplir con la labor.

Por otra parte, el circuito debe incorporar más elementos como son los sensores transductores tanto de transmisión como de recepción de señales ultrasónicas. Estos transductores generalmente piezoeléctricos, también se encuentran en el mercado de venta al público por pares de transmisor-receptor, contenidos en el módulo HC-SR04 que posee una resolución de 0.3cm de tolerancia (Rubio y Villao, 2010, p. 1, 3 y Cytron Technologies, 2013, p. 3).



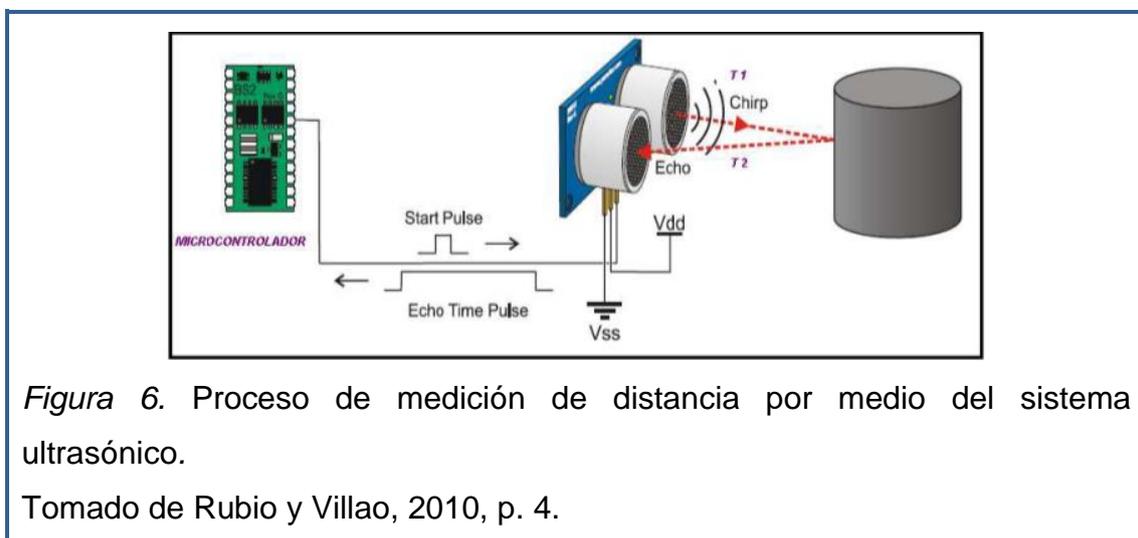
Los medidores de distancia suelen presentar los resultados numéricos en una pantalla contenida en el dispositivo. Sin embargo, también se puede destinar la información hacia algún programa computacional más complejo para un manejo más práctico de los datos. Además, el ensamblaje del circuito requiere de otros componentes electrónicos básicos para el correcto funcionamiento del circuito final (Rubio y Villao, 2010, p. 3).



El funcionamiento del circuito final mantiene el principio básico de localización de objetos por ultrasonido. Opera de la siguiente manera: se dispara una señal de frecuencia determinada en conjunto con un pulso digital interno (uno lógico) y un contador de tiempo que se pone en marcha. Cuando la señal ultrasónica choca con un obstáculo, se refleja en forma de eco y es detectado por el

sistema. Inmediatamente el pulso interno regresa a su estado inicial (cero lógico), y el contador interno cesa su conteo cuando esto ocurre. Por lo tanto, se considera que la duración del pulso interno determina el TOF que ha sido determinado por el contador. Posteriormente se realiza el cálculo de la distancia deseada, la misma que es presentada mientras el sistema se reconfigura a su estado inicial para una nueva lectura (Rubio y Villao, 2010, p. 4-5 y AGELECTRÓNICA, s.f., p. 2).

Al igual que en todo sistema, el medidor de distancias por ultrasonido presenta sus propias limitaciones dependiendo del tipo de fabricación, la capacidad de componentes, la disposición de los mismos y los valores con los que se trabaje. La posición y la distancia entre los sensores receptor y transmisor es la variable principal para la lectura de distancia, ya que mientras más juntos estén, el dispositivo podrá detectar obstáculos más cercanos a la fuente. Aunque suelen haber dispositivos constituidos por un solo transductor que funciona como transmisor y receptor (AGELECTRÓNICA, s.f., p. 3).



En otra instancia, para el óptimo rendimiento se aconseja que el dispositivo se ubique perpendicular y frente al objeto a medir, evitando la influencia de otros obstáculos indeseados en el campo de medición; además que mientras más plana sea la superficie del objeto y mientras más reflectante sea esta, más efectiva será la medición (AGELECTRÓNICA, s.f., p. 3).

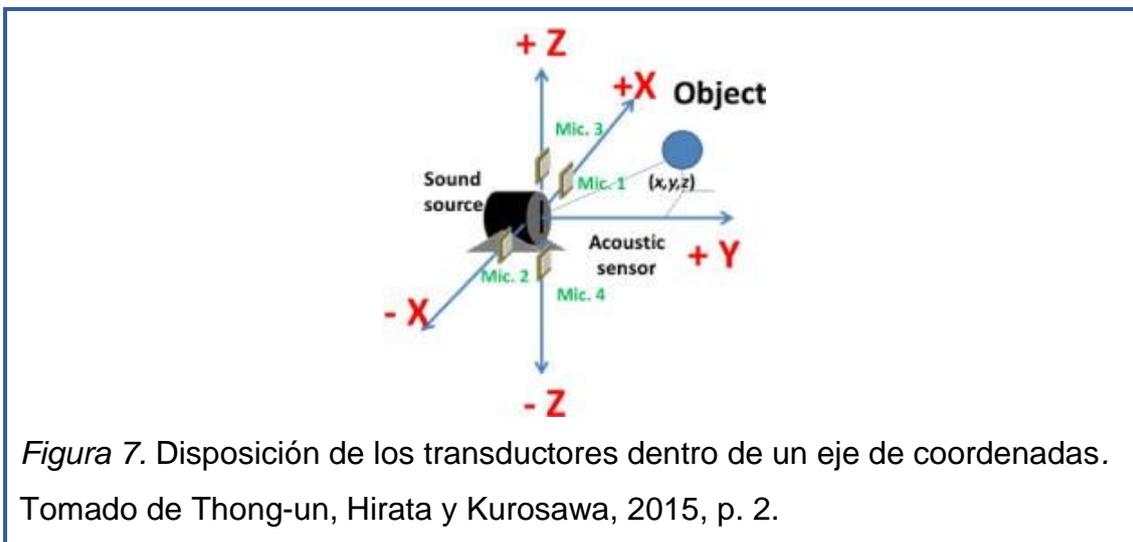
Por último, particularmente estos dispositivos deben permitir su calibración y ajuste. Por más sencillo que sea el dispositivo, el principio de su funcionamiento estará descrito en líneas de códigos de programación impresos en el microcontrolador, cerebro de operaciones. Dentro de estas codificaciones se consideran los valores de las constantes y las variables para el cálculo matemático correspondiente, como son principalmente: la velocidad del sonido dependiente de las condiciones climáticas del entorno, la frecuencia de la señal ultrasónica y su amplitud para ser transmitida, la estimación del TOF de la señal al ser receptada, contadores de tiempo, y el primordial cálculo de la distancia deseada (AGELECTRÓNICA, s.f., p. 3-4).

La posibilidad de cambiar los valores de las constantes y por ende de las variables, permitirá ajustar la detección del sistema a la mayor exactitud posible, ya sea por medio de programación, por modificación o ingreso de valores si así lo permite. Esta calibración se vuelve necesaria cuando se trabaja con sistemas sonoros debido a que la propagación de las ondas acústicas depende de las características del medio en el que se encuentren, para esta aplicación se trata del medio gaseoso del aire, el cual puede variar significativamente sus condiciones y alterar el trabajo del dispositivo provocando respuestas inexactas. El prototipo en construcción puede ser igualmente calibrado según las necesidades que se requieran (AGELECTRÓNICA, s.f., p. 2-3).

2.8 SISTEMA DE ECOLOCACIÓN EN 3 DIMENSIONES

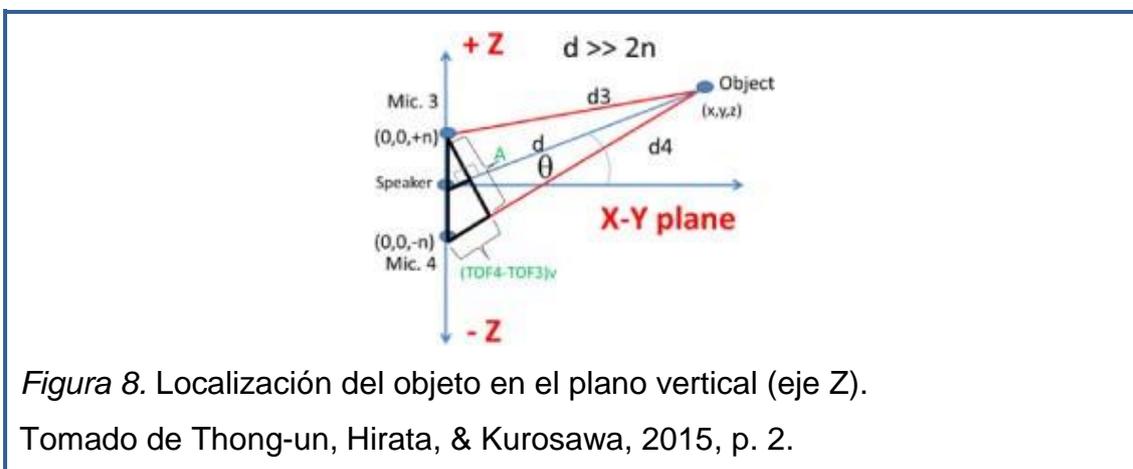
Para obtener resultados de ecolocalización en tres dimensiones se requiere sistemas de múltiples haces. Según el estudio de Thong-un y otros (2015, p. 1-5), quienes plantean un ecolocalizador tridimensional; se debe disponer de 4 transductores receptores además del transmisor, la distancia resultante será calculada con respecto al origen donde se encuentra el transmisor. Para detectar objetos frente al sistema se delinea un plano de coordenadas comprendido por el área entre $-X$ a $+X$ (ancho), $-Z$ a $+Z$ (alto) y solamente $+Y$ (distancia frontal al sistema). Los sensores deben ser ubicados en los ejes X y

Z como se observa en la Figura 7:



Primeramente se determina la posición del objeto en el plano vertical, para lo cual se tienen las variables del ángulo de elevación, la distancia y los tiempos de vuelo de los sensores 3 y 4. Además, se debe conocer la distancia constante entre los dos sensores. Consecuentemente se delinea un triángulo formado por el objeto y los dos sensores.

Entonces, al estimar el TOF de cada sensor se puede determinar la ubicación del objeto en el eje Z. Si TOF del sensor 3 es menor que TOF del sensor 4, el objeto se ubica en el área de +Z; en cambio, si TOF del sensor 4 es mayor, la ubicación del objeto será en -Z.



Considerando que la distancia al objeto es mucho mayor que la separación entre sensores se puede aplicar la ley de cosenos, la cual se usa en trigonometría cuando se conoce los valores de dos lados del triángulo y del ángulo que los interseca. Entonces se plantea la ecuación a manera de buscar solución para la distancia al sensor y solo bastará encontrar el ángulo entre la distancia al objeto y el plano vertical del eje Z, de la siguiente manera:

$$d_4^2 = d^2 + n^2 - 2nd \cos(90^\circ + \theta) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Dónde:

d_4 : Distancia entre obstáculo y sensor 4.

d : Distancia entre obstáculo y origen.

θ : Ángulo equivalente entre recta de distancia y eje +Y.

$2n$: Distancia entre sensores 3 y 4.

Se plantea otro triángulo interno para hallar el ángulo deseado a partir de la diferencia entre el TOF del sensor 4 y del sensor 3, y se utiliza la función seno como se expresa a continuación:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{(\text{TOF}_4 - \text{TOF}_3)v}{2n} \right) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Dónde:

v : Velocidad del sonido.

TOF_4 : Tiempo de vuelo del sensor 4.

TOF_3 : Tiempo de vuelo del sensor 3.

Una vez encontrado el ángulo θ , solo queda reemplazar las variables y despejar la incógnita de la distancia total en la ecuación 3. Tomando como ejemplo que la operación se realizó con el sensor 4, se tiene la siguiente fórmula:

$$d = \frac{(v\text{TOF}_4)^2 - n^2}{2v\text{TOF}_4 - 2n\cos(90^\circ + \theta)} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Dónde:

d: Distancia entre obstáculo y origen.

Por otra parte, si TOF_4 es menor que TOF_3 , únicamente se reemplazará TOF_4 por TOF_3 en la ecuación 5. Además, la coordenada en el eje Z corresponde a la ecuación:

$$z = d \cdot \sin(\theta) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Para identificar la distancia representada en el plano lateral (eje X) se realiza el mismo procedimiento con las fórmulas anteriores considerando los TOF de los sensores 1 y 2 y el ángulo que se forme en esa situación. Asimismo se encontrará la coordenada del eje X aplicando la ecuación 6 (Ecuación 6) y reemplazando los valores correspondientes al plano lateral. La coordenada del eje Y se puede deducir aplicando el modelo:

$$y = d \cdot \cos(\theta) \quad (\text{Ecuación 7})$$

Cabe recalcar que se debe considerar el área de cobertura y el patrón polar de radiación sonora ultrasónica que generalmente se encuentra entre los 20° a 45° , valores que dependen de la frecuencia ultrasónica que se utilice, ya que mientras mayor sea la frecuencia emitida, la radiación sonora es más direccional y el grado de cobertura tiende a reducirse. No obstante, la rotación del transmisor permite abarcar mayor espacio de radiación (Thong-un et al., 2015, p. 3).

CAPÍTULO III. DESARROLLO

El prototipo a desarrollar es un ecolocalizador multihaz que basa su diseño y cálculos en los medidores de distancia por ultrasonido Medidores de distancia por ultrasonido.y en el sistema de ecolocación en 3 dimensiones, presentados en el capítulo anterior.

Para la construcción del ecolocalizador se utilizaron principalmente los componentes: microcontrolador PIC16f886, dos módulos HC-SR04 que contienen los transductores ultrasónicos necesarios, una pantalla LED gráfica y una placa de circuitos perforada, además de elementos básicos como capacitores, resistencias, potenciómetros e interruptores. Cabe mencionar que el circuito final diseñado con estos elementos no permite manipular los impulsos ultrasónicos; la capacidad del sistema se limita a mostrar directamente los resultados numéricos de las distancias deseadas y no admite analizar las propiedades de las señales.

Para mayor comprensión del desarrollo del sistema, se ha dividido el capítulo en tres partes que son: cálculos matemáticos y simulación virtual, construcción del prototipo y experimentación del sistema; los cuales se presentan a continuación.Experimentación del sistema.

3.1 CÁLCULOS MATEMÁTICOS Y SIMULACIÓN VIRTUAL

3.1.1 Cálculos matemáticos.

Es la primera parte del desarrollo en la cual se utilizaron las especificaciones proporcionadas por los fabricantes de cada uno de los elementos para determinar las limitaciones, configuraciones y modos de operación del sistema en conjunto; de tal manera que se describió analíticamente, por medio de cálculos numéricos y gráficos, los resultados que se esperaban obtener en el prototipo final. Conjuntamente, se tomaron las decisiones teóricas principales sobre el funcionamiento del sistema, las cuales fueron comprobadas experimentalmente en el último proceso que corresponde a la operación del prototipo.

Esta etapa fue realizada dentro de hojas de cálculo del programa Microsoft Excel, en las que se desarrollaron y calcularon las etapas previas a la construcción del dispositivo y la operación del sistema en general. Además presenta hojas de cálculo relacionadas con la experimentación del sistema que se observará en la sección correspondiente.

La figura 9 muestra la información y los datos que utiliza el sistema para el cálculo de los resultados, manipular estos valores dentro de las tablas de Excel no permite modificar directamente la operación del ecolocalizador en desarrollo, únicamente representa la etapa de diseño de cálculos que posteriormente serán incorporados al microcontrolador del circuito. Además, la figura exhibe una gráfica que representa la visualización de posiciones en un plano de coordenadas XY. Para calcular dichos resultados, se tomaron como variables independientes a ingresar a las distancias obtenidas por cada uno de los sensores hacia el objeto determinado, y a la distancia que separa a los sensores denominada Base; formando un triángulo entre ellas. Por medio de cálculos geométricos, sobre este triángulo se va desarrollando paso a paso el proceso correspondiente hasta obtener las coordenadas finales del objeto dentro de un plano bidimensional X-Y, con unidades de milímetros. Es posible visualizar la posición de dicho objeto dentro del plano como se ve a continuación, asimismo permite la comparación del cálculo del sistema armado frente a los datos arrojados por el programa:

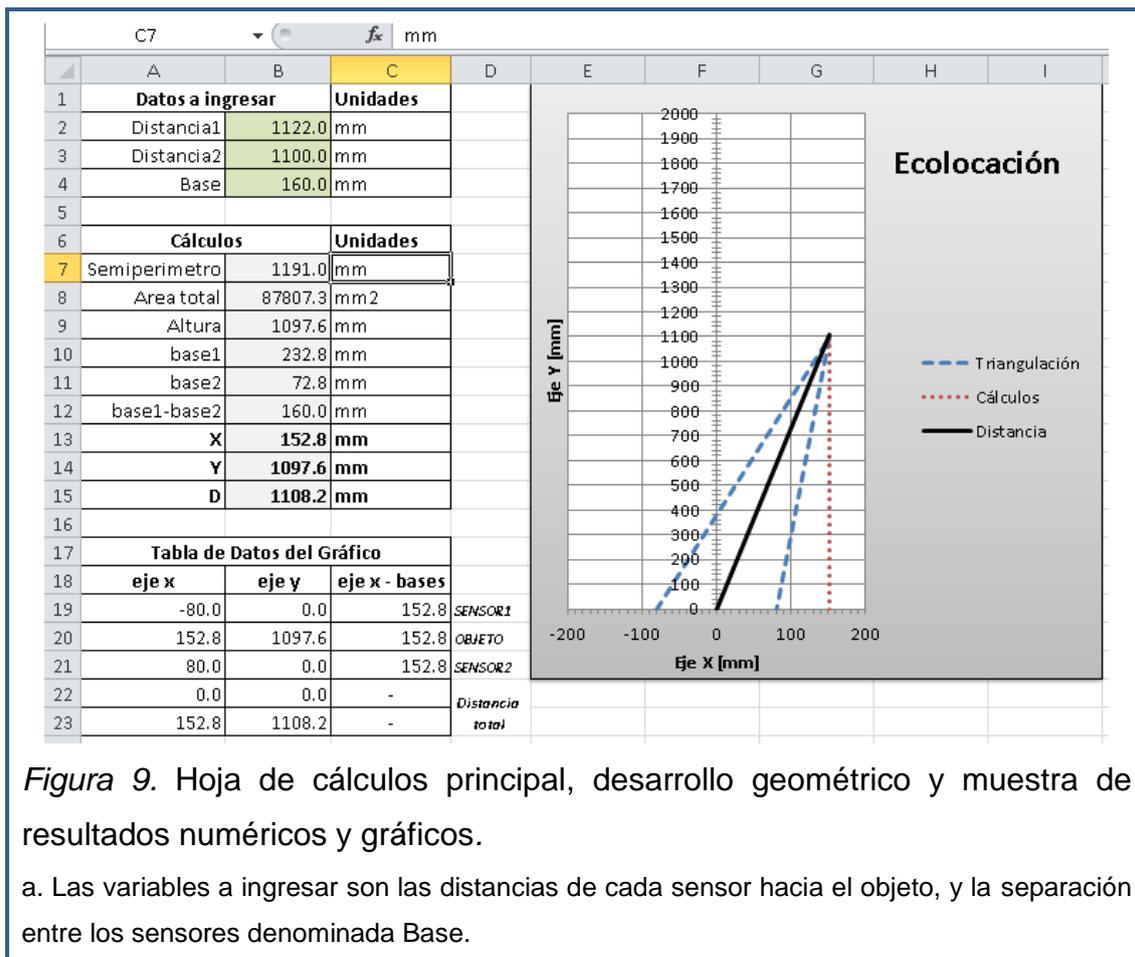


Figura 9. Hoja de cálculos principal, desarrollo geométrico y muestra de resultados numéricos y gráficos.

a. Las variables a ingresar son las distancias de cada sensor hacia el objeto, y la separación entre los sensores denominada Base.

