 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE DETECCIÓN DE PRESENCIA HUMANA USANDO SENSORES DE MICROONDAS PARA USO EN ROBÓTICA Y CON COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

Juan Esteban Espinosa Arango

Ingeniería Mecatrónica

Director:

Juan Sebastián Botero Valencia

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

Noviembre de 2022

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

El proceso de detectar el movimiento humano ha tenido diversas aplicaciones, como: seguridad en bancos y anunciar el paso de personas en lugares restringidos, apertura automática de puertas de un almacén, detener procesos industriales de manufactura robóticas para evitar el daño humano, entre otras. En la detección del movimiento humano se han empleado los sensores electrónicos, los cuales emiten ondas electromagnéticas en la frecuencia microondas, lo que permite traspasar objetos sólidos como paredes; teniendo en cuenta estas características se generó un esquema electrónico con el sensor, microcontrolador y la batería que permitiera su correcto funcionamiento y un dispositivo mecánico para la protección de dicho sistema de condiciones ambientales como la humedad, la luz o el polvo.

Este trabajo retomó el sensor Sen0192, con el interés de realizar una caracterización a partir de cuatro pruebas físicas para un posterior análisis con los datos brindados por el fabricante. Su importancia radica en conocer los rangos de medición real y facilitar una mejor aplicación en dispositivos electromecánicos en su respectiva generación de espacios seguros.

Palabras clave: Espectro electromagnético, ondas microondas, efecto Doppler, detección de personas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Inicialmente, quiero agradecer a mis padres y mi hermana por el apoyo brindado durante todo mi proceso académico, son un soporte fundamental para todavía seguir aquí, agradezco a el Universo la oportunidad de poder estudiar en el ITM, ha sido una experiencia maravillosa y bastante gratificante, a mis amigos Cristian Borda y Juan Manuel Gutiérrez por apoyarme y creer en mí, también agradezco al Dr. Juan Sebastián Botero Valencia quien es mi asesor de tesis, el cual me ha permitido seguir aprendiendo y guiándome tanto en cursos como en este trabajo.

Los autores desean expresar su agradecimiento por permitir el desarrollo de este trabajo de grado en el marco del proyecto de investigación titulado “Desarrollo de componentes y estructuras bioinspiradas a través de tecnologías de manufactura aditiva para el sector constructor nacional” y perteneciente a la segunda CONVOCATORIA CONJUNTA DE PROYECTOS DE I+D+i EN EL MARCO DE LA AGENDA REGIONAL DE I+D -> i.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

CAD Diseño asistido por computadoras (del inglés “computer-aided design”)

IOT Internet de las cosas (del inglés “Internet of things”)

VCC Fuente de voltaje

GND Tierra (del inglés “Ground”)

ADC Conversor Análogo-Digital (del inglés “*analogue to digital converter*”)

DAC Conversor Digital-Análogo (del inglés “*digital to analogue converter*”)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	7
1.1 Generalidades	7
1.1.1 Justificación.	7
1.1.2 Estado del arte	8
1.1.3 Planteamiento del problema	9
1.2 OBJETIVOS	10
1.2.1 Objetivo General	10
1.2.2 Objetivos Específicos	10
1.3 Organización de la tesis	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 Información de la medida	11
2.2 Principio de funcionamiento del sensor	13
2.3 Descripción del ESP32	14
3. METODOLOGÍA	16
3.1 Diseño electrónico	16
3.2. Diseño mecánico	16
3.3. Descripción de las pruebas del sensor Sen0192	16
3.4. Comparación	17
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
4.1. Ensamble final eléctrico	18
4.2. Ensamble final mecánico	19
4.3. Pruebas de validación	20
4.3.1. Primera prueba, a 2 metros con foco horizontal	22
4.3.2. Segunda prueba, a 2 metros con foco vertical	23
4.3.3. Tercera prueba, a 16 metros con foco horizontal	25
4.3.4. Cuarta prueba, a 16 metros con foco vertical	26
4.4. Resultados comparativos	28
4.4.1. Comparación, a 2 metros y 16 metros con foco horizontal y vertical	28

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

<u>4.4.2. Comparación, a 2 metros y 16 metros con foco horizontal</u>	<u>29</u>
<u>4.4.3. Comparación, 1 metro y 16 metros con foco vertical</u>	<u>31</u>
<u>4.5. Cálculo del error</u>	<u>32</u>
<u>CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO</u>	<u>34</u>
<u>Conclusiones.</u>	<u>34</u>
<u>Recomendaciones.</u>	<u>35</u>
<u>Trabajos Futuros</u>	<u>35</u>
<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	<u>36</u>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

1.1.1 Justificación.

Algunas de las aplicaciones de la sensórica se utilizan en ambientes caseros o industriales, en donde la robótica ofrece un control de los elementos con los que se interactúa en el ambiente, son los sensores del robot los que habilitan sus actuadores en dichos espacios con base en los parámetros establecidos con anterioridad.

En ambientes caseros existen robots que hacen limpieza en los hogares. Estos incluyen sensores que detectan el movimiento, y actuadores que evitan golpes para la prevención de daños en el instrumento tecnológico, personas y mascotas.

En ambientes industriales existen robots que mejoran las líneas de producción. Allí podrían existir elementos tecnológicos que desplazan cargas grandes y/o velocidades altas, en este contexto los sensores se hacen necesarios para identificar el tránsito de personas y habilitar sus actuadores para prevenir el daño humano.

Un principio teórico que utilizan estos sensores es el efecto Doppler, su objetivo es la detección del cambio de frecuencia de las ondas electromagnéticas emitidas en un espacio determinado. Este fenómeno físico ha ayudado a la humanidad en distintas aplicaciones, como por ejemplo determinar la gravedad en planetas como Júpiter, en la misión Juno se emplea esta teoría para reconocer los movimientos, las ondas emitidas y recibidas del planeta y, de esta manera percibir el cambio de frecuencia (Correa, 2014); también se puede ver en aplicaciones médicas para medir la masa ovárica y estudios del feto durante su gestación (Salas, 2002). Retomar dicha teoría en este proyecto propicia un espacio para la caracterización de un producto con información real, y de esta forma,

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

brindarle las cualidades necesarias para tomar una decisión pertinente en la generación de ambientes seguros.

