



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SENSOR
INTELIGENTE DE BAJO COSTO PARA DISPOSITIVOS
DE NAVEGACIÓN DE PERSONAS NO VIDENTES
USANDO PLATAFORMAS EMBEBIDAS”

TRABAJO DE TITULACIÓN:
TIPO: DISPOSITIVO TECNOLÓGICO

Presentado para optar al grado académico de:
INGENIERO EN ELECTRÓNICA CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

AUTOR: JOHN ALEXANDER HIDALGO AGUIRRE
DIRECTOR: Ing. JORGE LUIS HERNÁNDEZ AMBATO, Ph.D

Riobamba – Ecuador

2019

©2019, John Alexander Hidalgo Aguirre

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, John Alexander Hidalgo Aguirre, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados de este son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 27 de noviembre de 2019

John Alexander Hidalgo Aguirre
180473112-1

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación: Tipo Dispositivo Tecnológico, **DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE SENSOR INTELIGENTE DE BAJO COSTO PARA DISPOSITIVOS DE NAVEGACIÓN DE PERSONAS NO VIDENTES USANDO PLATAFORMAS EMBEBIDAS**, realizado por el señor **JOHN ALEXANDER HIDALGO AGUIRRE**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

FIRMA

FECHA

Ing. Paúl Romero Riera, PhD.

PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

Ing. Jorge L. Hernández Ambato, PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO

DE TITULACION

Ing. Jorge Luis Paucar Samaniego.

MIEMBRO DE TRIBUNAL

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación lo dedico principalmente a Dios, por haberme dado toda la fuerza necesaria para continuar en este proceso de cumplir una de mis metas. A mis padres Rina Aguirre y Victor Hidalgo, por el amor, trabajo y sacrificio que realizaron todos estos años, gracias a ustedes logré llegar hasta aquí y convertirme en lo que ahora soy. En especial quiero agradecer a mi madre quien supo guiarme todos estos últimos años mediante su ejemplo de esfuerzo y dedicación, fue una gran motivación para lograr todo esto. A mi hermano Dennis Hidalgo, quien me dio todo su apoyo durante toda esta etapa de mi vida. A mi equipo de robótica Nastratech quienes también me apoyaron y han hecho que este trabajo se realice con éxito. A HandEyes quien fue el proyecto de ayuda social para personas no videntes inspirador para que yo realice este trabajo de titulación y en general a todos mis amigos y familiares quienes estuvieron en todo momento junto a mí apoyándome durante toda mi carrera universitaria.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por bendecirme durante mi vida, por guiarme a lo largo de mi existencia y ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

Gracias a mis padres: Rina Aguirre y Victor Hidalgo, por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer en mí en todo momento, por los valores, concejos y principios que me han inculcado durante toda mi vida.

A mi querida institución la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, la cual se convirtió en mi segundo hogar y donde pude desarrollar algunos proyectos durante mi carrera universitaria.

Agradezco a mis docentes de la Carrera de Ingeniería en Electrónica Control y Redes Industriales, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de mi carrera y de manera especial a mi director de tesis Ing. Jorge Hernández quien contribuyó de manera muy significativa con su conocimiento y guía al desarrollo de este trabajo de titulación, el cual va a ayudar a la movilización de varias personas no videntes.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xv
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xvi
RESUMEN.....	xvii
SUMMARY.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO.....	7
1.1. Transductor.....	7
<i>1.1.1. Transductor de entrada.....</i>	<i>7</i>
<i>1.1.2. Transductor de salida.....</i>	<i>7</i>
<i>1.1.3. Principios de transducción.....</i>	<i>7</i>
<i>1.1.3.1. Principio de transducción piezoeléctrico.....</i>	<i>8</i>
<i>1.1.3.2. Principio de transducción ultrasónico.....</i>	<i>11</i>
<i>1.1.3.3. Efecto Doppler.....</i>	<i>11</i>
<i>1.1.4. Características deseables de los transductores.....</i>	<i>13</i>
<i>1.1.4.1. Exactitud.....</i>	<i>13</i>
<i>1.1.4.2. Precisión.....</i>	<i>13</i>
<i>1.1.4.3. Rango de funcionamiento.....</i>	<i>13</i>
<i>1.1.4.4. Velocidad de respuesta.....</i>	<i>13</i>
<i>1.1.4.5. Calibración.....</i>	<i>13</i>
<i>1.1.4.6. Fiabilidad.....</i>	<i>13</i>
1.2. Sensor.....	14
<i>1.2.1. Sensor analógico.....</i>	<i>14</i>
<i>1.2.2. Sensor digital.....</i>	<i>14</i>
1.3. Sensor inteligente.....	14

1.3.1.	Escalas de integración de los sensores inteligentes.	15
1.3.2.	Sensores MEMS	16
1.3.3.	Entradas de un sensor inteligente	17
1.3.4.	Salidas de un sensor inteligente	17
1.3.5.	Acondicionamiento de señal.	17
1.3.6.	Circuitos divisores	18
1.3.6.1.	Divisor de Voltaje.	18
1.3.6.2.	Divisor de corriente.	19
1.3.7.	Circuitos de Puente	20
1.3.8.	Circuitos amplificadores.	24
1.3.9.	Circuitos convertidores.	27
1.3.9.1.	Convertidor analógico-digital (ADC)	27
1.3.9.2.	Filtros	32
1.4.	Tipos de sensores de nivel y proximidad	34
1.4.1.	Ultrasónicos	35
1.4.1.1.	HC - SR04	35
1.4.1.2.	MB1000 LV-MaxSonar-EZ0	37
1.4.1.3.	GY-US42	39
1.4.1.4.	SRF08	40
1.5.	Microcontrolador	42
1.5.1.	PIC Y AVR	43
1.5.1.1.	Comunicación I2C	43
1.5.1.2.	Interfaz I2C	44
1.5.1.3.	Direcciones del protocolo I2C	44
1.5.1.4.	Características del protocolo I2C.	45
1.5.1.5.	Componentes del protocolo I2C.	45
1.5.1.6.	Ventajas del protocolo I2C.	46
1.5.2.	Lenguajes de programación e IDE.	46
1.5.3.	Interfaces de Programación.	47
 CAPITULO II		
2.	MARCO METODOLÓGICO	48

2.1.	Requerimientos para el diseño del sensor	49
2.2.	Diseño e implementación del prototipo de sensor inteligente	50
2.2.1.	Selección de hardware	50
2.2.1.1.	<i>Elección del transductor</i>	50
2.2.1.2.	<i>Elección del microcontrolador</i>	51
2.2.2.	Diseño del prototipo de sensor inteligente	53
2.2.3.	Etapa de emisión de pulsos ultrasónicos	54
2.2.4.	Etapa de recepción de pulsos ultrasónicos	55
2.2.5.	Etapa de acondicionamiento de señal.	57
2.2.5.1.	<i>Simulación de filtros del acondicionamiento de señal del sensor MB1000.</i>	57
2.2.6.	Implementación en el protoboard del primer prototipo de sensor inteligente	62
2.2.7.	Evaluación del primer prototipo en protoboard de sensor inteligente.	63
2.2.8.	Diseño del circuito impreso del primer prototipo de sensor inteligente.	65
2.2.9.	Evaluación del primer prototipo en PCB de sensor inteligente	67
2.3.	Optimización del sensor inteligente	68
2.3.1.	Optimización en hardware del sensor inteligente.	68
2.3.1.1.	<i>Diagrama electrónico del sensor inteligente JA-002</i>	69
2.3.1.2.	<i>Diseño del PCB del sensor inteligente optimizado</i>	70
2.3.1.3.	<i>Ensamble final del sensor inteligente optimizado</i>	71
2.3.2.	Optimización de software del sensor inteligente.	71
2.3.2.1.	<i>Algoritmo para la comunicación I2C entre el sensor JA002 y el módulo maestro</i> ...	72
2.3.2.2.	<i>Configuración de la interfaz Realterm desde Matlab.</i>	73
2.3.2.3.	<i>Algoritmo de calibración del sensor inteligente optimizado</i>	74
2.3.2.4.	<i>Algoritmo para el envío de pulsos ultrasónicos del sensor inteligente optimizado</i> ...75	
2.3.2.5.	<i>Evaluación del algoritmo para emisión de pulsos ultrasónicos</i>	76
2.3.2.6.	<i>Configuración de fuses en el Atmega328p</i>	76
2.3.2.7.	<i>Algoritmo para escuchar el eco ultrasónico.</i>	78
2.3.2.8.	<i>Análisis en Matlab de la señal receptada por el sensor inteligente optimizado</i>	79
2.3.2.9.	<i>Algoritmo para encontrar el pulso receptado por el sensor inteligente optimizado</i> .83	
2.4.	Evaluación final del funcionamiento del sensor inteligente optimizado.	85
2.4.1.	Materiales y herramientas para la evaluación del sensor optimizado	85
2.4.1.1.	<i>Arduino Uno</i>	85
2.4.1.2.	<i>Monitor serial IDE Arduino.</i>	86