Las ecuaciones correspondientes a los cálculos geométricos se describen a continuación: (Universo Fórmulas, 2015).

- Semiperímetro del triángulo:

$$\text{semip} = (d1 + d2 + \text{base}) / 2 \quad (\text{Ecuación 8})$$

- Área del triángulo según fórmula de Herón:

$$\text{área} = \sqrt{\text{semip}(\text{semip} - d1)(\text{semip} - d2)(\text{semip} - \text{base})} \quad (\text{Ecuación 9})$$

- Altura del triángulo:

$$\text{altura} = 2\text{área} / \text{base} \quad (\text{Ecuación 10})$$

- Distancia entre sensor 1 y la perpendicular del objeto hacia la base:

$$\text{base1} = \sqrt{d1^2 - \text{altura}^2} \quad (\text{Ecuación 11})$$

- Distancia entre sensor 2 y la perpendicular del objeto hacia la base:

$$\text{base2} = \sqrt{d2^2 - \text{altura}^2} \quad (\text{Ecuación 12})$$

- Coordenada de x en relación entre base1 y base2:

Si: $\text{base1} - \text{base2} > 0 \therefore X^+ = \text{base1} - \text{base2}/2$ (Ecuación 13)

Si: $\text{base1} - \text{base2} < 0 \therefore X^- = -\text{base2} + \text{base1}/2$ (Ecuación 14)

- Coordenada de y:

$Y = \text{altura}$ (Ecuación 15)

- Distancia total al origen del sistema:

$D = \sqrt{X^2 - Y^2}$ (Ecuación 16)

Dónde:

d1: Distancia entre sensor 1 y objeto.

d2: Distancia entre sensor 2 y objeto.

base: Distancia entre los dos sensores.

D: Distancia total del objeto hacia el origen del sistema.

Por otra parte, la hoja de cálculo diseñada también incluye cálculos relacionados con transformaciones de valores a diferentes unidades necesarias para las operaciones, empezando con la velocidad del sonido a una temperatura determinada. Además se realizan las conversiones proporcionales correspondientes al gráfico de las distancias en la pantalla y las relaciones que existen entre milímetros y píxeles para cada dimensión, ya que son las unidades que se utilizan en la pantalla LCD del sistema (figura 10).

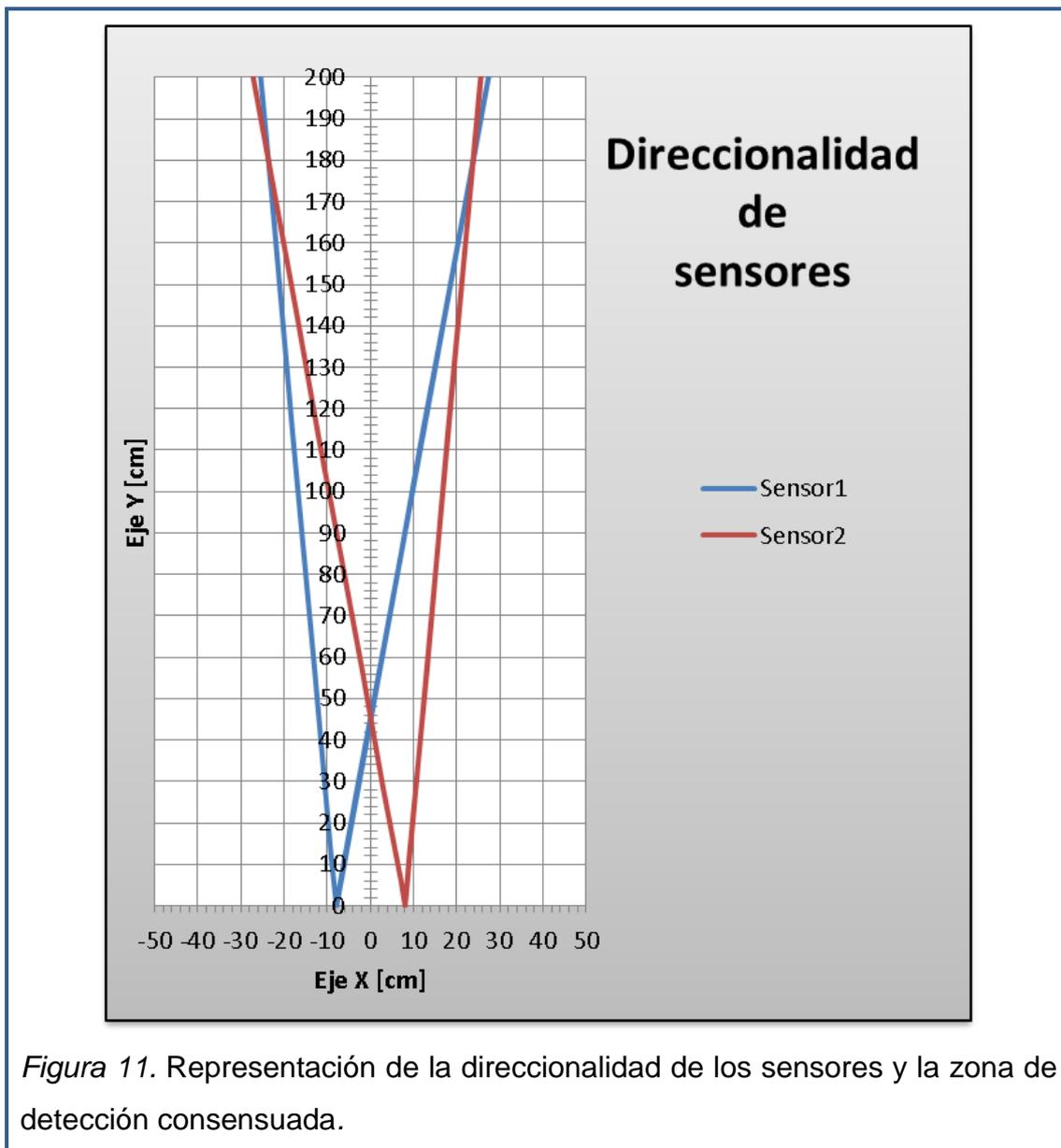
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Temperatura	20	°c					
2								
3	Fórmula	c - Vel sonido	Unidad		dist Total	2000	2015.5	[mm]
4	$331.5+0.6*^{\circ}\text{C}$	343.5	m/s		TOF	11644.83261	11735	[us]
5	$343.5/10000$	0.03435	cm/us		T total	65535	65535	[us]
6	$1/29.112$	0.03435	cm/us		T precarga	53890.2	53800	[us]
7	$1/(29+(112/1000))$	0.03435	cm/us					
8	$343.5/1000$	0.3435	mm/us					
9	$343.5*1000/(1*10^6)$	0.3435	mm/us					
10	$1/2.9112$	0.3435	mm/us					
11	$1/(2+(9112/10000))$	0.3435	mm/us					
12	$3435/10000$	0.3435	mm/us					
21								
22		Vertical						
23	Eje y	1500mm/101p	14.85	15 mm/pixel				
24	Eje x	520mm/36p	14.44	15 mm/pixel				
25								
26		Eje	Dist en mm	Distancia en pixeles				
27		y	1097.59	73.2 pixel				
28		x	152.76	10.2 pixel				

Figura 10. Hoja de cálculos conversiones, transformación de unidades necesarias para el sistema.

- Se calcula la velocidad del sonido a 20°C en unidades de milímetros por microsegundos, unidades a las que trabaja el microcontrolador para mayor precisión.
- El contador interno tendrá una precarga de 53800 de un total de 65535 microsegundos que puede contar, así se desborda y reinicia pasados los 2 metros.
- La resolución para el gráfico del plano y de las posiciones en la pantalla led será de 15 milímetros por cada pixel para los dos ejes X-Y.

Finalmente, se presenta una visión de los límites del patrón polar de cada uno de los sensores según sus especificaciones. En esta hoja fue posible configurar la ubicación de los sensores y su angulación propicia dentro del eje de coordenadas con el fin de definir una zona de detección de objetos lo más amplia y extensa posible.

Cabe recalcar que la zona de detección es aquella en la que se da la intersección de los patrones polares de cada sensor, es decir, que corresponde al espacio cubierto por los dos sensores, si el objeto se encuentra fuera de esta zona no será detectado. La figura 11 muestra la gráfica de la disposición teórica de los sensores y la cobertura que presentan:



Entonces, se tomó la decisión de separar los sensores una distancia de 16 cm y angular cada uno de ellos 2.5° hacia adentro, para obtener una zona de detección que se abre hasta 50cm de apertura y desde los 50cm hasta los 200cm de distancia del sistema.

3.1.2 Simulación virtual.

En esta etapa se diseñó un modelo virtual del funcionamiento del prototipo y se realizaron las configuraciones necesarias en base a los análisis matemáticos realizados anteriormente. Esencialmente, en esta parte se describieron los

procesos del algoritmo del sistema, que posteriormente se volvieron códigos de programación. Dicho algoritmo de programación es descrito por un diagrama de flujo que indica el esquema general del modo de operación del prototipo y los procesos que debe cumplir. El esquema debe plasmarse en líneas de programación que codifiquen un microcontrolador como cerebro central de operaciones, desde donde se enviarán órdenes hacia todo el sistema. El diagrama de flujo se muestra en la siguiente figura.

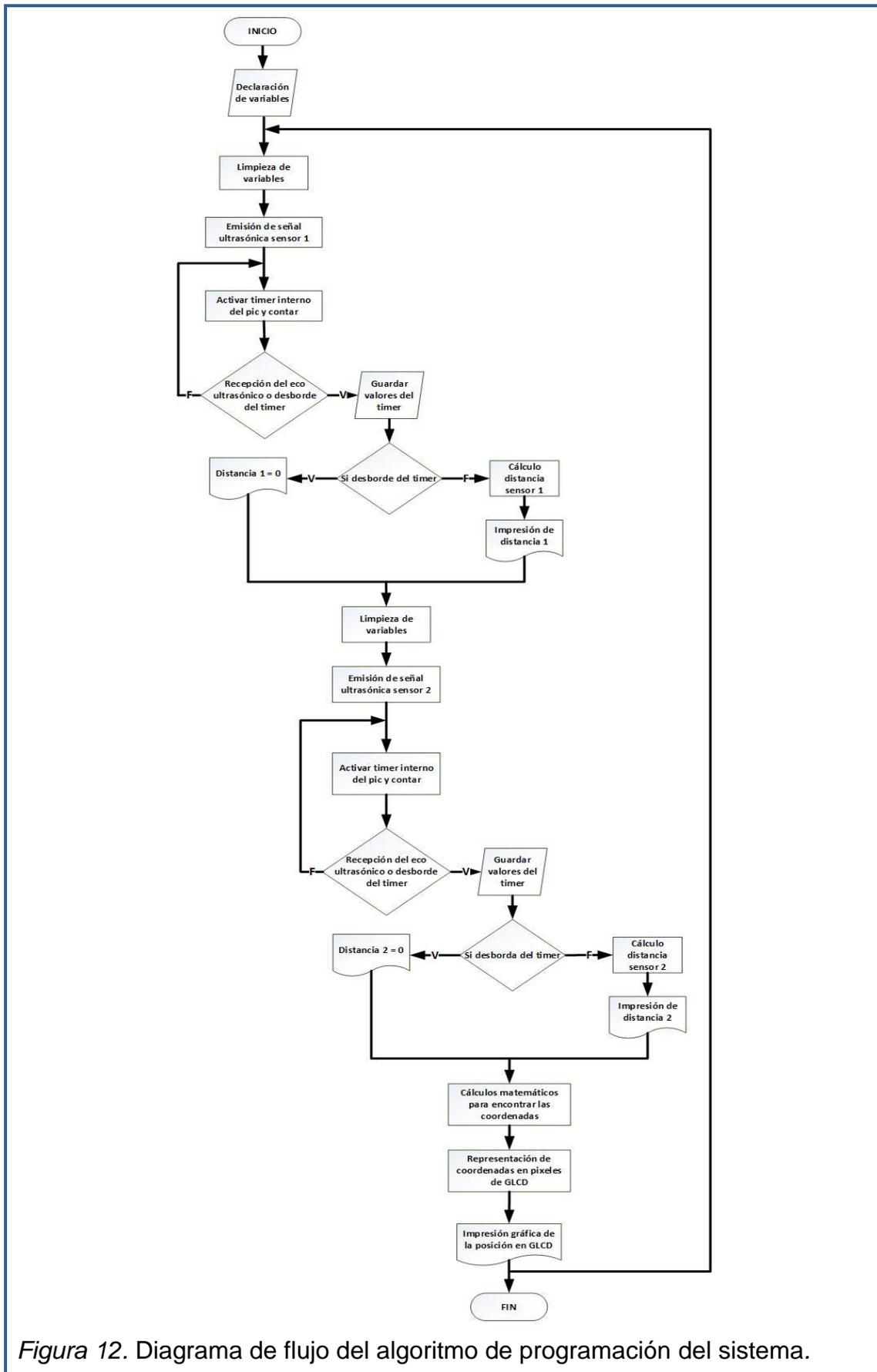


Figura 12. Diagrama de flujo del algoritmo de programación del sistema.

Los códigos de programación deben ser escritos por medio de un software específico y dependen del modelo de microcontrolador que se vaya a utilizar. Para el prototipo en desarrollo se ha decidido trabajar con el programa de codificación *Mikrobasic* por la versatilidad de trabajar en lenguaje Basic y las respectivas librerías que incorpora para facilitar procesos. Además se ha dispuesto utilizar el microcontrolador de marca Microchip y modelo PIC16f886 debido a la cantidad de puertos que pone a disposición, la capacidad de memoria de almacenamiento disponible y la capacidad de los temporizadores; lo cual resulta suficiente para poner en funcionamiento el prototipo de colocación. Las líneas de códigos de la programación se detallan en los anexos.

Una vez realizada la programación con las configuraciones correspondientes para el microcontrolador, se puso en práctica la simulación virtual del sistema dentro del programa *Proteus*, el cual se dispuso en esta ocasión. Dentro del programa se diseñó virtualmente el sistema electrónico representando gráficamente los elementos y conexiones deseadas.

A continuación se debe cargar el archivo codificado de Mikrobasic dentro del microcontrolador simulado en Proteus para poner en marcha el funcionamiento virtual del sistema. En la figura 13 se puede apreciar la disposición de los elementos virtuales y la conexión de los mismos.

Por lo tanto, el diseño virtual consta de un microcontrolador 16f886 con la programación cargada, además de dos sensores ultrasónicos HC SR04 los cuales no incorpora Proteus en sus librerías, sino que fueron agregados externamente desde el Blog Embarcado (2013); una pantalla LCD alfanumérica para visualizar resultados numéricos fácilmente, una pantalla gráfica LCD donde se presentan resultados y un osciloscopio para visualizar el comportamiento de las señales.

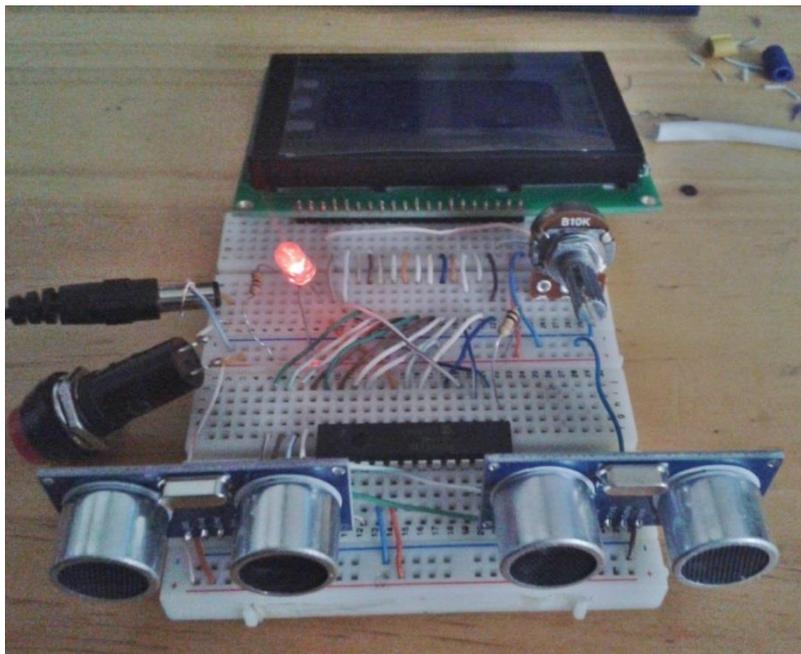


Figura 14. Primer modelo del prototipo para inspección de los elementos.
a. No se tomó ninguna consideración de distancias para el desarrollo de este modelo.

Simultáneamente, se diseñó un modelo del plano físico acotando los ejes X-Y sobre una tabla de MDF de 2.15 por 0.62 metros, en la cual se delinearon las referencias necesarias para la comprobación física del sistema.

Una vez construido este modelo se lo ubicó en el plano para verificar su funcionamiento con una botella de plástico llena de agua, y una caja de cartón en forma octaédrica.



Figura 15. Ubicación del primer modelo en el plano.

a. Se realizaron pruebas de verificación de funcionamiento con la botella plástica.

Posteriormente se realizó una reconexión del circuito con el fin de modificar la posición de los sensores en base a los análisis matemáticos previos; de tal manera que exista una separación de 16 cm entre ellos y estén angulados a 2.5° hacia adentro. Para mayor facilidad de posicionamiento de los circuitos se utilizó una base de cartón en la que fue montado el sistema.

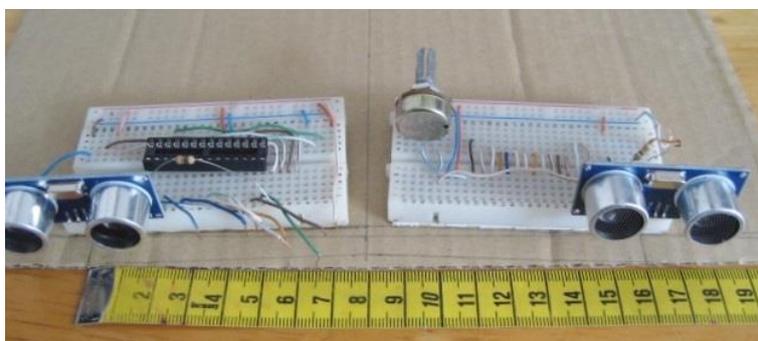


Figura 16. Posicionamiento del modelo de prueba sobre una base de cartón delineada.

a. Se considera 16cm de separación y angulación de 2.5° de los sensores.

De igual forma se realizaron pruebas de verificación con los mismos objetos, además de un tubo cilíndrico de cartón con el fin de observar la influencia de los materiales. Adicionalmente se complementó el sistema colocando material absorbente en los alrededores del plano con el fin de generar un espacio menos reflectante y observar el comportamiento. La figura 17 muestra la comprobación de funcionamiento del modelo de prueba armado.

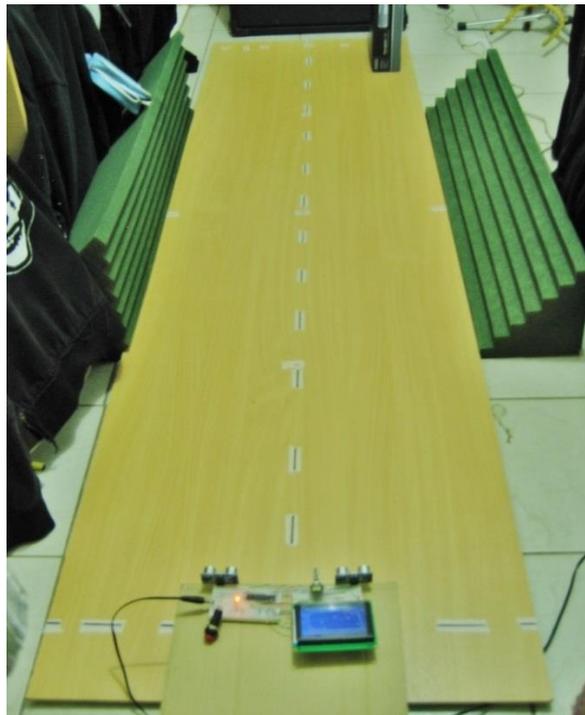


Figura 17. Instalación de material absorbente a los lados del plano para observar el comportamiento del sistema de prueba.