Este proyecto investigativo reconoce el sistema de detección real del Sen0192 a partir de pruebas físicas con el fin de establecer los elementos significativos que permitan establecer los parámetros necesarios para generar ambientes seguros. Es decir, caracterizar el sensor para obtener mejor respuesta en el entorno que se use.

1.1.2 Estado del arte

Las personas adultas mayores que viven solas corren el riesgo de tener accidentes al interior del hogar, en este contexto el sensor microondas utiliza el efecto Doppler para realizar un seguimiento de las velocidades de los movimientos usuales en actividades propias como caminar, sentarse, recoger un objeto del suelo y demás. De esta forma, el sensor podría diferenciar el cambio de frecuencia de las ondas electromagnéticas emitidas en este espacio y generar la alerta en caso de sufrir una caída o la nulidad de acciones.

La ventaja principal de este sensor es que no es invasivo y puede utilizarse en otros lugares como un baño, donde un individuo podría sentirse incómodo con otros instrumentos de medición como las cámaras. (Kazuaki, Takashi, & Yosuke, 2017).

Los materiales poseen distintas características eléctricas, las cuales determinan cómo será el comportamiento de un elemento ante un campo electromagnético. Estos parámetros sirven a los ingenieros para el control de los procesos, a los científicos para la aplicación de nuevas investigaciones, a la medicina para medir las dieléctricas en los tejidos como el cáncer y, a la zapatería para el curado de poliuretano con la respectiva calidad del producto (García Baños, 2008).

En espacios abiertos donde cae nieve, las personas corren el riesgo de quedar atrapadas tras avalanchas, este es un entorno homogéneo y con la frecuencia 2,4GHz el sensor microondas es capaz de penetrar las capas de la nieve y detectar micromovimientos como

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

la respiración o latidos del corazón. A diferencia de personas que quedan atrapadas bajo los escombros en un derrumbe, la tecnología microonda no serviría, ya que los escombros son heterogéneos y tienen componentes metálicos los cuales generan fallos en la medición porque reflejan y redireccionan las ondas (Pieraccini, Luzi, Dei, Pieri, & Atzeni, 2008).

1.1.3 Planteamiento del problema

Históricamente, se ha podido evidenciar a través de pruebas físicas que los atributos presentados por el fabricante en la hoja de información de un producto es aproximada y no verídica con base en las mediciones y el alcance real.

El fabricante del Sen0192 establece normas y atributos del producto. Pero, ¿Cómo saber si estas características son tan precisas como se muestra allí?, este proyecto de investigación busca reconocer los parámetros reales de medición a través de pruebas físicas para generar ambientes seguros.

El objetivo es verificar y comprobar los rangos de detección del sensor, sus ángulos de apertura, la reflectancia de la onda microondas en las personas y objetos y, a través de la hoja de datos (datasheet) y datos obtenidos de forma experimental realizar el reconocimiento de los atributos verídicos del producto.

Con los datos obtenidos se realizarán las respectivas gráficas y comparaciones con los atributos establecidos por el fabricante en la hoja de información. Esta información integrará un sistema de control (microcontrolador) que enviará la información vía inalámbrica y, de acuerdo a este registro tomará una respuesta predeterminada de acuerdo a la aplicación.

Pensando en condiciones ambientales hostiles como la lluvia, la humedad, el polvo, la temperatura y demás, se incluirá un modelado Diseño Asistido por Computadora -CAD- para que sea óptimo en aplicaciones robóticas, con su respectiva impresión 3D.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de detección de presencia humana usando sensores de microondas en aplicaciones robóticas con un sistema de comunicación.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar un circuito electrónico y un modelo de comunicación que contenga un controlador desde el cual se hará la recopilación de los datos entregados por el sensor.
- Diseñar y fabricar un encapsulado para el sistema que permita su instalación en exteriores y con alimentación externa.
- Proponer e implementar una metodología de caracterización de sensores de microondas que permita conocer su campo de detección.
- Comparar los resultados obtenidos por la caracterización y los resultados experimentales, con las características dadas por la hoja de datos del sensor.

1.3 Organización de la tesis

Inicialmente, en el marco teórico se presenta el principio de funcionamiento del sensor y las técnicas del mismo para distintas aplicaciones y el mismo proyecto. Allí se enseñan los elementos conceptuales del campo electromagnético y sus radiaciones de energía en las bandas del campo, con base en la tecnología microondas y sus ventajas para la aplicación.

Posteriormente, en la metodología se detalla el paso a paso, sobre: el diseño electrónico del microcontrolador con su esquema de conexiones, cómo se realizó la parte mecánica en la que se incluye el modelado CAD y, las características de las pruebas físicas aplicadas al sensor.

Finalmente, se detallan los resultados. En donde se puede apreciar cómo queda el sensor encapsulado, se muestran las comparativas y las gráficas obtenidas de las pruebas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

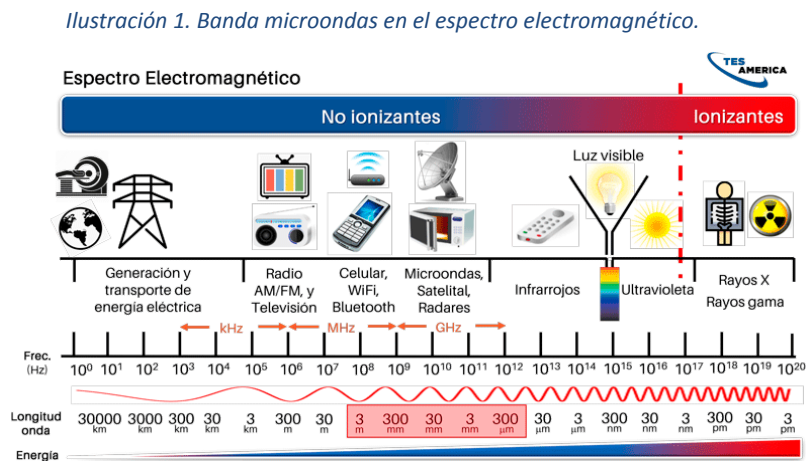
Adicionalmente, se presentan las conclusiones y las recomendaciones.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Información de la medida

El uso del espectro electromagnético ha generado grandes ventajas para la implementación de nuevas tecnologías, al permitir el desplazamiento de ondas a través de las bandas en las cuales se separan las radiaciones de energía con sus longitudes y frecuencias. Se puede hacer uso de las ondas microondas que permite integrarse a sensores con distintas aplicaciones, de acuerdo con la longitud de onda y frecuencia que se use. Algunas aplicaciones son la transmisión de radio y televisión y, la detección de materiales ferromagnéticos, personas y componentes en la sangre o aceites. (NANZER, 2012).