2.4.2.	<i>Escenario para la evaluación del sensor inteligente optimizado</i>	87
--------	---	----

CAPITULO III

3.	ANALISIS DE RESULTADOS	88
3.1.	Introducción	88
3.2.	Resultados de las pruebas de campo realizadas con el sensor JA-002	88
3.3.	Caracterización del sensor inteligente JA-002	91
3.3.1.	<i>Rango</i>	91
3.3.2.	<i>Alcance</i>	92
3.3.3.	<i>Resolución</i>	92
3.3.4.	<i>Precisión</i>	92
3.3.5.	<i>Exactitud</i>	93
3.3.6.	<i>Repetitividad</i>	93
3.3.7.	<i>Sensibilidad</i>	94
3.4.	Análisis de costos del sensor inteligente JA-002	94
3.5.	Características del sensor inteligente JA-002	95
3.6.	Discusión de resultados	96
3.6.1.	<i>Zona muerta y rango de medición máximo del sensor inteligente JA-002.</i>	96
3.6.2.	<i>Comparación de mediciones de distancia con diferentes tipos de materiales</i>	97
3.6.3.	<i>Comparación del sensor JA-002 con otros sensores ultrasónicos comerciales.</i>	98
3.6.4.	<i>Comparación del costo del sensor JA-002 con otros sensores comerciales.</i>	101
	CONCLUSIONES	103
	RECOMENDACIONES	104

GLOSARIO

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1.	Características del sensor ultrasónico HC-SR04.....	36
Tabla 2-1.	Ventajas y desventajas del sensor ultrasónico HC-SR04.....	37
Tabla 3-1.	Características del sensor ultrasónico MB1000.....	37
Tabla 4-1.	Ventajas y desventajas del sensor ultrasónico MB1000.....	39
Tabla 5-1.	Características del sensor GY-US42.....	39
Tabla 6-1.	Ventajas y desventajas del sensor GY-US42.....	40
Tabla 7-1.	Características del sensor ultrasónico SRF08.....	41
Tabla 8-1.	Ventajas y desventajas del sensor ultrasónico SRF08.....	42
Tabla 1-2.	Requerimientos a cumplir el sensor inteligente.....	49
Tabla 2-2.	Características del transductor FBULS1612P.....	51
Tabla 3-2.	Características del microcontrolador Atmega 328P.....	52
Tabla 4-2.	Materiales para la implementación del primer prototipo de sensor.....	62
Tabla 5-2.	Distancia medida con el primer prototipo de sensor armado en un protoboard...	64
Tabla 6-2.	Distancia medida con el primer prototipo de sensor.....	68
Tabla 7-2.	Materiales para la implementación del prototipo de sensor optimizado.....	69
Tabla 1-3.	Rango del sensor JA-002.....	91
Tabla 2-3.	Precisión del sensor JA-002.....	93
Tabla 3-3.	Intervalos de entrada y salida del sensor inteligente JA-002.....	94
Tabla 4-3.	Costo de materiales del sensor JA-002.....	94
Tabla 5-3.	Costo de materia prima y mano de obra del sensor JA-002.....	95
Tabla 6-3.	Características del sensor inteligente JA-002.....	95
Tabla 7-3.	Comparación de resultados obtenidos con JA-002 a diferentes distancias.....	97
Tabla 8-3.	Comparación del sensor JA-002 frente a otros sensores ultrasónicos.....	98
Tabla 9-3.	Comparación del costo del sensor JA-002 con otros sensores ultrasónicos.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1.	Principios de transducción.....	8
Figura 2-1.	Material piezoeléctrico en su estado normal.....	8
Figura 3-1.	Material piezoeléctrico polarizado.....	9
Figura 4-1.	Efecto piezoeléctrico inverso.....	9
Figura 5-1.	Transductor de Langevin.....	10
Figura 6-1.	Reflexión, absorción y transmisión de una onda.....	11
Figura 7-1.	Efecto Doppler.....	12
Figura 8-1.	Principio de transducción ultrasónico.....	12
Figura 9-1.	Sensor inteligente.....	15
Figura 10-1.	Primer modo de integración de un sensor inteligente.....	15
Figura 11-1.	Segundo modo de integración de un sensor inteligente.....	15
Figura 12-1.	Tercer modo de integración de un sensor inteligente.....	16
Figura 13-1.	Cuarto modo de integración de un sensor inteligente.....	16
Figura 14-1.	Configuración de un sensor MEMS.....	17
Figura 15-1.	Sistema de medición.....	18
Figura 16-1.	Circuito divisor de voltaje.....	18
Figura 17-1.	Circuito divisor de corriente.....	19
Figura 18-1.	Puente de Wheatstone.....	21
Figura 19-1.	Configuraciones del puente de Wheatstone.....	22
Figura 20-1.	Circuitos de linealización de puentes de Wheatstone.....	23
Figura 21-1.	Puentes de Wheatstone de corriente constante.....	24
Figura 22-1.	Circuito de un amplificador operacional.....	24
Figura 23-1.	Símbolo del amplificador operacional.....	25
Figura 24-1.	Amplificador operacional en lazo abierto.....	26
Figura 25-1.	Amplificador operacional en realimentación.....	26
Figura 26-1.	Configuraciones básicas de amplificadores operacionales.....	27
Figura 27-1.	ADC de aproximaciones sucesivas.....	29
Figura 28-1.	ADC paralelo de 3 bits.....	30
Figura 29-1.	Canal ADC.....	31
Figura 30-1.	ADC integrador.....	31
Figura 31-1.	ADC Sigma-Delta.....	32
Figura 32-1.	Modelo de bloque de un filtro.....	33
Figura 33-1.	Tipos de filtros pasivos.....	34
Figura 34-1.	Sensor HC-SR04.....	35

Figura 35-1.	Diagrama de tiempos del sensor ultrasónico HC-SR04.....	36
Figura 36-1.	Sensor ultrasónico MB1000.....	37
Figura 37-1.	Diagrama de tiempos del sensor ultrasónico MB1000.....	38
Figura 38-1.	Sensor ultrasónico GY-US42.....	39
Figura 39-1.	Sensor ultrasónico SRF08.....	41
Figura 40-1.	Microcontroladores, versión encapsulado PDIP.....	42
Figura 41-1.	Esquema de la interfaz del bus I2C.....	44
Figura 1-2.	Etapas de desarrollo del sensor inteligente.....	48
Figura 2-2.	Transductor FBULS1612P.....	51
Figura 3-2.	Microcontrolador Atmega 328P.....	53
Figura 4-2.	Diagrama electrónico del prototipo de sensor inteligente.	54
Figura 5-2.	Diagrama de comprobación del funcionamiento de sensor inteligente.	54
Figura 6-2.	Diagrama de flujo para emitir 8 pulsos ultrasónicos.....	55
Figura 7-2.	Diagrama de flujo para recepción del eco y emisión del pulso PWM.....	56
Figura 8-2.	Acondicionamiento de señal del sensor MB1000.....	57
Figura 9-2.	Primera etapa de acondicionamiento de señal.....	58
Figura 10-2.	Configuración del generador de señal.....	58
Figura 11-2.	Circuito de simulación para la recepción de señal eco.....	59
Figura 12-2.	Señales resultantes de la primera etapa en PR1, PR2 y PR3.....	60
Figura 13-2.	Segunda etapa de acondicionamiento de señal.....	60
Figura 14-2.	Señales resultantes de la segunda etapa del acondicionamiento de señal.....	61
Figura 15-2.	Resultantes al sumar todas las etapas del acondicionamiento de señal.....	61
Figura 16-2.	Implementación en protoboard del sensor inteligente.....	63
Figura 17-2.	Escenario de prueba para el primer prototipo de sensor.....	63
Figura 18-2.	Diseño del PCB para el primer prototipo de sensor inteligente.....	66
Figura 19-2.	PCB profesional del primer prototipo de sensor.....	67
Figura 20-2.	Implementación de PCB profesional del primer prototipo de sensor.....	67
Figura 21-2.	Diagrama electrónico del sensor optimizado.....	69
Figura 22-2.	PCB optimizada del sensor inteligente JA-002.....	70
Figura 23-2.	Implementación de PCB optimizada del sensor JA-002.....	71
Figura 24-2.	Ensamble final del sensor JA-002.....	71
Figura 25-2.	Diagrama para la comunicación entre el sensor y el computador.....	72
Figura 26-2.	Diagrama del algoritmo para comunicación I2C.....	72
Figura 27-2.	Algoritmo para abrir la interfaz Realterm desde Matlab.....	73
Figura 28-2.	Algoritmo para la función de calibración.....	74
Figura 29-2.	Diagrama de la función sonar_enviar.....	75
Figura 30-2.	Evaluación de la señal de pulsos ultrasónicos.....	76