3.2.2 Modelo final.

Corresponde al sistema final del prototipo de ecolocación. Su diseño debe incorporar un chasis con la forma y dimensiones determinadas y debe contener al circuito ensamblado en una placa perforada.

El diseño virtual de la caja que servirá de chasis del prototipo se realizó en el programa libre *SketchUp Make*, para el cual se determinaron las dimensiones apropiadas para el tamaño y disposición de los elementos, así como también la forma de todo el conjunto. En la figura 18 se aprecia el diseño elaborado.

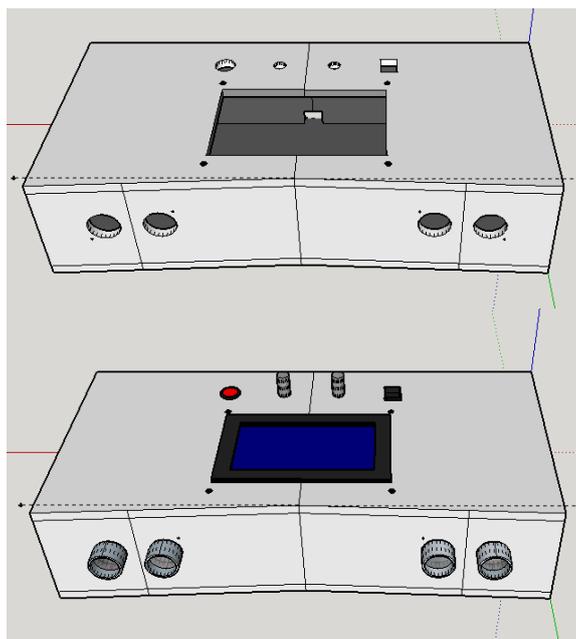


Figura 18. Diseños virtuales del prototipo de ecolocación.

- a. La imagen superior presenta solamente el diseño del chasis.
- b. La imagen inferior muestra el prototipo completo, incluyendo sus componentes.

La construcción del chasis se realizó en planchas de acrílico transparente de 4 mm de espesor cortadas a laser para mayor exactitud. Las dimensiones exactas del modelo se presentan en los anexos. A continuación se observa en la siguiente figura el chasis ensamblado:



Figura 19. Chasis del prototipo de ecolocación.

- a. Se realizó en placas de acrílico transparente de 4mm de espesor.

Inmediatamente después se realizó la instalación de los componentes en una placa de circuitos perforada, procurando posibilitar la adaptación del microcontrolador por la parte inferior. Cada elemento es asegurado en su sitio evitando que el movimiento influya en el funcionamiento del sistema. Luego de la instalación de cada pieza se comprobó el correcto funcionamiento del sistema en conjunto. El nombre y función de los controles se detallan en los anexos.



De igual manera, se mejoró la presentación del plano de coordenadas físico, reafirmando las referencias de distancia y la zona de detección que manejará el sistema.

Por último, se ubicó el sistema armado en su posición correspondiente dentro del plano físico para las posteriores pruebas con los objetos establecidos, de esta manera se podrá determinar estadísticamente la precisión del sistema comparando las posiciones reales en el plano físico y los puntos arrojados por el sistema.

Además se practicó un tercer experimento libre en el cual no se especifica un objeto determinado, sino que puede realizarse con distintos objetos de distinto material. Para finalizar la experimentación, se probó la capacidad de ecolocación de objetos en movimiento, observando si los puntos emergentes en la pantalla dibujan la trayectoria del movimiento.



Figura 21. Posicionamiento del sistema en el plano de coordenadas para las consiguientes pruebas.

3.3 EXPERIMENTACIÓN DEL SISTEMA.

Las prácticas experimentales constaron de tres partes, la primera fue de objetos estáticos en la cual se utilizaron dos objetos del mismo material pero diferente forma y similares dimensiones con el fin de observar el comportamiento del sistema y los modos de propagación en función de la forma de los objetos, sobre estos objetos recae el mayor análisis del sistema. Para la segunda parte se ubicaron objetos aleatorios de formas, dimensiones y materiales indefinidos. Por último se realizaron pruebas con objetos en movimiento dentro del campo de detección para comprobar si el sistema es capaz de dibujar la trayectoria de cada movimiento.

Los métodos de experimentación para cada una de las tres partes se describen a continuación. De igual manera se obtuvieron resultados basados en el comportamiento del sistema para cada situación.

3.3.1 Objetos estáticos.

Las pruebas iniciaron con el primer objeto: un cilindro de radio 32mm y 223mm de altura forrado con papel de aluminio. Se procedió a la toma de muestras en diferentes posiciones aumentando de 200 en 200mm en el eje Y, partiendo desde los 200mm; además se consideró realizar la práctica a los 500mm debido a que según el análisis teórico, correspondería al punto inicial de detección. Mientras que en el eje X se contemplaron posiciones correspondientes a -300mm, -150mm, 0mm, 150mm, 300mm para cada una de las posiciones del eje Y.

El método de muestreo se describe a continuación: se ubica el objeto en la primera posición (corresponde al punto de coordenadas $XY = 0;200$) y se inicia la ecolocación del sistema, se anotan los valores X,Y únicamente de tres muestras cualquiera en el transcurso de 30 segundos y se cambia de posición. Para la siguiente posición únicamente varía el eje Y conservando el valor de X (punto XY en $0;400$), de igual manera se toman tres muestras en 30 segundos y nuevamente se cambia la posición. Esta práctica se realiza consecutivamente

hasta llegar al punto máximo del eje Y (punto XY en 0;2000), posteriormente se retorna a la posición inicial y nuevamente se toman 3 muestras más por posición. El bucle se lo repite una vez más para obtener un total de 9 muestras por posición.

Una vez que se ha hecho esto se prosigue a la siguiente posición del eje X y se realiza el mismo bucle cambiando el valor de Y. Se debe repetir el ciclo en $X = -300\text{mm}$; -150mm ; 150mm ; 300mm . De manera que se obtienen 9 muestras por cada una de las posiciones, las cuales son tomadas de tres en tres, por tres ocasiones con la finalidad de obtener escenarios diferentes y aleatoriedad en los resultados. En caso de que el sistema no arroje ningún resultado en el lapso de 30 segundos por posición, se otorgará el valor de cero para cada coordenada de la muestra; si en ese tiempo el sistema no arroja la cantidad de muestras necesarias, solo se tomarán los valores posibles aunque no se completen las nueve muestras.

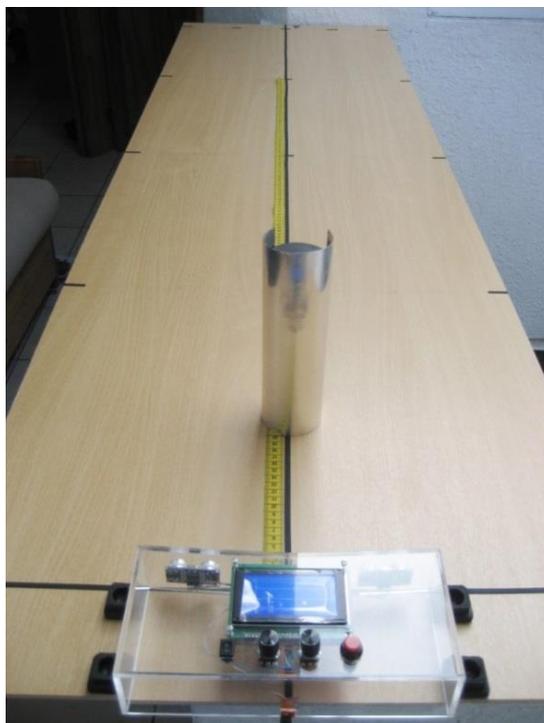


Figura 22. Realización de pruebas con el primer objeto.

a. El objeto es un cilindro de radio 32mm y 223mm de altura forrado de aluminio.

Tras tomar las muestras para el cilindro de aluminio, se continúa con el mismo método para el siguiente objeto que es el ortoedro de aluminio cuyas dimensiones son 72mm de ancho, 72mm de profundidad y 223mm de altura.

Los valores obtenidos de las coordenadas XY de cada muestra son registrados en una tabla de cálculo para ser promediados y obtener un solo punto por cada posición, dicho punto pasa a ser comparado con las coordenadas reales de ubicación del objeto en el plano físico.

A partir de estos resultados se efectúan cálculos estadísticos y se obtiene la desviación estándar, el error absoluto y el error relativo para cada una de las posiciones y por objeto en estudio. Dichas tablas se exponen en la sección de Resultados, con las cuales se puede apreciar y analizar el grado de precisión del sistema ecolocalizador.

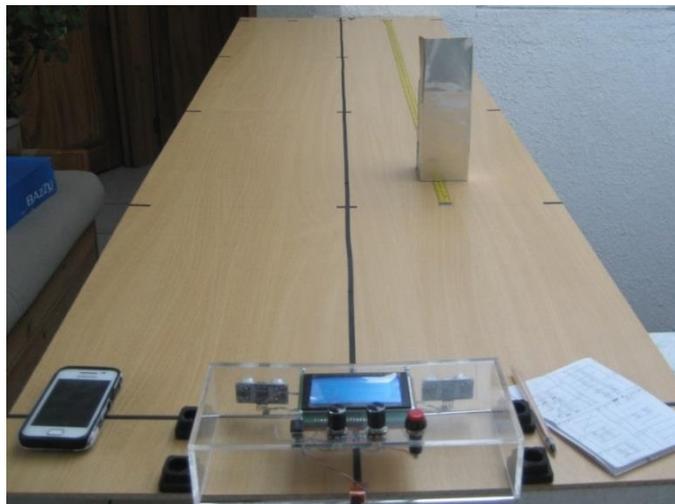


Figura 23. Realización de pruebas con el segundo objeto.

a. Corresponde a un ortoedro de 72x72x223 mm forrado de aluminio.

3.3.2 Objetos aleatorios.

El método experimental para objetos aleatorios es exactamente igual al descrito previamente. La diferencia radica en que los objetos utilizados pueden ser de diversas formas, dimensiones y materiales. Por lo tanto, primeramente se dispuso de tres elementos: un oso de peluche pequeño de 150mm de altura

por 65mm de ancho, otro peluche más grande de 175mm de alto por 160mm de ancho, y una batería alcalina de 9 voltios de 47mm de altura por 25mm de ancho y 16 mm de profundidad.

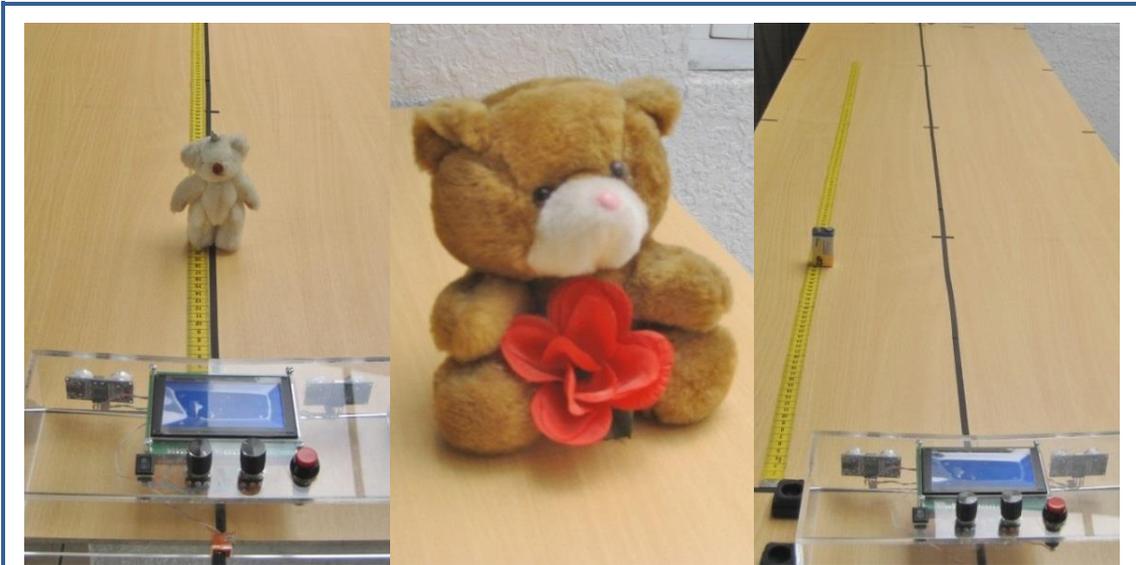


Figura 24. Pruebas realizadas con los tres primeros objetos aleatorios.

- a. La imagen de la izquierda presenta el primer objeto, un peluche de 150x65 mm.
- b. En el centro se observa el segundo objeto, un peluche de 175x160 mm.
- c. El objeto de la imagen derecha corresponde a una batería alcalina de 9v de 47x25x15 mm.

Adicionalmente y en segundo lugar, se realizaron experimentos con dos objetos más: un cilindro de plástico de radio de 24mm y 230mm de alto, y el mismo ortoedro de cartón sin el forro de aluminio. Estas pruebas fueron realizadas de manera selectiva tomando las muestras más acertadas posibles con el objeto de comprobar la mayor precisión obtenible del sistema.

El método de muestreo en esta segunda parte es diferente a la anterior, ya que se realizaron únicamente 5 muestras en cada posición y fueron tomadas de manera seguida, una tras otra. Además que el eje X fue dividido en 7 partes a cada 100mm (corresponden a los puntos X de -300, -200, -100, 0, 100, 200 y 300mm). De estas pruebas se muestra únicamente la desviación estándar de las muestras y el error absoluto de cada punto con respecto a su posición real.



Figura 25. Pruebas realizadas con objetos aleatorios para la mayor precisión posible.

Los métodos de muestreo previos se realizan solamente para los objetos destinados para la experimentación estática, se exceptúa a aquellos que serán utilizados para la ecolocación de movimiento.

3.3.3 Objetos en movimiento.

El método experimental se basa en la trayectoria que sigue el objeto en línea recta desde el origen del sistema hacia el frente hasta el punto $0;2000$ y se comprueban si los puntos que aparecen en la pantalla corresponden con dicha trayectoria. Seguidamente se comprueba la detección de movimiento desde el punto $-300;1000$ hasta el punto $300;1000$ generando movimiento en el eje X. Para finalizar se realizan movimientos libres en todo el plano con la finalidad de observar la trayectoria en la pantalla del sistema.

Cada comprobación de resultados es realizada inmediatamente después del respectivo desplazamiento, dando lugar a que el sistema genere los puntos de la trayectoria correspondiente y permita capturar el muestreo presentado en la pantalla por medio de fotos, para así observar los resultados de cada movimiento.

Los objetos seleccionados para esta práctica son cilindros de papel y de aluminio. Se optó por el cilindro por ser el objeto con mejores resultados obtenidos, además se observará el comportamiento del sistema con estos materiales. Estos objetos se sujetan en un carro pequeño manejado a control remoto, con el cual se hacen posibles los movimientos descritos.



Figura 26. Pruebas realizadas con objetos en movimiento.

- a. En la izquierda se observan los elementos utilizados para la toma de muestras.
- b. La imagen derecha presenta el objeto cilíndrico montado sobre el carro a control remoto, las pequeñas dimensiones del carro permiten que el sistema apunte al cilindro de aluminio.

Previamente a realizar estos ensayos, se verifico que la influencia de objetos a los alrededores externos del plano utilizado sea nula, con la finalidad de que las muestras presentadas por el sistema correspondan solamente a los objetos puestos a prueba.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

A partir de los valores de todas las muestras obtenidas en las pruebas experimentales se obtuvieron resultados estadísticos de desviación estándar, error absoluto y error relativo. Utilizando estos resultados estadísticos se generaron tablas en las que se distingue una escala de colores gradual según los valores. Además de las tablas, también se presenta una figura por objeto que muestra la localización del sistema en un plano de coordenadas XY.

Tabla 1. Explicación de los colores de las tablas de resultados estadísticos.

Color	Descripción
Blanco	No se detecta ninguna muestra, corresponde a una zona de detección nula.
	Color verde para valores más precisos a la ubicación del objeto considerando sus dimensiones. Representa una zona de precisión.
	Gradiente del verde al amarillo, representa una tolerancia de 3cm a partir de la zona de precisión. La tolerancia se debe a la separación de 2.7cm entre los centros de los sensores del módulo HC-SR04, más 0.3cm por error de resolución del módulo (Cytron Technologies, 2013, p. 3). Corresponde a la zona de detección.
	Gradiente del amarillo al rojo para valores erróneos desde 3cm hasta 4.5cm excedentes de la zona de precisión, errores mayores se tiñen de rojo. Se toma 4.5cm por la separación máxima entre los extremos de los sensores (4.2cm), más la resolución. Recae en una zona de error.

Para determinar si los resultados de la desviación estándar corresponden a una zona u otra, se debe contemplar la dimensión total del ancho de los objetos (corresponde al eje X del sistema), ya que se describe la dispersión de todas las muestras por posición y se las compara con las dimensiones para establecer una precisión de concentración de puntos tomados. Mientras que para los resultados de errores absolutos y relativos solamente se considera la mitad de dicha dimensión, debido a que se hace una comparación entre el promedio de las muestras tomadas por posición con respecto a la ubicación real del objeto.

Por otra parte, para la dimensión de profundidad de los objetos (eje Y del sistema) se considera la forma del objeto; de manera que si es cilíndrico se utiliza la longitud del radio para la determinación de la zona en todos los resultados estadísticos. Mientras que para ortoedros se permite hasta 5mm dentro de la zona de precisión para todos los resultados estadísticos, y a partir de esta zona se determinan las demás; esta tolerancia se debe a que el ancho de las líneas marcadas en el plano físico utilizado para los ensayos es de 5mm.

Las consideraciones de dimensiones previas se deben a que se desconoce el punto exacto de incidencia de las ondas ultrasónicas en los objetos. Por lo tanto, de este modo se admite que las ondas pueden incidir en cualquier punto dentro de las dimensiones señaladas.

4.1 OBJETOS ESTÁTICOS.

4.1.1 Cilindro de aluminio.

Tabla 2. Desviación estándar de las muestras obtenidas con el cilindro de aluminio, junto con los valores de su escala de colores.

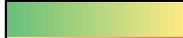
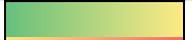
Desviación estándar											
		Eje X [mm]									
		-300		-150		0		150		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	400	0.0	0.0	61.4	187.5	180.8	282.9	12.0	31.2	0.0	0.0
	500	225.1	233.9	59.6	53.6	13.4	53.1	17.2	78.3	87.6	302.1
	600	37.9	88.5	18.4	52.6	14.2	63.0	8.4	33.0	30.6	64.7
	800	10.3	113.5	7.6	69.8	30.5	39.2	5.0	26.0	88.1	107.4
	1000	23.8	89.0	331.1	23.7	6.5	65.8	14.0	57.6	13.6	43.1
	1200	18.9	81.3	25.2	40.8	2.2	87.3	2.7	29.0	13.5	44.9
	1400	18.6	70.3	8.9	64.2	5.8	58.3	10.8	65.9	23.4	78.4
	1600	0.0	0.0	16.1	100.2	29.4	234.6	10.1	69.1	39.1	165.4
	1800	0.0	0.0	10.9	40.0	9.0	101.3	29.4	141.8	0.0	0.0
2000	0.0	0.0	5.6	61.0	4.8	97.9	10.1	106.4	0.0	0.0	
Escala de colores											
Colores	Y [mm]	X [mm]	Colores	Y [mm]	X [mm]						
Blanco	0	0		32 - 62	64 - 94						
	0.1 - 32	0.1 - 64		62 - 77	94 - 109						

Tabla 3. Error absoluto del promedio de muestras con el cilindro de aluminio, junto con los valores de su escala de colores.

