



# **Sistema Háptico de Detección de Obstáculos para invidentes**

**Joseph Vizenio Vargas Fajardo**

Universidad Antonio Nariño  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Neiva, Colombia  
2021



# **Sistema Háptico de Detección de Obstáculos para invidentes**

**Joseph Vizenio Vargas Fajardo**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Electrónico**

Director (a):

Director: José Fernando Barrera Campo.

Eng, MsC, PhD

Línea de Investigación:

Tecnologías Asistenciales

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Neiva, Colombia

2021



*“El éxito no es definitivo, el fracaso no es fatal:  
lo que cuenta es tener el coraje para  
continuar”.*

**Winston Churchill**



## Agradecimientos

Agradezco en especial a aquellas personas que hicieron posible de diferentes maneras mi actual trayectoria universitaria que culmina con este trabajo de grado, el cual representa para mí un condensado de todos los conocimientos y experiencias que pude obtener y vivir en esta institución educativa UAN.

Quiero empezar agradeciendo a mis padres y a mi hermano, por todo el apoyo moral y económico que me brindaron en estos años, sin el cual hubiese podido cumplir esta meta trazada desde mis años en la secundaria; ellos son la razón de que pudiese superar los diferentes retos y dificultades que aparecerían en el camino.

A mis docentes quiero agradecer, en especial a la ingeniera Andrea Marín, cuya diligencia e interés por educar un ingeniero competente, imprimió a partes iguales exigencia y confianza que me permitieron superar los diferentes retos intelectuales que plantaban las diferentes asignaturas.

Por último, quiero agradecer al ingeniero Fernando Barrera Campo, el cual tuve la oportunidad de conocer en este último tramo de mi carrera universitaria, y sin el cual este trabajo se hubiese podido presentar a tiempo, y con la calidad que se espera de un verdadero ingeniero, gracias por los aportes y el conocimiento que compartió conmigo durante el desarrollo de mi TIG.



## Resumen

La ceguera es una discapacidad sensorial que afecta la capacidad de los globos oculares para percibir la luz, sus múltiples tonos y formas de emisión “imágenes”. Esta discapacidad dificulta la movilidad de quienes la padecen, debido a la actual infraestructura de las ciudades e interiores, y de que la mayoría de las soluciones de movilidad que se encuentran en forma de accesorio personal tienen limitaciones debido a su enfoque de detección orientado a los obstáculos existentes al nivel del suelo; por ello el enfoque principal de diseño fue el de un sistema que pudiese informar al usuario sobre los obstáculos que tengan como objetivo los miembros superiores del cuerpo humano.

El prototipo está implementado en una estructura en forma de sombrero que cuenta con 6 sensores de proximidad (3 infrarrojos “IR” & 3 ultrasónicos “US”) ubicados en pares sobre el ala frontal de sombrero (IR, US); estos pares de sensores apuntarán hacia el frente, pero a direcciones distintas (izquierda, frontal, derecha), teniendo un ángulo diferencial del 15% con respecto al par frontal; de esta forma obtener información de múltiples puntos del área censada. Luego del censado y toma de datos, el algoritmo del autor procesará y eliminará las medidas que identifique como ruido con una tasa de tolerancia máxima del 25% de ruido para los ultrasónicos y del 20% para infrarrojos, posteriormente, El prototipo caracterizará los datos procesados usando Look Up Table’s individuales para cada sensor, obtenidas mediante la implementación de un modelo de predicción en el programa MATLAB.

El sistema finalmente informará de la presencia y cercanía de un obstáculo mediante un brazalete háptico conformado por 3 motores vibrotáctiles, que funcionaran uno tras otro, y que tendrán programados estímulos específicos que el usuario interpretará, dado que cada motor representa una dirección de donde pueden provenir los obstáculos; dichos obstáculos detectados están en un rango de 20cm a 79cm.

**Palabras clave:** Invidentes, háptico, obstáculos, movilidad, time of light, fusión de datos multimodal.

## Abstract

Blindness is a sensory disability that affects the ability of the eyeballs to perceive light, its multiple shades and forms of emission "images". This disability hinders the mobility of those who suffer from it, due to the current infrastructure of cities and interiors, and the fact that most mobility solutions that are in the form of personal accessories have limitations due to their detection approach oriented to people. existing obstacles at ground level; For this reason, the main design approach was that of a system that could inform the user about the obstacles that the upper limbs of the human body are targeting.

The prototype is implemented in a hat-shaped structure that has 6 proximity sensors (3 infrared "IR" and 3 ultrasonic "US") located in pairs on the front brim of the hat (IR, US); These pairs of sensors will point towards the front, but in different directions (left, front, right), having a differential angle of 15% with respect to the front pair; in this way, obtain information from multiple points of the surveyed area. After the census and data collection, the author's algorithm will process and eliminate the measurements that it identifies as noise with a maximum tolerance rate of 25% noise for ultrasonics and 20% for infrared, later, the prototype will characterize the processed data using individual Look Up Tables for each sensor, obtained by implementing a prediction model in the MATLAB program.

The system will finally inform of the presence and proximity of an obstacle by means of a haptic bracelet made up of 3 vibrotactile motors, which will work one after the other, and which will have specific stimuli programmed that the user will interpret, since each motor represents a direction from which they can come. the obstacles; said obstacles detected are in a range of 20cm to 79cm.

**Keywords: Blind, haptic, obstacles, mobility, time of light, multimodal data fusion.**

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen .....</b>	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas.....</b>	<b>XVI</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Marco Teórico.....</b>	<b>9</b>
1.1 Discapacidad .....	9
1.2 Ceguera.....	9
1.3 Sistema Háptico.....	9
1.4 Tiempo de Vuelo (Time of Flight).....	9
1.5 Fusión de Datos Multimodales.....	10
1.6 Medios de Orientación y Desplazamiento de Personas Invidentes: .....	10
1.6.1 Adquisición de nuevas habilidades.....	11
1.6.2 Tecnologías Asistenciales de Orientación para Invidentes:.....	11
<b>2. Estado del Arte .....</b>	<b>13</b>
2.1 Dispositivos que Emplean Sensores Ultrasónicos .....	13
2.2 Dispositivos que Emplean Diferentes Tipos de Sensores .....	14
<b>3. Diseño de una Plataforma de Asistencia para Invidentes.....</b>	<b>17</b>
3.1 Diseño Electrónico.....	17
3.1.1 Componentes Electrónicos.....	17
3.1.2 Diagrama Electrónico .....	18
3.1.3 Diseño de Cubiertas.....	19
3.1.4 Diseño de Software .....	22
3.2 Calibración de Sensores.....	26
3.2.1 Sensor Infrarrojo .....	28
3.2.2 Sensor Ultrasónico.....	32
3.2.3 Modelo predictivo usando MATLAB .....	35
3.3 Calibración de los Sensores Usando el Algoritmo.....	40
<b>4. Resultados.....</b>	<b>49</b>
4.1 Pruebas de medición en condiciones ideales. ....	49
4.2 Pruebas de campo.....	53
4.2.1 Prueba 1. ....	56

4.2.2	Prueba 2.....	57
4.2.3	Prueba 3.....	58
<b>5.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones .....</b>	<b>63</b>
5.1	Conclusiones.....	63
5.2	Recomendaciones.....	63
<b>A.</b>	<b>Anexo: Peso exacto en Kg del prototipo.....</b>	<b>64</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>65</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 3-1</b> Esquema de circuito completo del prototipo. ....	19
<b>Figura 3-2</b> Prototipo terminado, y su peso en Kg. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura 3-3</b> Boceto de Carcasa, A) perspectiva superior y B) frontal respectivamente. .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura 3-4</b> Boceto de Brazaletes Háptico. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura 3-5</b> Algoritmo de sistema háptico de detección de obstáculos para invidentes. .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura 3-6</b> Estructura construida para la calibración del sistema. ....	27
<b>Figura 3-7</b> Procedimiento realizado para toma de patrones de entrenamiento. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<b>Figura 3-8</b> Comportamiento de un sensor Infrarrojo. ....	28
<b>Figura 3-9</b> Pines Sensor Sharp GP2Y0A02YK0F. ....	29
<b>Figura 3-10</b> Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor infrarrojo 1. ....	30
<b>Figura 3-11</b> Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor infrarrojo 2. ....	30
<b>Figura 3-12</b> Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor infrarrojo 3. ....	31
<b>Figura 3-13</b> Comportamiento del sensor ultrasónico. ....	32
<b>Figura 3-14</b> Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor ultrasónico 1. ...	33
<b>Figura 3-15</b> Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor ultrasónico 2. ...	34
<b>Figura 3-16</b> Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor ultrasónico 3. ...	34
<b>Figura 3-17</b> Look Up Table Sensor Infrarrojo Izquierdo Sin Filtro. ....	36
<b>Figura 3-18</b> Look Up Table Sensor Ultrasónico Izquierdo Sin Filtro. ....	37
<b>Figura 3-19</b> Look Up Table Sensor Infrarrojo Frontal Sin Filtro. ....	37
<b>Figura 3-20</b> Look Up Table Sensor Ultrasónico Frontal Sin Filtro. ....	38
<b>Figura 3-21</b> Look Up Table Sensor Infrarrojo Derecha Sin Filtro. ....	38
<b>Figura 3-22</b> Look Up Table Sensor Ultrasónico Derecha Sin Filtro. ....	39
<b>Figura 3-23</b> Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor infrarrojo 1. ....	41
<b>Figura 3-24</b> Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor infrarrojo 2. ....	41
<b>Figura 3-25</b> Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor infrarrojo 3. ....	42
<b>Figura 3-26</b> Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor ultrasónico 1. ...	43
<b>Figura 3-27</b> Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor ultrasónico 2. ...	43
<b>Figura 3-28</b> Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor ultrasónico 3. ...	44
<b>Figura 3-29</b> Look Up Table Sensor Infrarrojo Izquierdo con Filtro. ....	45
<b>Figura 3-30</b> Look Up Table Sensor Ultrasónico Izquierdo con Filtro. ....	45
<b>Figura 3-31</b> Look Up Table Sensor Infrarrojo Frontal con Filtro. ....	46

<b>Figura 3-32</b> Look Up Table Sensor Ultrasónico Frontal con Filtro.....	46
<b>Figura 3-33</b> Look Up Table Sensor Infrarrojo Derecho con Filtro.....	47
<b>Figura 3-34</b> Look Up Table Sensor Ultrasónico Derecho con Filtro .....	47
<b>Figura 4-1</b> Perfiles del usuario con el prototipo y regla. ....	53
<b>Figura 4-2</b> Brazaletes Hápticos y sus Componentes.....	54
<b>Figura 4-3</b> Pilar con láminas suspendidas. ....	55
<b>Figura 4-4</b> Trayecto prueba 1. ....	56
<b>Figura 4-5</b> Trayecto prueba 2. ....	57
<b>Figura 4-6</b> Pilar ubicado con perspectiva diagonal. ....	59
<b>Figura 4-7</b> Prueba 3, primera parte del trayecto. ....	59
<b>Figura 4-8</b> Prueba 3, trayecto en el fondo de la habitación.....	60
<b>Figura 4-9</b> Prueba 3, trayecto de retorno.....	61

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 2-1</b> Sistema Anticolisión para invidentes. ....	13
<b>Tabla 2-2</b> Assistive Infrared Sensor Based Smart Stick for Blind .....	14
<b>Tabla 2-3</b> Diseño de un Sistema de detección de obstáculos en ambientes cerrados para personas con ceguera total en San Juan de Pasto.....	14
<b>Tabla 3-1</b> Tabla sin algoritmo de sensores infrarrojos. ....	35
<b>Tabla 3-2</b> Tabla sin algoritmo de sensores ultrasónicos. ....	35
<b>Tabla 3-3</b> RMSE obtenido por cada modelo predictivo.....	40
<b>Tabla 3-4</b> Comparativa de RMSE de los datos con filtrado y sin filtrado.....	48
<b>Tabla 4-1</b> Par de Sensores Izquierdo. ....	49
<b>Tabla 4-2</b> Par de Sensores Frontal .....	51
<b>Tabla 4-3</b> Par de Sensores Derecho. ....	52
<b>Tabla 4-4</b> Medidas recolectadas prueba 1. ....	56
<b>Tabla 4-5</b> Medidas recolectadas prueba 2. ....	58
<b>Tabla 4-6</b> Medidas recolectadas prueba 3. ....	¡Error! Marcador no definido.

# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Subíndices

<b>Subíndice</b>	<b>Término</b>
<i>Cm</i>	Centímetros
<i>mV</i>	Mili-voltios
<i>OS</i>	Operating System
<i>ms</i>	Mili-segundos
<i>UART</i>	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter.
<i>V</i>	Voltios
<i>Dc</i>	Direct Current
<i>A</i>	Amperios
<i>GND</i>	Ground
<i>IR</i>	Infrarrojo
<i>US</i>	Ultrasónico

# Introducción

Actualmente en Colombia existen 1.143.992 ciudadanos con discapacidad visual lo cual representa el 2,37% de la población total en Colombia (Caracol Radio Servicio Informativo, 2019) (DANE, 2019) y según organizaciones no gubernamentales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), manifiestan que el dispositivo de orientación más utilizado por invidentes continua siendo el bastón blanco (Ciegos, 2018); su popularidad se debe a su bajo costo y facilidad de adquisición, además de que un medio informativo y no solo un accesorio para la movilidad, ya que según no requiera mayor capacitación para su uso y su combinación de colores permite a un vidente conocer la o las discapacidades sensoriales del usuario (RNIB, 2017).

El prototipo propuesto tiene la capacidad de percibir obstáculos dirigidos hacia los miembros superiores del cuerpo, mediante el uso de múltiples sensores de proximidad ubicados de tal forma que cubran en su rango de medición todo el frente del sujeto, estos obstáculos serán informados al usuario del dispositivo mediante el uso de vibraciones aplicadas en la sección superior del brazo (bíceps), estas vibraciones serán proporcionadas por motores vibrotáctiles ubicados cuidadosamente en un brazalete elástico adaptable a todo tipo de usuario.

**Planteamiento del problema:** La ceguera es una discapacidad sensorial que afecta la habilidad de percibir la luz, sus múltiples tonos y. Esta limitación visual esta categorizada en niveles de afectación, los cuales empiezan desde la percepción de manchas y figuras, hasta la ausencia completa de la vista; esta limitación sensorial es mayoritaria a nivel mundial tomando como población total a toda persona que padece alguna discapacidad, esta situación también se evidencia en Colombia donde el número de ciudadanos invidentes asciende a 1.143.992 personas (Caracol Radio Servicio Informativo, 2019).

Los ciudadanos que padecen algún tipo de ceguera enfrentan ciertos retos al momento de movilizarse en espacios cerrados y áreas urbanas, entre los problemas más habituales se encuentran: la incapacidad de ubicarse, la dificultad de encontrar entradas o salidas, y la imposibilidad de evitar obstáculos dirigidos a la altura de miembros superiores del

cuerpo; esta última dificultad no ha sido solucionada aun incluso con el amplio número de propuestas de investigación; esto se debe a que algunas de ellas son aplicaciones móviles y dispositivos provenientes del mercado que no están diseñados para los eventos impredecibles del día a día, ya que existen obstáculos y estructuras estáticas y no estáticas, que deben ser detectadas en tiempo real para salvaguardar la integridad física del usuario, ya sea porque se encuentran a una altura que el bastón blanco no pueda detectar, o que se puedan dirigir a la altura de los miembros superiores.

La detección de obstáculos a la altura de los miembros superiores "Cabeza, Hombros y Torso" ha sido un problema poco explorado, ya que la mayoría de las investigaciones posicionan el foco de atención en los obstáculos a la altura de los miembros inferiores, cuando está comprobada la eficacia del bastón blanco como accesorio detector de este tipo obstáculos, debido a que este necesita el contacto directo con el obstáculo dejando como innecesario la incorporación de sistemas de apoyo en el accesorio que tendrán márgenes de error implícitos por el uso de sensores, como se ha visto en muchos dispositivos en el mercado y la investigación (WeWalk INC, 2020).

Otro gran grupo de dispositivos para movilidad integran emisores de sonido, lo cual es contraproducente, ya que este medio de comunicación entre el dispositivo y el usuario fue pensado desde la perspectiva de un vidente, lo que resulta en el desarrollo de prototipos que no tienen en cuenta las capacidades únicas de un ciudadano invidente; debido a esto se desarrollan dispositivos que para un invidente resultan molestos o poco prácticos, ya que interrumpen constantemente el censado que naturalmente hace el oído con señales audibles provenientes del dispositivo, esto en el caso de un ciudadano con ceguera se hace más presente, ya que se ha observado mediante estudios neurológicos el aumento de percepción por parte de los invidentes (Collignon, 2011) en personas que han nacido con esta discapacidad o que la han adquirido en cualquier momento de su vida (Bauer et al., 2017), por lo que un sonido molesto que perciba un vidente, un invidente lo sentirá aún más molesto e irritante.

Habiendo resaltado la problemática del uso de sonido como medio de comunicación entre dispositivo de guía y el usuario, es necesario mencionar los problemas del uso de sensores de proximidad. La mayoría de estos usan la técnica Time of Flight que permite mediante la emisión de señales en el ambiente calcular la distancia en función del tiempo que tarda la señal en retornar al sensor, esta técnica puede ser usada en mediciones o incluso la

cartografía de mapas 3D (Schuon et al., 2008), pero esta depende de los sensores de los que se disponga ya que en el ambiente existen diferentes señales que pueden interferir las mediciones.

El prototipo propuesto planea solucionar el problema de comunicación entre el dispositivo y el usuario, además de solucionar el problema de enfoque de dispositivos, haciendo uso de vibraciones moduladas, y enfocándose en los obstáculos a la altura de los miembros superiores respectivamente. El uso de vibraciones es posible gracias al uso de motores vibro táctiles que generan vibraciones similares a las de un Smartphone, lo que hace viable esta alternativa debido a que cumple con la norma ISO 5349 sobre el máximo de vibraciones provenientes de un dispositivo o herramienta que puede tolerar un ser humano [19], en respuesta a los problemas identificados previamente, este proyecto planea el desarrollo de un algoritmo permita determinar la cercanía de los obstáculos a

los sensores de proximidad infrarrojos y ultrasónicos, e incluyendo el uso de motores vibratorios en contacto con la piel o “sistema háptico” que comunique la cercanía de los obstáculos frontales y laterales, con esto será posible cumplir los objetivos técnicos de eficiencia en el intercambio de información entre sistema y usuario.

**Justificación:** Los motivos por los cuales se orienta esta investigación en torno al desarrollo de un prototipo que pudiese informar a los discapacitados visuales sobre los diferentes obstáculos que tienen frente a su cabeza, hombros y torso, se debe a la situación actual de los discapacitados en Colombia que se reduce a un definitivo retraso en la implementación de tecnologías en infraestructura en pro de los discapacitados (OMS, 2017), esta situación se ha evidenciado en el actual reporte vigente sobre discapacidad publicado por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011), donde mencionan los diferentes problemas de movilidad a los que se enfrentan los discapacitados visuales entre los que se encuentran: la inaccesibilidad a zonas públicas y edificios, la poca intervención gubernamental para promover la investigación hacia las necesidades de los invidentes, la falta de adaptación en productos de uso masivo como los Smartphone y el lento proceso en la legislación de las naciones para promover la movilidad segura de los invidentes. Dados los datos previos se ha concluido que afirmar el poco protagonismo investigativo que se le ha proporcionado esta problemática, lo que hace que las diferentes propuestas para la orientación de alta fidelidad que salen al mercado tengan un alto costo y sean de

difícil acceso; por esta razón aún son populares las soluciones como el bastón blanco para discapacitados visuales, que llevan avalados oficialmente por las organizaciones para los invidentes más de 80 años desde su invención (Comunicaciones INCI, 2018).