Figura 31-2.	Configuración interna de los fuses en el microcontrolador.....	77
Figura 32-2.	Configuración interna de los fuses en el microcontrolador.....	77
Figura 33-2.	Configuración interna de los fuses en el microcontrolador.....	78
Figura 34-2.	Diagrama de la función sonar_escuchar.....	79
Figura 35-2.	Procesamiento de la señal receptada en el sensor optimizado – 3m.....	80
Figura 36-2.	Procesamiento de la señal receptada en el sensor optimizado – 80cm.....	80
Figura 37-2.	Procesamiento de la señal receptada en el sensor optimizado -3m 1500us.....	82
Figura 38-2.	Procesamiento de la señal receptada en el sensor optimizado 80cm -1500us.....	82
Figura 39-2.	Procesamiento de señal receptada en el sensor optimizado apuntando al cielo...	83
Figura 40-2.	Diagrama del algoritmo para detectar el pulso receptado en el sensor JA-002....	84
Figura 41-2.	Arduino UNO.....	85
Figura 42-2.	Monitor serial IDE Arduino.....	86
Figura 43-2.	Configuración del monitor serial IDE Arduino.....	86
Figura 44-2.	Esquema del escenario para la evaluación final del sensor optimizado.....	87
Figura 1-3.	Proceso para el análisis de resultados.....	88

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3.	Mediciones con el sensor JA-002 frente a un objeto de cartón.....	89
Gráfico 2-3.	Mediciones con el sensor JA-002 frente a un objeto de plástico.....	89
Gráfico 3-3.	Mediciones con el sensor JA-002 frente a un objeto de madera.....	90
Gráfico 4-3.	Mediciones con el sensor JA-002 frente a una persona con su vestimenta.....	90
Gráfico 5-3.	Rango del sensor JA-002.....	91
Gráfico 6-3.	Repetitividad del sensor JA-002 a 36cm, rango de 5s e intervalo de 100ms.....	93
Gráfico 7-3.	Zona muerta del sensor JA-002 frente a diferentes tipos de materiales.....	96
Gráfico 8-3.	Comparación de mediciones de distancia con diferentes tipos de materiales	97
Gráfico 9-3.	Corriente de trabajo de diferentes sensores ultrasónicos.....	99
Gráfico 10-3.	Rango de distancia de los diferentes tipos de sensores ultrasónicos.....	100
Gráfico 11-3.	Resolución de los diferentes tipos de sensores ultrasónicos.....	100
Gráfico 12-3.	Precio de los diferentes tipos de sensores ultrasónicos.....	102

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO A:** Tabulación de datos de las medidas de distancia obtenidas con el sensor JA-002 frente a diferentes objetos de diversos materiales.
- ANEXO B:** Tabulación de datos de las medidas de distancia obtenidas con el sensor JA-002 en un rango de 30cm a 218cm con el respectivo error calculado.
- ANEXO C:** Ensamble del sensor inteligente JA-002
- ANEXO D:** Pruebas de campo del sensor inteligente JA-002
- ANEXO E:** Datasheets

RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realizó el diseño e implementación de un prototipo de sensor inteligente de bajo costo para dispositivos de navegación de personas no videntes usando plataformas embebidas. Para el desarrollo del sensor inteligente se establecieron varios requerimientos en base al estudio de otros sensores ultrasónicos y del dispositivo Eyeclip el cual ayuda a las personas no videntes a su movilización, entre los más importantes se mencionan las dimensiones, bajo consumo de corriente y voltaje que el sensor debe tener. El primer prototipo implementado tenía dos transductores para la emisión y recepción de los pulsos ultrasónicos pero el funcionamiento y las dimensiones que tenía no fueron las adecuadas para la utilización en el dispositivo Eyeclip. La optimización del sensor inteligente fue en base al funcionamiento que tenía el primer prototipo para lo cual se optó por mejorar el algoritmo de recepción de pulsos ultrasónicos a través de un análisis de la señal receptada en Matlab, logrando así establecer un nuevo algoritmo que detecta el primer pulso ultrasónico receptado por el transductor para calcular la distancia hacia el objetivo, dando como resultado el prototipo final optimizado de sensor inteligente JA-002. A partir del diseño implementado se realizó diferentes pruebas de campo con varios tipos de materiales a detectar como la madera, plástico, ropa y cartón. Tabulando las medidas obtenidas se obtuvo un rango de medición del sensor inteligente de 30cm a 218cm lo cual lo hace ideal para el uso en dispositivos que ayuden a la movilización de personas no videntes. Finalmente, se concluye que el sensor inteligente JA-002 implementado cumple con los requerimientos planteados porque funciona con un voltaje de 3.3V, una corriente de 4.8mA, tiene un bajo costo y utiliza un solo transductor logrando así el mínimo dimensionamiento posible.

Palabras clave: <TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERÍA>, <ELECTRÓNICA>, <SENSOR>, <TRANSDUCTOR>, <ONDAS ULTRASÓNICAS>.

SUMMARY

In this titling work, the design and implementation of a low-cost intelligent sensor prototype for navigation devices of blind people using embedded platforms were carried out. Were established Several requirements for the development of the smart sensor based on the study of other ultrasonic sensors and the Eyeclip device which helps the blind people to their mobilization, among the most important are the dimensions, low current and voltage consumption that the sensor must-have. The prototype implemented had two transducers for the emission and reception of the ultrasonic pulses, but the operation and dimensions were not suitable for use in the Eyeclip device. The optimization of the intelligent sensor was based on the operation of the first prototype, for which it was decided to improve the algorithm of reception of ultrasonic pulses through an analysis of the signal received in Matlab, thus establishing a new algorithm that detects the first ultrasonic pulse received by the transducer to calculate the distance to the target, resulting in the final optimized prototype of intelligent sensor JA-002. From the implemented design, different field tests were carried out with various types of materials to be detected, such as wood, plastic, clothing and cardboard. By tabulating the measurements obtained, a measuring range of the smart sensor from 30 cm to 218 cm was obtained, which makes it ideal for use in devices that help the mobilization of blind people. Finally, it concludes that the intelligent sensor JA-002 implemented meets the requirements raised because it works with a voltage of 3.3V, a current of 4.8mA, has a low cost and uses a single transducer thus achieving the minimum possible sizing.

Key words: <ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCES>, <ELECTRONIC ENGINEERING AND TECHNOLOGY>, <OBSTACLE DETECTION>, <VISUAL DISABILITY>, <SENSOR>, <TRANSDUCTOR>, <ULTRASONIC WAVES>.

INTRODUCCIÓN

Los sensores inteligentes o Smart Sensors fueron desarrollados desde años atrás, siendo uno de los temas más apasionantes en el mundo de la electrónica. Hasta la actualidad se han desarrollado cuatro tendencias en el mundo de sensores inteligentes en las cuales se habla sobre los procedimientos para crearlos tomando en cuenta varios aspectos necesarios para su correcto funcionamiento. La característica principal de este tipo de sensores se da debido al uso de un sensor integrado en un solo chip con un procesador, es decir, es el conjunto de uno o varios sensores con algún instrumento de acondicionamiento de señal enlazados en una misma unidad física (Custodio *et al.*, 1999: p. 14).

Según los datos otorgados por la Organización Mundial de la Salud, existen aproximadamente 285 millones de personas con discapacidad visual, de las cuales 39 millones son completamente ciegas y 246 millones presentan baja visión, además, aproximadamente un 90% de la carga mundial de discapacidad visual se concentra en países con bajos recursos económicos (OMS, 2014). Por otra parte, en el Ecuador, según datos del CONADIS las personas con discapacidad visual son 363000 aproximadamente y se encuentran repartidos en todos los estratos socioeconómicos (Cazar *et al.*, 2017, p. 196).

Por esta razón se han desarrollado varios sistemas electrónicos como ayuda a personas no videntes para mejorar su movilidad, entre ellos tenemos: El bastón blanco, el cual en la parte superior posee una agarradera de goma y en la parte inferior una puntilla metálica rodante.