Como se puede apreciar en la siguiente ilustración, las frecuencias en las bandas del espectro electromagnético varían desde la generación y transporte de energía eléctrica hasta los rayos x - rayos gama.



Fuente: Tomado de (America, 2022)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Los sensores que usan la tecnología microondas tienen grandes ventajas en su aplicación, porque pueden cubrir distancias de frecuencia de 300MHz-30GHz en proporción con la longitud de onda en un rango entre 10mm-1m (Horst, 2019), adicionalmente no necesita un medio para transmitirlo y podría hacerlo hasta en el vacío.

En consecuencia, esas ventajas varían de acuerdo con la longitud y la frecuencia de la onda, puesto que puede pasar a través de objetos sólidos como paredes, garantizando la privacidad en lugares con poco espacio hasta condiciones de seguridad en un banco.

A diferencia de la tecnología infrarroja que se ve afectada por condiciones ambientales hostiles que limitan la lectura en entornos con polvo, humedad, altas temperaturas y demás.

Gracias a las investigaciones realizadas por Maxwell en relación con las teorías del campo electromagnético, las ondas se puede modelar a través de ecuaciones, con interpretaciones del campo eléctrico y magnético, en el que separan las bandas de acuerdo con sus frecuencias y longitudes de onda de radiaciones de energía como lo muestran las siguientes ecuaciones:

$$\nabla^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{H} - \gamma^2 \vec{H} = 0 \tag{1}$$

Fuente: sacado de libro. (Miranda Pantoja, 2002)

En donde γ es el factor de propagación (desplazamiento de la honda en un entorno) y viene expresado como se observa en la ecuación 2:

$$\gamma \triangleq \sqrt{j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon \triangleq \alpha + j\kappa} \tag{2}$$

Fuente: sacado de libro. (Miranda Pantoja, 2002)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

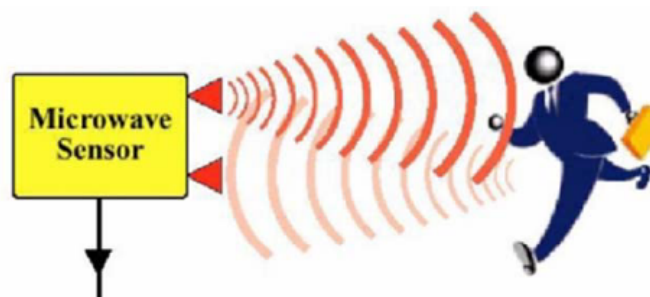
La ecuación 2 tiene una parte real y otra imaginaria, ambas tienen constantes (μ y κ) las cuales se denominan como de atenuación y de fase, respectivamente.

Los sensores microondas que usan el efecto Doppler para la detección de personas u objetos gracias a los rangos de radiación de energía en la longitud y frecuencia de la banda de microondas del espectro electromagnético, permite una fácil detección de humanos gracias a la absorción térmica efectuada, totalmente diferente a la de otros elementos.

Estos sensores para la detección del movimiento tienen dos antenas, la primera envía radiación de ondas microondas al entorno, la segunda es receptora de la onda reflejada o emitida por las personas o materiales. Y es el microcontrolador que con estas características se encarga de generar una información sobre el cambio en el ambiente que perturbó la onda (NANZER, 2012).

Usando ondas microondas, el efecto Doppler tiene algunos errores en la detección a distancias muy cercanas del sensor (Pérez Martínez & Casanova Galeano, 1999), así como lo muestra la siguiente ilustración.

Ilustración 2. Efecto Doppler.



Fuente: Hoja de datos del sensor Sen0192 del fabricante. (DFROBOT, 2016)

2.2 Principio de funcionamiento del sensor

Para este trabajo se usó el sensor microondas de referencia Sen0192 del fabricante DFRobot, este sensor usa el efecto Doppler para la detección de las personas u objetos, este envía a través de una de sus antenas una onda que recorre el espacio con una

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

frecuencia predeterminada de 10.525GHz y es el trimmer resistor el que permite variar la distancia en la cual se está midiendo, entre 2 a 16 metros.

Este producto tiene dos focos de medida para la detección, uno horizontal con un ángulo de apertura de 72 grados y un foco vertical con 36 grados, con una medida de 360 grados independientemente si se cambia la distancia. Aunque, con un área de detección mayor de los rangos mencionados, solo que con menor precisión.

La banda del espectro electromagnético usada tiene ventajas como no ser afectada por condiciones ambientales de humedad, polvo o luz, pero sí por la lluvia. En estas condiciones detecta materiales como plásticos, metales, personas, y su detección es proporcional al volumen del objeto, entre más grande sea más fácil se realiza el registro del movimiento. Durante este proceso el sensor genera una respuesta digital que encenderá un LED -Diodo emisor de luz- y enviará a través de uno de sus cables una respuesta de 5v al microcontrolador.

2.3 Descripción del ESP32

El sensor microondas de referencia Sen0192 usa un módulo externo ESP32 que genera algunas ventajas. La principal, es el uso de una conexión inalámbrica para el envío de los datos a través de Bluetooth y Wi-Fi, también utiliza componentes apropiados para un bajo consumo de energía, cuenta con la facilidad de ser usado en distintos entornos porque incorpora un código abierto y sus múltiples librerías. Estos beneficios facilitan ser utilizados en aplicaciones de IOT -Internet de las cosas-.