Error absoluto											
		Eje X [mm]									
		-300		-150		0		150		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	400	0.0	0.0	35.3	76.3	311.1	51.9	22.2	59.7	0.0	0.0
	500	14.8	4.6	13.6	30.2	15.2	23.0	18.3	19.2	36.9	219.2
	600	27.4	73.6	2.0	58.2	4.4	16.4	16.2	47.2	50.2	100.8
	800	17.1	145.7	6.9	6.0	2.0	5.9	14.6	15.1	55.9	93.2
	1000	17.6	54.1	114.3	25.9	2.3	23.2	3.3	49.4	13.7	38.1
	1200	20.4	73.6	2.6	70.6	3.0	82.2	2.9	9.6	12.7	58.8
	1400	27.8	98.7	7.2	74.9	3.0	107.7	7.9	51.9	16.3	68.0
	1600	0.0	0.0	6.9	32.8	1.3	51.2	7.4	13.3	0.1	19.6
	1800	0.0	0.0	8.8	56.9	4.0	23.9	16.1	96.9	0.0	0.0
	2000	0.0	0.0	0.3	63.7	0.4	15.7	8.7	25.0	0.0	0.0
Escala de colores											
Colores	Y [mm]	X [mm]	Colores	Y [mm]	X [mm]						
Blanco	0	0		32 - 62	32 - 62						
	0.1 - 32	0.1 - 32		62 - 77	62 - 77						

Tabla 4. Error relativo del promedio de muestras con el cilindro de aluminio, junto con los valores de su escala de colores.

Error relativo											
		Eje X [mm]									
		-300		-150		0		150		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	400	0.0	0.0	8.8	50.9	77.8	51.9	5.6	39.8	0.0	0.0
	500	3.0	1.5	2.7	20.1	3.0	23.0	3.7	12.8	7.4	73.1
	600	4.6	24.5	0.3	38.8	0.7	16.4	2.7	31.5	8.4	33.6
	800	2.1	48.6	0.9	4.0	0.3	5.9	1.8	10.1	7.0	31.1
	1000	1.8	18.0	11.4	17.3	0.2	23.2	0.3	33.0	1.4	12.7
	1200	1.7	24.5	0.2	47.0	0.3	82.2	0.2	6.4	1.1	19.6
	1400	2.0	32.9	0.5	49.9	0.2	107.7	0.6	34.6	1.2	22.7
	1600	0.0	0.0	0.4	21.9	0.1	51.2	0.5	8.9	0.0	6.5
	1800	0.0	0.0	0.5	37.9	0.2	23.9	0.9	64.6	0.0	0.0
	2000	0.0	0.0	0.0	42.4	0.0	15.7	0.4	16.7	0.0	0.0

Escala de colores					
Colores	Y [mm]	X [mm]	Colores	Y [mm]	X [mm]
Blanco	0	0		32 - 62	32 - 62
	0.1 - 32	0.1 - 32		62 - 77	62 - 77

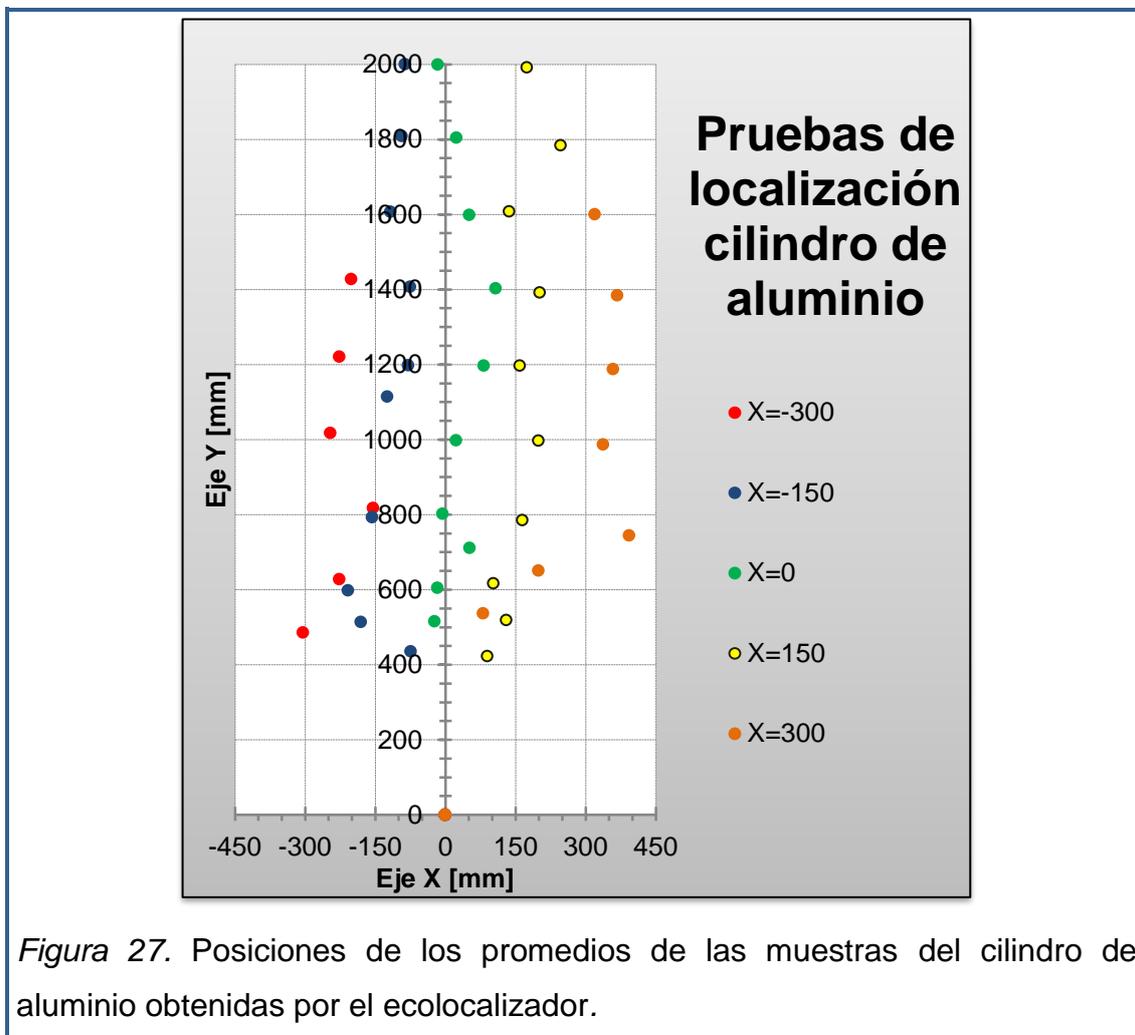


Figura 27. Posiciones de los promedios de las muestras del cilindro de aluminio obtenidas por el ecolocalizador.

Los resultados indican que el ecolocalizador presenta un comportamiento irregular más acertado en las zonas centrales entre $Y=500\text{mm}$ a $Y=1000\text{mm}$, y entre $X=-150\text{mm}$ a $X=150\text{mm}$ con errores absolutos menores a 62mm en su mayoría, incluso la desviación estándar indica una concentración precisa en este espacio. En las zonas periféricas los errores absolutos llegan a superar los 77mm de detección lateral. Además no presenta detección antes de $Y=400\text{mm}$ en la zona central, ni antes de $Y=500\text{mm}$ en los extremos; tampoco a partir de $Y=1600\text{mm}$ en $X=-300\text{mm}$, ni desde $Y=1800\text{mm}$ en $X=300\text{mm}$.

Adicionalmente se muestra que la precisión está relacionada con la distancia, ya que al considerarla en el error relativo, aparecieron únicamente 5 errores. La Figura 27 muestra una tendencia de localización hacia el centro con desviación hacia X positivo.

4.1.2 Ortoedro de aluminio

Tabla 5. Desviación estándar de las muestras obtenidas con el ortoedro de aluminio, junto con los valores de su escala de colores.

Desviación estándar											
		Eje X [mm]									
		-300		-150		0		150		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	400	0.0	0.0	0.0	0.0	374.9	395.9	0.0	0.0	0.0	0.0
	500	0.0	0.0	145.0	173.6	217.2	143.5	27.7	92.2	0.0	0.0
	600	158.9	198.4	106.4	170.3	11.4	92.9	30.0	95.4	30.0	106.3
	800	22.8	197.1	17.2	57.5	16.3	82.3	18.8	109.1	37.3	95.8
	1000	46.1	172.9	15.6	44.0	9.6	35.1	21.2	84.9	46.7	125.9
	1200	18.5	70.4	16.8	99.2	2.2	35.3	22.8	104.7	41.0	71.1
	1400	37.1	192.8	20.3	78.7	3.2	47.4	33.0	147.9	34.2	130.2
	1600	29.4	145.4	25.9	120.8	28.1	253.3	12.9	72.3	48.1	182.4
	1800	20.2	126.9	27.2	149.6	11.9	182.7	24.4	128.2	46.6	149.7
	2000	0.0	0.0	8.0	56.5	7.5	140.1	9.3	58.1	0.0	0.0
Escala de colores											
Colores	Y [mm]	X [mm]	Colores	Y [mm]	X [mm]						
Blanco	0	0		5 - 35	72 - 102						
	0.1 - 5	0.1 - 72		35 - 50	102 - 117						

Tabla 6. Error absoluto del promedio de muestras con el ortoedro de aluminio, junto con los valores de su escala de colores.

Error absoluto											
		Eje X [mm]									
		-300		-150		0		150		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	400	0.0	0.0	0.0	0.0	516.8	25.7	0.0	0.0	0.0	0.0
	500	0.0	0.0	150.1	386.0	121.3	81.1	2.9	17.0	0.0	0.0
	600	13.7	30.0	54.4	116.4	9.7	34.8	14.0	41.3	64.7	34.0
	800	18.0	235.4	32.1	105.8	0.9	56.9	4.9	92.6	9.6	41.7
	1000	9.0	1.9	15.7	87.6	9.0	19.9	21.7	93.4	7.6	25.0
	1200	18.4	97.4	33.8	157.1	13.7	36.2	24.2	107.7	33.7	131.0
	1400	12.4	21.3	20.3	136.2	14.3	50.1	8.8	52.2	44.4	90.1
	1600	21.0	104.2	21.6	133.4	27.0	159.3	24.3	150.0	28.6	83.9
	1800	3.6	13.7	25.8	155.6	20.8	52.3	18.8	107.9	43.7	154.2
2000	0.0	0.0	33.9	164.1	18.8	32.6	25.9	143.4	0.0	0.0	
Escala de colores											
Colores		Y [mm]		X [mm]		Colores		Y [mm]		X [mm]	
Blanco		0		0				5 - 35		36 - 66	
		0.1 - 5		0.1 - 36				35 - 50		66 - 81	

Tabla 7. Error relativo del promedio de muestras con el ortoedro de aluminio, junto con los valores de su escala de colores.

Error relativo											
		Eje X [mm]									
		-300		-150		0		150		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	400	0.0	0.0	0.0	0.0	129.2	25.7	0.0	0.0	0.0	0.0
	500	0.0	0.0	30.0	257.3	24.3	81.1	0.6	11.3	0.0	0.0
	600	2.3	10.0	9.1	77.6	1.6	34.8	2.3	27.6	10.8	11.3
	800	2.3	78.5	4.0	70.5	0.1	56.9	0.6	61.7	1.2	13.9
	1000	0.9	0.6	1.6	58.4	0.9	19.9	2.2	62.3	0.8	8.3
	1200	1.5	32.5	2.8	104.7	1.1	36.2	2.0	71.8	2.8	43.7
	1400	0.9	7.1	1.5	90.8	1.0	50.1	0.6	34.8	3.2	30.0
	1600	1.3	34.7	1.3	89.0	1.7	159.3	1.5	100.0	1.8	28.0
	1800	0.2	4.6	1.4	103.7	1.2	52.3	1.0	71.9	2.4	51.4
2000	0.0	0.0	1.7	109.4	0.9	32.6	1.3	95.6	0.0	0.0	

Escala de colores					
Colores	Y [mm]	X [mm]	Colores	Y [mm]	X [mm]
Blanco	0	0		5 - 35	36 - 66
	0.1 - 5	0.1 - 36		35 - 50	66 - 81

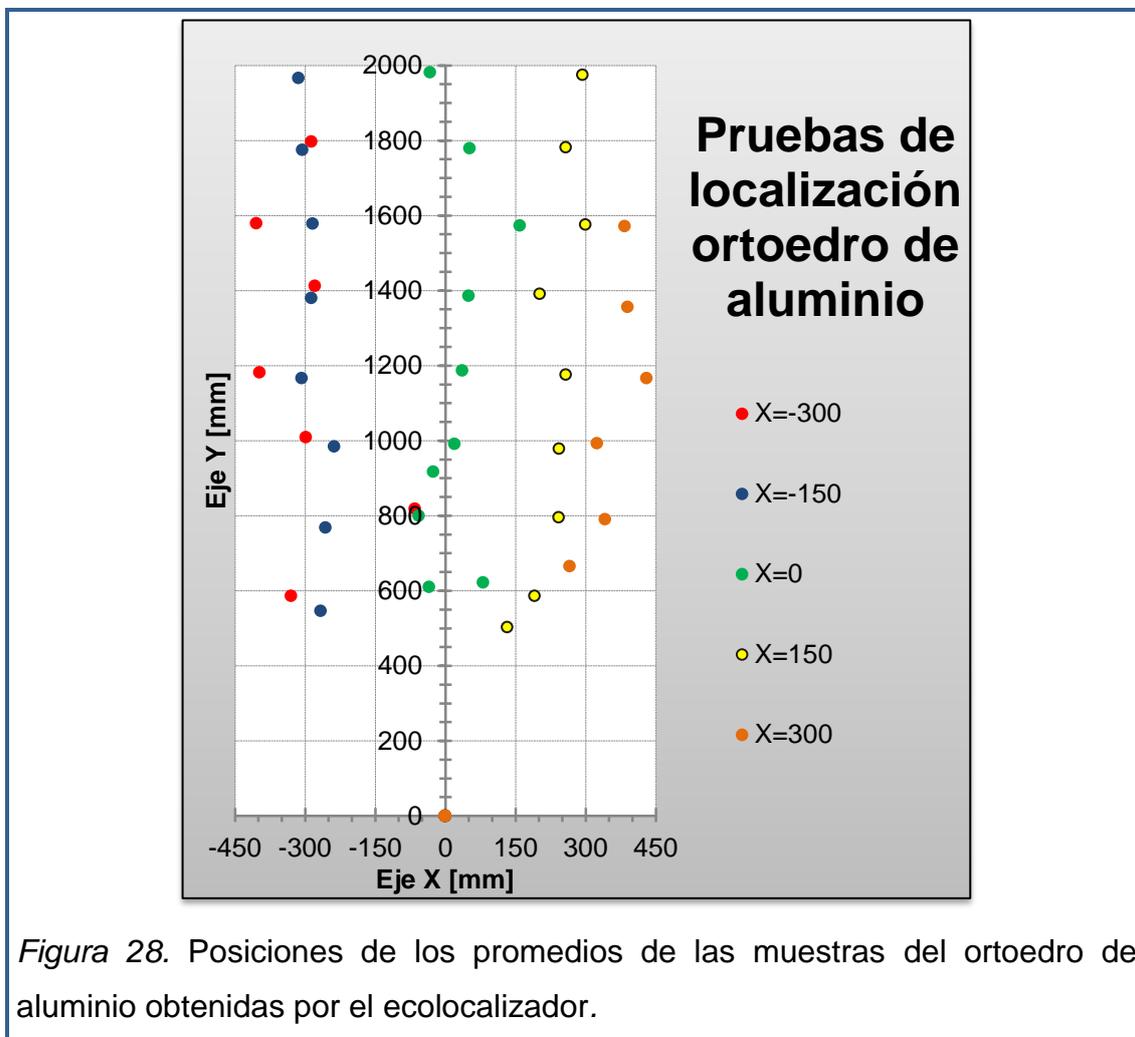


Figura 28. Posiciones de los promedios de las muestras del ortoedro de aluminio obtenidas por el ecolocalizador.

El sistema se comporta de una manera más imprecisa y aleatoria con el ortoedro, por una parte las muestras presentan una desviación estándar concentrada y uniforme correspondiente a zona de detección entre $Y=600\text{mm}$ a $Y=1400\text{mm}$ y entre $X=-150\text{mm}$ a $X=150\text{mm}$. De aquí en adelante las muestras son más dispersas, en especial para los puntos del eje X. Sin embargo el promedio de muestras de los puntos $X=-150\text{mm}$ y $X=150\text{mm}$ es impreciso y presenta un error absoluto y relativo por sobre los 3cm de tolerancia, tanto así que se aproximan a los bordes del plano.

La detección en los extremos ($X=-300\text{mm}$ y $X=300\text{mm}$) va desde $Y=600\text{mm}$ hasta $Y=1800\text{mm}$; mientras que en el centro se da desde $Y=400\text{mm}$ y $Y=500\text{mm}$. En esta ocasión el sistema presenta una tendencia a desviar el objeto hacia los costados con una leve inclinación hacia X positivo.

4.2 OBJETOS ALEATORIOS.

4.2.1 Dos peluches:

A pesar de realizarse exactamente el mismo procedimiento de los objetos anteriores, el ecolocalizador no detectó ninguna posición con ninguno de los dos peluches; desconoció completamente la presencia de estos objetos en todas las posiciones.

4.2.2 Batería alcalina ortoédrica de 9 voltios:

Tabla 8. Desviación estándar de las muestras obtenidas con la batería de 9v, junto con los valores de su escala de colores.

Desviación estándar											
		Eje X [mm]									
		-300		-150		0		150		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	400	0.0	0.0	0.0	0.0	20.4	129.4	0.0	0.0	0.0	0.0
	500	0.0	0.0	0.0	0.0	8.9	28.9	0.0	0.0	0.0	0.0
	600	0.0	0.0	103.9	127.9	295.8	127.6	13.2	45.6	0.0	0.0
	800	62.7	328.3	11.1	54.0	4.5	49.4	13.7	56.4	32.7	40.5
	1000	25.8	109.0	18.6	60.5	7.2	42.2	205.3	102.2	58.7	174.8
	1200	34.8	96.5	24.8	73.5	5.8	41.4	16.5	77.4	53.9	133.8
	1400	13.3	105.7	27.2	133.9	4.0	49.2	15.6	83.8	0.0	0.0
	1600	0.0	0.0	30.1	104.4	13.9	188.5	6.6	40.2	0.0	0.0
	1800	0.0	0.0	8.0	80.6	10.2	32.4	8.9	93.1	0.0	0.0
2000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Escala de colores											
Colores	Y [mm]	X [mm]	Colores	Y [mm]	X [mm]						
Blanco	0	0		5 - 35	25 - 55						
	0.1 - 5	0.1 - 25		35 - 50	55 - 70						

Escala de colores					
Colores	Y [mm]	X [mm]	Colores	Y [mm]	X [mm]
Blanco	0	0		5 - 35	13 - 43
	0.1 - 5	0.1 - 13		35 - 50	43 - 58

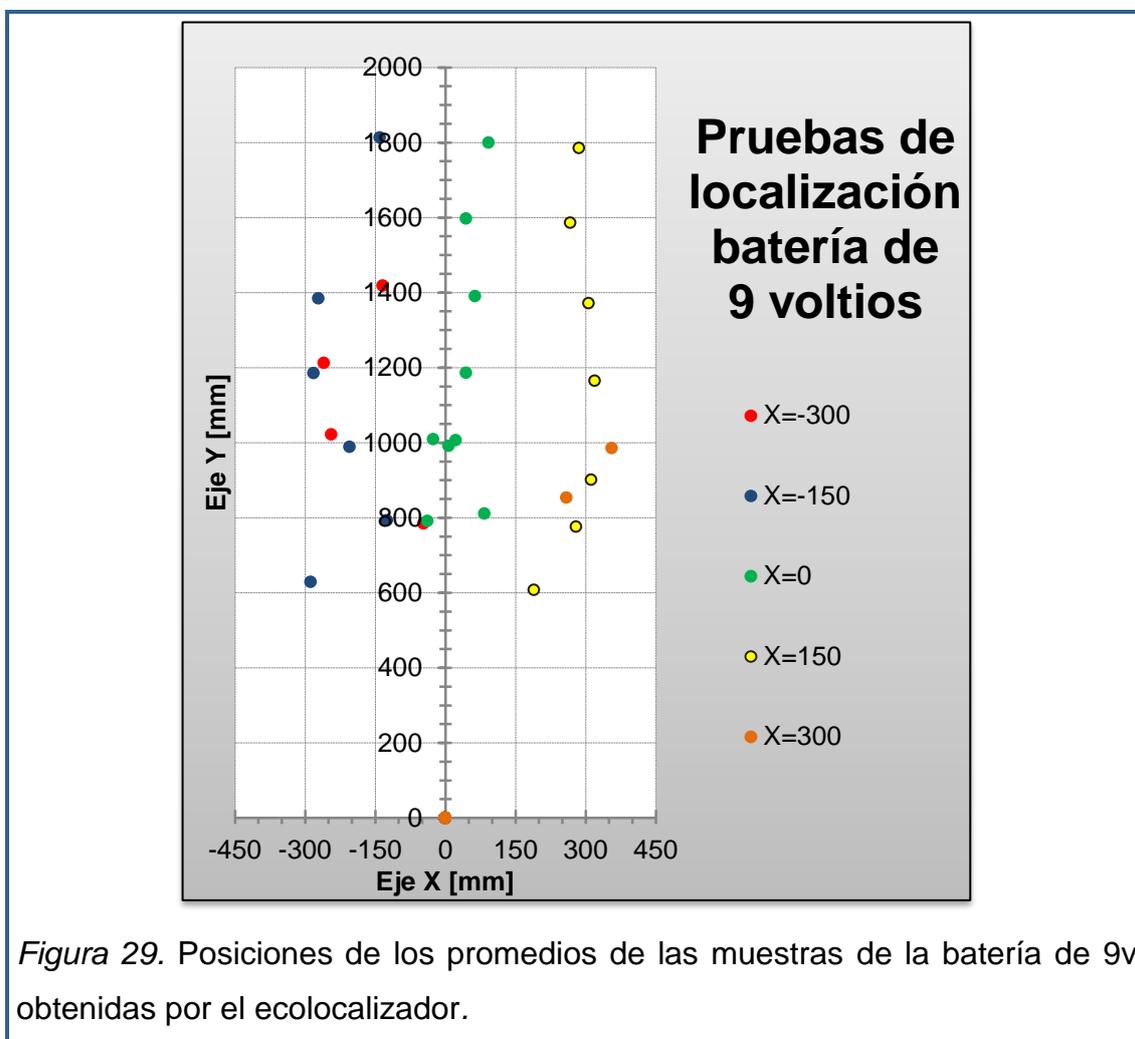


Figura 29. Posiciones de los promedios de las muestras de la batería de 9v obtenidas por el ecolocalizador.