Egara, es un proyecto creado en España en el 2013, el cual consta de tres sensores para ayuda al invidente a detectar obstáculos existentes a su alrededor, activando así una manilla vibratoria. Ultracane, posee sensores ultrasónicos de rango estrecho y motores vibratorios conectados al bastón, este dispositivo se encuentra en el mercado mundial a un precio de 635 euros. Smartcane, es un proyecto patrocinado con el Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT) y tuvo alto impacto debido al alcance social del mismo, este bastón ayuda a la percepción espacial, porque puede detectar la presencia y ausencia de objetos en los alrededores, además en comparación con el bastón blanco, la distancia de detección se incrementa desde 0.5 metros a 3 metros, se informa de la presencia de objetos antes de tocarlos logrando así la prevención del contacto no deseado.

La mayoría de los proyectos mencionados anteriormente utilizan sensores previamente fabricados con sus características ya establecidas como: rango de medición, zona muerta, amplitud, etc.

Muchos de estos sensores tienen un costo elevado porque son diseñados en otros países y su importación es costosa. Los sensores ultrasónicos son una solución rentable para el problema de la medición de distancia cuando se requiere una operación sin contacto, son robustos, intrínsecamente seguros y capaces de una precisión notable cuando se utilizan en entornos silenciosos (Konolige *et al.*, 2008, p. 3002)

Uno de los proyectos para la movilización de personas no videntes destacado a nivel de América latina es el producto Eyeclip; está cotizado alrededor de 100\$ lo cual lo hace muy costoso para las personas con escasos recursos económicos en donde principalmente se da la discapacidad visual, uno de los materiales por el cual el producto final tiene un precio alto es el sensor MB1000, tiene un precio alrededor de 50\$, (MaxBotix, 2012, p. 2). Hasta la presente fecha se han desarrollado varios estudios con diferentes sensores de distancia, los cuales son de bajo costo pero lamentablemente los resultados al momento de realizar pruebas de campo mediante la utilización de diferentes obstáculos frente a personas no videntes no han sido favorables porque las etapas de acondicionamiento de señal y filtrado de los sensores no han sido óptimos y de igual forma la distancia de sensado no ha sido la más adecuada para el desarrollo del proyecto.

Por lo anteriormente expuesto se propone desarrollar un sensor inteligente de bajo costo para medir distancias como ayude al soporte en la navegación de personas no videntes usando plataformas embebidas, con el fin de abaratar el costo del producto Eyeclip y así se logre incluso donar el producto a varias personas no videntes. Este producto tuvo una gran demanda y ayudó a mejorar la matriz productiva del Ecuador porque se ha exportado a varios países como México, Perú y Colombia, pero en los últimos meses se ha notado una caída debido a su precio, finalmente realizando una proyección a futuro mediante la fabricación de 1000 productos con la inserción de un propio sensor fabricado en Ecuador, este producto llegará a costar alrededor de 30\$.

ANTECEDENTES

Los sensores inteligentes o Smart sensors han sido desarrollados desde años atrás, siendo uno de los temas más apasionantes para el mundo de la electrónica. El primer sensor inteligente fue desarrollado por Honeywell en el año 1969 como una solución al problema de compensación de temperatura en los sensores de presión, para el sistema de aire en los aviones DC-9 (Custodio *et al.*, 1999, p. 14). Estaba formado por dos piezoresistores medidores de presión y dos capacitores para crear un desplazamiento de fase. Estos elementos estaban realimentados y conectados a un inversor para crear un oscilador. La frecuencia de salida era proporcional a la constante de tiempo RC, y por ende a la presión. Tiempo después Toyota Research presento otro sensor de presión

similar. Ambas empresas, sin imaginárselo, estaban empezando una revolución sin par en las tecnologías de sensores (Custodio *et al.*, 1999, p. 14).

La siguiente generación de sensores inteligentes fue introducida nuevamente por Honeywell en los años 80s. La presentó en dos aplicaciones: Una para el control de procesos y otra para aplicaciones aeroespaciales (Custodio *et al.*, 1999, p. 14). Ambos estaban formados por un grupo de sensores multiplexados, conectados a un convertidor V/F (Tensión/frecuencia). La frecuencia obtenida era procesada por un microprocesador tipo DSP, y la salida se llevaba a un convertidor D/A. La salida era acorde al estándar analógico de 4 mA a 20 mA. El software tenía compensación de la presión estática, calibración remota del rango, direccionalidad y diagnóstico. Los sensores eran de presión diferencial estática y temperatura en el caso del control de procesos y presión absoluta y temperatura en el caso aeroespacial (Custodio *et al.*, 1999, p. 15).

En la actualidad hay cuatro grandes tendencias en el diseño de sensores inteligentes: La primera es el desarrollo de sensores inteligentes integrados los cuales consisten básicamente en integrar todo el dispositivo junto al sensor, algunos ejemplos son: Un oscilador controlado por tensión basado en un flip-flop tipo D presentado por Xi. Otro de los sensores es usado para la medición angular o linear (tipo resistivo sin contacto), con conversión a frecuencia mediante el uso de un oscilador modificado de Martín, desarrollado por Li y Meijer (Custodio *et al.*, 1999, p. 15).

La segunda tendencia en sensores inteligentes es el uso de sistemas de conversión integrados, lo cual deja todo el procesamiento y parte del acondicionamiento en una computadora conectada a la red. Scheriber propone un sistema de interfaz capaz de realizar solo la captura y conversión, y dejar todo el procesamiento para corregir los errores a un PC. De esta manera se podrá proponer un sistema avanzado de eliminación de errores, tal como los de lógica inteligente (Custodio *et al.*, 1999, p. 15). También se podría usar un microcontrolador muy pequeño (como la serie PIC2XXX de Micrpchip Technology), y construir un sistema de adquisición de señales (multicanal) muy económico.

Para la tercera tendencia se propone el desarrollo de sistemas de medida integrados con el AD654 (convertidor V/F) de Analog Devices el cual permite acoplar termopares y galgas directamente, las ideas más revolucionarias pueden encontrarse en estos dos trabajos: El USIC (Universal sensor interface chip) desarrollado por ERA Technology Ltd. (Custodio *et al.*, 1999, p. 16). Este chip posee comparadores, demoduladores E/A, filtros digitales, interfaz serie y paralelo, convertidores DAC, multiplexor, memoria RAM y un microprocesador RISC. Los convertidores son de 20 bits. Los multiplexores pueden seleccionar tres fuentes de entrada para cada convertidor, haciendo un

direccionamiento total de 6 sensores. La salida digital puede ir por RS482 / RS232, o paralelo. Este sistema sin embargo fue retirado del mercado por ser demasiado costoso.

Otra de las ideas revolucionarias es el UTI (Universal Transducer Interface), creado por Van der Goes y Meijer, (Custodio *et al.*, 1999, p. 16), puede ser utilizado para sensores capacitivos, RTD, termistores, puentes de resistencia y potenciómetros. Se basa en una red de interruptores utilizados para seleccionar el tipo de sensor a utilizar. La salida de la red se conecta a un convertidor de carga a periodo (oscilador de relajación) y éste genera la salida en frecuencia del sistema. El circuito tiene una resolución de 16 bits en un rango de medida de 1ms a 100ms. Es muy económico porque está desarrollado en tecnología CMOS. Opera con una fuente simple (3,3 V a 5,5 V), posee auto-calibración de offset y ganancia, medida 2/3/4 hilos, suprime interferencias de 50/60 Hz, y todo en un encapsulado DIP de 16 patillas.

Finalmente, la cuarta tendencia en sensores inteligentes se encuentra en el desarrollo de sensores de bajo coste no integrados. En el ámbito discreto se han planteado algunas técnicas de conversión a frecuencia más económicas. Un circuito muy simple formado por dos inversores y un comparador (Custodio *et al.*, 1999, p. 16). Puede alcanzar los 9 bits de resolución y, al promover una salida, relación entre un voltaje de referencia y el voltaje de interés, permite reducir algunas fuentes de error. Mochizuke y Watanabe proponen un circuito para el procesamiento de señal de alta precisión en sensores capacitivos. Está basado en un oscilador de relajación, es muy simple porque está formado por 4 operacionales. Su señal de salida es en frecuencia, siendo esta una relación de valores entre sensores capacitivos (medida ratiométrica). Se puede detectar cambios pequeños de capacitancia de 0.1% en un tiempo total de 10 μ s (Custodio *et al.*, 1999, p. 16).