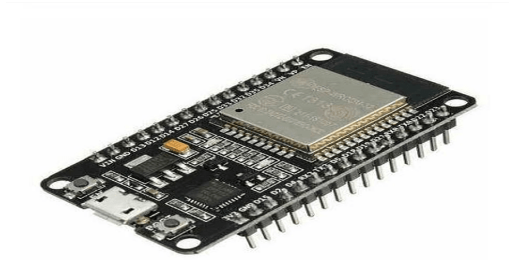
Dentro de los lenguajes que pueden ser empleados para la programación del módulo son:

- Arduino (en lenguaje C++)
- Esp-idf (Espressif IoT Development Framework) (en lenguaje Python)
- RTOS's (como Zephyr Project, Mongoose OS, NuttX RTOS)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- MicroPython

Ilustración 3. Modulo ESP32



Fuente: Sacado de internet. (Zamux, s.f.)

Algunas características relevantes del microcontrolador son:

- Voltaje de Alimentación DC: 2.2V a 3.6V.
- Procesador de 240 MHz de doble núcleo microcontrolador con 600 DMIPS de Tensilica LX6.
- 20 entradas/salidas digitales.
- 18 ADC de 12 bits.
- 2 DAC de 8 bits.
- Integrado Bluetooth modo dual (clásico y BLE).
- 16 MByte flash.
- WiFi HT40.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

3.1 Diseño electrónico

Partiendo del principio de estructura eléctrica del proyecto, se identifican cuatro elementos necesarios para la realización del esquema eléctrico y control de proyecto. En los cuales se encuentra: el sensor, el microcontrolador, la alimentación a la fuente de energía y el receptor de los datos, el computador en donde se registra la información.

El objetivo es diseñar un circuito electrónico con esos cuatro elementos para la recopilación de los datos entregados por el sensor.

3.2. Diseño mecánico

Para el diseño mecánico se garantiza el encapsulado del sensor con el objetivo que resista condiciones ambientales hostiles, como la radiación solar directa, la humedad, agua o polvo en el circuito eléctrico y que estas pudieran afectar el funcionamiento de este. Ya que el sensor usa una frecuencia que es capaz de traspasar objetos sólidos, se realiza un modelado CAD de unas piezas que cubren lo por completo.

Durante este proceso se emplea un software de modelado para la realización de este sistema de protección y su debida impresión 3D en el material PLA -Ácido poliláctico- .

3.3. Descripción de las pruebas del sensor Sen0192

Se realizarán pruebas físicas del sensor microondas referencia Sen0192 con el objetivo de corroborar las características dadas por el fabricante, el objetivo es verificar y detallar el campo de detección.

Inicialmente, se desarrolla una aplicación de escritorio con lenguaje de programación Python que permitiera la sistematización de la información recopilada en el proceso de pruebas físicas. Allí se consigna el número del registro, el tipo de foco del sensor y la distancia de detección en el que se identifica el movimiento.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para la correcta aplicación de las pruebas, se garantizan espacios ideales en donde se cuente con las mejores condiciones para realizar la medición. Las características son: contar con un tamaño superior al campo de detección máximo del sensor (16 metros) y, el espacio no podría tener registros de movimiento como por ejemplo el de las ramas de un árbol, de la lluvia u otros elementos.

El proceso cuenta con cuatro pruebas: una con el foco horizontal y otra con el foco vertical a una distancia de 2 metros y, con esas mismas características a 16 metros.

Finalmente, con la información arrojada por las pruebas físicas y sistematizadas en Python se procede a la realización de tablas y gráficas del campo de detección del sensor microondas de referencia Sen0192.

3.4. Comparación

Una vez realizado el diseño eléctrico, el diseño mecánico y la aplicación de las pruebas se procede a realizar el respectivo análisis de la información del sensor entregada por el fabricante.

Durante este proceso se verifican los datos presentados en el datasheet con los resultados obtenidos durante las pruebas físicas, evidenciando el nivel de error de la medida entre ambos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Ensamble final eléctrico

El diseño electrónico con el que cuenta el sensor de referencia Sen0192 tiene 3 cables: dos son de alimentación y el otro es la respuesta que va conectado al microcontrolador.

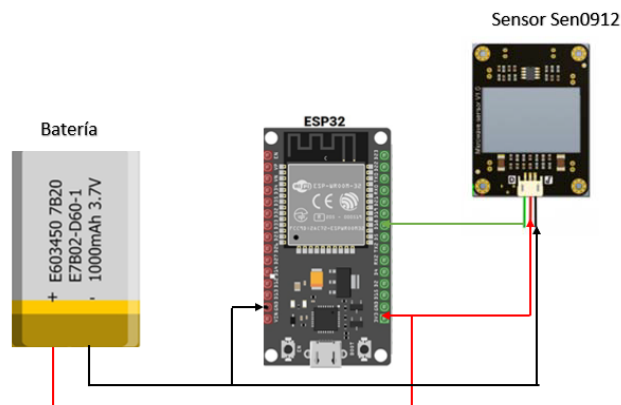
Ilustración 4. Esquemáticos conexión cables del sensor

Color	Function Description
Green	Signal Line
Red	Power+ (VCC)
Black	Power- (GND)

Fuente: Sacado de la hoja de datos del sensor (DFROBOT, 2016)

El sensor tiene integrado un sistema electrónico para la detección de movimiento y sus características son suficientes para dar respuesta final, por esta razón no es necesario adicionar ningún circuito porque la respuesta no se puede mejorar.

Ilustración 5. Esquemático conexiones sensor-microcontrolador



Fuente: Elaboración propia.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Para garantizar un correcto funcionamiento del sensor, el microcontrolador y la fuente de energía se crearon las siguientes conexiones:

- Dos para la alimentación del esquema eléctrico, el sensor y el microcontrolador se conectan con base en parámetros internacionales. A través de los cables rojos (Positivo-Vcc) y negro (Tierra-Gnd) a una batería a unos 3.7v.
- Una conexión adicional con el cable verde, esta es la respuesta del sensor al microcontrolador, donde se acciona la respuesta al movimiento registrado.