Estableciendo los límites existentes del bastón blanco, como la incapacidad de informar al usuario sobre la existencia de los obstáculos en el plano superior del cuerpo; además de las fallas de eficiencia vistas en ciertos puntos de los enfoques propuestos en las áreas del mercado y la investigación, hace necesario el aumentar las alternativas en los campos del saber, y de esta manera proporcionar más opciones a la población invidente que desee probar soluciones poco convencionales.

Por ello el Autor conserva en sí la intención de proporcionar una alternativa que pueda solventar algunas de las problemáticas de eficiencia encontradas en las propuestas a lo largo del tiempo de recaudación de información, esto ha permitido a su vez resolver y estudiar las diferentes propuestas evaluando selectivamente que enfoques y aportes pueden perpetuarse para el actual desarrollo y también reemplazarse con nuevas propuestas.

### **Objetivos:**

#### **▪ General:**

- Desarrollar un prototipo de sistema de guiado que permita a un invidente percibir la presencia y distancia de obstáculos en su campo cercano a través de una interfaz háptica.

#### **▪ Específicos:**

- Desarrollar un algoritmo de fusión de medidas que combine las medidas provenientes de un sensor ultrasónico con uno infrarrojo para reducir ruido e incertidumbre.
- Implementar un prototipo funcional que por medio de sensores de proximidad detecte obstáculos en el campo cercano, e informe su distancia al usuario mediante transductores vibro táctiles.
- Validar el desempeño del prototipo mediante un ambiente controlado, y así determinar la precisión del algoritmo de fusión de medidas y la funcionalidad del prototipo.

**Metodología:** La metodología implementada se enfocó en el desarrollo de un algoritmo capaz de establecer distancias mediante sensores ultrasónicos e infrarrojos de proximidad para indicar la existencia de un obstáculo en el camino del individuo o sus laterales mediante vibraciones moduladas:

- **Etapa 1:** Esta etapa se enfocó en el desarrollo del algoritmo de fusión de medidas que será programado en la plataforma Arduino, además de realizarse paso a paso la incorporación de los sensores de proximidad.
  - En primera instancia se realizó el diseño preliminar del algoritmo incorporando solo 2 sensores (Ultrasónico e Infrarrojo) mediante diagrama de flujo para esquematizar el funcionamiento del prototipo.
  - En segunda instancia se diseñó el algoritmo que definió el comportamiento del dispositivo con los 6 sensores de proximidad.
  - En tercera instancia se estableció que los 4 sensores restantes se ubicarán a 15° del par que apunte hacia el frente; de esta forma se cubrirán las perspectivas que busca el autor (Frente, ángulo derecho, ángulo, izquierdo).
  - Finalmente se estableció la zona de pruebas, en el domicilio del autor por la actual situación sanitaria mundial.
- **Etapa 2:** Esta etapa comprendió la implementación de lo planteado anteriormente en un dispositivo que pueda ser llevado en la cabeza, además de la instalación de los motores vibratorios en una interfaz Háptica:
  - Inicialmente se realizaron pruebas con los motores vibratorios, el objetivo es conocer la intensidad necesaria para su correcto funcionamiento en términos de sensibilidad humana.
  - En segunda instancia se definirá el comportamiento de los motores desde el algoritmo manipulando el tiempo que se mantiene activo con la salida de Arduino, con esto será posible comunicar la cercanía de un obstáculo al individuo según sea el tiempo en que permanezca activo.
  - En tercera instancia se incluyeron los motores vibratorios en el sistema teniendo como prioridad la alimentación del sistema completo para eficiencia en la futura autonomía del mismo.
  - En cuarta instancia se instaló todo el hardware en una estructura tipo sombrero que permitió simplificar el uso del prototipo, los sensores fueron incorporados en el ala frontal del sombrero según lo descrito en la instancia cuatro de la etapa

1; el resto del hardware (Arduino, Power Bank, cableado, etc.) se ubicaron en la parte superior de la copa y la banda del sombrero.

- **Etapa 3:** Esta etapa se enfocó en el proceso de calibración, validación del algoritmo y el prototipo, donde se determinará la precisión y eficiencia de los mismos bajo las siguientes instancias:
  - En primera instancia se realizó un código de prueba para la calibración de los 6 sensores a usar (3 ultrasónicos, 3 infrarrojos) para posteriormente desarrollar el código Arduino basado en el algoritmo establecido en el diagrama mencionado en la etapa 1; este se aplicara primero en 2 sensores con diferentes medios de emisión Ultrasónico (HC-SR04) e Infrarrojo(Sharp GP2Y0A02YK0F), los cuales trabajaran en conjunto y aportaran 2 entradas de datos de la misma dirección, y durante el desarrollo del proyecto se comparara la estrategia de fusión de datos propuesta frente a otras técnicas clásicas (Guerrero, 2018).
  - En segunda instancia se instaló en la residencia del autor una pista de obstáculos compuesta por paredes de cartón, objetos livianos suspendidos en el aire usando cuerdas, y el uso de personas; los anteriores obstáculos determinarán la precisión del prototipo ante estructuras estáticas, u objetos o entidades que puedan tener contacto con los miembros superiores.
  - En tercera instancia realizaron pruebas del prototipo con objetos estáticos, tales como pilares, y móviles como péndulos o personas que se acerquen a este para medir su precisión ante obstáculos no estáticos.
  - En cuarta instancia se realizó una comparación de los resultados esperados con los obtenidos, para realizar cambios en caso de necesitarlos.
- **Organización de la tesis:** El presente documento cuenta con 6 capítulos cuyo objetivo es el de inducir, ilustrar, contextualizar, exponer, probar y concluir respectivamente con cada uno de los capítulos, a continuación, se expondrán los propósitos de cada capítulo y estos son:
  - **Marco Teórico:** El capítulo 2 cumple la tarea de contextualizar todo lo relacionado con el TIG en los diferentes aspectos sociales, técnicos y educativos; de esta forma el lector podrá conocer la situación de movilidad actual de los invidentes, eso incluye también sus alternativas no convencionales.

- **Estado del Arte:** Este capítulo 3 se encargará de exponer los diferentes artículos y trabajos de grado que inspiraron la actual propuesta de movilidad para invidentes ya sea desde un punto de vista conceptual, técnico o metodológico.
- **Diseño de una Plataforma de Asistencia para Invidentes:** El capítulo 4 es el encargado de exponer todos los aspectos técnicos y tecnológicos relacionados con el prototipo y el algoritmo, este capítulo contara con información detallada sobre la composición y estructura del prototipo, el diseño de hardware y software del sistema, y el funcionamiento técnico y digital del mismo.
- **Resultados y Pruebas:** Este capítulo presenta toda la información relacionada a los datos obtenidos de las pruebas de medición planteadas en la metodología del documento, este contendrá entre otras cosas tablas, gráficos e imágenes que evidencien la realización de las pruebas y los datos de medición y respuesta del prototipo obtenido durante el evento.
- **Conclusiones:** El capítulo 6 será el último del documento, y contará con todas las conclusiones relacionadas con los resultados y sus pruebas, donde se contrastará finalmente lo que se esperaba inicialmente del prototipo, y lo que finalmente se obtuvo.



# **1. Marco Teórico.**

Dentro de la siguiente sección se podrá encontrar información relevante para contextualizar al lector con el desarrollo de este TIG, entre estos se podrá encontrar información relacionada con los aspectos técnicos del sistema.

## **1.1 Discapacidad**

Es definida como la deficiencia a largo plazo de tipo sensorial, física, intelectual o mental que pueda padecer un ser humano debido a las diferentes barreras que impidan el pleno ejercicio de su participación en la sociedad, en igualdad de condiciones con todos los ciudadanos (MinSalud, 2020)

## **1.2 Ceguera**

Según la ley de la república de Colombia, la ceguera es una discapacidad sensorial que afecta la capacidad de percibir la luz en todas sus formas de emisión, esto ocurre debido a la afectación total o parcial de los globos oculares (Colombia, 2013), esta discapacidad posee diferentes niveles de afectación, por ello en la república de Colombia una persona es declarada ciega si su percepción de luz es tan baja que no pueda reconocer colores, formas, etc.

## **1.3 Sistema Háptico**

Se refiere a cualquier sistema que haga uso exclusivo del sentido del tacto para la transmisión de información entre un dispositivo y un ser humano mediante estímulos que pueden ser eléctricos, vibratorios, etc. (RAE, 2019).

## **1.4 Tiempo de Vuelo (Time of Flight)**

Es una técnica usada para medir distancia sin contacto físico alguno, usando la emisión de ondas ultrasónicas o radiación infrarroja en el aire para determinar cuánto tiempo tarda

entre su emisión y retorno, y así, calcular la distancia entre el sensor y una superficie u obstáculo (Schuon et al., 2008). El comportamiento de las ondas emitidas es conocido bajo las leyes físicas en el ambiente, pero estas pueden ser alteradas por señales de ruido provenientes de la zona donde se emiten tales como: la temperatura, la humedad, y la cantidad de luz medida en lúmenes; el aumento del error de medición a causa de estos factores depende también del tipo de medio de emisión del sensor, ya que un sensor que emite ultrasonido solo será afectado por la temperatura y la humedad, y a un sensor infrarrojo será vulnerable a la temperatura y la intensidad de luz producidas por el sol, las bombillas y lámparas de alta intensidad, etc.

## 1.5 Fusión de Datos Multimodales

Es una técnica de medición que usa dos o más sensores para un mismo objetivo, esto se hace bajo la premisa de que, con múltiples perspectivas visto en este caso desde los sensores, es posible reducir el margen de error debido la redundancia datos de la misma medición. La técnica puede ser usada con sensores que usen diferentes medios de emisión, un ejemplo de lo anterior es el uso de dos sensores de proximidad, uno ultrasónico y otro infrarrojo para la medición de distancias, pero los medios de medida son diferentes (Li et al., 105 C.E.).

## 1.6 Medios de Orientación y Desplazamiento de Personas Invidentes:

**Bastón Blanco:** Es un accesorio de movilidad diseñado para que personas invidentes puedan detectar obstáculos al nivel del suelo y la cintura, su color, el cual puede ser verde o el blanco, indica a las personas el tipo de discapacidad sensorial de su usuario; el color verde indica que el usuario tiene baja visión, mientras que el blanco anuncia que la ceguera de su usuario es total, además, el bastón blanco puede contar con líneas de color rojo que indican ceguera y sordera respectivamente(Comunicaciones INCI, 2018).

**Perros Guía:** Son caninos entrenados para orientar personas invidentes y prevenir accidentes mientras caminan, son obtenidos mediante adopción, ya que su entrenamiento es conocido por su elevado costo, por ello son de difícil acceso para usuarios de bajos ingresos; a diferencia de la concepción popular de que deben ser tratados como perros comunes, estos no deben recibir muestras de afecto, ni cualquier otra distracción ya que pueden afectar su objetivo principal de orientar y proteger.

**Apps de Guía:** Son aplicaciones que mediante el uso de la tecnología GPS constituida por 3 segmentos el segmento espacial, el segmento de control y el segmento del usuario” y el uso de comandos de voz por parte de dispositivos, puede dar a conocer a personas invidentes o con baja visibilidad la ubicación de sus lugares de interés y así trazar una ruta, por ejemplo, la ruta que deben tomar para llegar a su lugar de trabajo usando la ubicación de su residencia, la de ubicación de su lugar de trabajo y las rutas existentes en la ciudad que habita, con las características anteriores es posible orientar a el usuario mediante

instrucción por comandos de voz sobre en qué esquinas debe doblar, y cuantos metros de una calle debe recorrer, reduciendo la posibilidad de que el usuario invidente se extravié.

**Pavimentación Táctil:** Es una ayuda que proporciona la infraestructura pública de las ciudades para sus discapacitados visuales, este se compone de baldosas con señalización de alto relieve destinada a leerse mediante el uso del bastón blanco; esta nueva infraestructura posee diferentes símbolos similares al braille que deben ser interpretados para detenerse, avanzar y cruzar de forma apropiada y segura. (Department of the Environment, 2000),

**Paneles táctiles:** Es una tecnología convencional que actualmente puede ser usada por los invidentes gracias a la función de accesibilidad por voz de los dispositivos con pantalla táctil, ellos deben someterse a una curva de aprendizaje en lo relacionado con su reacción oído – mano, ya que la respuesta del dispositivo es en tiempo real, y se puede interactuar con el de inmediato.

### 1.6.1 Adquisición de nuevas habilidades

Las personas invidentes deben actualizarse constantemente a las exigencias del mercado y la tecnología, ya que la adaptación es necesaria para su plena incorporación en la sociedad y en el mercado laboral, por ello las personas han tenido que adaptarse a tecnologías de uso masivo como la de los paneles táctiles y la pavimentación táctil.

Los paneles táctiles actualmente pueden ser usados por los invidentes gracias a la función de accesibilidad por voz de los dispositivos con pantalla táctil, ellos deben someterse a una curva de aprendizaje en lo relacionado con su reacción oído – mano, ya que la respuesta del dispositivo es en tiempo real, y se puede interactuar con el de inmediato.

La pavimentación táctil es una ayuda que proporciona la infraestructura pública de las ciudades para sus discapacitados visuales, este se compone de baldosas con señalización de alto relieve destinada a leerse mediante el uso del bastón blanco; esta nueva infraestructura posee diferentes símbolos similares al braille que deben ser interpretados para detenerse, avanzar y cruzar de forma apropiada y segura.

### 1.6.2 Tecnologías Asistenciales de Orientación para Invidentes:

Son tecnologías diseñadas para facilitar la movilidad en áreas urbanas, estas en su mayoría usan la tecnología GPS en combinación con la función de instrucción hablada para proporcionar una ruta que seguir a los invidentes, algunos ejemplos de esta tecnología son:

- **Accesibilidad por Voz:** Es una función que a día de hoy se está incorporando a los dispositivos inteligentes para proporcionar una experiencia más amena a personas con baja visibilidad o ceguera, esta proporciona una descripción de todo botón, icono, o

imagen que señale el usuario, además, también está adaptada en apps de navegación o mapas para proporcionar guía (Inc, 2020b).

- **Google Maps:** Es una aplicación de mapas diseñada por Alphabet INC que cuenta con la función de accesibilidad por voz que junto con la tecnología GPS, proporciona información sobre los lugares de interés del usuario, lo cual es útil ya que con esto también es posible trazar rutas de recorrido orientadas por la accesibilidad por voz (Inc, 2020).
- **Apple Maps:** Es una aplicación de mapas y navegación diseñada por Apple INC, capaz de proporcionar navegación en áreas rurales y urbanas, esta cuenta con la función de accesibilidad por voz llamada Voice Over, la cual proporciona información de su ubicación o ruta trazada a personas con baja visibilidad y ceguera (Apple Inc, 2020). Apple Maps está disponible solo en dispositivos con IOS diseñado también por Apple.
- **BBVA App:** Es una Aplicación Móvil diseñada por la empresa de servicios financieros BBVA, esta posee el mismo servicio de GPS con instrucción hablada que Google y Apple maps, con la incorporación de una función más que es capaz de orientar a las personas de baja visibilidad y con ceguera a los bancos y proporcionar información sobre sus servicios financieros, o de cómo retirar dinero de un cajero automático de la empresa (BBVA, 2018).

## 2.Estado del Arte

La actual selección de bibliografía es producto de la revisión de múltiples trabajos de grado orientados a la movilidad de las personas invidentes, y el procesamiento de datos en tiempo real usando microcontroladores.

### 2.1 Dispositivos que Emplean Sensores Ultrasónicos

Prototipo de detector de obstáculos implementado en un chaleco para invidentes **Tabla 2-1**.

**Tabla 2-1** Sistema Anticolisión para invidentes.

Titulo	SISTEMA ANTICOLISIÓN PARA INVIDENTES (Coral, 2018)
Autores	Juan David Alvarado Coral
Año	2018
País y Ciudad	Colombia, Popayán
Resumen	El proyecto propone la construcción de un chaleco con múltiples sensores de ultrasonido en la región del pecho y la espalda, todo lo anterior procesado usando una red neuronal evolutiva y un algoritmo genético.
Aportes	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ El uso de múltiples sensores apuntando al mismo objetivo.</li><li>▪ Implementación del prototipo en un artículo de vestir en lugar de un accesorio.</li><li>▪ Calibración del algoritmo mediante el uso de redes neuronales.</li></ul>
Brechas	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ El Prototipo usa sonido como medio de comunicación con el invidente.</li><li>▪ El rango deja sin cubrimiento el área de la cabeza.</li><li>▪ El uso de múltiples sensores ultrasónicos puede generar ruido en la medida de cada uno de ellos.</li></ul>

## 2.2 Dispositivos que Emplean Diferentes Tipos de Sensores

Bastón detector de obstáculos al nivel del suelo usando sensores infrarrojos **Tabla 2-2**.

**Tabla 2-2** Assistive Infrared Sensor Based Smart Stick for Blind

Titulo	Assistive Infrared Sensor Based Smart Stick for Blind People (Nada et al., 2015)
Autores	Ayat A. Nada, Mahmoud A. Fakhir, Ahmed F. Seddik
Año	2015
País y Ciudad	Reino Unido, Londres
Resumen	La propuesta consiste en la construcción de un bastón blanco inteligente usando un sistema embebido con el microcontrolador PIC de MICROCHIP, y un par de sensores infrarrojos debajo del mango en lugar del convencional palo.
Aportes	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El prototipo propone el uso de solo un par de sensores para medir un objetivo.</li> <li>▪ La electrónica que controla el prototipo está diseñada como un sistema embebido.</li> <li>▪ La estructura del prototipo fue diseñada para que fuese ligera y portable.</li> </ul>
Brechas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ El Prototipo usa un auricular como medio de comunicación con el invidente.</li> <li>▪ El sistema está diseñado para detectar al detalle obstáculos que están solo al nivel del suelo.</li> <li>▪ El prototipo intenta reemplazar el bastón blanco, y por ello la perspectiva para la implementación no es conveniente.</li> </ul>

Sistema detector de obstáculos mediante el procesamiento de imágenes **Tabla 2-3**.

**Tabla 2-3** Diseño de un Sistema de detección de obstáculos en ambientes cerrados para personas con ceguera total en San Juan de Pasto.

Titulo	Diseño de un Sistema de detección de obstáculos en ambientes cerrados para personas con ceguera total en San Juan de Pasto (Guerrero, 2018)
Autores	Juan Gabriel Franco Guerrero

---

Año	2018
País y Ciudad	Colombia, Pasto
Resumen	Es un sistema detector de obstáculos mediante la técnica de visión por imágenes, diseñado para ambientes cerrados.
Aportes	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ El sistema propone el censado del panorama en lugar de un solo objetivo para detectar más.</li></ul>
Brechas	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ El sistema no fue diseñado para probarse en campo, por lo tanto la portabilidad de este sistema y sus exigencias son complejas.</li></ul>



## 3. Diseño de una Plataforma de Asistencia para Invidentes.

### 3.1 Diseño Electrónico.

Esta sección del documento dará a conocer los diferentes componentes, diseños, estructuras y lógica usadas para el diseño e implementación del prototipo en forma de sombrero, además del algoritmo encargado de establecer el funcionamiento del prototipo.