En estos trabajos se obtiene la relación de la señal medida respecto a una señal de referencia. De esta manera se reduce el efecto de elementos indeseables como son la temperatura y las variaciones en la fuente de alimentación, el efecto de elementos secundarios en la medida, la corrección de offset y errores de sensibilidad, etc.

En la actualidad se han desarrollado varios sistemas electrónicos capaces de ayudar a las personas no videntes a mejorar su movilidad entre ellos tenemos: El bastón blanco, el cual en la parte superior posee una agarradera de goma y en la parte inferior una puntilla metálica rodante. Egara, es un proyecto creado en España en el 2013, el cual consta de tres sensores para ayuda al invidente a detectar obstáculos existentes a su alrededor, activando así una manilla vibratoria. Ultracane, posee sensores ultrasónicos de rango estrecho y motores vibratorios conectados al bastón, este dispositivo se encuentra en el mercado mundial a un precio de 635 euros. Smartcane, es un proyecto patrocinado con el Instituto de Tecnología de Massachussets (MIT) y tuvo alto impacto

debido al alcance social del mismo, este bastón ayuda a la percepción espacial, porque puede detectar la presencia y ausencia de objetos en los alrededores, además en comparación con el bastón blanco, la distancia de detección se incrementa desde 0.5 metros a 3 metros, se informa de la presencia de objetos antes de tocarlos logrando así la prevención del contacto no deseado.

En la tesis “Diseño y Construcción de un Bastón Electrónico como Ayuda a Personas con Discapacidad Visual”, realizado por Luis Santillán y María Nuñez de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, se ha creado un Bastón electrónico para ayudar en la navegación a personas no videntes en donde se han empleado 5 sensores ultrasónicos Ping Parallax, el bastón funciona mientras cada uno de los sensores va detectando los obstáculos de acuerdo a la distancia, este dispositivo no solo permite a la persona invidente detectar obstáculos si no también subir bajar gradas e inclusive detectar agujeros (Santillán y Nuñez, 2010: p. 75).

Los proyectos mencionados anteriormente los sensores ya están previamente fabricados con sus características ya establecidas como: rango de medición, zona muerta, amplitud, etc. Muchos de estos sensores tienen un costo elevado porque son diseñados en otros países y su importación es costosa. Los sensores ultrasónicos son una solución rentable para el problema de la medición de distancia cuando se requiere una operación sin contacto (Konolige *et al.*, 2008, p. 3008).

Son robustos, intrínsecamente seguros y capaces de una precisión notable cuando se utilizan en entornos silenciosos, pero sufren ruido acústico el cual reduce enormemente su rendimiento, por ese motivo se ha decidido crear un sensor inteligente barato y fácil de implementar con las características que los sistemas de navegación para no videntes requieren basándonos en cálculos matemáticos y estudios de ondas para mejorar las características de los sensores existentes tal como: distancia, velocidad del sonido, ondas ultrasónicas, etc.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo desarrollar un prototipo de sensor inteligente de bajo costo para dispositivos de navegación de personas no videntes usando plataformas embebidas?

SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo Identificar los dispositivos de ultrasonido disponibles en el mercado que ayuden a la detección de obstáculos, enfatizando en sus características, ventajas y desventajas?

¿Cuáles son los requerimientos de diseño y operación que debe cumplir el prototipo a implementar?

¿Qué software y hardware son adecuados para llevar a cabo la implementación del prototipo diseñado?

¿Cómo se evaluará que el prototipo cumpla con los requerimientos planteados?

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un prototipo de sensor inteligente de bajo costo para dispositivos de navegación de personas no videntes usando plataformas embebidas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los dispositivos de ultrasonido disponibles en el mercado que ayuden a la detección de obstáculos, enfatizando en sus características, ventajas y desventajas.
- Especificar los requerimientos de diseño y funcionamiento que debe cumplir el prototipo de sensor inteligente necesarios para establecer el diseño correspondiente.
- Implementar el prototipo diseñado utilizando herramientas de software y componentes hardware que cumplan con los requerimientos y parámetros establecidos durante la fase de diseño.
- Evaluar el costo y funcionamiento del sensor inteligente mediante varias pruebas de campo con diferentes obstáculos a detectar.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los tipos de transductores existentes en la actualidad, principios de transducción y sus características. Además, se menciona los tipos de sensores de nivel y proximidad disponibles en el mercado que ayuden a la detección de obstáculos, enfatizando en sus características, ventajas y desventajas, así como los tipos de acondicionamiento de señal para su correcta adquisición y procesamiento por parte de un sensor inteligente. Finalmente se realiza una comparación entre las diferentes familias de microcontroladores para lograr una mejor claridad en cuanto a sus interfaces y ambientes de programación.

1.1. Transductor

El transductor forma parte de un actuador o sensor y es capaz de transformar una variable física en otra con una magnitud diferente. Diferencia entre un transductor y un sensor: el primero solamente cambia el dominio de la variable, mientras que el sensor entrega una salida útil la cual puede ser utilizada en un sistema de procesamiento de señal. De manera general un transductor cambia la variable física a una señal eléctrica, movimiento, presión, flujo, etc. (Corona *et al.*, 2014: p. 2). Existen dos tipos de transductores los cuales son:

1.1.1. *Transductor de entrada*

Se usa como parte de un sensor, mide una variable física y la salida es utilizada por un sistema de procesamiento de señal (Corona *et al.*, 2014: p. 3).

1.1.2. *Transductor de salida*

Se usa como parte de un sistema de actuación, es decir, convierte una señal emitida por el sistema de procesamiento de la información en una acción tangible en el entorno (Corona *et al.*, 2014: p. 3).

1.1.3. *Principios de transducción*

Se denomina principio de transducción al principio físico de transformación de la energía y existen varios, los cuales se pueden apreciar en la Figura. 1-1.

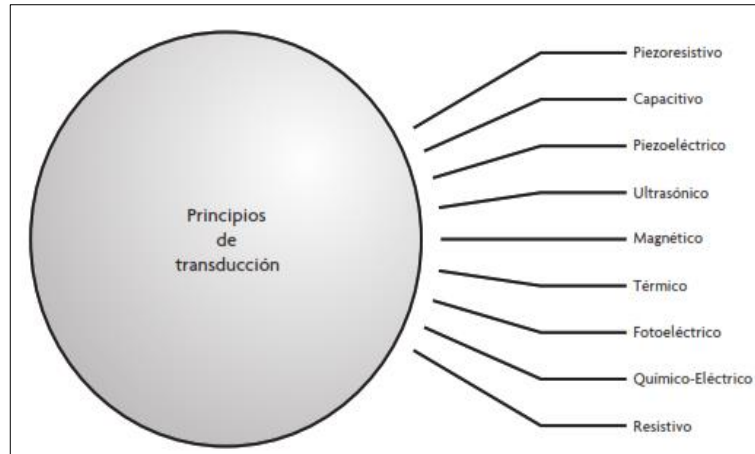


Figura 1-1. Principios de transducción.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 3)

1.1.3.1. Principio de transducción piezoeléctrico

Los hermanos Pierre y Jacques Curie fueron quienes descubrieron la piezoelectricidad la cual presentan algunos materiales debido a sus características intrínsecas. Estos materiales se caracterizan por generar carga eléctrica cuando una fuerza externa es aplicada sobre ellos.

Esta transducción se basa en el cambio de polarización del material debido a la deformación, en la Figura 2-1 se observa un trozo de material piezoeléctrico en su estado normal en donde cada elemento del material tiene un dipolo, el cual tiene un extremo es más negativo que el otro (Corona *et al.*, 2014: p. 7).

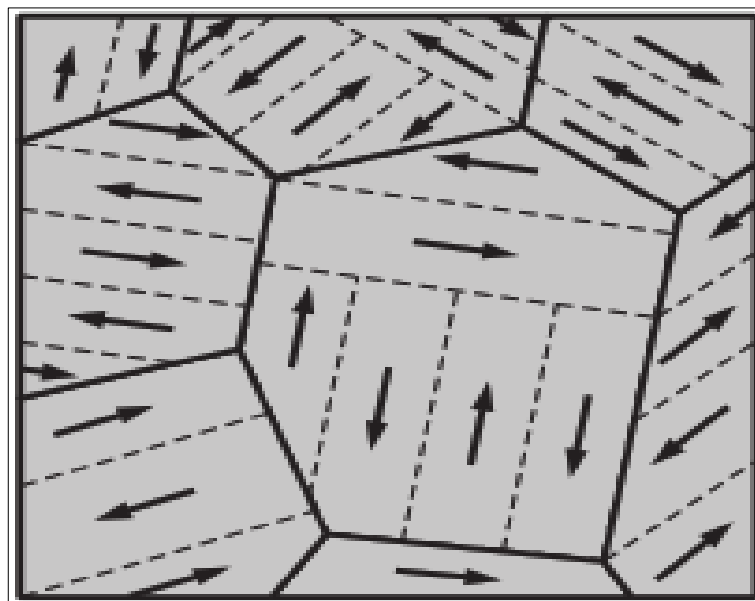


Figura 2-1. Material piezoeléctrico en su estado normal.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 7)

Cuando el material es sometido a una deformación por extensión o contracción los dipolos se alinean y se puede medir un voltaje tal como se muestra en la Figura 3-1 (Corona *et al.*, 2014: p. 7).