4.2. Ensamble final mecánico

Para el diseño mecánico se realizó un modelado CAD, allí se consideran dos asuntos significativos: el primero tiene que ver con el foco horizontal que registra mayor apertura, y el segundo, la salida de cables en la parte inferior. Tal y como se observa en la siguiente ilustración:

Ilustración 6. Sensor foco horizontal

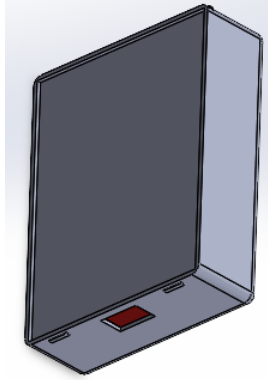


Fuente: Elaboración propia

El modelado CAD se realiza a través de un diseño asistido por computadora y se imprime 3D en un material PLA -Ácido poliláctico-. Dicho encapsulado protege al sensor para que resista condiciones ambientales hostiles, sin afectar su funcionamiento por su capacidad de atravesar objetos sólidos.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

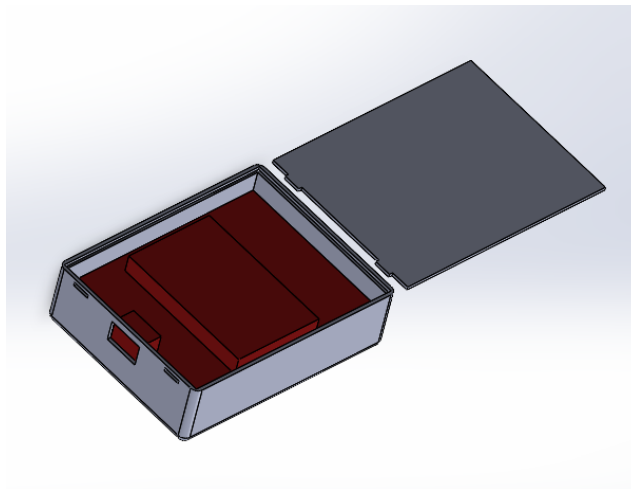
Ilustración 7. Modelado Cad.



Fuente: Elaboración propia.

Durante este proceso se consideró una tapa deslizante debido a la geometría del sensor. El encapsulado es estático debido al campo de detección del sensor, que es a sus 360 grados.

Ilustración 8. Estructura cad con el sensor



Fuente: Elaboración propia.

4.3. Pruebas de validación

Con base en los rangos de distancias establecido por el fabricante del sensor de detección microondas Sen0192, se eligió un lugar amplio en el cual se puedan aplicar las pruebas.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Inicialmente, se intentó en una zona verde, este cumplía con la característica relacionada con el tamaño superior a la distancia de detección del sensor. Sin embargo, la presencia de árboles generó mediciones erróneas frente a los movimientos naturales de sus ramas y hojas.

Por la cancha utilizada (de 25 metros) no transcurrían personas y sin árboles para prevenir el movimiento de las ramas u hojas. Además, se sorteó la suerte con las condiciones climáticas, puesto que la lluvia generó una falsa medición y no se contaba con lugares cerrados para dicha aplicación. Por esta razón, se optó por cambiar la fecha para la realización del registro.

Ilustración 9. Canchas de vacías



Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente, se tomó el sensor el cual tiene dos focos (horizontal y vertical) de apertura para el envío y recepción de la onda, además un trimmer resistor desde donde se puede ajustar la distancia máxima de detección en un rango entre 2 a 16 metros.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Los datos obtenidos de las pruebas del sensor fueron guardados en una sola tabla en un archivo .db, pero separados en cada una de las pruebas realizadas.

4.3.1. Primera prueba, a 2 metros con foco horizontal

La primera tabla corresponde a la prueba con el foco horizontal en el rango de 2 metros. Aquí se puede observar que entre los ángulos muestreados, la mayor distancia se registra en el ángulo de 90 grados en el que se realiza una detección a 1.86 metros. Sin embargo, en los ángulos 180 a 360 grados no se realizó detección.

Tabla 1. Primera prueba sensor distancia 2 metros

#	Grados	Distancia (m)	Foco
1	0	0.03	Horizontal
2	10	0.03	Horizontal
3	20	0.03	Horizontal
4	30	0.035	Horizontal
5	40	0.08	Horizontal
6	50	0.082	Horizontal
7	60	0.085	Horizontal
8	70	1.52	Horizontal
9	80	1.04	Horizontal
10	90	1.86	Horizontal
11	100	1.45	Horizontal
12	110	1.28	Horizontal

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

13	120	0.91	Horizontal
14	130	0.49	Horizontal
15	140	0.35	Horizontal
16	150	0.08	Horizontal
17	160	0.05	Horizontal
18	170	0.032	Horizontal
19	180	0.02	Horizontal

Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Segunda prueba, a 2 metros con foco vertical

En la segunda prueba, se continuó en el mismo rango de 2 metros, pero se cambió el sensor para obtener un nuevo foco en vertical.

Ilustración 10. Sensor foco vertical



Fuente: Elaboración propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Entre los ángulos muestreados en esta prueba, se repiten patrones anteriores: a los 90 grados se tuvo una detección máxima en la distancia de 1.65 metros, así como también no se observó movimiento en los ángulos entre 180 a 360 grados, siendo este un punto ciego para este rango.

Tabla 2. Segunda prueba sensor distancia 2 metros

#	Grados	Distancia (m)	Foco
20	0	0.35	Vertical
21	10	0.38	Vertical
22	20	0.435	Vertical
23	30	0.302	Vertical
24	40	0.73	Vertical
25	50	0.84	Vertical
26	60	1.06	Vertical
27	70	1.085	Vertical
28	80	1.53	Vertical
29	90	1.65	Vertical
30	100	1.49	Vertical
31	110	1.36	Vertical
32	120	1.03	Vertical
33	130	0.81	Vertical
34	140	0.64	Vertical
35	150	0.265	Vertical
36	160	0.13	Vertical
37	170	0.13	Vertical
38	180	0.048	Vertical

Fuente: Elaboración propia

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.3.3. Tercera prueba, a 16 metros con foco horizontal

En la tercera prueba se ajustó el sensor a un rango de detección de 16 metros con una posición en foco horizontal.

Entre los ángulos muestreados en esta prueba, se repite un patrón de los que se observó con anterioridad. La mayor distancia se presentó a los 90 grados, con una medida de 15 metros. Además, se evidenció una detección detrás de sus antenas, siendo capaz de obtener información a sus 360 grados.