#### 3.1.1 Componentes Electrónicos.

- **Arduino Mega 2560:** Es una placa programable de origen italiano que incorpora el microcontrolador ATmega2560, y cuenta con 54 pines digitales programables de E/S destinados a diferentes tareas (Arduino Store, 2020), entre los más importantes a destacar para el proyecto son:
  - 16 entradas analógicas.
  - 15 pines PWM.

El Arduino mega también incorpora dos pines de voltaje, uno de 5v y otro de 3.3v, además de varios pines de GND para comodidad del desarrollador; esto simplifica la realización de experimentos para los desarrolladores ya que la placa está en capacidad de alimentar varios módulos y sensores al mismo tiempo, esta placa es programable gracias a la plataforma de software Arduino IDE, la cual cuenta con un constante respaldó de actualizaciones por parte de la empresa fabricante.

Esta placa programable es perfecta para el uso académico, ya que cuenta con una amplia variedad de módulos, sensores y drivers económicamente accesibles para

los usuarios, esto se debe a que la placa cuenta con una amplia comunidad a nivel mundial que continuamente desarrolla librerías que están al alcance de todos en la plataforma Arduino IDE posibilitan el uso simplificado de estos complementos de hardware.

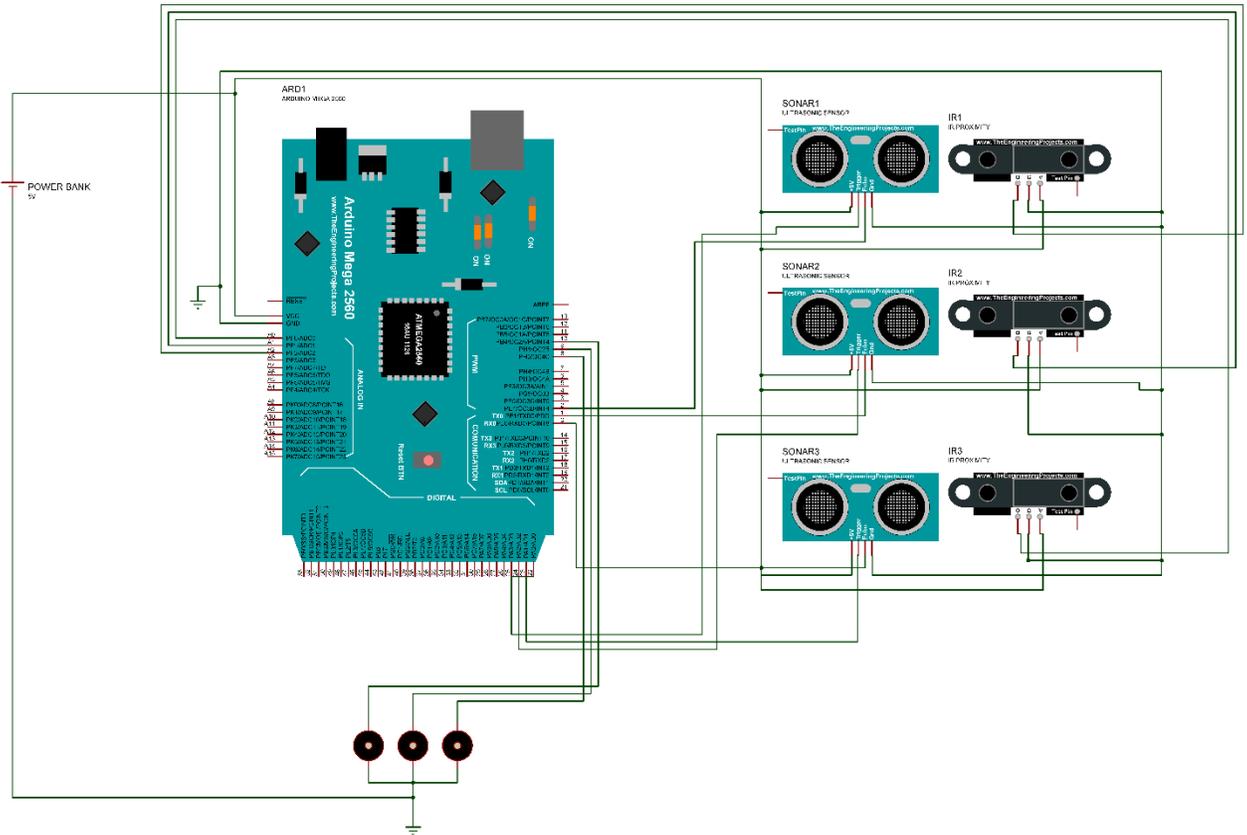
- **Motorvibrotáctil:** Es un componente eléctrico diseñado para producir vibraciones aptas para la piel del ser humano, estos motores no tienen un tamaño mayor al de una moneda, y tienen una frecuencia fija de 5Hz; es un componente muy usado para tratamientos físicos en el estímulo de los músculos, además de la creación de dispositivos de realidad aumentada como chalecos que simulen las sensaciones de un videojuego o simulación virtual (Choi & Kuchenbecker, 2012).

### 3.1.2 Diagrama Electrónico

La **Figura 3-1** muestra el diagrama electrónico del prototipo, que cuenta con una placa programable Arduino Mega 2560, 3 sensores ultrasónicos HC – SR04, 3 sensores infrarrojos Sharp Gp2Y0a02Yk0F y 3 motores vibro táctiles; estos motores vibrotáctiles serán los encargados de proporcionar la respuesta del prototipo al usuario, informando de la proximidad de un obstáculo según el tiempo que permanezcan activos según la orden de la placa Arduino.

El comportamiento de los motores serán los estados de alto y bajo, pero, modulando el tiempo en el que están activados, este tiempo dependerá de los datos de entrada proporcionados por los sensores ultrasónicos e infrarrojos, y posteriormente del procesamiento realizado por la placa Arduino.

**Figura 3-1** Esquema de circuito completo del prototipo.



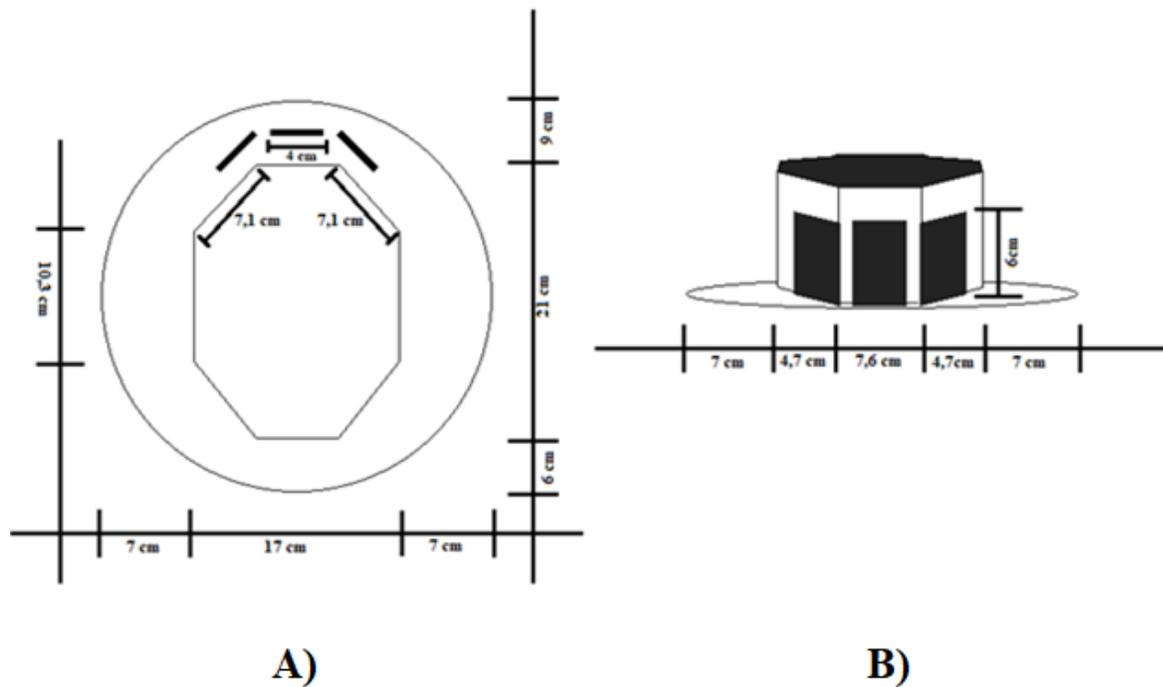
**Fuente:** Autor, diseño en proteus.

### 3.1.3 Diseño de Cubiertas

El objetivo principal para el diseño de la cubierta fue el de incorporar todos los componentes electrónicos en una sola estructura, además, de tener la capacidad de usar la misma en la cabeza sin que represente algún esfuerzo que pueda afectarla a consecuencia del peso del prototipo; esta prevención se debe a que el cuello y cabeza humanos solo soportan hasta 5 Kg de peso adicional (KENNETH K. HANSRAJ, 2014); por ello, esta estructura tiene un peso de 0.865 Kg de peso, y tendrá una forma similar a un sombrero, debido a la conveniencia para la implementación de la electrónica, ya que en su ala frontal será posible ubicar los múltiples sensores, y en la copa todo lo demás como la placa Arduino mega, el powerbank, y las múltiples conexiones.

Las dimensiones de la cubierta se muestran en la **Figura 3-2**, en la que es posible observar las láminas de madera MDF y sus dimensiones.

**Figura 3-2** Boceto de Carcasa, A) perspectiva superior y B) frontal respectivamente.



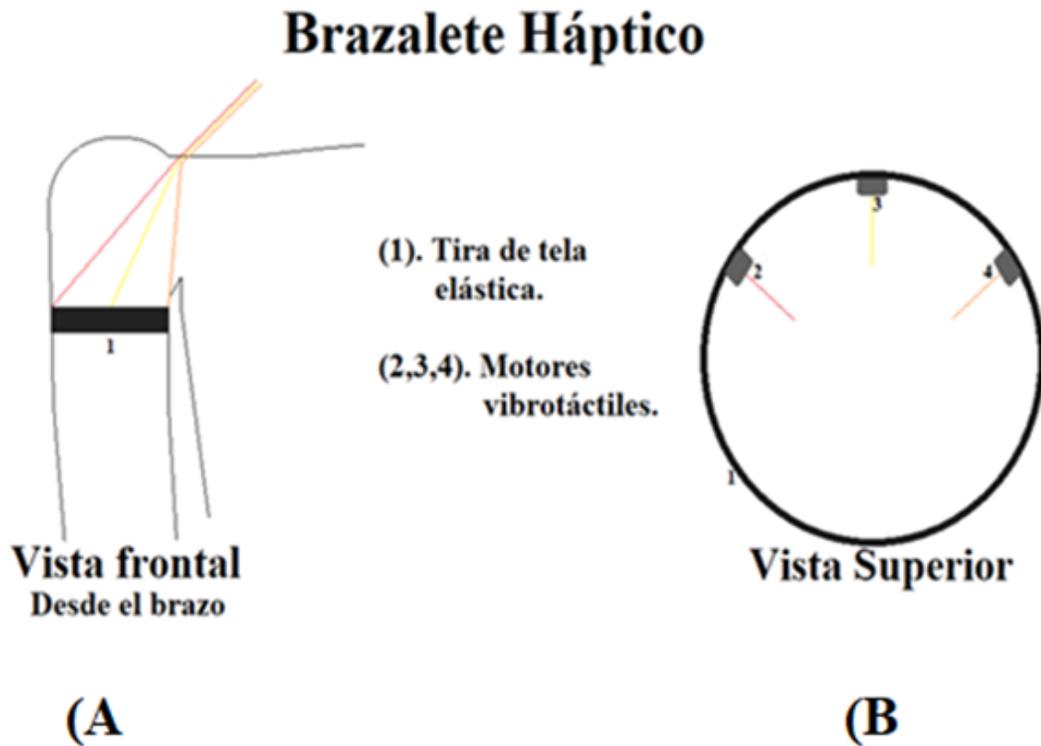
**Fuente:** Autor.

La estructura contara con 3 láminas de 4x6 cm en madera, que estarán paralelas a la copa del sombrero en la sección del ala frontal, esto con el objetivo de ubicar en cada una de ellas un par de sensores, y que estos apunten hacia el frente; estas laminas estarán ubicadas a 15° con respecto a la lámina que está en el centro, como se aprecia en la perspectiva superior, de esta forma los sensores no apuntaran hacia la misma dirección, en lugar de esto los sensores podrán apuntar levemente hacia la izquierda o derecha (Ver B **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) según la ubicación de estas en el ala frontal. La copa del sombrero será un octágono irregular con un lado frontal y trasero de 7,6 cm, diagonales de 7,1cm y laterales de 10,3cm como se aprecia en la perspectiva superior, estas medidas son producto del tamaño de la cabeza del autor, el cual tiene 58cm

de diámetro, y una curvatura craneal superior de 31cm. la estructura del prototipo está hecha en madera de 3mm de espesor, e incorporará todos los componentes electrónicos.

Los motores vibrotáctiles requieren un contacto directo con la piel del usuario para su apropiado funcionamiento, estos serán ubicados en una banda de tela elástica que se usara en el brazo derecho como lo muestra la **Figura 3-3**, esta banda tendrá un diámetro 5mm menor al del bíceps derecho del autor, ya que solo es necesario el contacto directo de los motores con la piel para su adecuado funcionamiento, y las bandas elásticas son de costura de baja tensión.

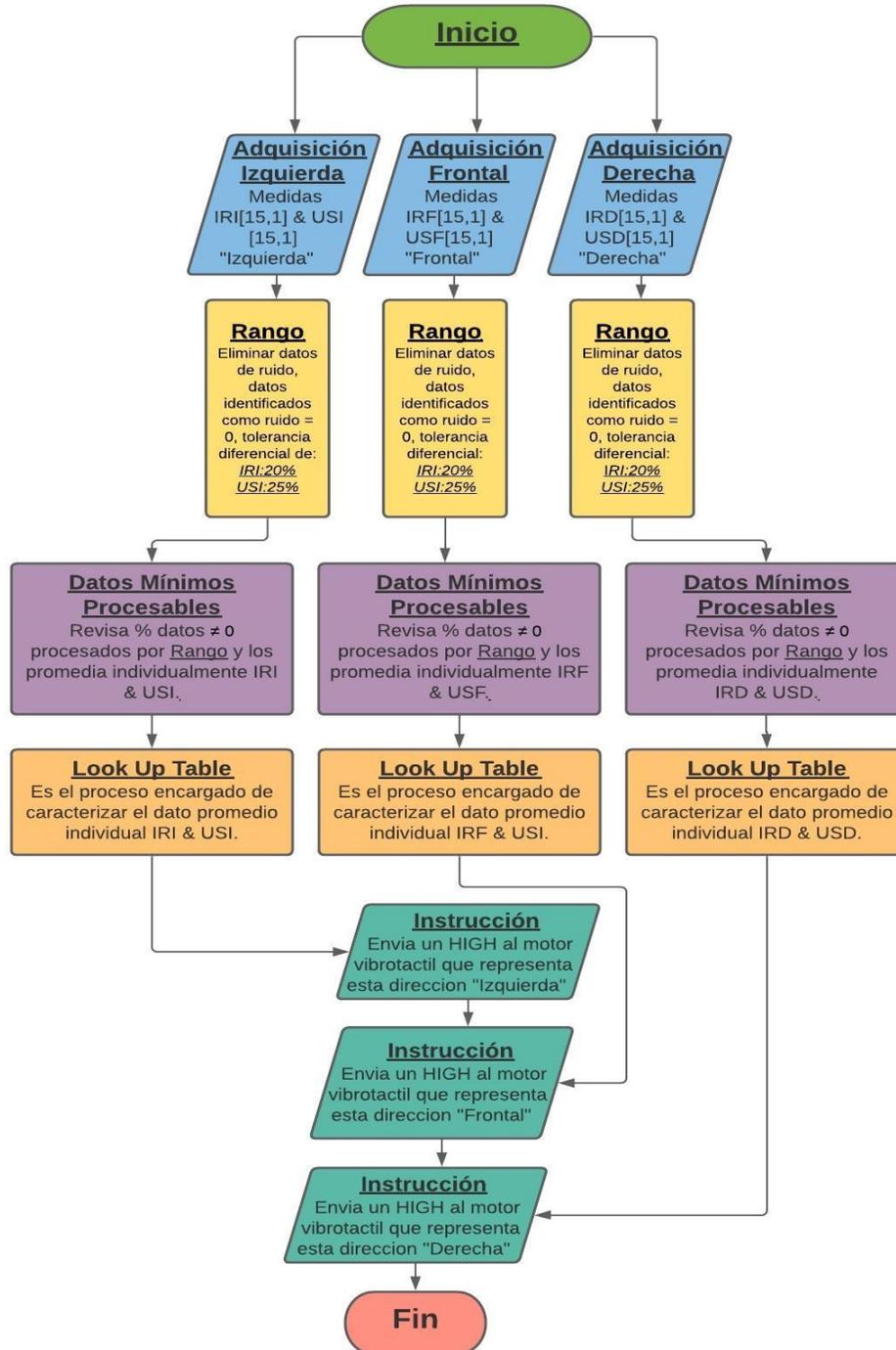
**Figura 3-3** Boceto de Brazalete Háptico.



**Fuente:** Autor.

### 3.1.4 Diseño de Software

Figura 3-4 Algoritmo de sistema háptico de detección de obstáculos para invidentes.



Fuente: Autor.

La **Figura 3-4** muestra el diagrama de flujo para este prototipo, el cual consiste en una serie de pasos para el filtrado y procesamiento selectivo de datos con el propósito de reducir el error de medición de los sensores a causa de los múltiples factores existentes en el ambiente tales como la temperatura, variaciones en la intensidad de lumen de luz, la humedad, etc. El algoritmo realizara diferentes procesos que influirán en la respuesta en tiempo real del prototipo los cuales son:

**Adquisición:** Es el proceso responsable de la toma de medidas de distancia realizadas por los sensores de proximidad, el proceso iniciara tomando y guardando las medidas, para posteriormente crear una matriz de 15 datos para cada uno de los sensores de proximidad instalados en el prototipo, los cuales son 6 en total; los sensores estarán ubicados en el ala frontal del sombrero, donde serán ubicados en pares (1 infrarrojo & 1 ultrasónico), y donde cada par de sensores estará instalado en las láminas de la estructura ubicadas en la zona frontal y de manera paralela a la copa del sombrero como se muestra en la **Figura 3-2**. Ya que los sensores de proximidad trabajaran en pares, los datos obtenidos también lo harán, y se procesaran por pares, y ya que los objetivos direccionales de los sensores difieren uno del otro en  $15^\circ$  con respecto al par ubicado en el centro, se nombrará a los pares según su ubicación visto desde un perfil superior (Izquierda, Frontal, Derecha).

Los datos serán medidos en el orden de los (mV) para los infrarrojos y en (ms) para los ultrasónicos; por lo tanto, no se realizará ninguna caracterización hasta este punto.