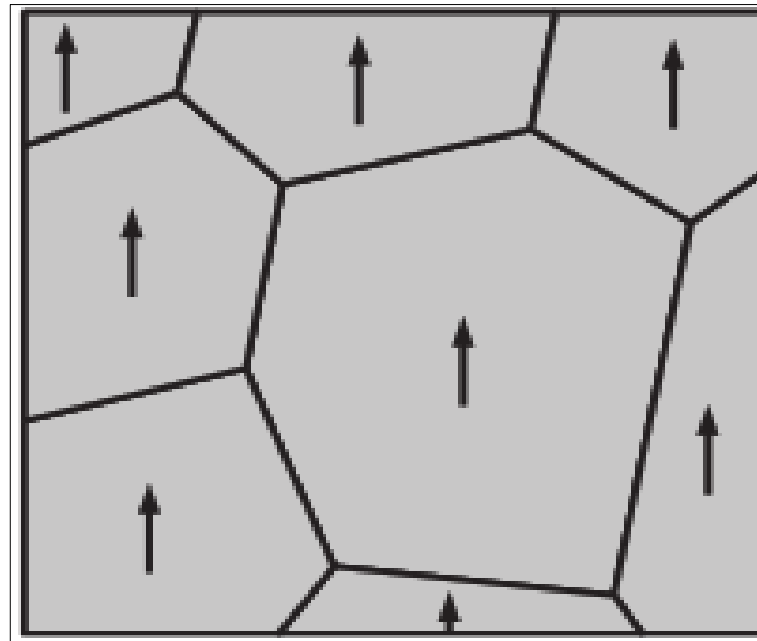


Figura 3-1. Material piezoeléctrico polarizado.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 7)

Si el material piezoeléctrico se encuentra en reposo y se conecta una batería, el campo eléctrico de la batería hace que el material se extienda o se contraiga dependiendo de la polarización, a este proceso se le llama efecto piezoeléctrico inverso apreciable en la Figura 4-1 (Corona *et al.*, 2014: p. 7).

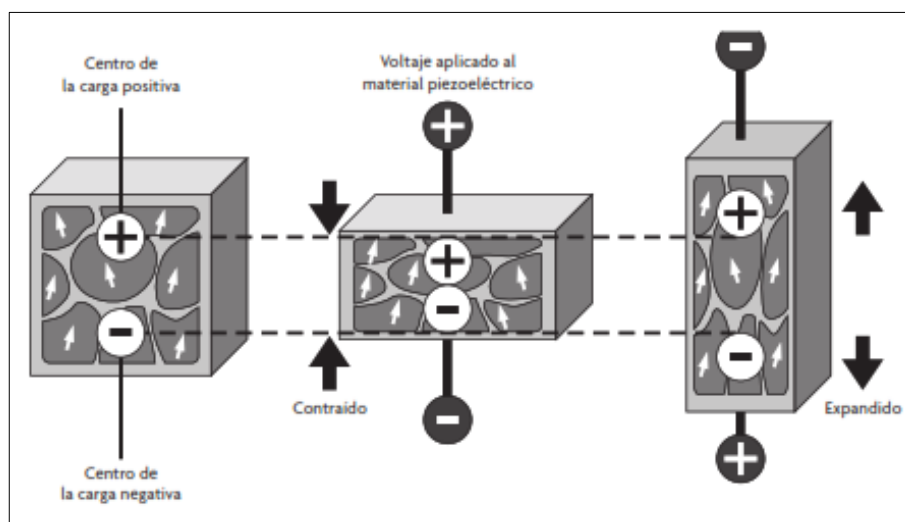


Figura 4-1. Efecto piezoeléctrico inverso.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 7)

El transductor de Langevin es una arquitectura muy utilizada en la actualidad para aplicaciones de baja frecuencia, también es llamado de sándwich o de Tonpiliz el cual está constituido por anillos piezoeléctricos ordenados en pares como se muestra en la Figura 5-1, donde se observa de mejor manera este tipo de transductor (Corona *et al.*, 2014: p. 8).

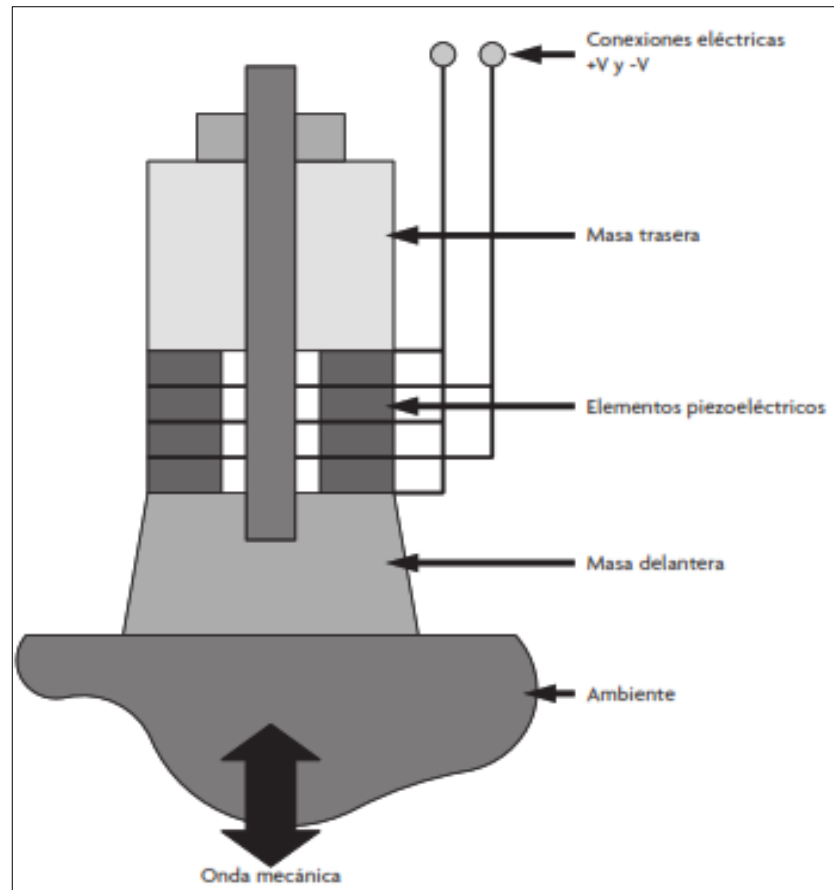


Figura 5-1. Transductor de Langevin

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 8)

En estos transductores los anillos convierten la energía eléctrica en mecánica, la cual es trasladada a la estructura metálica donde están sumergidos. La masa posterior de este transductor sirve para absorber la energía emitida por el piezoeléctrico en la parte distal y la masa delantera sirve como protección para los anillos del piezoeléctrico, estos diseños son muy utilizados en sonares (Corona *et al.*, 2014: p. 8).

Los piezoeléctricos son muy susceptibles a la temperatura porque se puede dar una dilatación del material con lo cual provocaría ruido al momento del sensado, por el contrario, una de las ventajas se da cuando la señal emitida es proporcional a la deformación del material lo cual provoca una linealidad a la salida (Custodio *et al.*, 1999: p. 14).

1.1.3.2. Principio de transducción ultrasónica

La onda ultrasónica está por encima de la frecuencia audible y es utilizada para detectar objetos en medios gaseosos, líquidos y sólidos. En la actualidad son muy utilizadas porque no se atenúan con rapidez en objetos metálicos, debido a esto el principio de transducción ultrasónico sea el más usado en varias aplicaciones como imagenología, diagnóstico médico, sonar, giroscopios de vibración, detección de fallas en metales, etc. (Corona *et al.*, 2014: p. 9).

Las ondas ultrasónicas se propagan a una velocidad de entre 300 m/s y 10000 m/s y son detectadas con facilidad, su velocidad depende del medio por el cual se transporta porque no es lo mismo propagar una onda en un medio líquido que en un gaseoso (Corona *et al.*, 2014: p. 9).