Los resultados son altamente imprecisos para el eje X con desviaciones y errores por sobre los 3cm de tolerancia casi en su totalidad, el área para la zona de detección se encuentra en X=0mm, entre Y=800mm hasta Y=1200mm; siendo una zona muy reducida. El sistema no presentó detección antes de Y=400mm en X=0mm, tampoco antes de Y=600mm en X=-150mm y X=150mm, ni antes de Y=800mm en los extremos de X. Así como tampoco hay registros para Y=2000mm; incluso dejó de actuar a partir de Y=1400mm para X=-300mm, y a partir de Y=1200mm en X=300mm.

Una vez más el sistema tiende a abrir la detección hacia los bordes con una desviación leve hacia el costado de X positivo, además presenta mucha dificultad para detectar en los extremos.

4.2.3 Cilindro plástico:

Tabla 11. Desviación estándar de muestras obtenidas con el cilindro plástico, junto con los valores de su escala de colores.

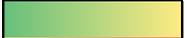
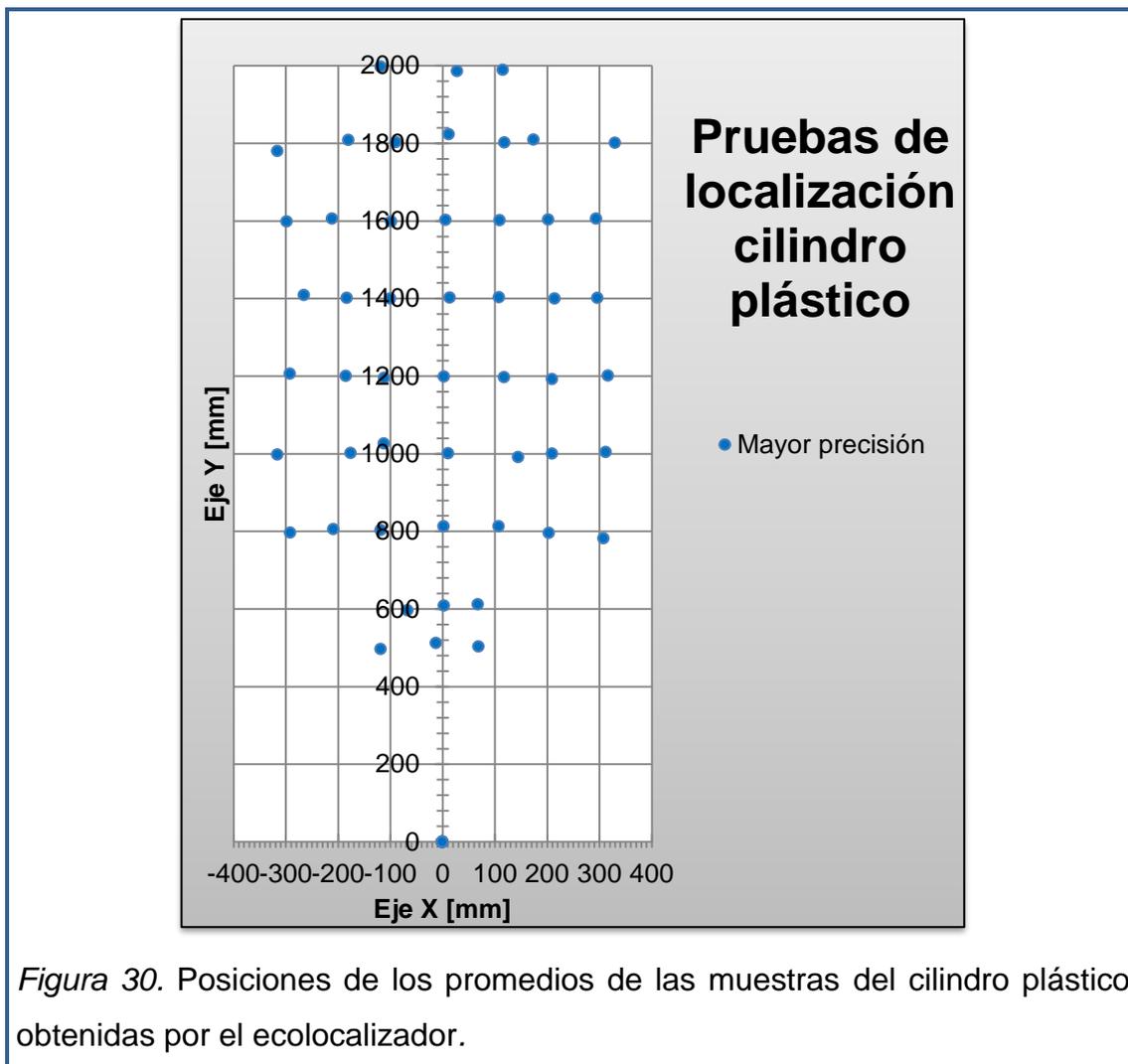
Desviación estándar															
		Eje X [mm]													
		-300		-200		-100		0		100		200		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	500	0	0	0	0	2	13	14	45	2	22	0	0	0	0
	600	0	0	0	0	3	23	9	63	8	23	0	0	0	0
	800	15	18	14	67	7	43	27	63	21	32	8	12	49	39
	1000	13	53	9	65	33	27	12	43	5	25	11	28	10	35
	1200	14	39	5	36	4	22	1	20	3	26	5	26	11	37
	1400	7	33	4	31	3	15	6	24	5	25	6	34	4	11
	1600	12	46	5	48	6	25	4	55	3	30	7	38	8	45
	1800	14	11	11	25	7	43	39	34	13	8	13	43	1	21
	2000	0	0	0	0	7	50	5	47	6	30	0	0	0	0
Escala de colores															
Colores	Y [mm]		X [mm]		Colores	Y [mm]		X [mm]							
Blanco	0		0			24 - 54		48 - 78							
	0.1 - 24		0.1 - 48			54 - 69		78 - 93							

Tabla 12. Error absoluto del promedio de las muestras con el cilindro plástico, junto con los valores de su escala de colores.

Error absoluto															
		Eje X [mm]													
		-300		-200		-100		0		100		200		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	500	0	0	0	0	3	18	12	13	3	31	0	0	0	0
	600	0	0	0	0	4	33	9	3	12	32	0	0	0	0
	800	4	9	6	9	3	18	13	2	13	8	4	4	18	8
	1000	2	16	2	24	26	12	1	11	8	45	0	10	4	12
	1200	6	8	0	15	5	11	1	3	3	18	7	10	1	17
	1400	9	35	1	17	0	0	3	14	3	8	0	14	2	4
	1600	2	2	6	11	1	2	2	6	2	9	4	2	6	6
	1800	20	16	8	20	3	11	23	12	2	18	10	26	1	30
2000	0	0	0	0	2	18	14	28	10	16	0	0	0	0	
Escala de colores															
Colores	Y [mm]	X [mm]		Colores	Y [mm]	X [mm]									
Blanco	0	0			24 - 54	24 - 54									
	0.1 - 24	0.1 - 24			54 - 69	54 - 69									



Cabe recalcar que las muestras obtenidas para este ensayo fueron sesgadas y se escogieron las más acertadas con la finalidad de observar la mayor precisión posible de ecolocación, razón por la cual se dividió el plano de X en 7 secciones a comparación de las anteriores pruebas. Por lo tanto los resultados son muy cercanos a la realidad y las desviaciones estándar y errores absolutos se encuentran en su mayoría en zona de precisión. El sistema detecta establemente desde Y=400mm entre X=-100mm a X=100mm; y desde Y=600mm en los extremos, así como también deja de actuar a partir de Y=1800mm para los mismos extremos.

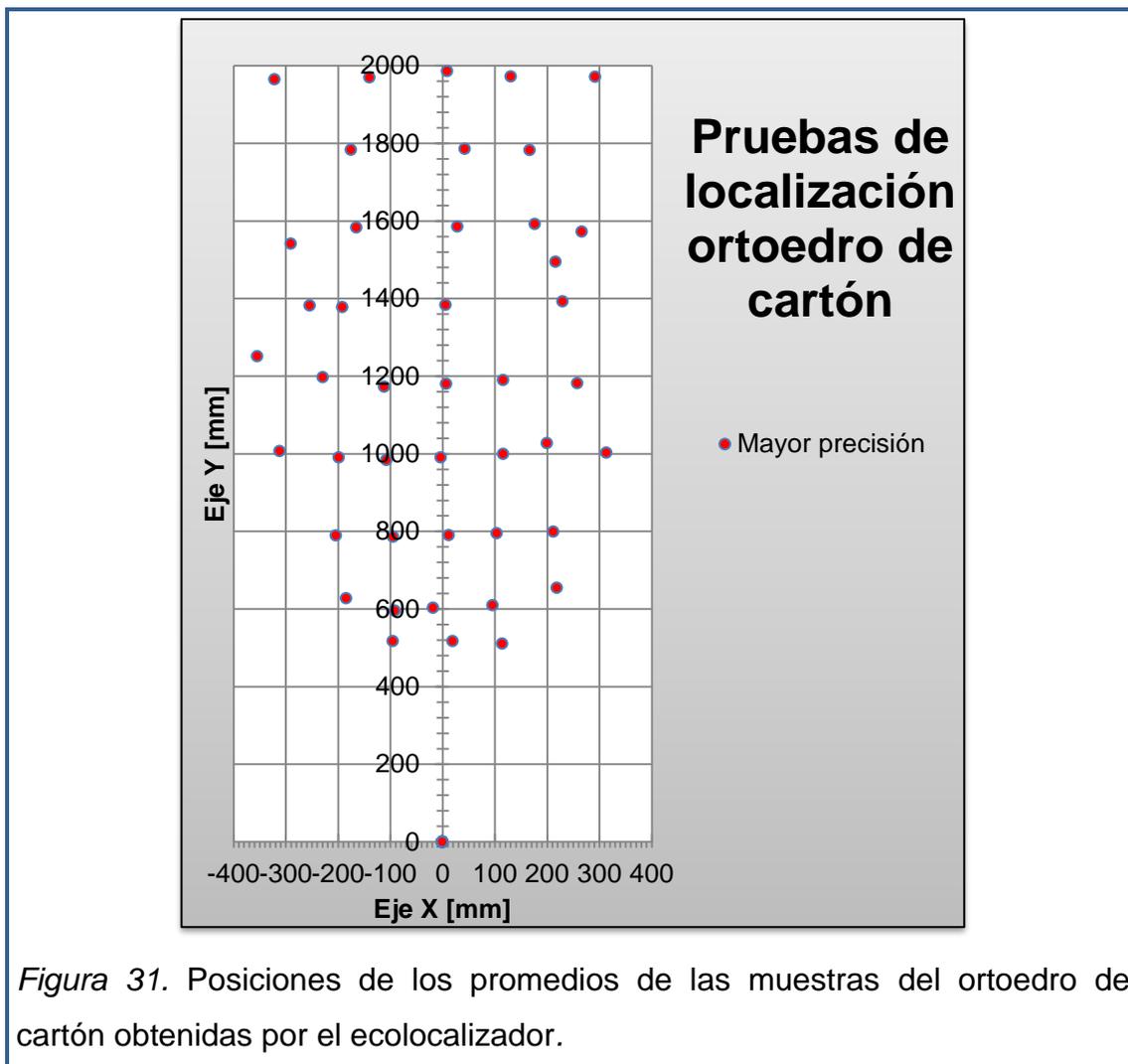
4.2.4 Ortoedro de cartón:

Tabla 13. Desviación estándar de las muestras obtenidas con el ortoedro de cartón, junto con los valores de su escala de colores.

Desviación estándar															
		Eje X [mm]													
		-300		-200		-100		0		100		200		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	500	0	0	0	0	25	28	13	73	8	124	0	0	0	0
	600	0	0	54	29	7	15	6	93	7	27	50	10	0	0
	800	0	0	6	22	9	24	8	59	8	34	16	39	0	0
	1000	5	25	11	27	5	35	8	9	9	26	28	19	17	30
	1200	36	38	17	31	2	50	4	14	10	20	4	11	0	0
	1400	0	0	5	33	11	21	2	32	268	55	5	40	0	0
	1600	0	0	42	64	7	31	2	39	16	12	11	11	0	0
	1800	0	0	0	0	1	61	8	45	7	53	0	0	0	0
	2000	0	0	7	30	4	65	3	43	3	54	6	59	0	0
Escala de colores															
Colores	Y [mm]	X [mm]	Colores	Y [mm]	X [mm]										
Blanco	0	0		5 - 35	72 - 102										
	0.1 - 5	0.1 - 72		35 - 50	102 - 117										

Tabla 14. Error absoluto del promedio de las muestras con el ortoedro de cartón, junto con los valores de su escala de colores.

Error absoluto															
		Eje X [mm]													
		-300		-200		-100		0		100		200		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	500	0	0	0	0	18	5	18	20	11	15	0	0	0	0
	600	0	0	28	16	5	9	3	18	9	4	55	19	0	0
	800	0	0	11	4	14	5	10	12	5	4	1	12	0	0
	1000	6	12	10	2	16	7	10	3	0	16	27	0	3	14
	1200	51	54	3	29	27	11	20	7	10	16	19	58	0	0
	1400	0	0	18	54	22	92	17	6	95	116	8	30	0	0
	1600	0	0	59	90	17	65	15	28	8	77	28	67	0	0
	1800	0	0	0	0	17	75	14	43	18	67	0	0	0	0
	2000	0	0	35	121	31	39	14	9	28	31	29	92	0	0
Escala de colores															
Colores	Y [mm]	X [mm]	Colores	Y [mm]	X [mm]										
Blanco	0	0		5 - 35	36 - 66										
	0.1 - 5	0.1 - 36		35 - 50	66 - 81										



Las pruebas realizadas con este objeto también fueron selectivas para mayor precisión, sin embargo el sistema presentó mayor fluctuación de resultados para este caso a partir de $Y=1200\text{mm}$, zona que presenta valores sobre los 3cm de tolerancia, algunos incluso sobrepasan el margen de 4.5cm. La mayor dificultad se halla en los extremos ($X=-300\text{mm}$ y $X=300\text{mm}$), en donde difícilmente solo detectó muestras precisas para $Y=1000\text{mm}$.

Además, el ecolocalizador empieza a actuar desde $Y=500\text{mm}$ entre $X=-100\text{mm}$ a $X=100\text{mm}$, pero desde $Y=600\text{mm}$ en $X=-200\text{mm}$ y $X=200\text{mm}$. Para $Y=1800\text{mm}$ únicamente localizó entre $X=-100\text{mm}$ y $X=100\text{mm}$, lo cual indica la presencia de puntos ciegos ya que en $Y=2000\text{mm}$ si aparecen muestras en $X=-200$ y $X=200$, aunque muy erróneas y abiertas a los costados.

4.3 OBJETOS EN MOVIMIENTO.

4.3.1 Cilindro de papel:

En base al procedimiento descrito en el capítulo anterior, los resultados para el movimiento lineal por el eje Y fueron nulos; así como también los correspondientes al eje X. Mientras que la trayectoria presentada por la pantalla del movimiento circular por todo el plano, se presenta en la siguiente figura:

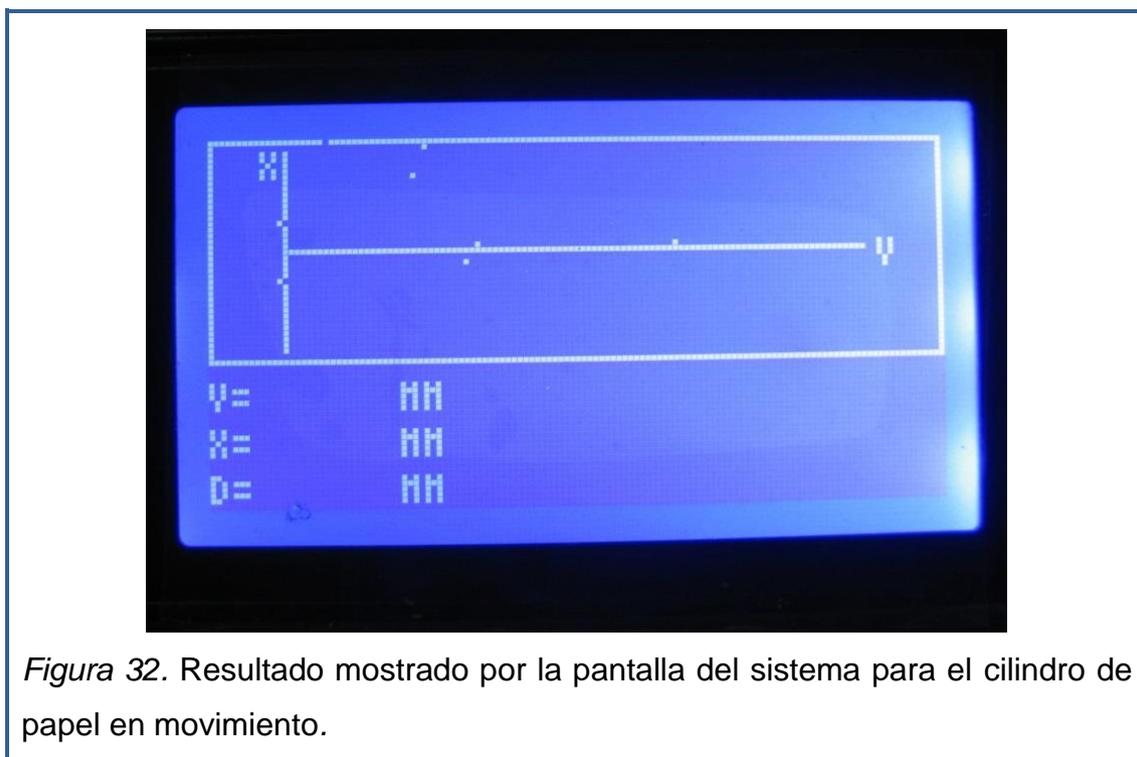


Figura 32. Resultado mostrado por la pantalla del sistema para el cilindro de papel en movimiento.

En la imagen de la pantalla mostrada no se aprecia el movimiento descrito, inclusive los puntos detectados son escasos e inexactos, tanto así que no sobrepasan los 1000mm en Y.