**Rango:** Este proceso del algoritmo tiene como objetivo descartar los datos medidos que puedan considerarse como ruido, para ello, se toma el grupo de medidas obtenido y se juntan en pares, estos pares están relacionados con su ubicación y dirección como se ilustra en la **Figura 3-2**; los 3 pares de datos serán procesados, pero será uno a la vez, por ello cada par procesara los datos de un vector infrarrojo (IRn) y uno ultrasónico (USn) que contendrán 15 datos cada uno como se observa en la (**Ecuación 3.1**), donde se realizara una comparación entre los mismos datos existentes en cada vector individual:

**Ecuación 3.1** Par de vectores

$$\text{Vector Infrarrojo } [IRn] = \begin{bmatrix} IR1 \\ IR2 \\ \vdots \\ IRn \end{bmatrix} \quad \text{Vector Ultrasonico } [USn] = \begin{bmatrix} US1 \\ US2 \\ \vdots \\ USn \end{bmatrix}$$

La comparación de cada uno de los datos con respecto al resto se realizará con un porcentaje de diferencia el cual se denomina “porcentaje de tolerancia”, este porcentaje de tolerancia será el valor con el cual se establecerán los rangos de cada uno de los datos los cuales tendrán el nombre de rango mayor (RMA) y rango menor (RME), en este caso se ha escogido una tolerancia del 20% para los sensores infrarrojos y de 25 % para los sensores ultrasónicos como se ilustra en la **Ecuación 3.2**, estos porcentajes de tolerancia son producto de diferentes pruebas de funcionamiento del proceso Rango con las medidas obtenidas de los sensores en tiempo real, estas pruebas revelaron que usar un porcentaje menor para cada sensor resultaría en la eliminación de la mayoría de los datos de cada vector en 7 de cada 10 casos, lo que dificultaría la capacidad de proporcionar una respuesta por parte del prototipo.

**Ecuación 3.2** Funcionamiento del sistema de comparación.

$$\text{Comparacion Infrarroja } [CI] = \begin{bmatrix} IR1 + (IR1 * 0.2) > [IRn] > IR1 - (IR1 * 0.2) \\ IR2 + (IR2 * 0.2) > [IRn] > IR2 - (IR2 * 0.2) \\ \vdots \\ IR15 + (IR15 * 0.2) > [IRn] > IR15 - (IR15 * 0.2) \\ \text{RMA} & \text{Vector} & \text{RME} \end{bmatrix}$$

$$\text{Comparacion Ultrasonica } [CU] = \begin{bmatrix} US1 + (US1 * 0.25) > [USn] > US1 - (US1 * 0.25) \\ US2 + (US2 * 0.25) > [USn] > US2 - (US2 * 0.25) \\ \vdots \\ US15 + (US15 * 0.25) > [USn] > US15 - (US15 * 0.25) \\ \text{RMA} & \text{Vector} & \text{RME} \end{bmatrix}$$

La comparación de los datos unos con otros se llevará a cabo dentro de un bucle For que se repetirá 15 veces para cada uno de los datos existentes en cada vector, y de forma paralela, se usara una variable que sumara +1 a su propio valor si la comparación arroja que el dato es menor o mayor a los límites establecidos en ese momento, el objetivo de esta parte del procedimiento es la de obtener un conjunto de medidas que tenga suficientes

valores que puedan ser procesados y que puedan dar una medida confiable, por ello si un dato del vector es diferente en 6 medidas de este mismo, será convertido a 0.

**Datos Mínimos Procesables:** En este paso el algoritmo revisara lo que fue procesado en el paso llamado Rango, y evaluara si hay suficientes datos que procesar, o si es necesario continuar con el proceso, pero con una alerta de objeto cerca; la decisión de continuar estará determinado por la condición  $\{(IRn + USn) \geq 18 \neq 0\}$ , esta dictamina que son necesarios mínimo 18 datos que sean diferentes de cero y que provengan de los vectores  $IRn$  y  $USn$ , de esta forma si un sensor tuvo mayor incertidumbre que el otro del mismo par, el proceso pueda continuar si entre ambos existen 18 datos que hayan pasado por la sección Rango; pero, en caso de que el sistema tenga menos de 18 datos pero más de 10 datos aceptables, el proceso, continuara, pero indicando a los siguientes procesos su estatus de alerta preventiva. Finalmente, el proceso promedia los datos diferentes de 0 si los hay de cada sensor de forma individual.

**Look Up Table:** Es el proceso encargado de caracterizar las medidas tomadas por los sensores, este proceso contara con 6 vectores previamente incorporados al código, producto de la calibración realizada por el autor

**Instrucción:** Este es el último paso del algoritmo, y tiene la tarea de establecer el tiempo de funcionamiento de los motores vibro táctiles, para ello se establecieron 3 tiempos fijos según sea la distancia a la que se encuentra el obstáculo del sensor, estos tiempos son 1,2 y 3 segundos; estos estarán controlados por el promedio de los datos post-procesados de los sensores, que está definida en la **Ecuación 3.3**.

### **Ecuación 3.3** Promedio de PAR

$$Promedio\ de\ PAR(n) = \frac{\overline{IRn} + \overline{USn}}{2}$$

El prototipo contara con 3 motores instalados en un brazalete de bíceps, cada motor será el representante de uno de los 3 pares de sensores del sombrero, además, cada uno será el encargado de informar que tan cerca está un obstáculo desde su punto de vista; el orden de activación de los motores será (Izquierda, Frontal, Derecha) visto desde arriba del sombrero en el brazalete, por lo tanto los motores no funcionaran todos al mismo tiempo,

sino por turnos; los tiempos antes mencionados se activaran de forma inversamente proporcional a la distancia, el algoritmo definirá el tiempo de funcionamiento según las siguientes condiciones:

- El motor  $n$  se encenderá por 3 segundos, si el valor de “Promedio PAR( $n$ )” obtenido está entre los 20cm a 33cm.
- El motor  $n$  se encenderá por 2 segundos, si el valor de “Promedio PAR( $n$ )” obtenido está entre los 33cm a 56cm.
- El motor  $n$  se encenderá por 1 segundos, si el valor de “Promedio PAR( $n$ )” obtenido está entre los 56cm a 79cm.

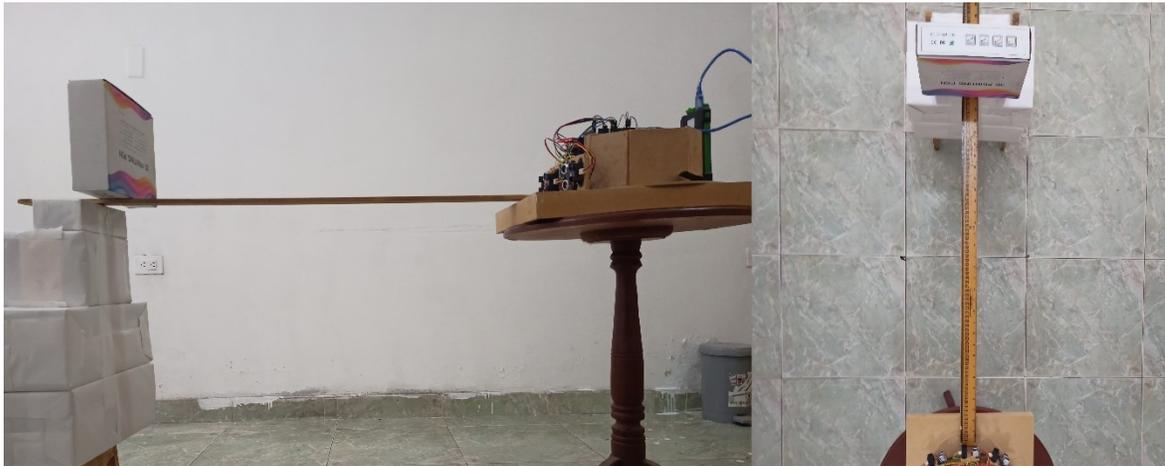
Operando de esta forma el autor espera una reacción más rápida por parte del usuario a los obstáculos

## 3.2 Calibración de Sensores

La calibración de los sensores es una parte importante del algoritmo, ya que esta investigación emplea sensores económicamente accesibles cuya precisión es baja, por lo tanto, es necesario mejorar su respuesta a través de técnicas de procesamiento de señales, análisis de datos y Machine Learning. Haciendo uso de las técnicas anteriormente mencionadas es posible obtener un modelo matemático de cada sensor que permite mejorar la interpretación de las señales de respuesta de estos; el procesamiento de los datos se realiza individualmente en la herramienta de software MATLAB y su app llamada Regresión Learner, realizando el procesamiento de los datos de forma individual es posible evaluar y determinar qué modelo es el mejor para cada sensor, ya que la app Regresión Learner tiene diferentes métodos para procesar los datos.

La recolección de patrones de entrenamiento se llevara a cabo cuando los sensores ya estén instalados en el sombrero, luego este es ubicado en el borde de la mesa con los sensores apuntando al vacío de la habitación como se muestra en la **Figura 3-5**, de esta forma los sensores no tendrán la ayuda de la superficie de la mesa para transmitir respectivamente sus señales ultrasónicas e infrarrojas, esto debido a que las superficies absorben y conducen las ondas; la toma de muestras se llevara a cabo en una habitación con luz natural no directa y con la mínima exposición al ruido habitual de las calles.

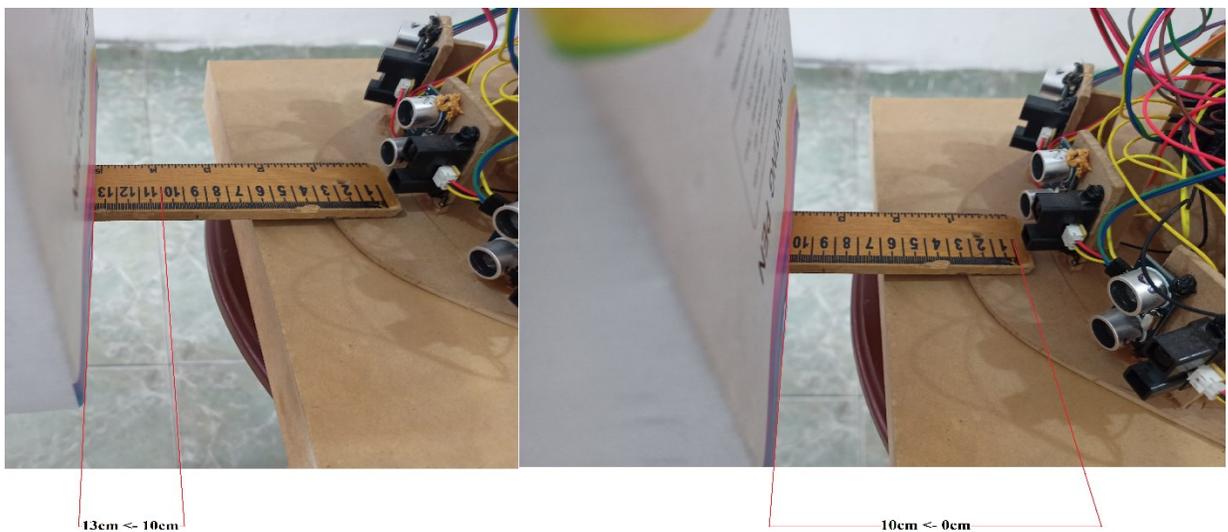
**Figura 3-5** Estructura construida para la calibración del sistema.



**Fuente:** Autor.

El rango establecido para la recolección de datos será desde los 10cm hasta los 79cm, con una diferencia de 3cm entre muestra y muestra. para asegurar la exactitud real entre cada uno de los datos medidos se usó una regla de 1m de longitud ubicada en el borde de la mesa como se muestra en la **Figura 3-5**, como obstáculo se usó una caja de (21.5cm x 16.5cm) que estará sobre la regla de madera y avanzará de 3cm en 3cm hasta alcanzar el objetivo de los 79cm (ver **Figura 3-6**).

**Figura 3-6** Procedimiento realizado para toma de patrones de entrenamiento.



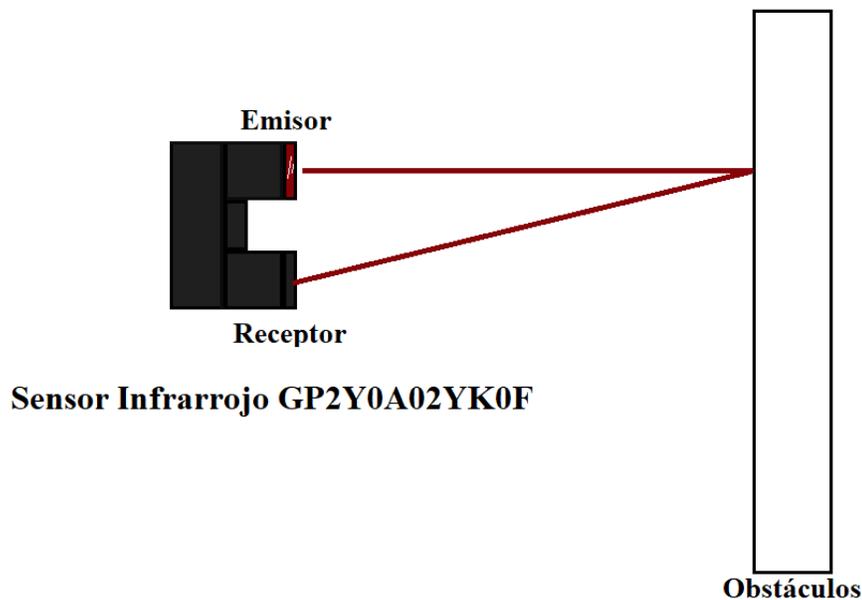
**Fuente:** Autor.

A continuación, se explicará el funcionamiento individual de cada sensor, y los resultados de los datos recolectados:

### 3.2.1 Sensor Infrarrojo

El sensor infrarrojo GP2Y0A02YK0F es un dispositivo opto electrónico capaz de determinar la proximidad de un obstáculo mediante la triangulación de radiación infrarroja, un fototransistor y la técnica Time of Flight; este último es el principio utilizado para medir la distancia entre el sensor y el obstáculo contando el tiempo que tarda la señal emitida en retornar al sensor como se muestra en la **Figura 3-7**. Este sensor reacciona ante la percepción de radiación infrarroja, ya que este sensor usa la diferencia de tiempo entre la emisión y retorno de la radiación para calcular la distancia, lo que también lo convierte en un sensor infrarrojo de categoría reflexiva, el proceso de triangulación ocurre entre el emisor, el obstáculo y el receptor respectivamente (Sharp, 2006).

**Figura 3-7** Comportamiento de un sensor Infrarrojo.



**Fuente:** Autor.

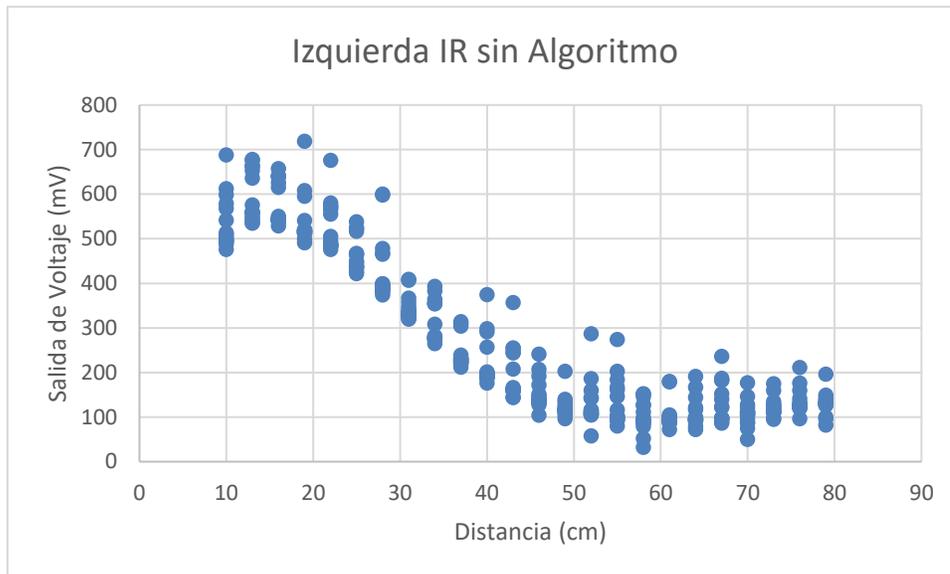
Este sensor es un dispositivo que cuenta con tres pines de conexión, dos de ellos son de alimentación Vcc y GND de izquierda a derecha respectivamente visto desde el frente; y por último el pin tres, encargado de la comunicación Vo (ver **Figura 3-8**).

**Figura 3-8** Pines Sensor Sharp GP2Y0A02YK0F.

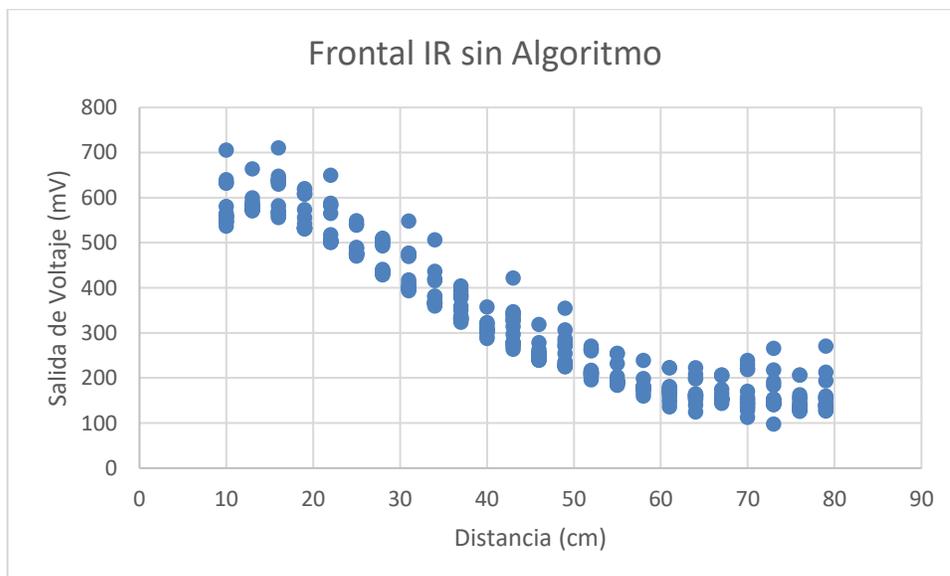


**Fuente:** smart-prototyping.com.

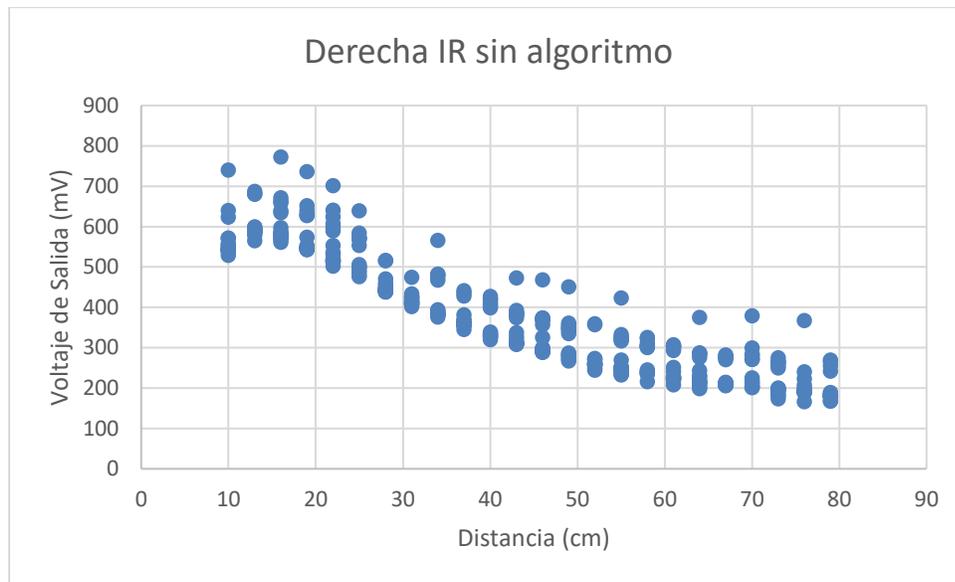
El pin de comunicación es el encargado de dar la respuesta del sensor, este mediante la variación del valor de voltaje producto de la distancia entre el sensor y el obstáculo, comunicara un voltaje que varía entre los 0V y 2.5V; debido a que la respuesta del pin de comunicación es de tipo analógica, se usaran los pines análogos de la placa Arduino para medir la respuesta en voltaje del sensor.