Tabla 3. Tercera prueba sensor distancia 16 metros

#	Grados	Distancia (m)	Foco
39	0	2.50	Horizontal
40	10	5.50	Horizontal
41	20	3.07	Horizontal
42	30	3.23	Horizontal
43	40	3.43	Horizontal
44	50	3.24	Horizontal
45	60	5.02	Horizontal
46	70	6.50	Horizontal
47	80	7.09	Horizontal
48	90	15	Horizontal
49	100	10.15	Horizontal
50	110	8.14	Horizontal
51	120	3.10	Horizontal
52	130	2.93	Horizontal
53	140	2.44	Horizontal
54	150	1.51	Horizontal
55	160	1.27	Horizontal
56	170	1.81	Horizontal
57	180	0.49	Horizontal

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

58	190	0.49	Horizontal
59	200	0.47	Horizontal
60	210	0.43	Horizontal
61	220	0.45	Horizontal
62	230	0.43	Horizontal
63	240	0.39	Horizontal
64	250	0.40	Horizontal
65	260	0.41	Horizontal
66	270	0.41	Horizontal
67	280	0.37	Horizontal
68	290	0.31	Horizontal
69	300	0.21	Horizontal
70	310	0.43	Horizontal
71	320	0.87	Horizontal
72	330	0.93	Horizontal
73	340	1.21	Horizontal
74	350	1.48	Horizontal

Fuente: Elaboración propia.

4.3.4. Cuarta prueba, a 16 metros con foco vertical

La cuarta prueba se realizó con el sensor ajustado en un rango de detección de 16 metros, pero con foco vertical.

Entre los ángulos muestreados en esta prueba, así como en los casos anteriores, en un ángulo de 90 grados se obtuvo la mayor detección a 15.38 metros. También, se observaron registros detrás de sus antenas, pero en una corta distancia de 0.31 metros a 270 grados.

Tabla 4. Cuarta prueba sensor distancia 16 metros

#	Grados	Distancia (m)	Foco
---	--------	---------------	------

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

75	0	2.72	Vertical
76	10	3.82	Vertical
77	20	4.05	Vertical
78	30	6.53	Vertical
79	40	6.15	Vertical
80	50	4.54	Vertical
81	60	5.31	Vertical
82	70	11.37	Vertical
83	80	14.56	Vertical
84	90	15.38	Vertical
85	100	11.11	Vertical
86	110	9.8	Vertical
87	120	7.27	Vertical
88	130	5.59	Vertical
89	140	3.88	Vertical
90	150	3.27	Vertical
91	160	2.11	Vertical
92	170	0.83	Vertical
93	180	0.16	Vertical
94	190	0.18	Vertical
95	200	0.14	Vertical
96	210	0.09	Vertical
97	220	0.14	Vertical
98	230	0.17	Vertical
99	240	0.21	Vertical
100	250	0.24	Vertical
101	260	0.29	Vertical
102	270	0.31	Vertical
103	280	0.31	Vertical

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

104	290	0.30	Vertical
105	300	0.23	Vertical
106	310	0.14	Vertical
107	320	0.22	Vertical
108	330	0.33	Vertical
109	340	0.83	Vertical
110	350	1.51	Vertical

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Resultados comparativos

4.4.1. Comparación, a 2 metros y 16 metros con foco horizontal y vertical

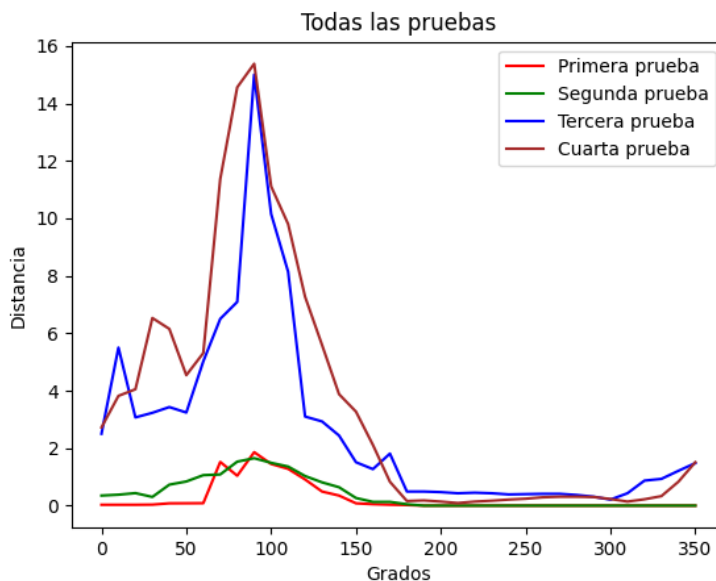
Con los datos obtenidos en cada una de las pruebas se realizó una gráfica cartesiana para observar el comportamiento del sensor, donde el eje 'x' contiene a la variable que es los grados y el eje 'y' contiene la distancia.

La primera gráfica cartesiana contiene la información de todos los resultados de las pruebas. En la gráfica se puede ver que la línea roja es de la primera prueba, la verde es de la segunda, la azul es de la tercera y, la café es de la cuarta.

En la gráfica se puede observar el comportamiento repetitivo en todos los resultados, el patrón es que la mayor distancia se presenta en un ángulo de 90 grados. Con sus respectivos picos, como se observa en la ilustración.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Gráfica 1. Gráfica cartesiana sensor distancia 2 metros y 16 metros con ambos focos



Fuente: Elaboración propia.

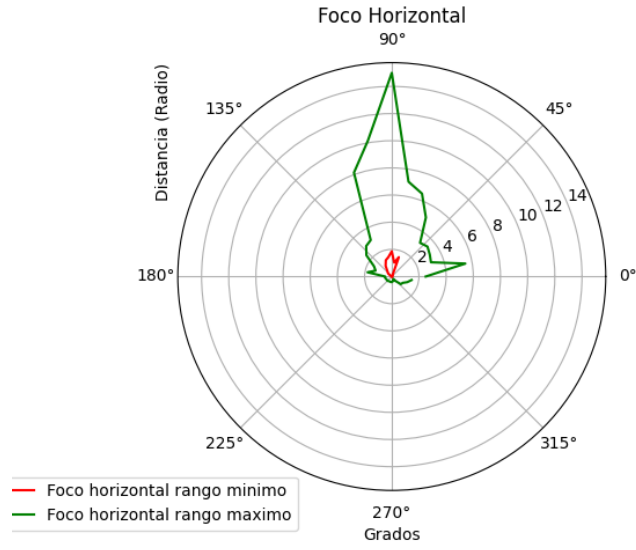
4.4.2. Comparación, a 2 metros y 16 metros con foco horizontal

Con los datos obtenidos en cada una de las pruebas se realizaron unas gráficas polares, en donde se puede observar el comportamiento del sensor a sus 360 grados con distintos focos.