4.3.2 Cilindro de aluminio:

De igual manera, las pruebas que constan de movimientos lineales para los dos ejes presentaron resultados nulos en este objeto, considerando que dicho objeto resultó ser el más preciso en los experimentos estáticos. Por otra parte, la trayectoria de los movimientos circulares detectados por el sistema son mostrados a continuación:

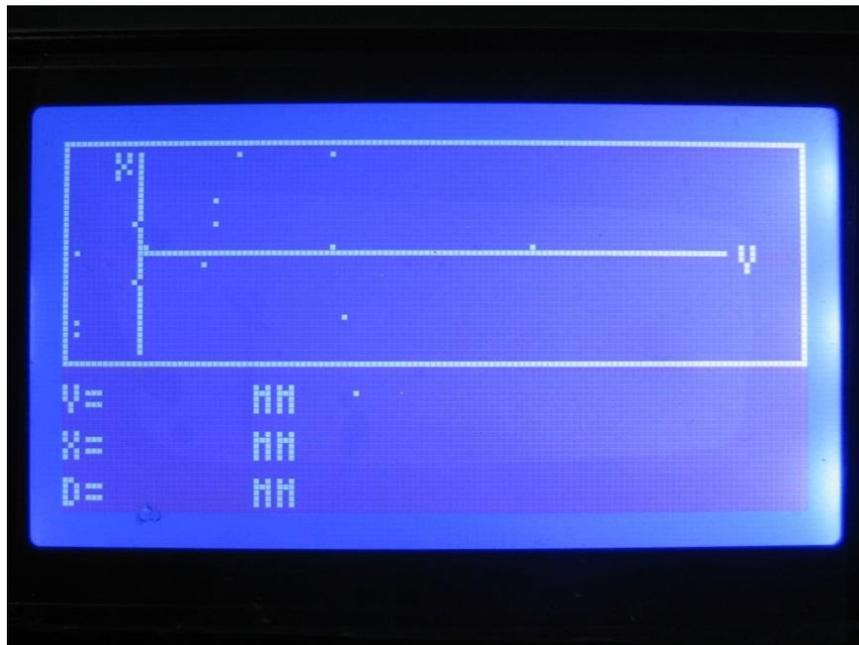


Figura 33. Resultado mostrado por la pantalla del sistema para el cilindro de aluminio en movimiento.

En esta ocasión, se observan pocos puntos correspondientes al movimiento que realizó el objeto, sin embargo solo se aprecian detecciones hasta $Y=1000\text{mm}$ aproximadamente, de ahí en adelante no se registró ningún otro punto. Además aparecieron puntos aleatorios indistintos a la trayectoria real y que se visualizan fuera del plano.

4.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

Según los resultados que se muestran anteriormente, se establece que el comportamiento del sistema de ecolocalización construido presenta muy poca precisión para ubicar los objetos en la posición que corresponden realmente. En general, las muestras que presenta por posición resultan ser muy dispersas en el eje X conforme aumenta la distancia y avanza el tiempo de muestreo, lo cual genera mayor dificultad para localizar un objeto en sentido lateral. Mientras que el resultado de la distancia en el eje Y, que representa el alejamiento entre el sistema y el obstáculo, resulta ser más preciso y proporciona una idea clara de que tan distante se encuentra.

A continuación se presentan tres tablas de resumen de resultados estadísticos, en las cuales se establecen las tres zonas principales: zona de detección, zona de error y zona de no detección, por cada objeto de prueba.

Tabla 15. Tabla de resumen de resultados de desviación estándar por cada objeto de prueba.

Objetos	Zona de detección		Zona de error		Zona de detección nula	
	Y [mm]	X [mm]	Y [mm]	X [mm]	Y [mm]	X [mm]
OBJETOS ESTÁTICOS						
Cilindro de aluminio	500 ≤ Y ≤ 1400	-150 ≤ X ≤ 150	400	≠ 150	200	Para toda X
	600; 1000 ≤ Y ≤ 1400	± 300	500; 800; 1600	± 300	≤ 400; ≥ 1600	-300
	1600 < Y ≤ 2000	-150	1600 < Y ≤ 2000	0 ≤ X ≤ 150	≤ 400; ≥ 1800	+300
Ortoedro de aluminio	600 < Y < 1400	-150 < X < 150	400 ≤ Y ≤ 500	≤ 0	200	Para toda X
	1200	-300	≥ 1600	Para toda X	≤ 400	± 150
	2000	± 150	Para toda Y; ≠ 1200	± 300;	≤ 500; 2000	± 300
OBJETOS ALEATORIOS						
Peluches	-	-	-	-	Para toda Y	Para toda X
Batería de 9v.	500; 800 ≤ Y ≤ 1400	0	600; ≥ 1600	≤ 0	200; 2000	Para toda X
	1800	0	≥ 1000	≤ -150; ≥ 150	≤ 500	± 150
	800	-150 ≤ X ≤ 300	800 ≤ Y ≤ 1400	-300	≤ 600; ≥ 1600	± 300
Cilindro de plástico	500 ≤ Y ≤ 2000	-100 ≤ X ≤ 100	-	-	≤ 400	Para toda X
	800 ≤ Y ≤ 1800	Para toda X			≤ 600; 2000	± 300
Ortoedro de cartón	500 < Y ≤ 2000	-100 ≤ X ≤ 100	600	± 200	≤ 400	Para toda X
	800 ≤ Y < 1600; 2000	± 200	1600	-200	≤ 500; 1800	± 200
	1000	± 300	500; 1400	100	≤ 800; ≥ 1200	± 300
OBJETOS EN MOVIMIENTO						
Cilindro de papel	1000	0	< 1000	Para toda X	≤ 500; > 1000	Para toda X
Cilindro de aluminio	500 < Y ≤ 1000	-300 < X < 300	≤ 500	Para toda X	> 1000	Para toda X

Tabla 16. Tabla de resumen de resultados de error absoluto por cada objeto de prueba.

Objetos	Zona de detección		Zona de error		Zona de detección nula	
	Y [mm]	X [mm]	Y [mm]	X [mm]	Y [mm]	X [mm]
OBJETOS ESTÁTICOS						
Cilindro de aluminio	$500 \leq Y \leq 800; \geq 1600$	$-150 \leq X \leq 0$	400; 1200; 1400	$\neq 150$	200	Para toda X
	$400 \leq Y \leq 1600; 2000$	150	$500 < Y \leq 1400; \neq 1000$	± 300	$\leq 400; \geq 1600$	-300
	1000	± 300	1800	150	$\leq 400; \geq 1800$	+300
Ortoedro de aluminio	$600 \leq Y \leq 2000; \neq 1600$	0	$400 \leq Y \leq 500; 1600$	≤ 0	200	Para toda X
	$500 \leq Y \leq 600$	150	$800 \leq Y \leq 2000$	$\leq -150; 150$	≤ 400	± 150
	$800 \leq Y \leq 1000$	300	$600; 1200 \leq Y \leq 1800$	300	$\leq 500; 2000$	± 300
OBJETOS ALEATORIOS						
Peluches	-	-	-	-	Para toda Y	Para toda X
Batería de 9v.	$800 \leq Y < 1200$	0	$\leq 600; \geq 1400$	0	200; 2000	Para toda X
	600	150	$600; 1000 \leq Y \leq 1600$	-150	≤ 500	± 150
	800; 1800	-150	$800 \leq Y \leq 1800$	$\pm 300; 150$	$\leq 600; \geq 1600$	± 300
Cilindro de plástico	$500 \leq Y \leq 2000$	$-100 \leq X \leq 100$	-	-	≤ 400	Para toda X
	$800 \leq Y \leq 1800$	Para toda X			$\leq 600; 2000$	± 300
Ortoedro de cartón	$500 \leq Y \leq 2000; \neq 1400$	$-100 \leq X \leq 100$	$1400 \leq Y \leq 1800$	± 100	≤ 400	Para toda X
	$600 < Y \leq 1400$	± 200	1600; 2000	± 200	$\leq 500; 1800$	± 200
	1000	± 300	600	200	$\leq 800; \geq 1200$	± 300
OBJETOS EN MOVIMIENTO						
Cilindro de papel	1000	0	< 1000	Para toda X	$\leq 500; > 1000$	Para toda X
Cilindro de aluminio	$500 < Y \leq 1000$	$-300 < X < 300$	≤ 500	Para toda X	> 1000	Para toda X

Tabla 17. Tabla de resumen de resultados de error relativo por cada objeto de prueba.

Objetos	Zona de detección		Zona de error		Zona de detección nula	
	Y [mm]	X [mm]	Y [mm]	X [mm]	Y [mm]	X [mm]
OBJETOS ESTÁTICOS						
Cilindro de aluminio	$\neq 400; \neq 1200; \neq 1400$	0	400; 1200; 1400	0	200	Para toda X
	$400 \leq Y \leq 2000$	$\leq -150; 150$	1800	150	$\leq 400; \geq 1600$	-300
	$600 \leq Y \leq 1600$	300	500	300	$\leq 400; \geq 1800$	+300
Ortoedro de aluminio	$600 \leq Y \leq 2000; \neq 1600$	0	$400 \leq Y \leq 500; 1600$	≤ 0	200	Para toda X
	$500 \leq Y \leq 1400; \neq 1200$	150	$500 \leq Y \leq 2000; \neq 1000$	-150	≤ 400	± 150
	$600 \leq Y \leq 1800$	± 300	$1200; 1600 \leq Y \leq 2000$	150	$\leq 500; 2000$	± 300
OBJETOS ALEATORIOS						
Peluches	-	-	-	-	Para toda Y	Para toda X
Batería de 9v.	$800 \leq Y < 1200$	0	$\leq 600; \geq 1400$	0	200; 2000	Para toda X
	1000	$\neq 150$	$600; 1200 \leq Y \leq 1600$	-150	≤ 500	± 150
	800; 1000; 1800	-150	$800 \leq Y \leq 1800$	150	$\leq 600; \geq 1600$	± 300
Cilindro de plástico	-	-	-	-	-	-
Ortoedro de cartón	-	-	-	-	-	-
OBJETOS EN MOVIMIENTO						
Cilindro de papel	-	-	-	-	-	-
Cilindro de aluminio	-	-	-	-	-	-

En síntesis y como se mencionó previamente, la mayor dificultad de detección se encuentra en los extremos del plano ($X=-300\text{mm}$ y $X=300\text{mm}$), son zonas en las que se reciben pocas muestras y únicamente por objetos capaces de reflejar ondas hacia el sistema (como el caso del cilindro). En la zona central se vuelve más estable a partir de $Y=500\text{mm}$ y puede alcanzar los 2000mm de distancia si el objeto presenta una dimensión detectable y material reflectante. Estos valores delimitan una zona de detección propicia que corresponde con la cobertura predicha en la etapa de cálculos matemáticos; la cual anunciaba una zona de detección desde $Y=500\text{mm}$ en $X=0$, que va abriéndose hasta alcanzar $X=\pm 150\text{mm}$ en $Y=2000\text{mm}$. En esta zona la precisión de la detección depende de las características de los objetos pero generalmente presenta errores

absolutos y desviaciones estándar menores a los 3cm de tolerancia, pero puede superar la zona de error en los perímetros del plano.

Conjuntamente, se obtuvo una detección complicada en los bordes del plano frente a objetos de superficie frontal plana, las muestras tienden a abrirse hacia los lados superando incluso el exceso de 45mm de error. No así sucede con superficies frontales convexas, pero tienden a desviarse hacia el centro del plano con aproximadamente 30mm de error. Mientras que frente a objetos en movimiento, el sistema se comporta de manera ineficaz para seguir trayectorias, únicamente rescata pocas muestras a una distancia aproximada de 1000mm a lo largo del eje X. Cabe mencionar que se verificó que el movimiento de objetos a los alrededores, por fuera del plano, no presente ningún tipo de muestra.

En otra instancia, los peluches utilizados en los ensayos fueron totalmente indetectables en toda posición del plano, debido a la incapacidad de reflexión ultrasónica de su material. Contrario es el caso de los objetos de aluminio, ya que la superficie reflectante que los recubre permite que el sistema los detecte y arroje mayor cantidad de muestras. El objeto de plástico utilizado fue totalmente capaz de generar reflexiones hacia los sensores, mientras que el cartón tiende a absorber levemente las ondas provocando detecciones erróneas y nulas a mayores distancias, como en $Y=1600\text{mm}$ en adelante.

Por otra parte, los resultados presentan mayores errores en la detección de la batería de 9v, de tal manera que la zona de detección obtenida va desde $Y=800\text{mm}$ hasta aproximadamente $Y=1200\text{mm}$ cuando $X=0\text{mm}$; es decir, solamente un espacio reducido de 40cm y frente al sistema, mientras que los puntos de error se dispersan por todo el plano restante hasta alcanzar la zona de detección nula correspondiente a $Y=200\text{mm}$ y 2000mm , $Y\leq 500\text{mm}$ cuando $X=\pm 150\text{mm}$, y en $Y\leq 600\text{mm}$ y $\geq 1600\text{mm}$ cuando $X=\pm 300\text{mm}$, siendo un espacio más amplio a comparación de los ensayos con objetos estáticos.

5. CONCLUSIONES

Se ha diseñado y desarrollado con éxito un dispositivo electrónico capaz de producir y detectar ondas ultrasónicas, que en conjunto funciona como un sistema de ecolocación multihaz en dos dimensiones, y que cumple con un alcance de detección para un espacio determinado.

Se ha utilizado módulos compuestos por un transductor transmisor y uno receptor, de ondas ultrasónicas. Gracias a estos módulos se ha hecho posible la captación de las reflexiones producidas por los objetos a localizar. Aunque estas señales recibidas no pueden ser manipuladas punto por punto dentro del dominio eléctrico, proporcionan la información necesaria para cumplir con el objetivo de localizar objetos.

La información proporcionada por los sensores ultrasónicos es analizada y procesada numéricamente entre códigos de programación dentro de un microcontrolador, el mismo que se encarga de producir resultados numéricos correspondientes a la posición de los objetos. Esta ubicación es mostrada por medio de una pantalla led incorporada al mismo sistema, en la cual se dibuja un plano de coordenadas XY a escala en donde aparecen los puntos correspondientes a las posiciones de los objetos. Además expone los valores en unidades de milímetros de las coordenadas X-Y y de la distancia total hacia cada posición identificada.

Se realizaron prácticas experimentales que describen la precisión del sistema con objetos determinados de diferentes formas, dimensiones y materiales. Se diseñó un plano físico de coordenadas XY y se ubicaron los objetos en posiciones específicas para comprobar la exactitud comparándolos con los valores arrojados en la pantalla del sistema.

Se obtuvieron tres zonas principales en el plano que representan los resultados de los ensayos; la primera es la zona de detección que describe mayor exactitud de ecolocación, con tolerancia de 30mm en los resultados a partir de

las dimensiones consideradas de los objetos de prueba, se establece en el espacio central del plano desde los 500mm hasta los 1800mm de distancia y con apertura de hasta 150mm por lado. La siguiente es la zona de error, ubicada (en el mejor de los casos) en el perímetro de la zona anterior, aunque aparecen puntos de error dentro de la zona de detección; los resultados estadísticos exceden con 15mm más y los superan fácilmente si los objetos presentan complicaciones para ser detectados. Por último se registró una zona de detección nula en los extremos del plano y generalmente antes de 400mm, espacio en el cual el ecolocalizador no detecta ningún objeto, y en los bordes cuando $Y > 1600\text{mm}$.

Conjuntamente se rescata que la simetría de los resultados a los costados del eje Y no es igual, el sistema presenta una tendencia a desviar el objeto hacia el polo positivo del eje X conforme aumenta el eje Y. Se presume que este efecto es causado por la disposición de los transductores receptor y transmisor en el dispositivo, ya que los módulos HC-SR04 utilizados en el prototipo construido ubican al transductor transmisor a la izquierda y al receptor a la derecha del módulo (en vista frontal), y al disponer de dos de estos módulos en el diseño, se tiene que la transmisión y recepción de señales no se da desde los puntos exactos establecidos para los sensores según el diseño.

Por otra parte se observa que la precisión con la que trabaja el sistema depende totalmente de las formas, materiales y dimensiones de los objetos. De tal modo que el ecolocalizador construido presenta mayor exactitud al detectar objetos de superficie frontal convexa, ya que generan reflexiones que retornan fácilmente al sistema. Si el objeto a localizar presenta una superficie frontal plana será complicada su detección en los bordes del plano, puesto que las reflexiones se desvían fuera del alcance del sistema. Si los objetos presentan formas indefinidas o compuestas pueden generar difusión de las ondas por todo el campo y dan lugar a detecciones erróneas. El mismo efecto ocurre con los objetos en movimiento, lo cual provoca ineficacia del sistema para seguir trayectorias.

El material de los objetos también influye directamente en el comportamiento del ecolocalizador, ya que si es altamente absorbente, el objeto será totalmente indetectable como sucedió con los peluches y, aunque el cartón es capaz de generar reflexiones, tiende a presentar muestras inestables e incluso nulas conforme aumenta la distancia en Y. Mientras más reflectante es el material, mayor cantidad de muestras arroja el sistema; de modo que los ensayos realizados con objetos de aluminio y plástico producen una buena cantidad de muestras que facilita el respectivo análisis. Así también sucede con las dimensiones, si se trata de objetos de tamaños pequeños como una batería de 9v, difícilmente serán detectados y las muestras presentarán errores altos, debido a que el haz del emisor no rebota en el objeto indicado.

Cabe recalcar que el plano físico de coordenadas XY utilizado para realizar los ensayos, es una tabla MDF de 2.15 por 0.62 metros; la misma que se constituye como una superficie reflectante para las ondas ultrasónicas. Sin embargo, no se tomaron consideraciones de altura en el montaje del ecolocalizador y los objetos de prueba sobre dicha tabla para evitar su influencia, debido a que las reflexiones que pueda generar el plano se desvían hacia arriba hasta encontrar otro obstáculo, espacio que está fuera del alcance del sistema, por lo tanto la influencia de la tabla fue rechazada para las pruebas realizadas.

Por otra parte, se concluye que el punto exacto de incidencia de la onda transmitida sobre el obstáculo es desconocido. Sin embargo, la lectura y detección recae sobre este punto de incidencia, el cual no siempre va a coincidir con el punto central del objeto, provocando que la respuesta de detección no describa exactamente el centro del mismo, es por esto que se tomaron consideraciones de dimensiones de los objetos para interpretar los resultados. A pesar de esto, se producen imprecisiones debidas a la dirección de propagación sonora, la incidencia de ondas en los objetos y por la forma de los mismos.

La experimentación de las pruebas realizadas puede ser reproducida fielmente siempre que se cumpla con los siguientes lineamientos técnicos: primeramente se debe tener un plano de coordenadas XY acotado, de manera que el eje Y alcance los dos metros y 30 cm para cada costado del eje X, así se podrán comparar los resultados obtenidos. El entorno debe estar libre de objetos a los costados (por lo menos 1 metro) para evitar reflexiones indirectas. La temperatura del ambiente debe ser de 20°C aproximadamente, ya que es el valor que se utilizó para la programación del sistema. El tiempo de muestreo programado en el microcontrolador debe ser de 1 segundo. La alimentación eléctrica del dispositivo debe ser de 3 voltios y 800 miliamperios en corriente continua (DC) para que la potencia ultrasónica dispuesta por los sensores corresponda con los ensayos. Los objetos en análisis deben corresponder con un cilindro de aluminio, plástico y papel de aproximadamente 32mm de radio, un ortoedro de aluminio y de cartón de 72mm de ancho, peluches de hasta 20cm de ancho y una batería alcalina de 9v de 47mm por 25mm y por 16mm. El ecolocalizador debe permanecer en el punto origen del plano, de manera que el sensor 1 corresponda al punto -80;0 [mm] y el sensor 2 al punto 80;0 [mm]. Por último se debe cumplir con los procedimientos para la toma de muestras que ha sido establecido en este trabajo.

6. RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones están asociadas con el desarrollo del diseño, operación y precisión del prototipo.

Para la elaboración del sistema en estudio se utilizaron dos módulos de sensores ultrasónicos, cada uno constituido por un transductor transmisor y uno receptor, cada módulo a un lado de la cara frontal haciendo un total de cuatro transductores (dos transmisores y dos receptores). Se recomienda rediseñar el prototipo utilizando únicamente tres sensores, dos receptores a cada lado de la pared frontal y solo un transmisor en el centro de la pared mentada en el dispositivo; así se logrará que los puntos de recepción de ondas estén en simetría con respecto al origen del plano y que la emisión de señales se realice desde un solo punto, que corresponderá con dicho origen; evitando de esta manera el efecto de desviar las muestras hacia el costado positivo del eje X, como se evidencia en los resultados obtenidos.