**Figura 3-9** Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor infrarrojo 1.

**Fuente:** Autor.

**Figura 3-10** Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor infrarrojo 2.

**Fuente:** Autor.

**Figura 3-11** Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor infrarrojo 3.

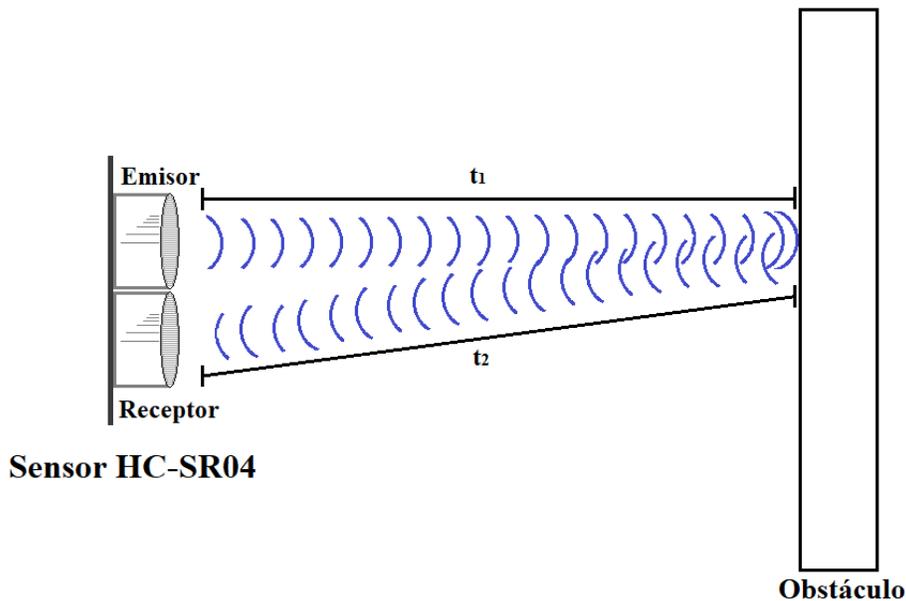
**Fuente:** Autor.

La toma de medidas de los sensores infrarrojos deja como resultado 3 grupos de datos representados en las gráficas de: la **Figura 3-9**, **Figura 3-10**, y la **Figura 3-11**; para la construcción de este grupo de datos se tomaron 15 muestras por cada medida en centímetros, un mayor número de muestras aumentaría el costo computacional del algoritmo, aumentando por consiguiente el tiempo de respuesta de este; con esta toma de muestras se obtuvo grupo total de 345 datos. Estas gráficas tienen en común la tendencia del sensor por dibujar una función descendente que se estabilice cerca de cero, y aunque su forma es distintiva y con esto se podría realizar una regresión polinómica que relacione adecuadamente los datos mediante el uso de MATLAB, es necesario resaltar la alta presencia de incertidumbre en el grupo de datos, por ello es necesario implementar una solución que permita el filtrado de los datos.

### 3.2.2 Sensor Ultrasónico.

Es un dispositivo diseñado para medir distancias sin contacto físico. Este dispositivo funciona mediante la emisión de ondas al aire con frecuencias mayores a 20Khz, las cuales son indetectables para el oído humano por ser de alta frecuencia; estas ondas chocan contra una superficie u obstáculo y luego retornan al sensor como se muestra en la **Figura 3-12**. Entre la emisión y retorno de estas ondas ultrasónicas existe un tiempo, con el cual es posible medir la distancia entre el sensor y el obstáculo, esto es posible debido a que se conoce la velocidad del sonido 344 m/s, la cual determinara la distancia según el tiempo que el sensor arroje; el sensor podrá medir siempre y cuando el obstáculo o superficie sean deflectores de sonido (Indoware, 2013).

**Figura 3-12** Comportamiento del sensor ultrasónico.

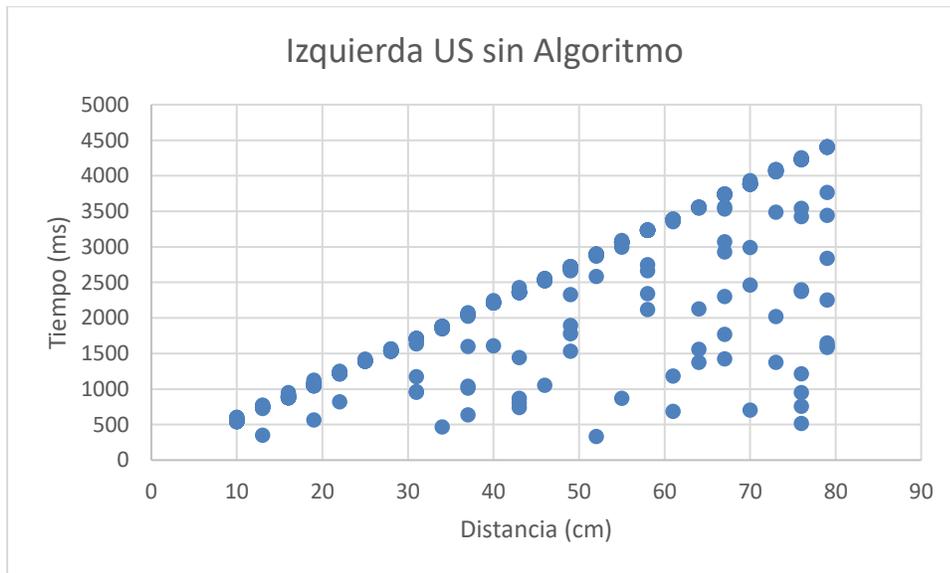


**Fuente:** Autor.

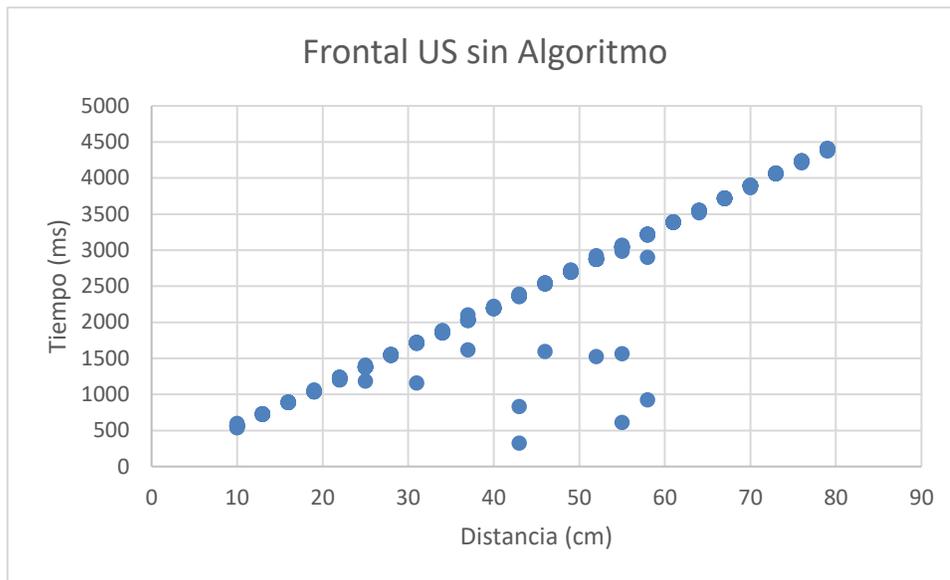
El sensor ultrasónico HC –SR04 es un dispositivo que cuenta con 4 pines, dos de ellos son para Vcc y GND, los otros dos reciben el nombre de Trigger y Echo; el pin de Trigger debe estar conectado a un pin PWM de la placa Arduino, ya que este debe recibir un pulso cuadrado de voltaje 10 microsegundos que inicializa el proceso de conteo del sensor para realizar mediciones. El pin Echo es el encargado de la respuesta del sensor ultrasónico

HC–SR04 a la distancia medida, este envía un pulso cuadrado que se mantendrá en alto una cierta cantidad de tiempo, este tiempo es proporcional a la distancia a la que se encuentre el obstáculo, por lo que entre más lejos este el obstáculo mayor será el tiempo en alto de la señal del pin Echo; para este pin el único requerimiento es que sea de tipo digital, de esta manera podrá contabilizar el tiempo en que la señal está en alto.

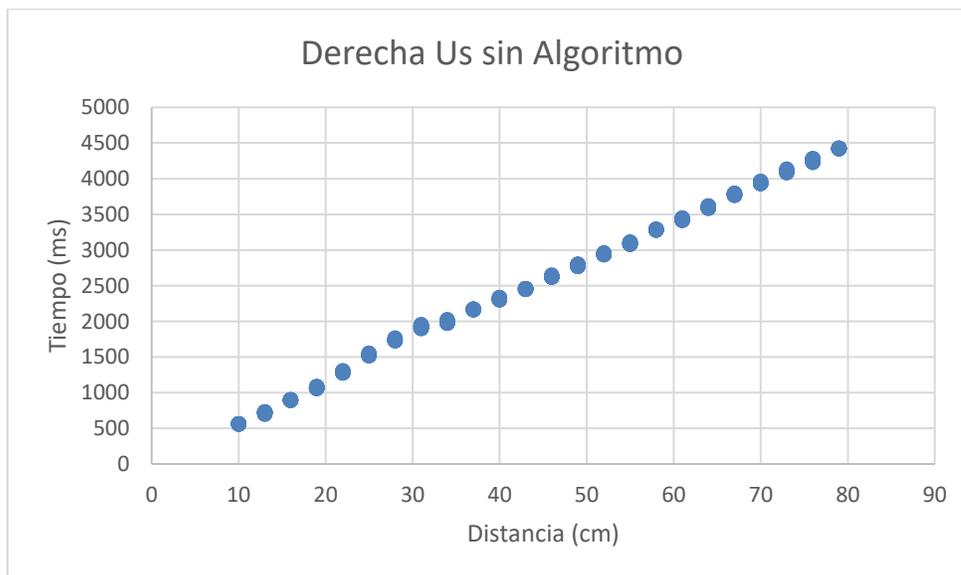
**Figura 3-13** Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor ultrasónico 1.



**Fuente:** Autor.

**Figura 3-14** Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor ultrasónico 2.

Fuente: Autor.

**Figura 3-15** Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor ultrasónico 3.

Fuente: Autor.

La toma de medidas de los sensores ultrasónicos deja como resultado 3 grupos de datos representados en las gráficas de: la **Figura 3-13**, **Figura 3-14**, **Figura 3-15**; al igual que la toma anterior de medidas, tomaron 15 muestras por cada medida en centímetros. Estas graficas tienen en común la tendencia del sensor por dibujar una recta de tipo ascendente, en este caso comparado con el grupo de medidas de los sensores infrarrojos es todavía más notable la presencia de ruido en los grupos de datos, debido a esto es necesaria la implementación del filtro de datos que permita realizar una regresión lineal con un menor índice de error usando MATLAB para la predicción adecuada de los datos.

### 3.2.3 Modelo predictivo usando MATLAB

La app de Regression Learner es una herramienta para el software MATLAB, que permite crear modelos predictivos ingresando una base de datos a esta, la app nos permite usar al mismo tiempo diferentes formas de procesamiento según sea el comportamiento y la tendencia de los datos que pueden necesitar una función que puede ser lineal, cuadrática, polinómica o gaussiana; esto sucede ya que algunas bases de datos poseen una tendencia lineal como los datos de los sensores ultrasónicos, y otros tienen un comportamiento más irregular como los datos del sensor infrarrojo. Para el procesamiento de los datos es necesario definir las entradas (predictors) y las salidas (response) de los datos.

**Tabla 3-1** Tabla sin algoritmo de sensores infrarrojos.

Sensor IR	Response	Predictors
Izquierda	32 - 719	10 - 79
Frontal	98 - 711	10 - 79
Derecha	166 - 772	10 - 79

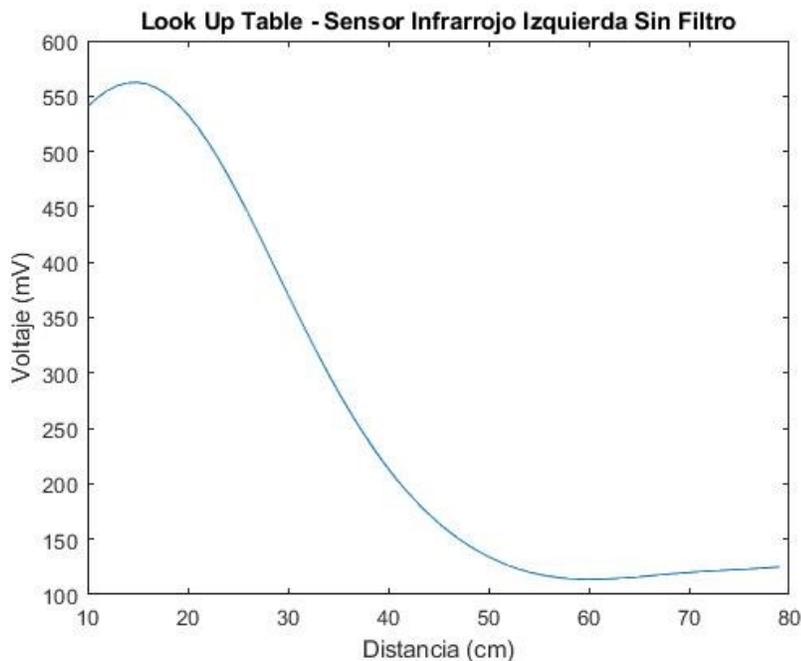
**Tabla 3-2** Tabla sin algoritmo de sensores ultrasónicos.

Sensor US	Response	Predictors
Izquierda	332 - 4404	10 - 79
Frontal	324 - 4407	10 - 79
Derecha	228 - 5669	10 - 79

La entrada (response) es el rango de los datos de respuesta del sensor, es importante recordar que los sensores tienen respuestas en variables y unidades diferentes, las cuales son de voltaje en (mV) para los infrarrojos y de tiempo en (ms) para los sensores ultrasónicos; la salida (predictors) es el rango en centímetros para ambos sensores, ya que el objetivo es predecir la distancia que miden estos. Los datos pueden ser visualizados en la **Tabla 3-1**, y la **Tabla 3-2**, los cuales al ser ingresados en la app Regression Learner producen una función de predicción de medidas, estando la función creada, es posible probarla ingresando datos para comprobar su respuesta, en este caso se ingresarán los datos de salida (predictors), al ingresar estos datos la función generará un vector de 69 datos para cada sensor en sus respectivas unidades de respuesta.

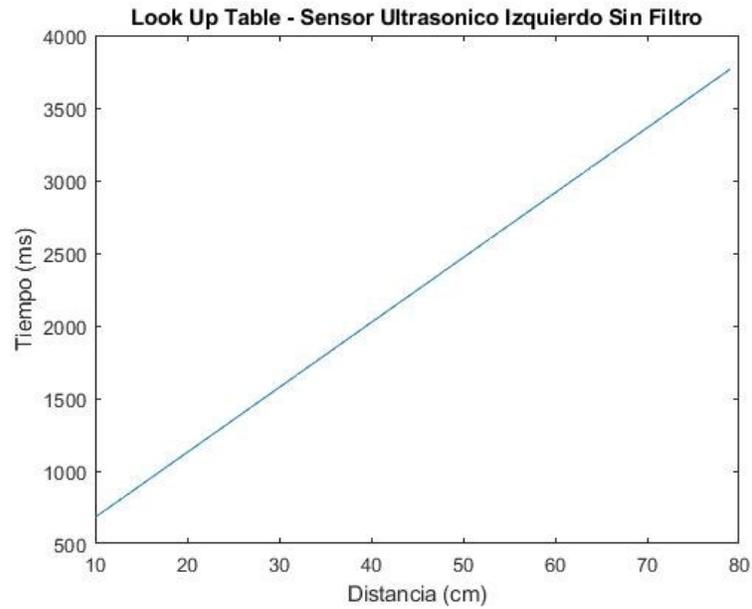
El vector de datos es un conjunto de números que relaciona la distancia en centímetros con las unidades de voltaje en infrarrojos y de tiempo para los ultrasónicos. creando un conjunto de números será posible caracterizar los datos en a la plataforma Arduino, y posteriormente obtener medidas que sean predichas en tiempo real en tiempo real.

**Figura 3-16** Look Up Table Sensor Infrarrojo Izquierdo Sin Filtro.



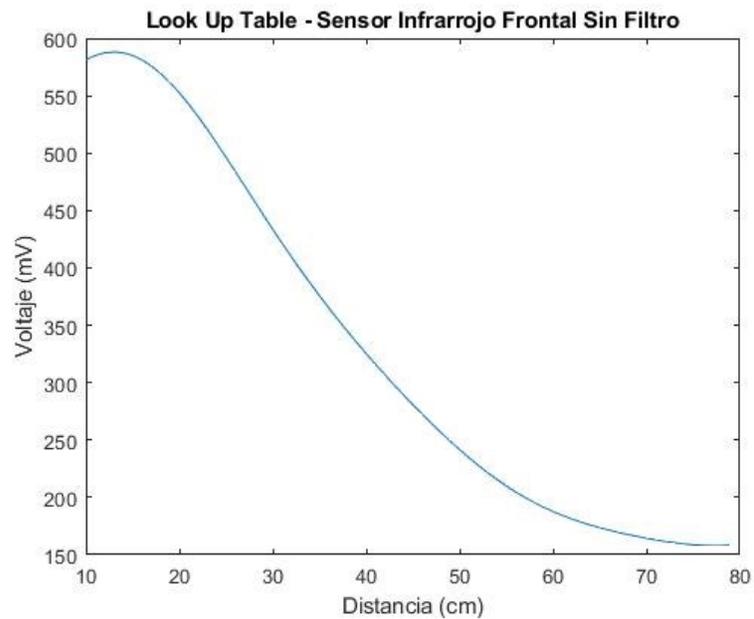
**Fuente:** Autor.