También se realizaron gráficas polares con el fin de representar la forma de detección del sensor a sus 360 grados en sus diferentes focos y sus distintas distancias.

La segunda gráfica interpreta la forma de detección en el foco horizontal en sus distintas distancias, la línea roja representa la primera prueba (rango mínimo) y la verde representa la 3 prueba (rango máximo).

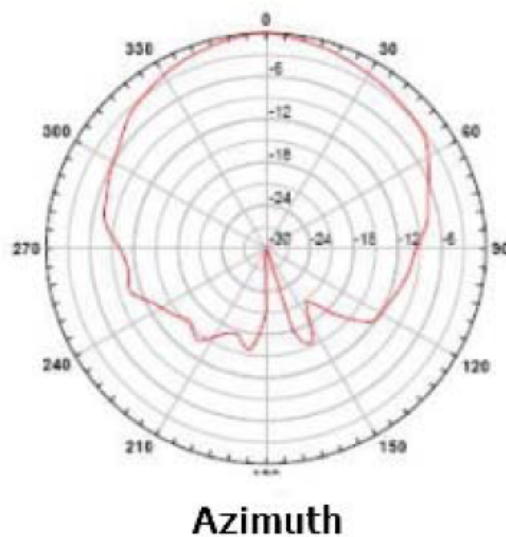
Gráfica 2. Gráfica polar sensor foco horizontal



Fuente: Elaboración propia.

La tercera gráfica corresponde a la entregada por el fabricante en la hoja de datos, donde se puede observar los atributos sobre la distancia de detección en el foco horizontal en 2 y 16 metros.

Gráfica 3. Gráfica polar detección teórica, foco horizontal



Fuente: Hoja de datos del sensor Sen0192 del fabricante DFRobot. (DFROBOT, 2016)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

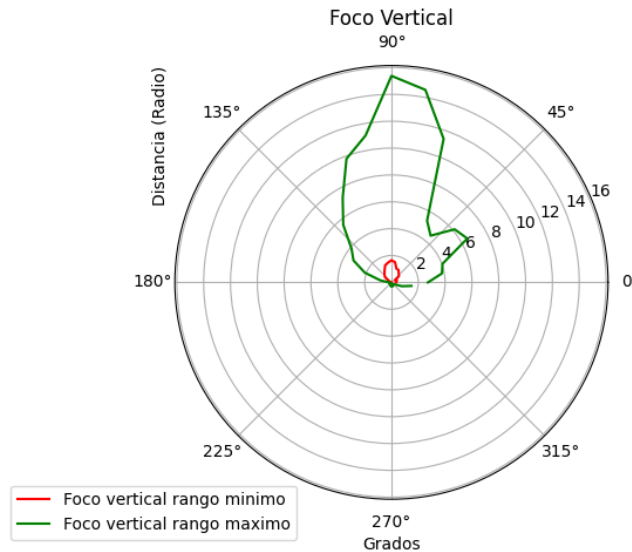
En las dos gráficas se puede apreciar la diferencia entre ambas mediciones. La del fabricante enseña un rango de detección general, reseña un registro detrás de sus antenas entre los 180 a 360 grados, mientras que en la prueba física no evidencia movimiento, considerándolo así un punto ciego para el sensor ajustado a 2 metros. Sin embargo, la situación cambia cuando el rango de detección aumenta a una distancia de 16 metros.

Con el cruce de información de las dos primeras pruebas y los datos de la hoja de datos se obtiene porcentajes de error de 7% y 17.5% respectivamente.

4.4.3. Comparación, 1 metro y 16 metros con foco vertical

La cuarta gráfica corresponde a la detección en el foco vertical para ambos rangos de distancia, la línea roja señala la medición a 2 metros y la verde a 16 metros.

Gráfica 4. Gráfica polar sensor, foco vertical

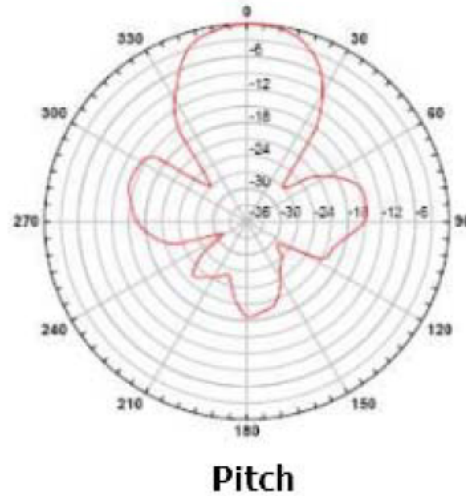


Fuente: Elaboración propia.

La quinta gráfica corresponde a la dada por el fabricante en el datasheet, donde se puede observar los atributos sobre la distancia de detección en el foco vertical en 2 y 16 metros.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Gráfica 5. Gráfica polar detección teórica, foco vertical



Fuente: Hoja de datos del sensor sen0192 del fabricante DFRobot (DFROBOT, 2016).

En este ítem se repite el mismo comportamiento. En las dos gráficas se puede apreciar la diferencia entre ambas mediciones. La del fabricante enseña un rango de detección general, reseña un registro detrás de sus antenas entre los 180 a 360 grados, mientras que en la prueba física no evidencia movimiento, considerándolo así un punto ciego para el sensor ajustado a 2 metros. Sin embargo, la situación cambia cuando el rango de detección aumenta a una distancia de 16 metros.

Con la caracterización del sensor en sus la tercera y cuarta prueba, se obtienen porcentajes de error de 6.25% y 3.875% respectivamente.