Podría ser de gran utilidad añadir al circuito un sistema que guarde los valores de las coordenadas obtenidos de cada punto detectado. De manera que permita descargar la base de datos y se pueda analizar los resultados en su totalidad.

El diseño del dispositivo fue realizado para abarcar una zona de detección determinada, sin embargo y con la finalidad de lograr mayores alcances frontales y laterales, se puede probar modificando las distancias entre sensores y sus respectivas angulaciones, de esta manera el espacio destinado para la detección del ecolocalizador también se verá modificado.

Los resultados obtenidos de la localización de objetos son presentados en una pantalla led gráfica. Asimismo podría ser incorporado un sistema sonoro que permita identificar la presencia de objetos en la zona de detección, el mismo que podría variar las propiedades sonoras en función de la posición de objetos en el eje Y como en el eje X; lo cual puede ser por ejemplo aumentar la

frecuencia y la intensidad del sonido conforme se acerca el objeto al dispositivo.

El tiempo de muestreo configurado en la programación del microcontrolador está contemplado a ser de 1 segundo debido a la facilidad para visualizar los valores en la pantalla. Sin embargo puede reconfigurarse dicho tiempo de muestreo en la codificación del microcontrolador, incluso se puede ampliar el diseño del circuito para tener la opción de seleccionar entre dos o más tiempos de muestreo por medio de un control manual para el usuario.

Del mismo modo, modificando las codificaciones del prototipo construido, es posible reconfigurar variables como la velocidad del sonido a la que actúa con el fin de utilizar el sistema en entornos distintos, mejorar la resolución de presentación de resultados y la disposición de los mismos en la pantalla gráfica del dispositivo, y variar la distancia límite para la detección de objetos.

En otra instancia, cabe mencionar que el plano físico en el cual se asentaron el dispositivo y los objetos para realizar las pruebas experimentales, es de carácter reflectante frente al ultrasonido; por lo tanto se recomienda considerar este detalle para realizar futuros ensayos y evitar la influencia de la superficie recubriéndola de material absorbente, o simplemente ubicando los elementos a una altura que impida reflexiones ultrasónicas indeseadas por el plano. Adicionalmente y con el fin de caracterizar con mayor detalle la operación del ecolocalizador, se recomienda realizar mayor cantidad de ensayos que permitan distinguir su comportamiento frente a objetos de características diferentes pero comparables entre sí.

Por último, y así como el sistema de ecolocación fue elaborado para detectar en dos dimensiones, también es posible construir un sistema que identifique la posición de objetos en tres dimensiones añadiendo más sensores en el eje restante, como se presenta en el estudio de Thong-un y otros (2015, p. 1-5) mencionado en el capítulo de marco teórico en este trabajo de titulación.

REFERENCIAS

- AGELECTRÓNICA. (s.f.). Nota de Aplicación 001. *Medidor de Distancia Ultrasonico*, 4. Distrito Federal, Méjico: AGELECTRÓNICA S.A. de C.V.
- Arias, C., Hug, M. X., Bermejo, F., Venturelli, N. y Rabinovich, D. (2010). Ecolocacion humana: revision historica de un fenomeno particular - Primera parte. *Interdisciplinaria*, 27(2), 335-348.
- Ballestero, L. y Garcia, D. (2010). *Estudio Batimétrico con Ecosonda Multihaz y Clasificación de Fondos*. Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Barshan, B. y Ayrulu, B. (2000). *A Comparison of Four Methods For Accurate Ultrasonic Range Estimation*. Universidad Bilkent, Department of Electrical Engineering, Ankara.
- Blog Embarcado. (2013). *Sensor Ultrassônico V2*. Recuperado el 6 de Abril de 2015, de Blog Embarcado: <http://blogembarcado.blogspot.com.br/2013/06/sensor-ultrassonico-v2.html>
- Cytron Technologies. (2013). *User's Manual*, 1, 10. Skudai, Malasia: Cytron Technologies Sdn. Bhd.
- Davies, K. T., Maryanto, I. y Rossiter, S. J. (2013). Evolutionary origins of ultrasonic hearing and laryngeal echolocation in bats inferred from morphological analyses of the inner ear. *Frontiers in Zoology*, 10(2), 1-15. Recuperado el 5 de Octubre de 2014, de <http://www.frontiersinzoology.com/content/10/1/2>
- GeoHab Backscatter Working Group. (2015). *Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars. Guidelines and Recommendations*. (X. Lurton, & G. Lamarche, Edits.) Recuperado el 8 de Julio de 2015, de GeoHab: <http://geohab.org/wp-content/uploads/2014/05/BSWGREPORT->
- Jakobsen, L., Brinkløv, S. y Surlykke, A. (2013). Intensity and directionality of bat echolocation signals. (C. F. Moss, Ed.) *Frontiers in Physiology*,

- 4(89), 1-9. Recuperado el 5 de Octubre de 2014, de <http://www.frontiersin.org/Physiology/editorialboard>
- Jascha, S.-D., Santani, T., Benjamin M., G., Chris C., R., Crystal, L., Michael R., D. y Nicol S., H. (2014). A device for human ultrasonic echolocation. *IEEE TRANSACTIONS ON BIOMEDICAL ENGINEERING*, 1-7.
- Kou, X. y Gu, L. (2014). Research of Long Range Accurate Ranging Technology Based on Ultrasonic Sensor Measurement. *Journal of Networks*, 9(8), págs. 2161-2167. Recuperado el 23 de Julio de 2015, de doi:10.4304/jnw.9.8.2161-2167
- Lasiter, J. B., Shenoy, R. V., Gousev, E. P., Panchawagh, H., Burns, D. W., Kuo, N.-K. y Ganti, S. (2015). *Patente nº 0165479*. Estados Unidos.
- Manik, H. (2015). *Acoustic Characterization of Fish and Seabed Using Underwater Acoustic Technology in Seribu Island Indonesia*, 5, 157, 1-9. Bogor, Indonesia: J Marine Sci Res Dev. Recuperado el 8 de Julio de 2015, de <http://dx.doi.org/10.4172/2155-9910.1000157>
- Matsuo, I. (2013). Echolocation of static and moving objects in two-dimensional space using bat-like frequency-modulation sound. *Frontiers in Physiology*, 4(149), 1-6. Recuperado el 5 de Octubre de 2014, de <http://www.frontiersin.org/Physiology/editorialboard>
- Microchip Technology Inc. (2006). *PIC16F882/883/884/886/887 Data Sheet*. Microchip Technology Inc.
- Milne, J. L., Anello, M., Goodale, M. A. y Thaler, L. (2014). A blind human expert echolocator shows size constancy for objects perceived by echoes. (Routledge, Ed.) *Neurocase: The Neural Basis of Cognition*, 1-6. Recuperado el 2 de Junio de 2014, de <http://dx.doi.org/10.1080/13554794.2014.922994>
- Mollén, K. (2015). *Water Depth Estimation Using Ultrasound Pulses for Handheld Diving Equipment*. Linköpings universitet tekniska högskolan, Department of Electrical Engineering, Linköping.
- Nielbo, F. L. (2015). *From soundscapes to meanings*, 1501-1506. Maastricht, Dinamarca: Euronoise 2015, Aarhus University.

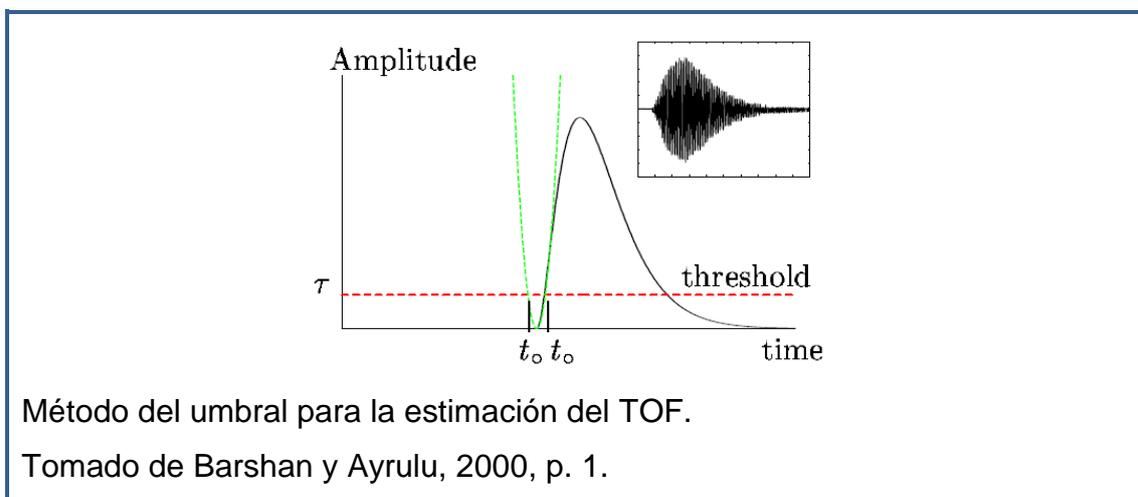
- Racey, P. A. (2015). The Uniqueness of Bats. En L. F. Wang, & C. Cowled (Edits.), *Bats and Viruses: A New Frontier of Emerging Infectious Diseases* (Primera ed., págs. 1-22). Penryn, Inglaterra: John Wiley & Sons, Inc.
- Real Academia Española. (2015). *Real Academia Española*. (RAE, Editor) Recuperado el 19 de 10 de 2015, de Diccionario de la Lengua Española: <http://dle.rae.es/?id=EKxeH6s>
- Rubio, S. y Villao, K. (2010). Medidor de distancia con sensores ultrasónicos utilizando un microcontrolador avanzado. Con comunicación serial a Datalogger e interfaz gráfica. Fuente de energía: 4 pilas recargables AA. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación. Guayaquil: CICYT, ESPOL.
- Sarabia, E. G., Llata, J. R., Robla, S., Torre-Ferrero, C. y Oria, J. P. (2013). Accurate Estimation of Airborne Ultrasonic Time-of-Flight for Overlapping Echoes. *Sensors*, 13, 15465-15488. Recuperado el 23 de Julio de 2015, de www.mdpi.com/journal/sensors
- Schörnich, S. (2008). *Time Domain Echo Analysis in the Bat Phyllostomus discolor*. Tesis doctoral, Ludwig-Maximilians-Universität, Fakultät für Biologie, Munich.
- Thaler, L. (2013). Echolocation may have real-life advantages for blind people: an analysis of survey data. *Frontiers in Physiology*, 4(98), 1-9. Recuperado el 5 de Octubre de 2014, de <http://www.frontiersin.org/Physiology/editorialboard>
- Thong-un, N., Hirata, S. y Kurosawa, M. K. (2015). Improvement in airborne position measurements based on an ultrasonic linear-period-modulated wave by 1-bit signal processing. *Japanese Journal of Applied Physics*, 54(07), 1-6. Recuperado el 24 de Junio de 2015, de IOPscience: <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.54.07HC06>
- Universo Fórmulas. (2015). *Triángulo*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2015, de Universo Fórmulas: <http://www.universoformulas.com/matematicas/geometria/triangulo/>

ANEXOS

ANEXO 1. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DEL TOF

Método del umbral.

La señal reflejada debe superar un umbral de amplitud determinado para ser analizada. Sin embargo, si los obstáculos se encuentran demasiado lejos, los ecos no tendrán la amplitud suficiente para superar el umbral. Reconfigurar un umbral más bajo provoca lectura de ruido y de obstáculos falsos más cercanos. En alcances cortos resulta ser un método instantáneo. (Barshan y Ayrulu, 2000, p. 1 y Mollén, 2015, p. 17).



Los picos de la envolvente de la señal deben sobrepasar el umbral, pero la envolvente posee una fase de ataque, en la que toma un tiempo llegar al pico, y desde el cual empieza a decaer. Este suceso proporciona un TOF mayor ya que añade el tiempo de ataque, lo que resulta en una distancia mayor a la real. Para que el sistema sea totalmente preciso se debe tomar exactamente el TOF hasta el punto de inicio de la onda eco (Kou y Gu, 2014, p. 2163-2164).

Método de ventana deslizante.

Se dispara una cantidad m de pulsos desde el transmisor y se almacena la información. Se genera una ventana con un ancho n correspondiente al número de pulsos que se reciben. Cada una de las señales recibidas pasa a ser analizada por un umbral y las que sobrepasen son guardadas en cada posición de la ventana deslizante. Si el número de pulsos recibidos es igual o mayor a

los transmitidos, el obstáculo habrá sido detectado. Para la estimación del TOF se podrá utilizar la primera señal de la ventana, la primera señal que sobrepasa el umbral, la muestra central de la ventana, o las señales restantes de los pulsos recibidos con los transmitidos ($n-m$). Sin embargo esta combinación de técnicas presenta las mismas desventajas que el método del umbral (Barshan y Ayrulu, 2000, p. 2 y Mollén, 2015, p. 18).

Método de ajuste de curvas.

Se debe obtener mínimo dos puntos de tiempo de la señal recibida, se consiguen mediante dos umbrales establecidos a diferente intensidad, se traza una curva que cruce lo más exacto posible por estos puntos. Esta curva describe aproximadamente la fase de ataque de la envolvente de la onda receptada. Se toma al vértice inicial de esta curva como punto de inicio de la transiente y el tiempo correspondiente a este punto se utiliza para la estimación del TOF. Aunque no se describe exactamente el origen de la forma de onda, resulta en una aproximación bastante cercana, logrando una mayor precisión para los cálculos (Barshan y Ayrulu, 2000, p. 1 y Mollén, 2015, p. 18).

Método de filtro emparejado.

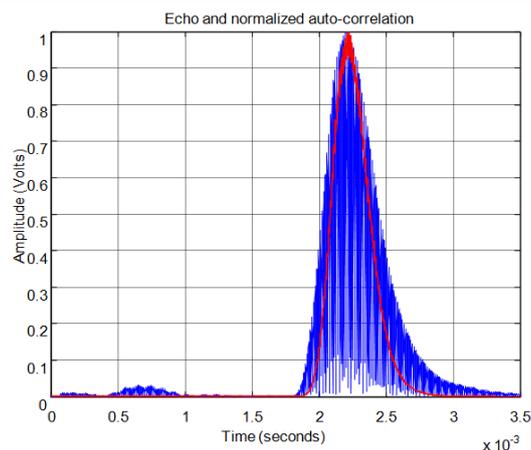
Para separar la señal reflejada del ruido extra, se aplica el filtro emparejado que maximiza el rango dinámico de la relación señal/ruido lo suficiente como para determinar el pico de la señal por sobre el ruido indeseado; el pico se acentúa aún más con filtros basa bajos. El TOF se estima en base a la comparación entre el pico de la onda transmitida y el resultante del filtraje. No obstante, se trata de un método no tan preciso, ya que se toma el pico del eco para el análisis y no exactamente el inicio de la señal. Finalmente, esta técnica desemboca en el método de correlación cruzada (Mollén, 2015, p. 9).

Método de correlación cruzada.

Se comparan las señales recibidas con las transmitidas considerando que el eco es función de la señal original y mantiene las mismas características. Entonces, después de correlacionar las señales se analiza el intervalo de

tiempo entre ellas y se procede al cálculo de la distancia al obstáculo (Barshan y Ayrulu, 2000, p. 2 y Kou y Gu, 2014, p. 2165).

Para largos alcances este método se vuelve impreciso e inestable debido a que las reflexiones en objetos relativamente distantes presentan armónicos cercanos a la frecuencia fundamental con intensidades semejantes, lo cual produce una lectura errónea ya que fácilmente se puede tomar el pico de algún armónico resultando en un dato inexacto de tiempo y distancia. Además, este método demanda más tiempo para los cálculos y procesamiento que el método del umbral, imposibilitando su ejecución en aplicaciones de tiempo real. Sin embargo, se aprovecha este método para comparar la efectividad de otros métodos (Sarabia et al., 2013, p. 15477-15478).



Método de correlación cruzada para la estimación del TOF.

Tomado de Sarabia et al., 2013, p. 15478

Método de señal modulada de 1 bit.

Añadiendo al método de correlación un procesamiento que utiliza una señal modulada de 1 bit, pueden reducirse los requerimientos computacionales que se demandan. El funcionamiento consiste en usar una señal de periodo modulado linealmente en su frecuencia para ser transmitida, el eco entrante es convertido en una secuencia de 1 bit y las dos señales pasan a ser comparadas y procesadas digitalmente por igual haciendo uso del método de correlación descrito anteriormente (Thong-un et al., 2015, p. 1).

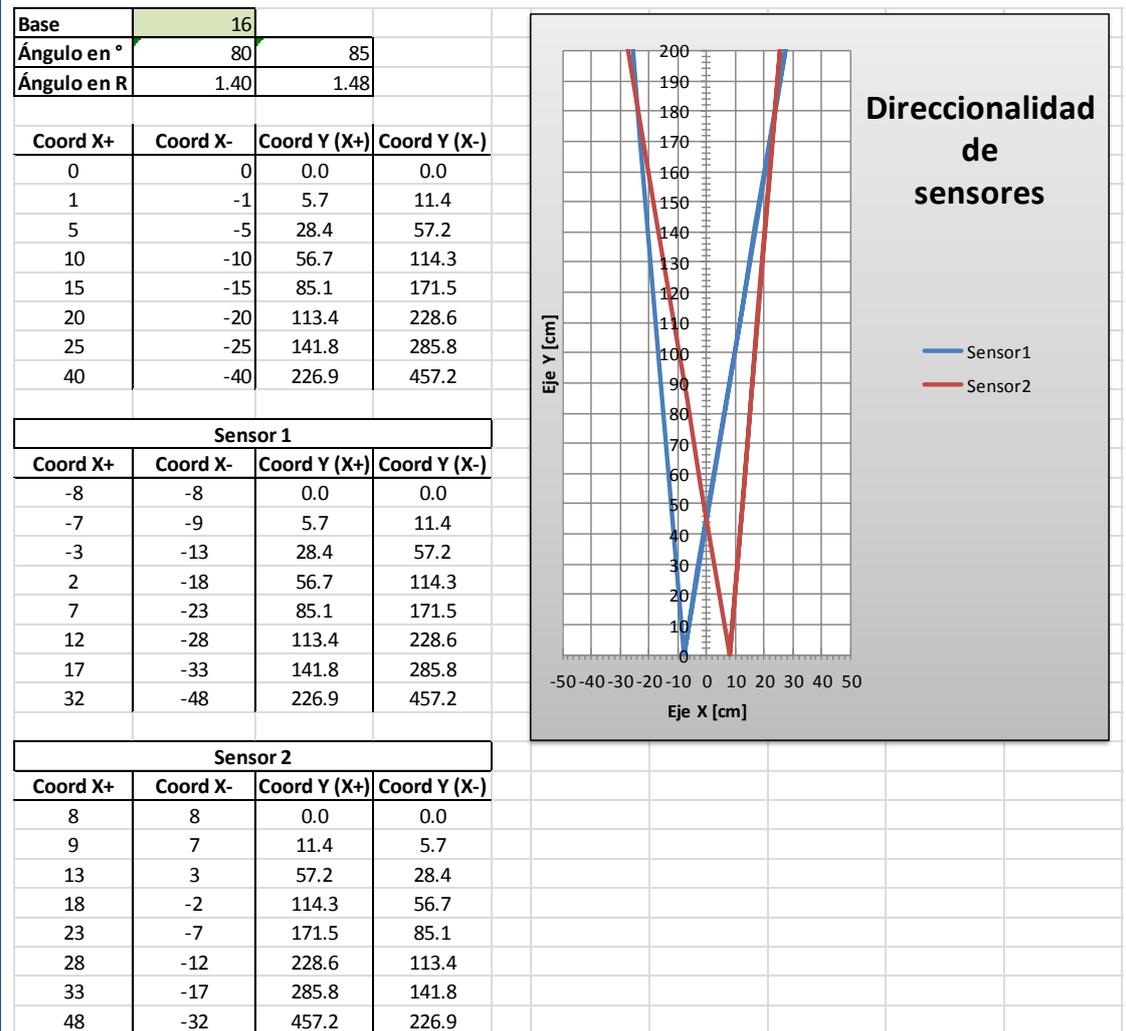
Método combinado de correlación y parábola.