A la conversión de la energía mecánica ultrasónica en otro tipo de energía se conoce como principio de transducción ultrasónica; por tanto, si la onda mecánica topa un objeto una parte será transmitida, otra absorbida y otra reflejada tal como se ilustra en la Figura 6-1. Debido a este fenómeno existente en los transductores ultrasónicos se utilizan principalmente para medir la velocidad de regreso de la onda, tiempo de propagación y atenuación.

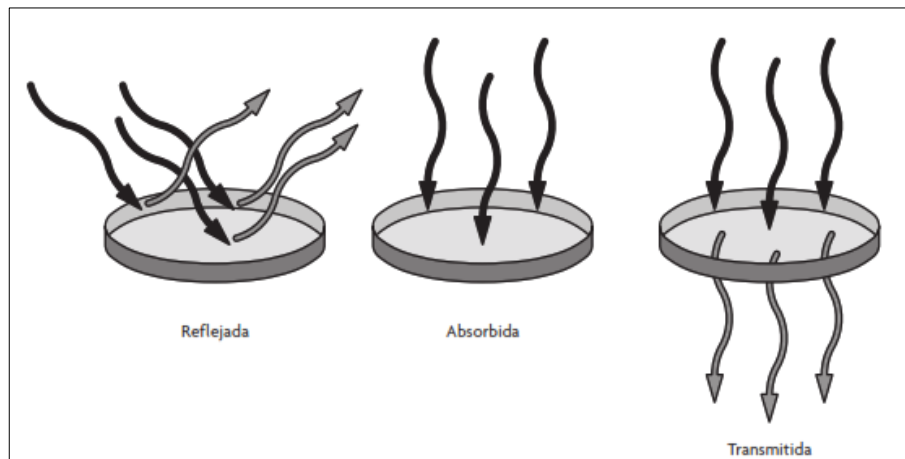


Figura 6-1. Reflexión, absorción y transmisión de una onda.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 9)

1.1.3.3. Efecto Doppler

El efecto Doppler es la base de los transductores ultrasónicos porque se produce cuando existe un aparente cambio en la frecuencia de radiación en un medio ultrasónico debido a un movimiento relativo entre la fuente emisora de dicha onda y el receptor, la Figura 7-1 muestra el efecto Doppler de una manera sencilla (Corona *et al.*, 2014: p. 9).

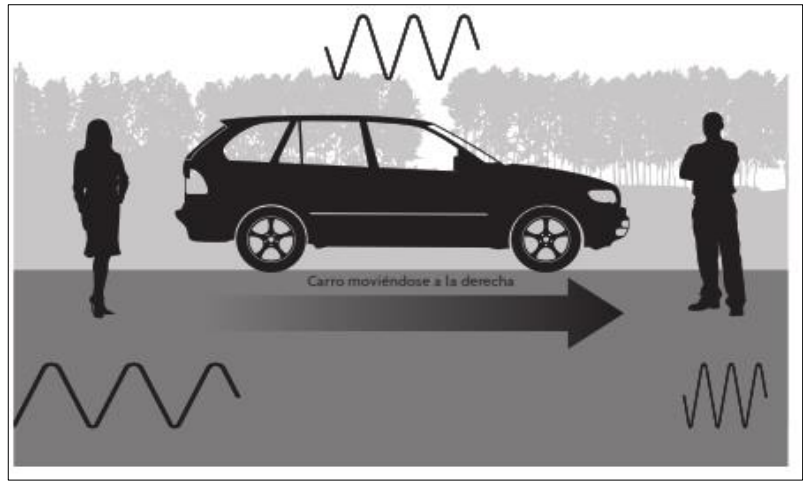


Figura 7-1. Efecto Doppler.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 9)

Para el caso de los transductores ultrasónicos cuando están cerca el emisor y receptor la frecuencia aparente aumenta y si están lejos disminuye. Complementario al efecto Doppler es el uso de un transductor piezoeléctrico porque es necesario generar una señal eléctrica variable, la cual se consigue gracias a la onda mecánica excitada en el piezoeléctrico logrando compresión o tensión en el transductor.

En la Figura 8-1 se indica el principio de transducción ultrasónica en la cual el emisor y receptor están ubicados de forma continua (Corona *et al.*, 2014: p. 9).

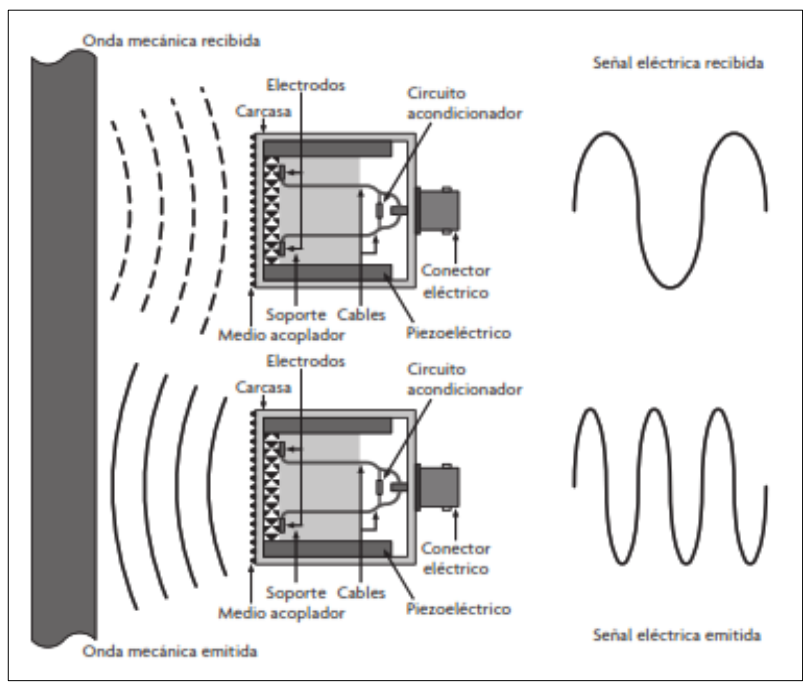


Figura 8-1. Principio de transducción ultrasónico

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 9)

1.1.4. Características deseables de los transductores

Para tener un correcto funcionamiento en un sensor o transductor, éste debe ser bien calibrado. En el proceso de calibración se define la relación existente entre lo medido y la señal de salida convertida (Escalona, 2007, p. 7). Para todo este proceso es importante conocer varias características de los transductores las cuales se detallan a continuación:

1.1.4.1. Exactitud

La exactitud es el valor verdadero de la variable sin detectar errores sistemáticos los cuales pueden ser positivos o negativos, en una medición la exactitud debe ser tan alta como sea posible porque con ello el promedio entre el valor real y el valor detectado tenderá a cero (Escalona, 2007, p. 8).

1.1.4.2. Precisión

La precisión se da cuando existe o no una pequeña variación aleatoria en la medición de cierta variable, en el caso de los transductores o sensores sería perfecto tener una precisión de la medición alta porque así se logrará tener un valor mínimo en la dispersión de los valores de una serie de mediciones (Escalona, 2007, p. 8).

1.1.4.3. Rango de funcionamiento

Todo sensor debe en lo posible ser exacto y preciso en todo su rango de funcionamiento (Escalona, 2007, p. 8).

1.1.4.4. Velocidad de respuesta

El transductor debe ser capaz de responder en un tiempo instantáneo a cualquier cambio existente en la variable medida (Escalona, 2007, p. 8).

1.1.4.5. Calibración

El procedimiento y tiempo que debe tener un sensor para el proceso de calibración deben ser mínimos, es decir, el sensor debe ser de fácil calibración. Además, el sensor no debe necesitar una recalibración frecuente ya que ésta se ve ligada al término desviación la cual tiene que ver con la pérdida gradual de exactitud del sensor que se da en función del tiempo y uso (Escalona, 2007, p. 8).

1.1.4.6. Fiabilidad

El sensor no debe tener fallas durante su trabajo, es decir, debe tener un alto índice de fiabilidad (Escalona, 2007, p. 9).

1.2. Sensor

Es un dispositivo capaz de detectar y medir una cantidad física, cuya salida es una señal eléctrica. Mediante el uso de un sensor se logra la ampliación de los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas que por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos (Corona *et al.*, 2014: p. 17).

1.2.1. Sensor analógico

Es un sensor capaz de proporcionar una señal analógica continua, esta puede ser voltaje o corriente eléctrica (Corona *et al.*, 2014: p. 18).