**Figura 3-17** Look Up Table Sensor Ultrasonico Izquierdo Sin Filtro.

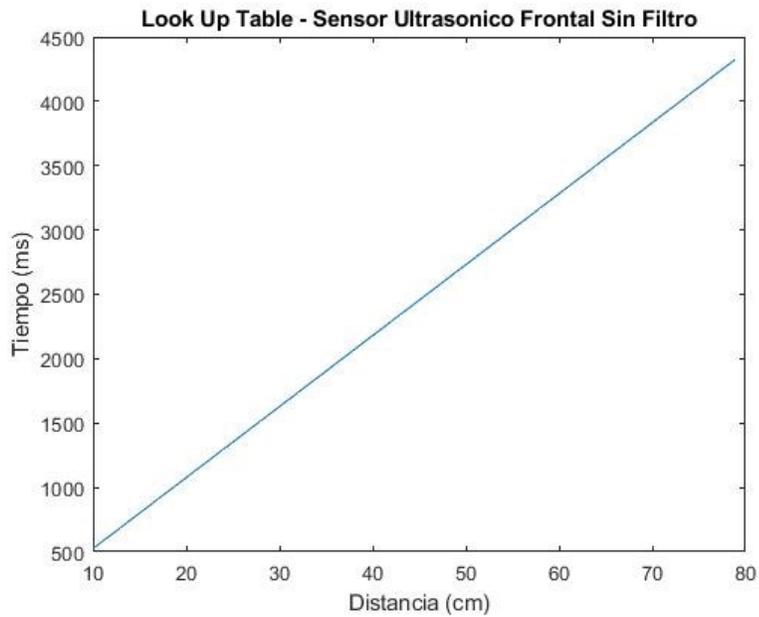


**Fuente:** Autor.

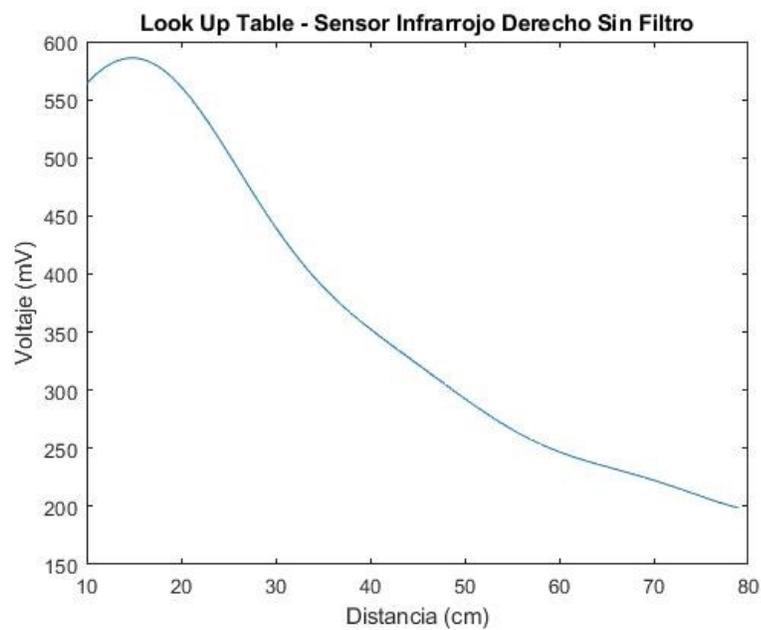
**Figura 3-18** Look Up Table Sensor Infrarrojo Frontal Sin Filtro.



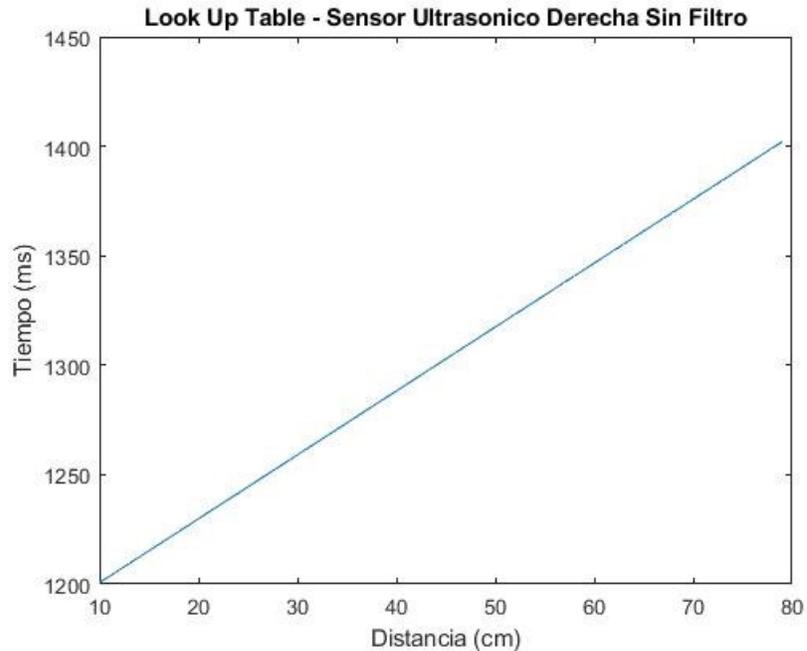
**Fuente:** Autor.

**Figura 3-19** Look Up Table Sensor Ultrasonico Frontal Sin Filtro.

**Fuente:** Autor.

**Figura 3-20** Look Up Table Sensor Infrarrojo Derecha Sin Filtro.

**Fuente:** Autor.

**Figura 3-21** Look Up Table Sensor Ultrasonico Derecha Sin Filtro.

**Fuente:** Autor.

Estos conjuntos de números son llamados Look Up Table, son producto de los modelos predictivos obtenidos de la app Regression Learner, a los cuales se introdujeron los datos de entrada que el investigador escoja, para todos los casos se introdujo un vector que iniciaba en 10 y terminaba en 79; ya que el objetivo era producir 1 vector para cada sensor que permitiera interpretar su respuesta en voltaje para infrarrojos y tiempo en ultrasónicos, como distancias en centímetros como se aprecia en las gráficas de la **Figura 3-16, Figura 3-17, Figura 3-18, Figura 3-19, Figura 3-20, Figura 3-21.**

El resultado paralelo para cada uno de los modelos predictivos usados anteriormente es el RMSE o ROOT-MEAN-SQUARE-ERROR, el cual es un dato entregado por la app que permite saber la distancia promedio entre los datos predichos y los datos reales, de esta forma podremos saber cuánto error puede haber por dato de predicción en unidades de la respuesta respectiva de cada sensor como se muestra en la **Tabla 3-3.**

**Tabla 3-3** RMSE obtenido por cada modelo predictivo.

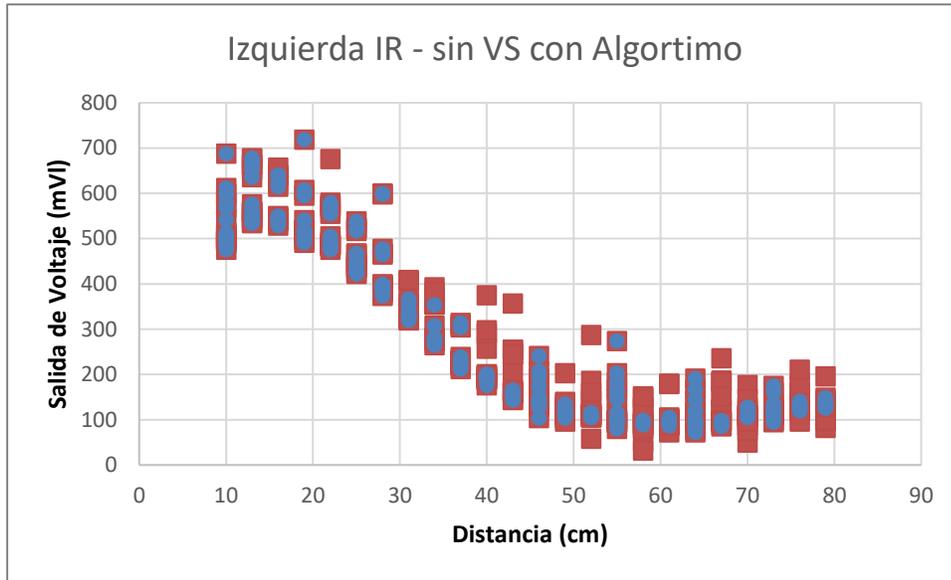
<b>Sensores</b>	<b>RMSE</b>
Infrarrojo Izquierda	46.89 (mV)
Ultrasónico Izquierda	629.11 (ms)
Infrarrojo Frontal	34.891 (mV)
Ultrasónico Frontal	259.75 (ms)
Infrarrojo Derecha	48.434 (mV)
Ultrasónico Derecha	460.04 (ms)

### 3.3 Calibración de los Sensores Usando el Algoritmo

Los sensores de proximidad instalados en la estructura en forma de sombrero han mostrado una alta presencia de ruido en la toma de medidas, ante este tipo de eventualidades la literatura académica opta por aplicar un análisis de datos estadísticos que permita predecir la respuesta del sensor a calibrar, pero, aun estando implementado un análisis estadístico, es evidente al momento de evaluar los sistemas que la interpretación de los datos medidos por parte de la plataforma programable o micro controlador sigue siendo limitada por la presencia de las medidas de incertidumbre, por ello es necesaria la implementación de un filtro de datos en tiempo real que descarte a aquellas medidas que este identifique como incertidumbre.

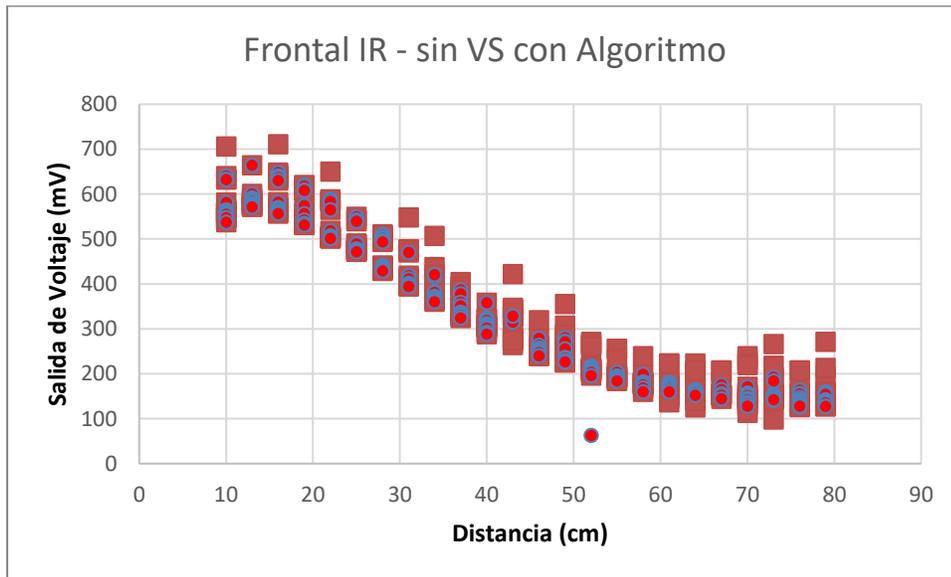
Esta investigación demostrara mediante el uso del software MATLAB y su app Regresión Learner, la conveniencia de implementar un algoritmo de filtrado que opere en tiempo real, en lugar de solo una base de datos pre procesada a la que posteriormente se le aplicara machine Learning, para ello, se aplicó el algoritmo de filtrado desde un principio en la plataforma Arduino con el objetivo de evaluar la respuesta del prototipo a la toma de medidas en forma paralela, y de esta forma comparar lo captado sin Algoritmo y con Algoritmo:

**Figura 3-22** Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor infrarrojo 1.



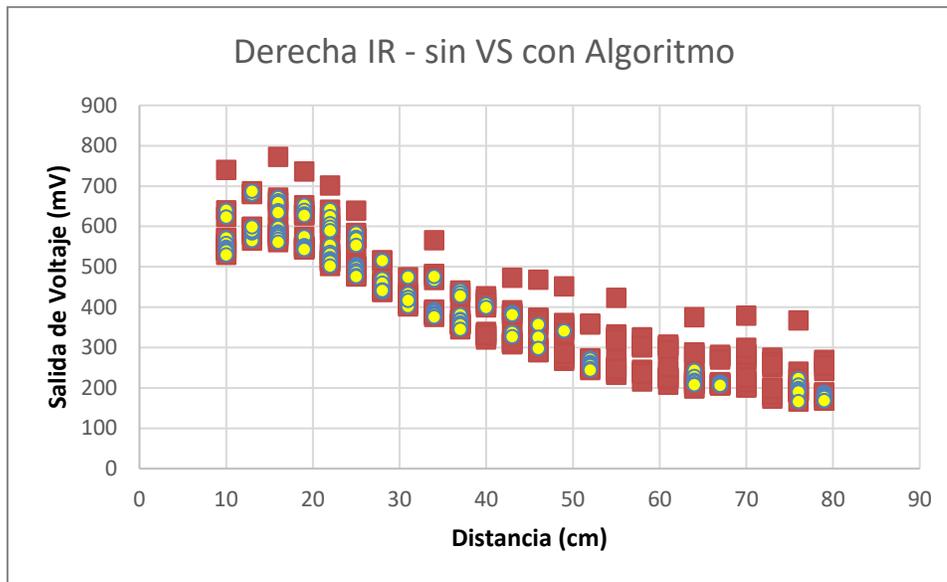
Fuente: Autor.

**Figura 3-23** Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor infrarrojo 2.



Fuente: Autor.

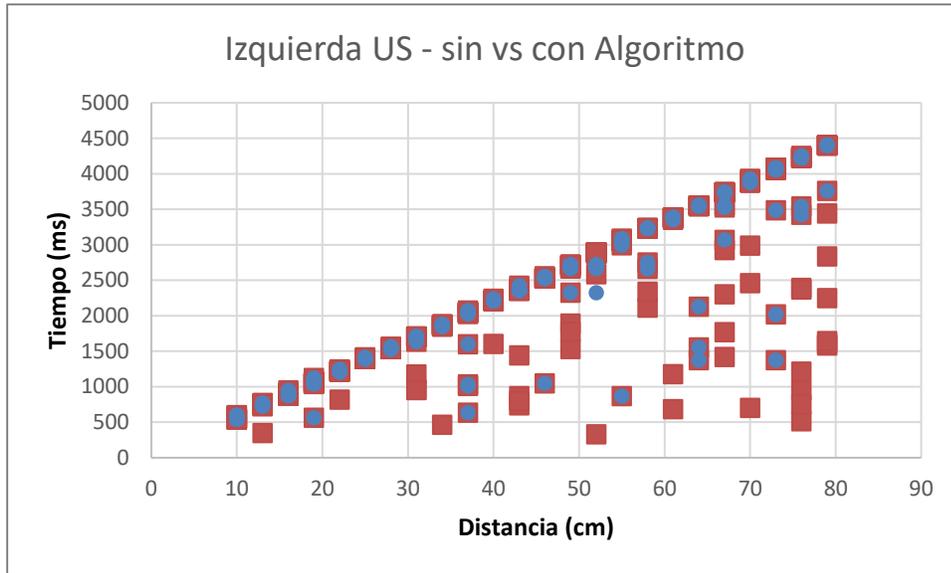
**Figura 3-24** Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor infrarrojo 3.



**Fuente:** Autor.

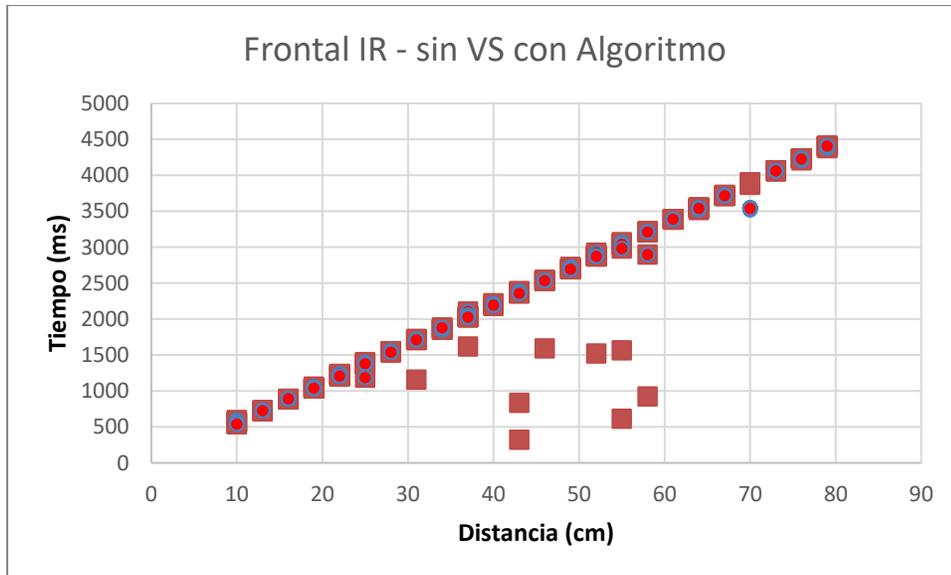
Las gráficas representadas en la **Figura 3-22**, **Figura 3-23**, **Figura 3-24**; muestran en azul los datos que son resultado del algoritmo y en rojo los que se tomaron sin nada, las gráficas ilustran como el filtrado en tiempo real elimino varias de las medidas realizadas que podrían catalogarse como ruido, esto se debe a que los datos no tenían una correlación con los otros valores de voltaje existentes en la misma medida en cm. para la realización del procesamiento de datos en tiempo real con el algoritmo fue necesario establecer el nivel porcentual de tolerancia en un 20% para los sensores infrarrojos, este porcentaje de tolerancia es producto de diferentes pruebas de funcionamiento del algoritmo, con las medidas obtenidas de los sensores en tiempo real, estas pruebas revelaron que usar un porcentaje menor para el sensor infrarrojo resultaría en la eliminación de la mayoría de los datos de cada vector en 7 de cada pruebas.

**Figura 3-25** Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor ultrasónico 1.

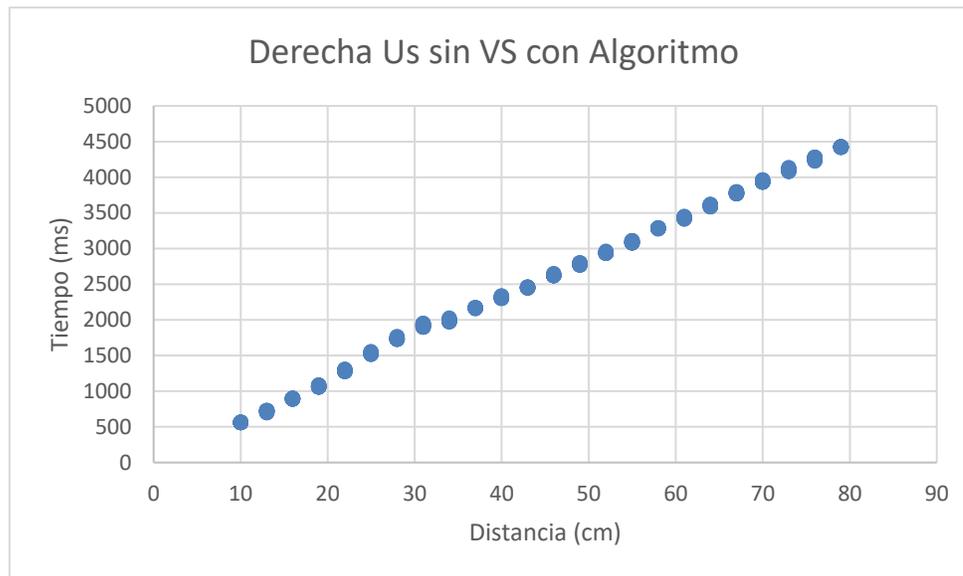


**Fuente:** Autor.

**Figura 3-26** Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor ultrasónico 2.



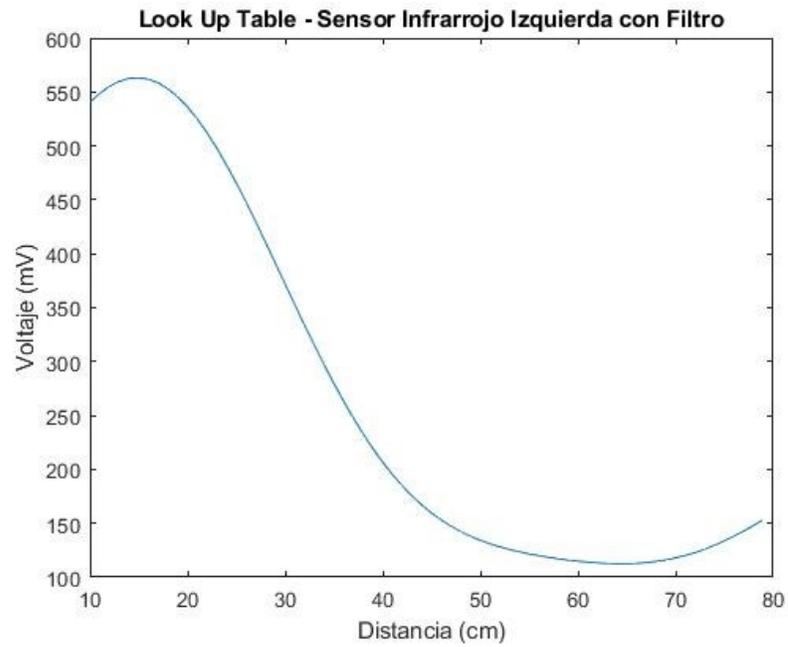
**Fuente:** Autor.