4.5. Cálculo del error

Teniendo en cuenta los valores teóricos dados por la hoja de datos y los reales obtenidos de las pruebas físicas se hizo el cálculo del error en la medida de acuerdo con la ecuación:

$$Error = \left| \frac{Valor\ real - valor\ teórico}{Valor\ teórico} \right| * 100\% \quad (3)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Ecuación cálculo para la primera prueba

$$Error = \left| \frac{1.86-2}{2} \right| * 100\% = 7\% \quad (4)$$

Ecuación cálculo para la segunda prueba

$$Error = \left| \frac{1.65-2}{2} \right| * 100\% = 17.5\% \quad (5)$$

Ecuación Cálculo para la tercera prueba

$$Error = \left| \frac{15-16}{16} \right| * 100\% = 6.25\% \quad (6)$$

Ecuación cálculo para la cuarta prueba

$$Error = \left| \frac{15.38-16}{16} \right| * 100\% = 3.875\% \quad (7)$$

Con los valores de error obtenidos, se realiza un promedio, así:

$$Promedio = \frac{(7\%+17.5\%+6.25\%+3.78\%)}{4} = 8.6325\% \quad (8)$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Conclusiones.

- Se desarrolla satisfactoriamente un circuito eléctrico, el cual hace la conexión entre el sensor y el microcontrolador para el envío de datos inalámbricos, sin necesidad de acondicionar el sensor porque trae un circuito interno que se encarga de esto y entrega la respuesta digital.
- Se diseña un sistema mecánico que permite al sensor y circuito eléctrico protegerse de condiciones ambientales hostiles como la lluvia, el polvo y la radiación solar, y de esta forma, prevenir el daño del sistema de detección.
- Se hacen las pruebas físicas al sensor en distintos entornos, buscando condiciones ideales para hacer las pruebas sin interrupciones, aquí se presentan adversidades en el registro errado por condiciones relacionadas con el movimiento de los árboles y la lluvia. Finalmente, se encuentra un lugar y un momento para la aplicación de las pruebas sin ningún inconveniente.
- Con la caracterización del sensor en sus pruebas físicas, se obtienen porcentajes de error en comparación con el datasheet en sus cuatro pruebas de 7%, 17.5%, 6.25% y 3.875% respectivamente. Para un error general de 8.6325% con respecto a los valores dados en la hoja de datos.
- Se genera con éxito un sistema de detección de personas con el sensor microondas Sen0192, el cual usa el efecto Doppler para la detección de movimiento a partir del cambio de frecuencia de los objetos. El sistema mecánico se genera para que sea estático, es capaz de traspasar objetos, no ser invasivo en diferentes contextos y, tener detección a sus 360 grados.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Recomendaciones.

- Se recomienda ajustar el sensor a un rango de medición mayor a dos metros para que este pueda hacer la detección a sus 360 grados.
- Se recomienda crear un sistema mecánico que permita el movimiento del sensor y de esa forma determinar la posición del objeto detectado.
- Se recomienda hacer más pruebas con objetos de pequeño volumen a largas distancias para obtener una caracterización más aproximada.
- Se recomienda no usar el sensor a una larga distancia durante un tiempo prolongado, porque resulta extremadamente sensible al movimiento y una pequeña hoja arrastrada por el viento puede afectar la medida.

Trabajos Futuros

- El proyecto generará más pruebas físicas, para una mejor caracterización, probando largas distancias, usando otros objetos como drones y así obtener un mejor resultado del sistema.
- Se complementará con otro sensor de movimiento que use otra tecnología, sacando mayor provecho de cada una de sus ventajas para la generación de un sistema más eficiente que permita el muestreo del movimiento y con mayor exactitud determinar si se genera un desplazamiento o si son condiciones externas a la medición.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

BIBLIOGRAFÍA

America, T. (20 de 05 de 2022). *¿Que son los campos electromagneticos?* Obtenido de <https://www.tesamerica.com/que-son-los-campos-electromagneticos/>

DFROBOT. (2016). *Gravity: Digital Microwave Sensor (Motion Detection)*. Obtenido de https://wiki.dfrobot.com/MicroWave_Sensor_SKU__SEN0192

García Baños, B. (2008). *Estudio y optimizacion de sensores microondas para la caracterizacion y monitorizacion de materiales en procesos industriales*. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10251/10628>

Horst, M. J. (2019). *Hardware architectures for compact microwave and millimeter wave cameras*. Obtenido de https://scholarsmine.mst.edu/doctoral_dissertations/2777/

Kazuaki, S., Takashi, K., & Yosuke, K. (2017). Fall Detection Utilizing Frequency Distribution Trajectory by Microwave Doppler Sensor. *IEEE Sensors Journal*.

Miranda Pantoja, J. M. (2002). *Ingenieria de Microondas: Técnicas Experimentales*. Madrid: Prentice Hall.

NANZER, J. A. (2012). *microwave and millimeter-wave remote sensing for security applications*. ARTECH HOUSE.

Pérez Martínez, F., & Casanova Galeano, F. (1999). New Microwave sensors for intrusion detection systems. *IEEE* .

Pieraccini, M., Luzi, G., Dei, D., Pieri, L., & Atzeni, C. (2008). Detection of Breathing and Heartbeat Through Snow Using a Microwave Transceiver. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*

Zamux. (s.f.). *ESP32 MODULO WIFI Y BLUETOOTH*. Obtenido de <https://www.zamux.co/modulo-esp32-wifi-y-bluetooth>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Correa, D. (2014, 09 28). *El Efecto Doppler*. ACADEMIA.

https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/39911555/El_Efecto_Doppler-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1669666065&Signature=U-j~ZeHilPcGD25T0o5L0o0V-L8VRI7BTKGH8RbXUVzXWfU7Ufj28yNgWOnAm~qp9OkERMEKh4t7Q7eqQmBGvPQOMKs7cR~5BUXd-1AEiwmkGsmiefwk~uplKpr7WDZf8mGhAMTMW3U

Salas, D. (2002, 05 30). *La historia del uso del Efecto Doppler en medicina*. Acta Académica.

<http://revista.uaca.ac.cr/index.php/actas/article/view/613>



INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO

Código	FDE 089
Versión	03
Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES Juan Espinosa

FIRMA ASESOR JUAN SE.

FECHA ENTREGA: 15/11/2022

Informe Final

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____