Para obtener mayor precisión se ha combinado el método de correlación cruzada que proporciona la posición pico de la función, y el método de interpolación parabólica y detección de desfase para reducir el error de la correlación. Se hace uso del ajuste de parábola tomando la transiente de la señal como parte del inicio de la parábola logrando mayor precisión de la posición inicial del eco (Kou y Gu, 2014, p. 2162).

Método combinado entre pico y envolvente de la señal.

El principio radica en que el intervalo de tiempo entre el inicio de la transiente y el pico de la señal eco se mantiene constante. Entonces, una vez obtenido el eco, se estima el tiempo de llegada de la transiente, para luego analizar la envolvente y obtener el tiempo del pico. Si el periodo de tiempo entre transiente y pico resulta estable se asumirá que habrá sido localizado un obstáculo y se procederá al cálculo del TOF entre señal eco y señal transmitida (Kou y Gu, 2014, p. 2165-2166).

ANEXO 2. CÁLCULOS MATEMÁTICOS.



Impresión de pantalla de la Hoja de Excel Cobertura.

- La hoja de cálculos que se observa es parte de la etapa de cálculos matemáticos y simulación virtual previas a la elaboración del prototipo, y muestra, en forma analítica, la cobertura de detección del sistema.
- Cabe mencionar que desde esta hoja de Excel no se controla ningún tipo de función del sistema final.

ANEXO 3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.

Características principales de los sensores ultrasónicos HC-SR04.

Características	HC-SR04
Frecuencia ultrasónica	40KHz
Nivel de Presión Sonora	115dB<
Sensibilidad	-64dB<
Directividad típica	15°
Alcance típico	2cm-400cm
Resolución	0.3cm

Tomado de Cytron Technologies Sdn. Bhd., 2013, p. 3, 6.

Especificaciones de los microcontroladores PIC 16F88X, primera tabla.

Device	Program Memory	Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)
	Flash (words)	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)		
PIC16F882	2048	128	128	28	11
PIC16F883	4096	256	256	24	11
PIC16F884	4096	256	256	35	14
PIC16F886	8192	368	256	24	11
PIC16F887	8192	368	256	35	14

Tomado de Microchip Technology Inc., 2006, p. 2.

Especificaciones de los microcontroladores PIC 16F88X, segunda tabla.

Device	ECCP/ CCP	EUSART	MSSP	Comparators	Timers 8/16-bit
PIC16F882	1/1	1	1	2	2/1
PIC16F883	1/1	1	1	2	2/1
PIC16F884	1/1	1	1	2	2/1
PIC16F886	1/1	1	1	2	2/1
PIC16F887	1/1	1	1	2	2/1

Tomado de Microchip Technology Inc., 2006, p. 2.

ANEXO 4. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR.

```
program f886
symbol signal1 = PORTB.4      ' Renombre al puerto RB4
symbol signal2 = PORTB.5      ' Renombre al puerto RB5
symbol echo1 = PORTB.6        ' Renombre al puerto RB6
symbol echo2 = PORTB.7        ' Renombre al puerto RB7
dim i as byte
dim MSB,LSB,CONTEO,CARGATIMER,BASET as word ' Declarar variables
de 16bits
dim base1,base2,AREAT,ALTURA,SEMIP,DIST1,DIST2 as float ' Declarar
variables con coma flotante
dim g as string[5]           ' Declarar cadenas para graficar
main:
ANSEL=0x00                    ' Digitalizar puertos A
ANSELH=0X00                   ' Digitalizar puertos B
TRISB= %11000000             ' RB6 y RB7 como entrada los demás como salidas
CARGATIMER = 0xD228'53800     ' Preparar el contador
Glcd_Init(PORTA, 2, 0, 3, 5, 7, 1, PORTC) ' Configuración del GLCD
Glcd_Fill(0)                   ' Limpiar pantalla
Glcd_Set_Font(@System3x6,3,6,32) ' Fuente pegueña de escritura
Glcd_Write_Char("Y",116,2,1)   ' Escribir eje Y
Glcd_Write_Char("X",9,0,1)     ' Escribir eje x
Glcd_Rectangle(0,0,127,38,1)   ' Graficar rectángulo
Glcd_V_Line(2,36,13,1)        ' Graficar línea vertical, eje Y del plano principal
Glcd_H_Line(13,113,19,1)      ' Graficar línea horizontal, eje X del plano principal
Glcd_H_Line(12,13,14,2)       ' Graficar sensor1
Glcd_H_Line(12,13,24,2)       ' Graficar sensor2
Glcd_dot(46,18,1)             ' Graficar división de 1m en eje y
Glcd_dot(80,18,1)            ' Graficar división de 1.5m en eje y
Glcd_Write_Text("Y=",0,5,1)   ' Escribir coordenada Y en GLCD
Glcd_Write_Text("X=",0,6,1)   ' Escribir coordenada X en GLCD
Glcd_Write_Text("D=",0,7,1)   ' Escribir coordenada X en GLCD
```

```

Inicio:          ' Etiqueta de inicio
T1CON=0         ' (TMR1ON =0) Contador 1 detenido
PIR1.TMR1IF=0   ' Reiniciar indicación de desborde (TMR1IF=0)
BASET = 160     ' Distancia entre sensores en mm
TMR1H=0xD2      '210'0xD2'187 Primer registro del contador 1
TMR1L=0x28      '40'0x28'128 Segundo registro del contador 1
signal1 =1      ' Iniciar disparo de señal1
Delay_10us()    ' Pausa de 10us
signal1=0       ' Cesa disparo de señal1
WHILE ECHO1=0   ' Mientras no se active eco1 no se hace nada
WEND            ' Caso contrario:
T1CON=1         ' Iniciar contador1 (TMR1ON =1)
WHILE echo1=1   'Mientras recibe eco1 o no desborda contador no hacer nada
WEND            ' Caso contrario:
T1CON=0         ' Detener el contador1 (TMR1ON =0)
MSB=TMR1H      ' Guardar registros de contador1 en MSB y LSB
LSB=TMR1L
if PIR1.TMR1IF=1 THEN      ' PIR1.0=1 Si se desborda el contador
    GOTO ERRORES          ' Saltar a etiqueta de errores
else                      ' Caso contrario:
    MSB=MSB << 8         ' Recorrer bit más significativo 8 puestos a la izq
    CONTEO=MSB+LSB      ' Guardar los registros en una sola variable de conteo
    DIST1=((conteo-CARGATIMER)*(3435/10000))/2      ' Distancia en mm
    @20°C (c=343.5m/s)
end if
PIR1.TMR1IF=0         ' Reiniciar indicación de desborde (TMR1IF=0)
TMR1H=0xD2'210'0XBB   ' Reiniciar registros del contador1
TMR1L=0x28'0X80
signal2 =1           ' Iniciar disparo de señal2
Delay_10us()        ' Pausa de 10us
signal2=0           ' Cesa disparo de señal2
WHILE echo2=0       ' Mientras no reciba eco2 no se hace nada

```

```

WEND          ' Caso contrario:
T1CON=1      ' Iniciar contador1 nuevamente
WHILE echo2=1 ' Mientras recibe eco2 o no desborda contador no hacer nada
WEND          ' Caso contrario:
MSB=TMR1H    ' Guardar registros de contador1 en MSB y LSB
LSB=TMR1L
T1CON=0      ' Detener el contador1 (TMR1ON =0)
if PIR1.TMR1IF=1 then ' Si se desborda el contador
    GOTO ERRORES ' Saltar a etiqueta de errores
else          ' Caso contrario:
    MSB=MSB << 8 ' Recorrer bit más significativo 8 puestos a la izq.
    CONTEO=MSB+LSB ' Guardar los registros en una sola variable de conteo
    DIST2=((conteo-CARGATIMER)*(3435/10000))/2 ' Distancia en mm
    @20°C (343.5m/s)
end if
WHILE (Fabs(dist1-dist2)>160) ' Error en la formación del triángulo
    GOTO ERRORES ' Saltar a etiqueta errores
WEND          ' Caso contrario
semip = ((dist1 + dist2 + baset)/2) ' Semiperímetro calculado en mm
AREAt=.Sqrt((semip)*(semip-dist1)*(semip-dist2)*(semip-baset)) ' Area a
partir del semiperímetro
altura = 2*areat/baset ' Cálculo de la altura del triángulo
base1=.Sqrt((dist1*dist1)-(altura*altura)) ' Calcular base del primer triángulo
rectángulo
base2=.Sqrt((dist2*dist2)-(altura*altura)) ' Calcular base del segundo triángulo
rectángulo
WordToStr(ALTURA,g) ' Guardar palabra altura en string g
i=5 ' Iteración de página 0
GOSUB GLCD ' Dirección a subrutina GLCDY para mostrar resultado
if (base1-base2)<0 then ' Si resta de bases es <0, X es negativa
    base1=base2-(baset/2) ' Cálculo de coordenada X
    base2=19-(base1/15) ' Conversión de mm a pixeles

```

```

    Glcd_Write_Char("-",8,6,1) ' Escribir coordenada X
else
    ' Caso contrario: Coordenada X es positiva
    base1=base1-(base1/2)      ' Cálculo de coordenada X
    base2=19+(base1/15)       ' Conversion de mm a pixeles
    Glcd_Write_Char(" ",8,6,1) ' No anteponer signo
end if
WordToStr(base1,g)           ' Guardar palabra base1 en string g
i=6                           ' Iteración de página 1
GOSUB GLCD                   ' Dirección a subrutina GLCDX para mostrar resultado
base1=Sqrt((base1*base1)+(altura*altura)) ' Cálculo de distancia total
WordToStr(base1, g)          ' Guardar palabra base1 en string g
i=7                           ' Iteración de página 7
GOSUB GLCD                   ' Dirección a subrutina GLCDX para mostrar resultado
ALTURA=(altura/15)-20       ' Conversion de mm a pixeles
Glcd_dot(altura,base2,2)     ' Graficar punto de ubicación del objeto en plano
delay_ms(1000)               ' Pausa de 750ms
GOTO Inicio                  ' Redirigir a etiqueta de Inicio
GLCD:                        ' Etiqueta de subrutina de GLCDY
Glcd_Write_text(g,11,i,1)    ' Presentar resultado de string g
Glcd_Write_Text("MM",33,i,1) ' Imprimir símbolo de unidad de centímetros
RETURN                       ' Retornar al programa principal
ERRORES:                     ' Etiqueta de Errores
Glcd_Write_Char(" ",8,6,1)  ' No anteponer signo
g=" "                        ' String g no toma ningun valor
i=5                           ' Salto a pagina 5
gosub GLCD                   ' Presentar string g
i=6                           ' Salto a pagina 6
gosub GLCD                   ' Presentar string g
i=7                           ' Salto a pagina 7
gosub GLCD                   ' Presentar string g
GOTO INICIO                  ' Saltar a etiqueta de inicio
end.

```

ANEXO 5. RESULTADOS DE TOMA DE MUESTRAS EN LOS ENSAYOS.

Promedios resultantes del muestreo con cilindro de aluminio.

Distancia detectada con cilindro de aluminio de r=32mm, h=223mm											
		Eje X [mm]									
		-300		-150		0		150		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	0	0	435	-74	711	52	422	90	0	0
	500	485	-305	514	-180	515	-23	518	131	537	81
	600	627	-226	598	-208	604	-16	616	103	650	199
	800	817	-154	793	-156	802	-6	785	165	744	393
	1000	1018	-246	1114	-124	998	23	997	199	986	338
	1200	1220	-226	1197	-79	1197	82	1197	160	1187	359
	1400	1428	-201	1407	-75	1403	108	1392	202	1384	368
	1600	0	0	1607	-117	1599	51	1607	137	1600	320
	1800	0	0	1809	-93	1804	24	1784	247	0	0
2000	0	0	2000	-86	2000	-16	1991	175	0	0	

Promedios resultantes del muestreo con ortoedro de aluminio.

Distancia detectada con ortoedro de aluminio de 72x72x223mm											
		Eje X [mm]									
		-300		-150		0		150		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	0	0	0	0	917	-26	0	0	0	0
	500	0	0	350	-536	621	81	503	133	0	0
	600	586	-330	546	-266	610	-35	586	191	665	266
	800	818	-65	768	-256	799	-57	795	243	790	342
	1000	1009	-298	984	-238	991	20	978	243	992	325
	1200	1182	-397	1166	-307	1186	36	1176	258	1166	431
	1400	1412	-279	1380	-286	1386	50	1391	202	1356	390
	1600	1579	-404	1578	-283	1573	159	1576	300	1571	384
	1800	1796	-286	1774	-306	1779	52	1781	258	1756	454
2000	0	0	1966	-314	1981	-33	1974	293	0	0	

Promedios resultantes del muestreo con la batería de 9v.

Distancia detectada con batería de 9v de 25x16x47mm													
		Eje X [mm]											
		-300		-150		0		150		300			
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X		
Eje Y [mm]	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	0	0	0	0	811	84	0	0	0	0	0	0
	500	0	0	0	0	1006	23	0	0	0	0	0	0
	600	0	0	629	-287	1009	-26	607	190	0	0	0	0
	800	784	-46	793	-125	791	-38	776	280	853	260	0	0
	1000	1022	-244	988	-205	991	7	901	312	985	356	0	0
	1200	1212	-260	1185	-281	1186	44	1165	320	1138	460	0	0
	1400	1418	-134	1384	-271	1390	64	1371	307	0	0	0	0
	1600	0	0	1528	-539	1597	45	1586	268	0	0	0	0
	1800	0	0	1813	-140	1799	92	1785	286	0	0	0	0
2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

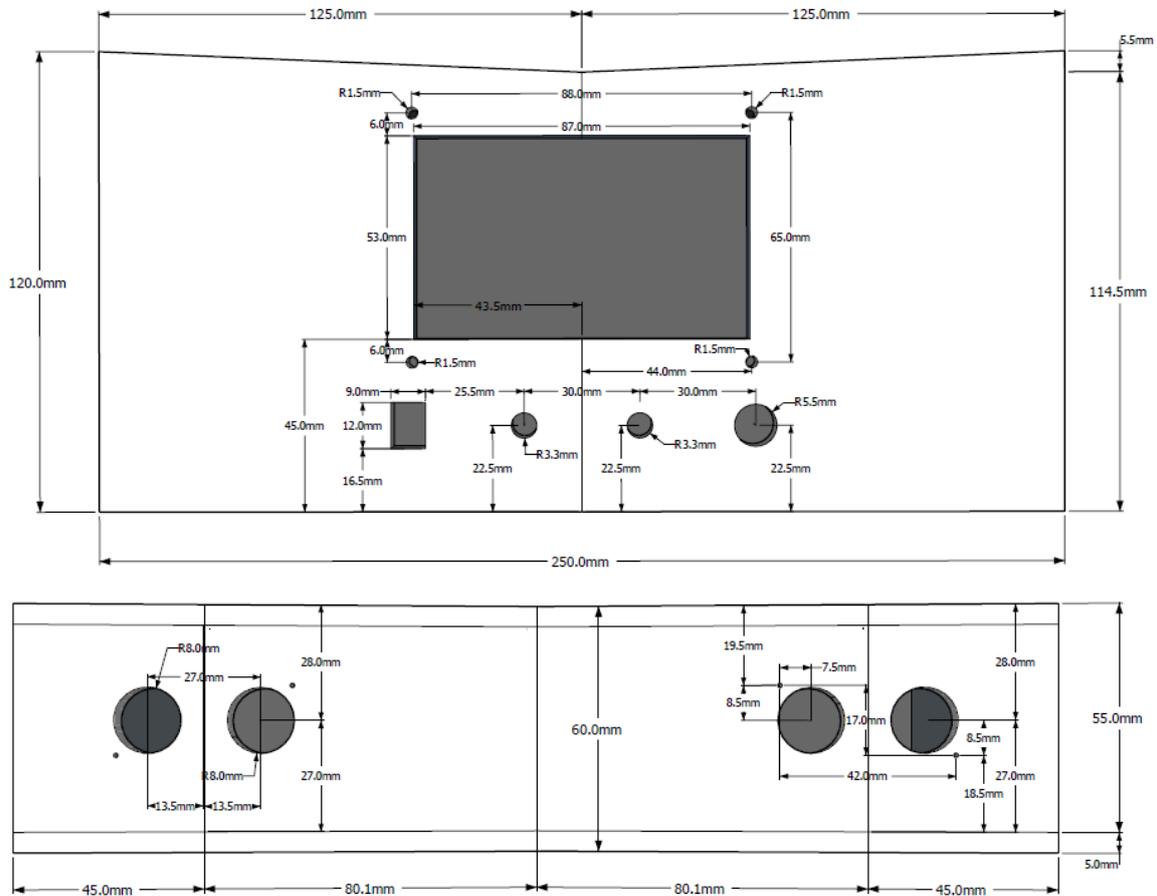
Promedios resultantes del muestreo con el cilindro de plástico.

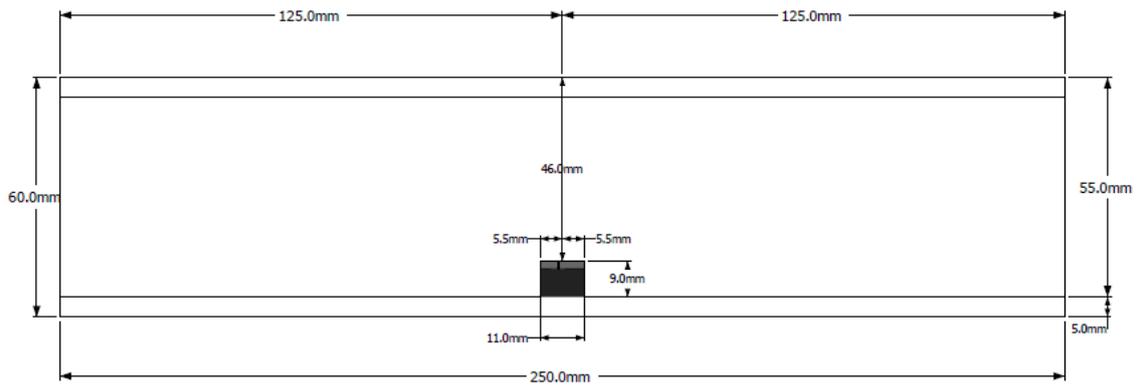
Distancia detectada con cilindro de plástico r=24mm, h=230mm															
		Eje X [mm]													
		-300		-200		-100		0		100		200		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	500	0	0	0	0	497	-118	512	-13	503	69	0	0	0	0
	600	0	0	0	0	596	-67	609	3	612	68	0	0	0	0
	800	797	-291	806	-209	803	-118	813	2	813	108	796	204	782	308
	1000	998	-316	1002	-176	1026	-112	1001	11	992	145	1000	210	1004	312
	1200	1206	-292	1200	-185	1195	-111	1199	3	1197	118	1193	210	1201	317
	1400	1409	-265	1401	-183	1400	-100	1403	14	1403	108	1400	214	1402	296
	1600	1598	-298	1606	-211	1599	-98	1602	6	1602	109	1604	202	1606	294
	1800	1780	-316	1808	-180	1803	-89	1823	12	1802	118	1810	174	1801	330
2000	0	0	0	0	1998	-118	1986	28	1990	116	0	0	0	0	

Promedios resultantes del muestreo con el ortoedro de cartón.

Distancia detectada con ortoedro de cartón de 72x72x223mm															
		Eje X [mm]													
		-300		-200		-100		0		100		200		300	
		Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	X
Eje Y [mm]	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	500	0	0	0	0	518	-95	518	20	511	115	0	0	0	0
	600	0	0	628	-185	595	-91	603	-18	609	96	655	219	0	0
	800	0	0	789	-204	786	-95	790	12	795	104	799	212	0	0
	1000	1006	-312	990	-198	984	-107	990	-3	1000	116	1027	200	1003	314
	1200	1251	-354	1197	-229	1173	-111	1180	7	1190	116	1181	258	0	0
	1400	0	0	1382	-254	1378	-192	1383	6	1495	216	1392	230	0	0
	1600	0	0	1541	-290	1583	-165	1585	28	1592	177	1572	267	0	0
	1800	0	0	0	0	1784	-175	1786	43	1782	167	0	0	0	0
2000	0	0	1965	-321	1969	-139	1986	9	1972	131	1971	292	0	0	

ANEXO 6. DIMENSIONES DEL CHASIS DEL PROTOTIPO CONSTRUIDO.





ANEXO 7. CONTROLES Y ELEMENTOS DEL DISPOSITIVO CONSTRUIDO.