**Figura 3-27** Representación gráfica de los datos obtenidos del sensor ultrasónico 3.

**Fuente:** Autor.

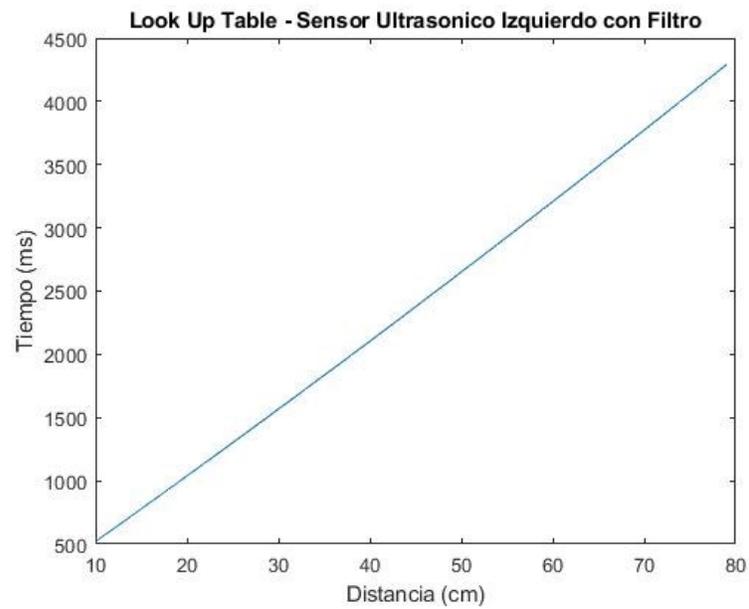
Las gráficas representadas en la **Figura 3-25**, **Figura 3-26**, **Figura 3-27**; representan de forma similar a la de los infrarrojos los datos con algoritmo en azul y en rojo los que no, los datos en el caso de los ultrasónicos contienen aún más valores de ruido, ya que las rectas con tendencia ascendente contienen medidas que podrían afectar la regresión lineal que se debe realizar para estos sensores. Al igual que los infrarrojos es necesario establecer un nivel porcentual de tolerancia, para estos 3 casos fue de 25% basado en el margen de respuesta del algoritmo en múltiples pruebas, el cual fue negativo en 8 de cada 10 pruebas con un porcentaje de tolerancia menor al mencionado.

**Figura 3-28** Look Up Table Sensor Infrarrojo Izquierdo con Filtro

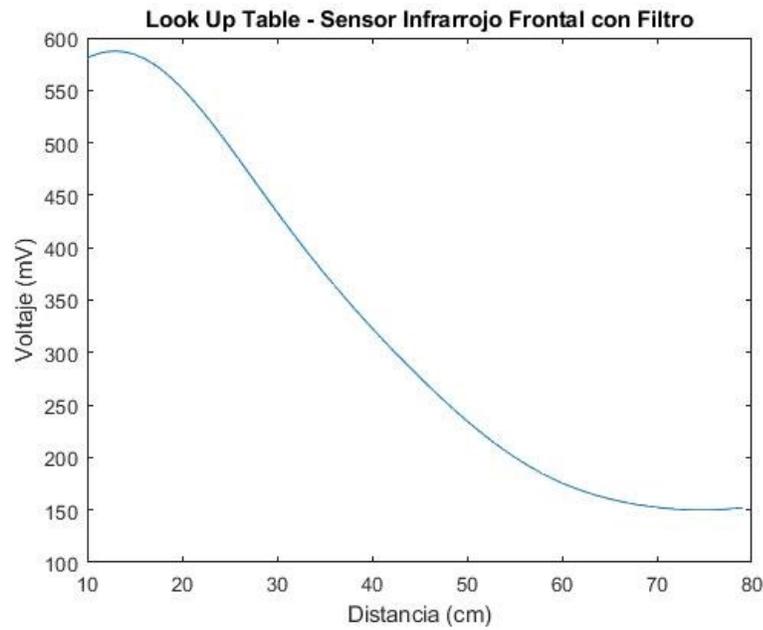


Fuente: Autor.

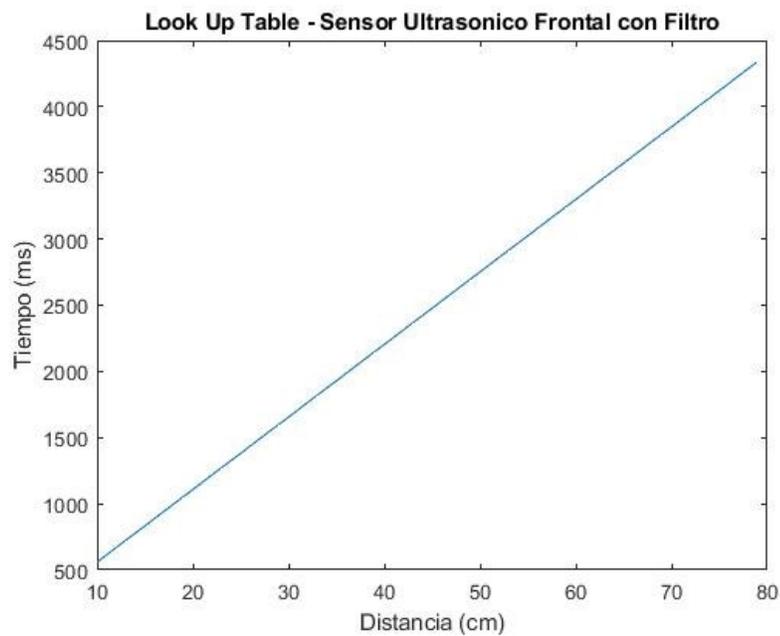
**Figura 3-29** Look Up Table Sensor Ultrasonico Izquierdo con Filtro



Fuente: Autor.

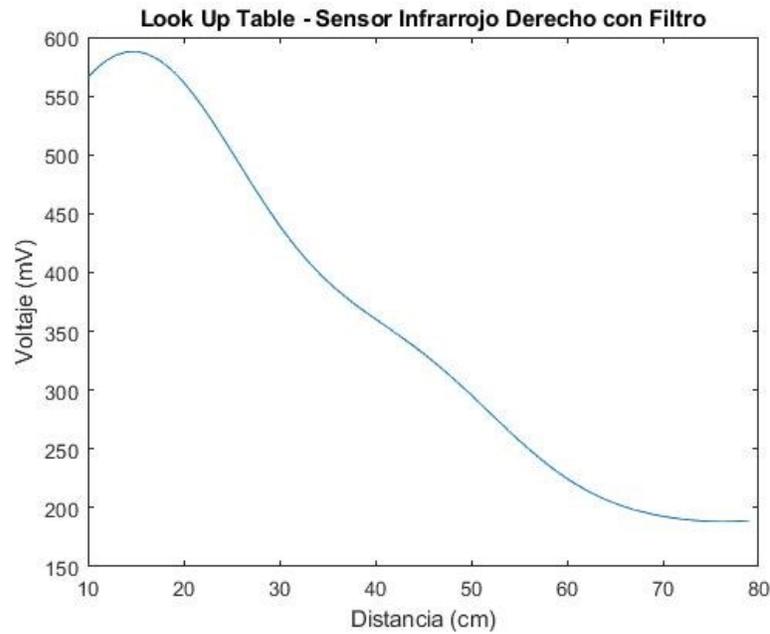
**Figura 3-30** Look Up Table Sensor Infrarrojo Frontal con Filtro.

**Fuente:** Autor.

**Figura 3-31** Look Up Table Sensor Ultrasonico Frontal con Filtro

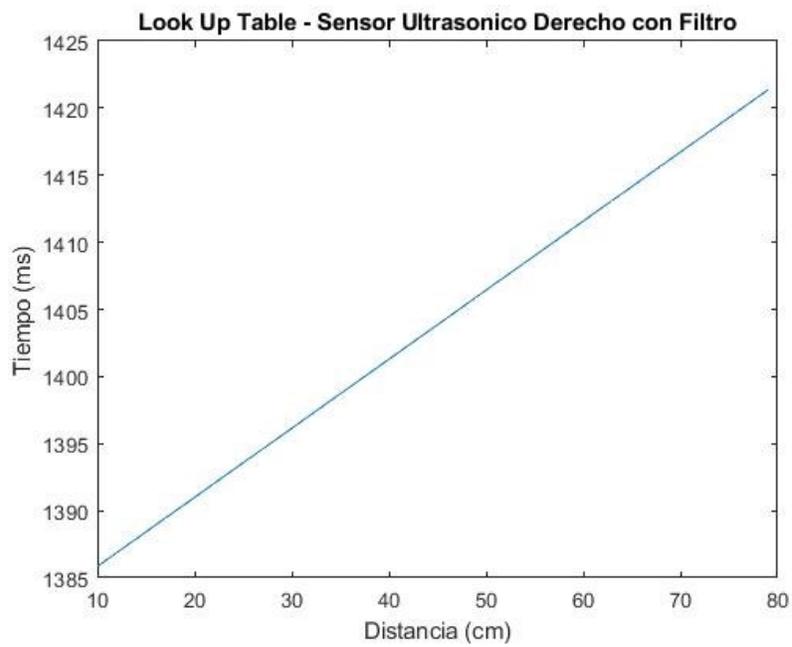
**Fuente:** Autor.

**Figura 3-32** Look Up Table Sensor Infrarrojo Derecho con Filtro



**Fuente:** Autor.

**Figura 3-33** Look Up Table Sensor Ultrasonico Derecho con Filtro



**Fuente:** Autor.

El objetivo principal de realizar un modelo de predictivo para los conjuntos de datos anteriores es el de comparar el RMSE sin algoritmo y con algoritmo, para de esta forma determinar en cuanto mejoro o empeoro la tasa de error según la base de datos ingresada en la app de MATLAB Regression Learner.

**Tabla 3-4** Comparativa de RMSE de los datos con filtrado y sin filtrado.

<b>Sensores</b>	RMSE sin Algoritmo (RMSEsa)	RMSE con Algoritmo (RMSEca)	Mejora de (RMSEca) respecto a (RMSEsa)
Infrarrojo Izquierda	46.89 (mV)	41.13 (mV)	12%
Ultrasónico Izquierda	629.11 (ms)	330.07 (ms)	47.53%
Infrarrojo Frontal	34.89 (mV)	25.96 (mV)	25.59%
Ultrasónico Frontal	259.75 (ms)	70.92 (ms)	72.69%
Infrarrojo Derecha	48.43 (mV)	33.83 (mV)	30.14%
Ultrasónico Derecha	253.04 (ms)	90.14 (ms)	64.37%

En la **Tabla 3-4**, es posible observar la disminución de la distancia entre el valor predicho y el valor real, esto es resultado del filtrado efectuado para eliminar las medidas catalogadas como incertidumbre. Dado que los modelos de predicción con menor error fueron los sometidos al algoritmo, fueron estos los que se usaron para obtener las Look Up Table apreciables en la **Figura 3-28**,

**Fuente:** Autor.

**Figura 3-29, Figura 3-30, Figura 3-31, Figura 3-32, Figura 3-33;** póstumamente de obtenerlas, es necesario introducir el algoritmo a la plataforma Arduino instalada en el prototipo, para que opere en tiempo real durante la toma de medidas.





## 4. Resultados

### 4.1 Pruebas de medición en condiciones ideales.

El prototipo será sometido a una toma de medidas siguiendo el mismo procedimiento usado en la calibración de los sensores, esto con el objetivo de observar el comportamiento de cada par de sensores en condiciones ideales, donde la distancia, y la estabilidad del obstáculo estarán controladas por el investigador,

**Tabla 4-1** Par de Sensores Izquierdo.

Medida Real (cm)	Medidas obtenidas		IR(cm)	US (cm)	Fusión de Medidas	% de Error
	IR(mV)	US (ms)				
16	559	856	16,8	20,4	18	12,50
19	544	1032	19,1	23,7	21	10,53
22	514	1208	21,8	27,1	24	9,09
25	444	1478	26,2	32,2	29	16,00
28	412	1628	27,9	35,1	31	10,71
31	391	1687	29	36,2	32	3,23
34	343	1844	31,5	39,2	35	2,94
37	311	2037	33,2	42,9	38	2,70
40	276	2189	35,2	45,8	40	0,00
43	255	2367	36,5	49,1	42	2,33
46	199	2697	40,6	55,4	48	4,35
49	204	2690	40,2	55,3	47	4,08
52	167	2868	43,9	58,7	51	1,92
55	-1	2972	60,7	60,7	61	10,91
58	-1	3189	64,8	64,8	64	10,34

61	-1	3365	68,2	68,2	68	11,48
64	115	3545	59,9	71,6	65	1,56
67	-1	3702	74,6	74,6	74	10,45
70	-1	3841	77,2	77,2	77	10,00
73	-1	4036	0	0	60	17,81
76	-1	4203	0	0	60	21,05
79	-1	4372	0	0	60	24,05
						<b>9,00</b>

Los resultados del par derecho de sensores representado en la **Tabla 4-1**, muestra los datos obtenidos en la sesión de medida; en la primera columna se encuentra el valor real en cm, en las 2 columnas siguientes se encuentran las medidas en voltaje y tiempo de cada sensor según su respectiva respuesta de salida, a su lado en las 2 columnas siguientes está el valor traducido en cm de los datos anteriores; finalmente en la penúltima columna se halla la fusión de medidas, que es resultado del promedio entre el valor traducido en cm de cada sensor. En la columna final se encuentra el error porcentual de cada medida captada, el cual fue calculado con la (**Ecuación 4.1**):

**Ecuación 4.1** Error Porcentual.

$$\text{Error Porcentual} = \frac{|Medida Real - Fusión de Medidas|}{Medida Real} * (100\%)$$

En las tablas siguientes se podrán encontrar datos poco concluyentes debido a los protocolos manejados por el algoritmo entre los que se encuentran:

- (-1) en la columna IR(MV), esto ocurre cuando uno de los sensores no posee suficientes datos que permitan al interpretar una medida fiable, por ello todos los datos que no apliquen a los estándares del algoritmo serán aproximados a 0; la consecuencia de este método de filtrado es que habrán ocasiones en donde ninguno de los datos son aceptables y todo el grupo será compuesto por ceros, pero, el proceso de igual forma podrá continuar si uno de los sensores no posee suficientes datos, pero su compañero si, serán tomados en cuenta solo los datos de aquel sensor que tenga datos relevantes, esto ocurre en **Tabla 4-1**, en la fila 14, donde

el sensor infrarrojo no tenía suficientes datos, y su medida fue igualada a la del sensor ultrasónico en (60,7 cm).

- (0) en las columnas IR(cm) y US(cm), esto ocurre si los sensores no recolectaron mínimo 18 datos entre ambos que pudiesen ser procesados por el algoritmo, este tipo de valores pueden crear desinformación para el usuario del prototipo si existen medidas que tengan relación entre sí, pero que no cumplieron con la condición establecida de mínimo 18 datos, lo que puede resultar en accidentes de choque; una alternativa del algoritmo ante este tipo de eventualidades es la de enviar una alerta preventiva que estará sustentada en la existencia de un mínimo de 10 datos aceptables para el algoritmo en lugar de los 18 estándares, esto es apreciable en las filas 19, 20, y 21 de la **Tabla 4-1**, donde las medidas en cm tienen como valor 0, pero la fusión de medidas es igual a 60; se le da un valor de 60 debido a que los motores vibratorios tienen un tiempo de operación inversamente proporcional a la distancia, en donde estos funcionarían por 1 segundo indicando la presencia de un obstáculo a un rango entre los 56 y los 79 cm.

**Tabla 4-2** Par de Sensores Frontal

Medida Real (cm)	Medidas obtenidas		IR(cm)	US (cm)	Fusión de Medidas	% de Error
	IR(mV)	US (ms)				
16	589	888	13,8	21	17	6,25
19	574	1037	17,1	23,7	22	15,79
22	555	1216	19,6	26,9	25	13,64
25	488	1388	25,6	30,1	27	8,00
28	443	1552	29,2	33,1	31	10,71
31	443	1709	29,2	35,9	32	3,23
34	405	1871	32,3	38,9	35	2,94
37	370	2039	35,4	42	38	2,70
40	358	2211	36,5	45,1	40	0,00
43	333	2373	39	48,1	43	0,00
46	331	2491	39,2	50,2	44	4,35
49	305	2675	41,9	53,6	47	4,08
52	304	2880	42	57,3	49	5,77
55	284	3045	44,1	60,3	52	5,45

58	278	3217	44,8	63,5	54	6,90
61	284	3388	44,1	66,6	55	9,84
64	258	3528	47,1	69,1	58	9,38
67	243	3727	48,9	72,8	60	10,45
70	237	3898	49,7	75,9	62	11,43
73	227	4047	51	78,6	64	12,33
76	217	4213	52,4	78,8	65	14,47
79	214	4276	52,8	79,2	66	16,46
						<b>7,92</b>

**Tabla 4-3** Par de Sensores Derecho.

Medida Real (cm)	Medidas obtenidas		IR(cm)	US (cm)	Fusión de Medidas	% de Error
	IR(mV)	US (ms)				
16	606	1009	21,8	21,8	21	31,25
19	567	1224	19,3	25,6	22	15,79
22	537	1435	22,2	29,5	25	13,64
25	502	1628	25	33	29	16,00
28	485	1787	26,3	35,8	31	10,71
31	426	1889	31,2	37,7	34	9,68
34	397	2037	34,4	40,4	37	8,82
37	372	2160	38	42,6	40	8,11
40	340	2309	43,5	45,3	44	10,00
43	326	2484	45,8	48,5	47	9,30
46	288	2699	51	52,4	51	10,87
49	281	2853	51,9	55,1	53	8,16
52	280	2913	52	56,2	54	3,85
55	253	3150	55,5	60,5	58	5,45
58	236	3308	58	63,4	60	3,45
61	235	3483	58,2	66,6	62	1,64
64	218	3640	61,3	69,4	65	1,56
67	218	3804	61,3	72,4	66	1,49
70	197	3974	67,6	75,4	71	1,43
73	187	4148	79,1	78,6	78	6,85
76	193	4336	69,8	69,8	69	9,21
79	188	4440	79	79	79	0,00
						<b>8,51</b>

Los procedimientos preventivos mencionados para la **Tabla 4-1** no son evidentes en las sesiones de los otros dos pares representados en la **Tabla 4-2** y **Tabla 4-3**, donde el filtrado y aproximación realizado por el algoritmo mostro una mayor eficiencia; el resultado de cada sesión es medido por la media del porcentaje de error que no supero en ninguno de los 3 pares el 10%, aun teniendo los 3 pares ciertas dificultades al medir distancias superiores a los 67cm

## 4.2 Pruebas de campo

Las pruebas de campo tienen como objetivo evaluar el comportamiento del prototipo en un entorno abierto, y siendo usado por el usuario final en su cabeza “autor”, las pruebas se realizaron en un espacio donde predomina el color blanco, en un área de 5x3 metros, para estas pruebas se hará uso de una regla de madera con 1m de longitud que simulará la función del bastón blanco, el usuario detectará los obstáculos al nivel del suelo con ella mediante contacto físico como en la **Figura 4-1**.

**Figura 4-1** Perfiles del usuario con el prototipo y regla.

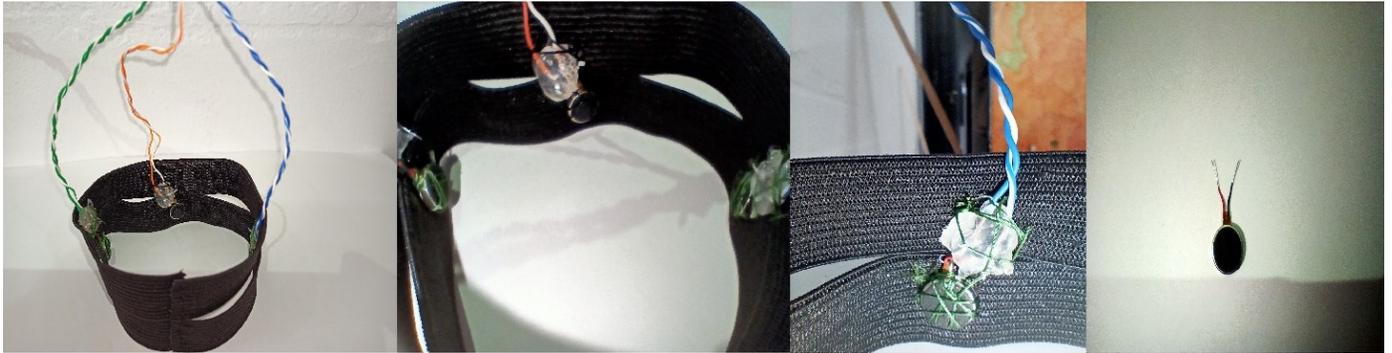


**Fuente:** Autor.

La **Figura 4-1** muestra en los diferentes elementos que usara el autor para que la simulación de ceguera sea fiable, el primero de ellos es el uso de una máscara de papel y la regla usada como bastón; el segundo elemento es el prototipo que informara sus

respuestas mediante el brazalete háptico ubicado en el bíceps del brazo derecho, el cual incorpora 3 motores vibrotáctiles en su interior como se observa en la **Figura 4-2**.

**Figura 4-2** Brazalete Háptico y sus Componentes



**Fuente:** Autor.

La pista de pruebas contara con un pilar hecho de cajas de 1,79 metros de alto, que tendrá láminas de cartón para fabricación de modelos de 70x5 cm incorporados como banderas en sus laterales ver (**Figura 4-3**), esto con el objetivo de que el usuario no pueda detectar el obstáculo usando el bastón.

**Figura 4-3** Pilar con láminas suspendidas.



**Fuente:** Autor.

Para la realización de estas pruebas el prototipo fue adaptado para que el usuario interpretara ciertas señales vibrotáctiles las cuales son:

- El dispositivo activará por 1 segundo los motores vibrotáctiles al mismo tiempo, indicándole al usuario que permanezca en estático, ya que el prototipo estará tomando medidas.
- Los motores vibrotáctiles al momento de informar al usuario sobre la presencia o ausencia de un obstáculo, activara uno por uno los motores vibrotáctiles, el orden de activación respecto a de donde viene la medida es 1 izquierda, 2 frontal, 3 derecha.
- Finalmente, luego de que ya se ha terminado el respectivo proceso del algoritmo, es momento de indicar la finalización del procedimiento activando nuevamente por 1 segundo los 3 motores vibrotáctiles.

Para la realización de las pruebas siempre se ha tenido en cuenta el bastón blanco como complemento del usuario para la detección de obstáculos, en este caso primero se

detectará el objeto usando el prototipo, posterior a esta detección se realizará una confirmación por parte del usuario realizando un contacto con el mango del bastón, y de esta forma asegurar la presencia del obstáculo, y también determinar la posible vía alterna para continuar con el trayecto.

### 4.2.1 Prueba 1.

La prueba 1 tiene como objetivo evaluar el comportamiento del prototipo ante la existencia de un obstáculo que puede ser percibido solo por el par izquierdo y el par frontal, dejando al par derecho al vacío, dándole al usuario una vía para evadir el obstáculo como se ilustra en la **Figura 4-4**.

**Figura 4-4** Trayecto prueba 1.



**Fuente:** Autor.

**Tabla 4-4** Medidas recolectadas prueba 1.

	Izquierda		Datos Mínimos Procesables	Frontal		Datos Mínimos Procesables	Derecha		Datos Mínimos Procesables
	IR(cm)	US (cm)		IR(cm)	US (cm)		IR(cm)	US (cm)	
	0	0	0	-1	17398	12	0	0	0
	38,2	67,2	18	50,5	63,2	29	-1	0	13
	0	0	0	61,5	61,5	9	30,9	30,9	27
Fusión de Datos	0		Fusión de Datos	0		Fusión de Datos	0		
	52			56			0		
	0			61			30		

La prueba recolecto datos en 3 ocasiones (ver **Tabla 4-4**), es posible identificar cada ocasión observando las filas, para este trayecto la detección se realizó de forma correcta con tan solo una excepción, en la 3 fila, donde el sensor frontal debía detectar una distancia considerable, pero interpreto la presencia de un obstáculo que estaba “lejos” para el prototipo, en total se realizaron 3 sesiones de medida con, con 9 interpretaciones, de las cuales 1 de ellas fue errónea.

### 4.2.2 Prueba 2.

La prueba 2 evalúa el comportamiento del prototipo ante la existencia de un obstáculo que puede ser percibido solo por el par derecho y el par frontal, dejando al par izquierdo al vacío (ver **Figura 4-5**), esto en complemento de la prueba uno, pero cambiando las condiciones de los sensores izquierdo y derecho.

**Figura 4-5** Trayecto prueba 2.



**Fuente:** Autor.

**Tabla 4-5** Medidas recolectadas prueba 2.

	Izquierda		Datos Mínimos Procesables	Frontal		Datos Mínimos Procesables	Derecha		Datos Mínimos Procesables
	IR(cm)	US (cm)		IR(cm)	US (cm)		IR(cm)	US (cm)	
	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	71,1	71,1	13	50,8	65,9	29	61,7	68,2	29
	23,1	23,1	15	0	0	11	0	0	0
<b>Fusión de Datos</b>	0		<b>Fusión de Datos</b>	0		<b>Fusión de Datos</b>	0		
	71			58			64		
	23			0			0		

La prueba 2 recolecto datos nuevamente en 3 ocasiones (ver **Tabla 4-5**), para este trayecto la detección se realizó de forma correcta con tan solo una excepción, en la 3 fila, donde el par de sensores izquierdo debía detectar una distancia considerable, pero interpreto la presencia de un obstáculo que estaba “lejos” para el prototipo, en total fueron necesarias 3 ocasiones de medida con, con 9 interpretaciones, de las cuales 1 de ellas fue errónea.

### 4.2.3 Prueba 3.

La prueba 3 tiene como objetivo realizar las 2 pruebas anteriores en un solo trayecto sin pausas alrededor de la habitación, pero, cambiando las condiciones de detección, esto se logró proporcionando un obstáculo ubicado de forma diagonal a los sensores (ver **Figura 4-6**), para de esta forma probar de manera más rigurosa el funcionamiento del prototipo ante obstáculos que no están ubicados paralelamente a las respectivas perspectivas de los sensores.

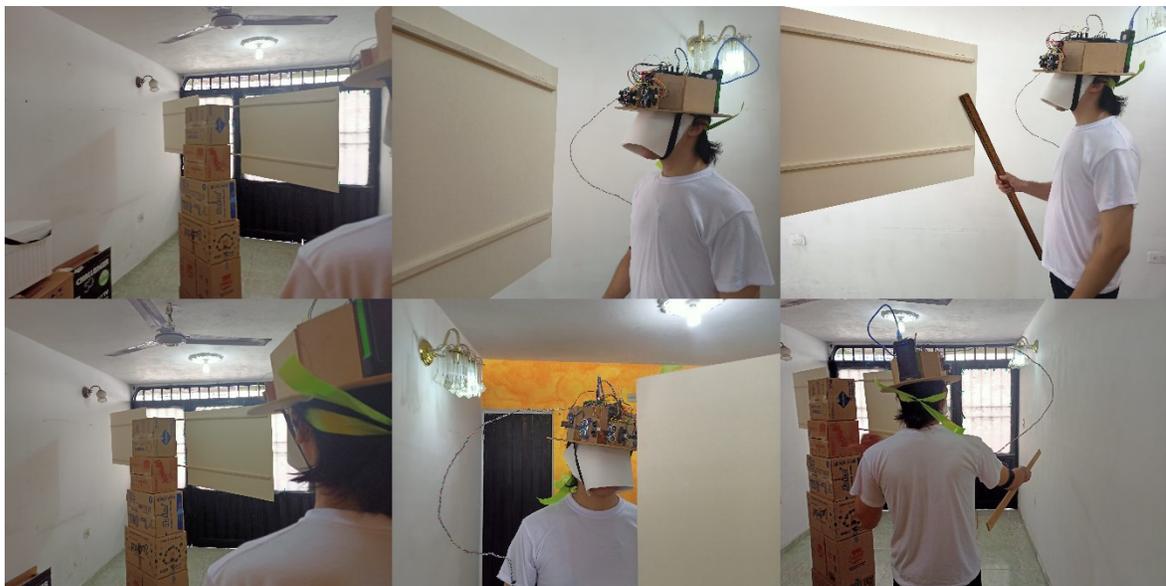
**Figura 4-6** Pilar ubicado con perspectiva diagonal.



**Fuente:** Autor.

La prueba comienza caminado directamente hacia el obstáculo, permitiendo que solo los sensores izquierdo y derecho puedan percibir el obstáculo como se muestra en la **Figura 4-7**.

**Figura 4-7** Prueba 3, primera parte del trayecto.



**Fuente:** Autor.

Esta parte de la prueba representada en la **Figura 4-8**, muestra la llegada del investigador al fondo de la habitación, y se muestra como el prototipo detecta los obstáculos, pero ya no es tan relevante debido a la presencia de un elemento similar al bastón blanco que puede indicar la presencia de obstáculos al nivel del suelo

**Figura 4-8** Prueba 3, trayecto en el fondo de la habitación.



**Fuente:** Autor.

El tramo final del trayecto nuevamente presenta un obstáculo suspendido en el aire que el bastón no puede detectar, por lo tanto, el prototipo es el encargado en esta ocasión de indicar al usuario la presencia de obstáculos sin el bastón, utilizando este último como solo al momento de confirmar mediante contacto la existencia de un obstáculo, como está planteado en las pautas de operación planteadas inicialmente (ver **Figura 4-9**).

**Figura 4-9** Prueba 3, trayecto de retorno.



**Fuente:** Autor.

**Tabla 4-6** Medidas recolectadas prueba 3.

	Izquierda			Frontal			Derecha		
	IR(cm)	US (cm)	Datos Mínimos Procesables	IR(cm)	US (cm)	Datos Mínimos Procesables	IR(cm)	US (cm)	Datos Mínimos Procesables
	0	0	0	0	0	0	0	0	10
	25	33,1	29	36,9	36,9	29	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	41,8	41,8	26
	39	64,3	26	62,8	61,2	22	43,9	63,9	29
	62,3	62,3	12	56,4	54,9	16	73,7	55,6	16
	0	0	0	0	0	0	26	26	25
Fusión de Datos	0		Fusión de Datos	0		Fusión de Datos	0		
	29			37			0		
	0			0			41		
	51			62			53		
	62			55			64		
	0		0			26			

La prueba 3 recolecto datos en 6 ocasiones (ver **Tabla 4-6**), que representan 18 interpretaciones por parte de los pares de sensores, de las cuales erraron 1 en la fila del sensor derecho, el cual debía medir una distancia considerable y no emitir ningún tipo de respuesta con los motores vibrotáctiles, pero si envió una señal.



## **5. Conclusiones y recomendaciones**

### **5.1 Conclusiones**

- El prototipo desarrollado es capaz de identificar obstáculos en tres diferentes perspectivas, usando el algoritmo de filtrado de datos con énfasis en la eliminación de incertidumbre, además de la incorporación de un sistema de caracterización de medidas usando vectores obtenidos de modelos de predicción usando MATLAB.
- El algoritmo tiene la capacidad procesar una amplia gama de datos provenientes de los sensores de forma eficiente, que permiten una interpretación más fiable de un mismo objetivo de medición de obstáculos.
- El uso de motores vibrotáctiles resulta conveniente para el usuario, ya que sus ubicaciones en diferentes polos del brazalete permiten interpretar el origen físico de la medida, con una respuesta rápida y sencilla.
- Se determinó que el uso de madera MDF de 3mm de espesor como material de construcción para la estructura del prototipo resulta apropiado, debido a su resistencia, y peso ligero.

### **5.2 Recomendaciones**

- Para trabajos futuros se recomienda el uso de una plataforma programable o microcomputadora que reduzca el tiempo de respuesta del prototipo aún más, además, usar sensores con una menor presencia de ruido en su respuesta, que permita adquirir valores más fiables.

## A. Anexo: Peso exacto en Kg del prototipo.



Fuente: Autor.

## Bibliografía

Apple Inc. (2020). *iPhone*. Apple Inc.

<https://www.apple.com/co/accessibility/iphone/vision/>

Arduino Store. (2020). *ARDUINO MEGA 2560 REV3*. Arduino.

<http://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>

Bauer, C. M., Hirsch, G. V., & Zajack, L. (2017, March). Multimodal MR-imaging reveals large-scale structural and functional connectivity changes in profound early blindness. *US National Library of Medicine*, 1.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5362049/>

BBVA. (2018). *Las personas ciegas ya pueden operar en los más de 6.300 cajeros de BBVA a través de una “app.”* <https://www.bbva.com/es/personas-ciegas-ya-pueden-operar-mas-6-300-cajeros-bbva-traves-app/>

Caracol Radio Servicio Informativo. (2019). Avanza la implementación del sistema Braille en Colombia. *Caracol Radio*, 1.

[https://caracol.com.co/radio/2019/08/13/nacional/1565724060\\_219546.html](https://caracol.com.co/radio/2019/08/13/nacional/1565724060_219546.html)

Choi, S., & Kuchenbecker, K. J. (2012). *Vibrotactile Display: Perception, Technology, and Applications* (No. 0018–9219; 9).

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6353870>

Ciegos, I. N. para. (2018). El INCI promueve el uso del bastón blanco para personas ciegas como símbolo de identidad, protección y movilidad. *INCI*, 1.

<http://www.inci.gov.co/search/node?keys=El+INCI+promueve+el+uso+del+bastón+blanco+para+personas+ciegas+como+símbolo+de+identidad%2C+protección+y+movilidad>

Collignon, O. (2011, March). Some blind people “see” with their ears, neuropsychologists

- show. *Science Daily*, 1.  
<https://www.sciencedaily.com/releases/2011/03/110316104123.htm>
- Colombia, C. de la R. de. (2013). *LEY 1680 DE 2013*. Secretaria Del Senado.  
[http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley\\_1680\\_2013.html](http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1680_2013.html)
- Comunicaciones INCI. (2018). El INCI promueve el uso del bastón blanco para personas ciegas como símbolo de identidad, protección y movilidad. INCI. *INCI*, 1.  
<http://www.inci.gov.co/blog/el-inc-i-promueve-el-uso-del-baston-blanco-para-personas-ciegas-como-simbolo-de-identidad>
- Coral, J. D. A. (2018). *SISTEMA ANTICOLISIÓN PARA INVIDENTES* [Universidad del Cauca].  
[http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1278/SISTEMA ANTICOLISIÓN PARA INVIDENTES.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1278/SISTEMA%20ANTICOLISI%C3%93N%20PARA%20INVIDENTES.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- DANE. (2019). Población de Colombia es de 48,2 millones de habitantes, según el DANE. *Presidencia de La República de Colombia*, 1.  
<https://id.presidencia.gov.co/Paginas/prensa/2019/190704-Poblacion-de-Colombia-es-de-48-2-millones-habitantes-segun-DANE.aspx>
- Department of the Environment, T. and the R. (2000). Guidance on the use of Tactile Paving Surfaces. In *DETR*.  
[https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/289245/tactile-paving-surfaces.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/289245/tactile-paving-surfaces.pdf)
- Guerrero, J. G. F. (2018). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS EN AMBIENTES CERRADOS PARA PERSONAS CON CEGUERA TOTAL EN SAN JUAN DE PASTO* [Cooperación Universitaria Autónoma de Nariño].  
<http://repositorio.aunar.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/20.500.12276/493/I.E.106A.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Inc, A. (2020a). *Accesibilidad en Google Maps*. Google Support.  
<https://support.google.com/maps/answer/6396990?co=GENIE.Platform%3DAndroid&hl=es-419>
- Inc, A. (2020b). *Comienza a usar Android con TalkBack*. Support Google.  
<https://support.google.com/accessibility/android/answer/6283677?hl=es-419>
- Indoware. (2013). Ultrasonic Ranging Module HC - SR04. *Datasheet*, 1–4.  
<https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>

- KENNETH K. HANSRAJ, M. (2014). *Assessment of Stresses in the Cervical Spine Caused by Posture and Position of the Head* (No. 593). <https://pingeprii.ee/wp-content/uploads/2016/09/Hansray-K.K.-Assessment-of-Stresses-in-the-Cervical-Spine-Caused-by-Posture-and-Position-of-the-Head.pdf>
- Li, W., Wang, Z., Wei, G., Ma, L., Hu, J., & Ding, D. (105 C.E.). *A Survey on Multisensor Fusion and Consensus Filtering for Sensor Networks* (683701). <https://www.hindawi.com/journals/ddns/2015/683701/>
- MinSalud. (2020). *Discapacidad*. MinSalud. <https://www.minsalud.gov.co/proteccionsocial/promocion-social/Discapacidad/Paginas/discapacidad.aspx>
- Nada, A. A., Fakhr, M. A., & Seddik, A. F. (2015). *Assistive Infrared Sensor Based Smart Stick for Blind People* [Electronics Research Institute Giza Egypt; University Cairo Egypt]. IEEE XPLORE Digital Library
- OMS. (2011). *Informe Mundial Sobre Discapacidad*. [https://www.who.int/disabilities/world\\_report/2011/summary\\_es.pdf?ua=1](https://www.who.int/disabilities/world_report/2011/summary_es.pdf?ua=1)
- OMS. (2017). *10 datos sobre la discapacidad*. Organización Mundial de La Salud. <https://www.who.int/features/factfiles/disability/es/>
- RAE. (2019). *háptico, ca*. Real Academia Española. <https://dle.rae.es/háptico>
- RNIB. (2017). *The Cane Explained*. *Royal National Institute of Blind People*, 1. <https://www.rnib.org.uk/cane-explained>
- Schuon, S., Theobalt, C., Davis, J., & Thrun, S. (2008). *High-Quality Scanning Using Time-Of-Flight Depth Superresolution* [Stanford University ; UC Santa Cruz]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4563171>
- Sharp. (2006). Gp2Y0a02Yk0F. *Production*, 1–9. [https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Infrared/gp2y0a02yk\\_e.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Infrared/gp2y0a02yk_e.pdf)
- WeWalk INC. (2020). *WeWalk*. About. <https://wewalk.io/en/about/>