1.2.2. Sensor digital

Estos sensores producen una señal digital a su salida en la forma de un conjunto de bits de estado en paralelo o a través de pulsaciones, estos transductores tienen la ventaja de tener una mayor compatibilidad al momento de ser conectados a computadoras digitales (Corona *et al.*, 2014: p. 18).

1.3. Sensor inteligente

El término sensor inteligente fue propuesto por primera vez a mediados de la década de 1980. Según la IEEE se define como “aquel sensor capaz de proveer funciones más allá de las necesarias para generar una correcta representación de una cantidad sensada o controlada.

Esta función típicamente simplifica la integración del transductor en aplicaciones en un ambiente de red”. Un sensor inteligente incluye, por lo común, una porción del sistema de control requerido para una cierta aplicación, protocolos especiales de comunicación, memoria, convertidores digitales-analógicos o analógicos-digitales, etc. En la Figura 9-1 se observa la representación de un sensor inteligente en forma de diagrama a bloques (Corona *et al.*, 2014: p. 21).

No todos los sensores inteligentes poseen un dispositivo programable, como un microcontrolador, un procesador digital de señales o un FPGA, entre otros. En ocasiones este tipo de dispositivos se incluyen en el mismo chip o en una tarjeta de circuito impreso embebida, con la finalidad de incrementar la inteligencia del sensor (Custodio *et al.*, 1999: p. 17).

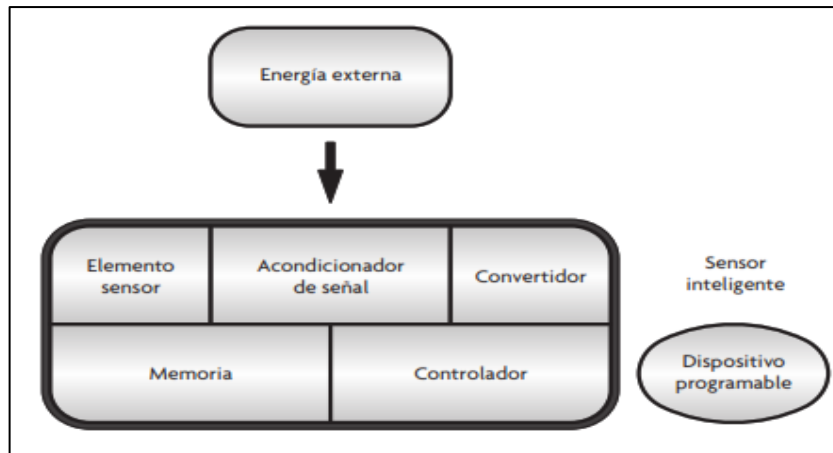


Figura 9-1. Sensor inteligente.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 21)

1.3.1. Escalas de integración de los sensores inteligentes.

En la actualidad existen diferentes configuraciones de sensores inteligentes, dependiendo del modo de integración. El primer modo de integración tiene una escala de integración baja porque los dispositivos discretos se incorporan en un mismo circuito impreso y el usuario final tiene acceso a este tipo de sensores en forma de tarjetas acondicionadoras tal como se muestra en la Figura 10-1 (Corona *et al.*, 2014: p. 22).



Figura 10-1. Primer modo de integración de un sensor inteligente

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 22)

El segundo modo de integración es más alto, debido a los circuitos acondicionadores, los convertidores y el sistema de control necesario se implementan en un solo dispositivo y el sensor se maneja por separado como un dispositivo discreto. En la Figura 11-1 se observa el diagrama de bloques de este sistema de integración (Corona *et al.*, 2014: p. 22).



Figura 11-1. Segundo modo de integración de un sensor inteligente

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 22)

Como ejemplo del tercer modo de integración sobresalen algunos sensores MEMS; este modo de integración se caracteriza porque el transductor se encuentra en el mismo chip en conjunto con el acondicionador de señal, aunque la salida aún es analógica. De manera general, este tipo de sensores inteligentes son los más fáciles de usar; no obstante, son muy difíciles de modificar, lo cual constituye una gran desventaja (Corona *et al.*, 2014: p. 22). Estos cuentan con uno o dos modos de operación. En la Figura 12-1 se observa el diagrama de bloques de este sistema.

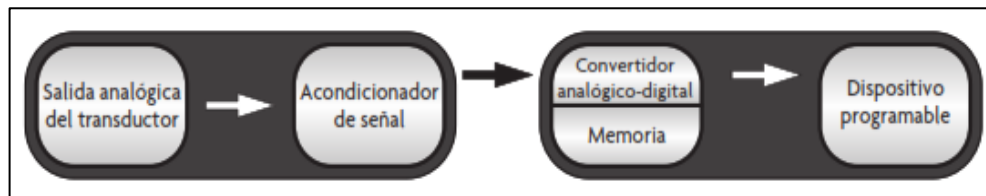


Figura 12-1. Tercer modo de integración de un sensor inteligente

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 22)

Como ejemplo del cuarto modo de integración se encuentran la mayoría de los sensores MEMS, en estos sensores en un solo encapsulado se integra el transductor, el acondicionador de señal y los convertidores analógico-digitales necesarios, para luego ser trabajados en un dispositivo programable externo. Este tipo de integración es de los más comunes porque es posible configurar el sensor en varios modos de operación con mucha facilidad, enviando un valor digital a través de un protocolo de comunicación (Corona *et al.*, 2014: p. 22). En la Figura 13-1 se observa este modo de integración de los sensores inteligentes.

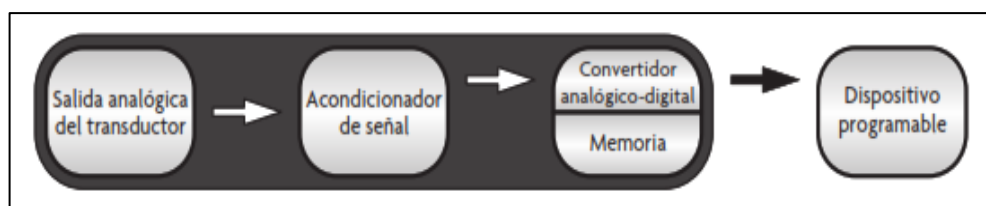


Figura 13-1. Cuarto modo de integración de un sensor inteligente

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 22)

1.3.2. Sensores MEMS

El término MEMS es una abreviación (por sus siglas en inglés) de Sistema Micro-Electromecánico estos sensores componentes de tamaño micrométrico (μm). Un MEMS está diseñado para lograr una función específica en un sistema de ingeniería, contiene elementos mecánicos y electrónicos, entre otros (Corona *et al.*, 2014: p. 23). En general, el núcleo de un MEMS está compuesto de dos partes: un sensor o actuador y una unidad de transducción de la señal, como se muestra en la Figura 14-1.

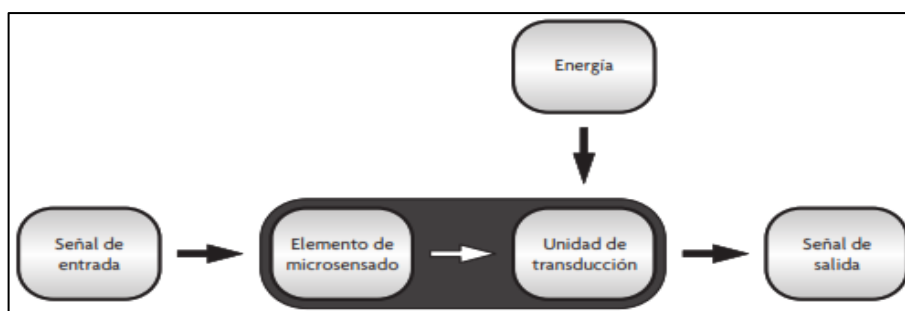


Figura 14-1. Configuración de un sensor MEMS

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 23)

Este tipo de dispositivos está diseñado específicamente para sensar la existencia o la intensidad de cierta cantidad física o química, como temperatura, presión, fuerza, aceleración, radiación, flujo magnético o composición química. De este modo, existen sensores MEMS en los cuales el elemento sensor se encuentra en un chip y la electrónica asociada con este en otro chip donde ambos chips, a través de un proceso tecnológico, son encapsulados juntos, para tener un producto comercial final.

Otro tipo de tecnologías fabrican los sensores MEMS en un mismo chip, compartiendo la estructura sensora y la electrónica asociada sobre un mismo sustrato. En la actualidad, las tecnologías más utilizadas para este tipo de sensores MEMS son PolyMUMPs, SOI MEMS, LIGA, CMOS- MEMS (Corona *et al.*, 2014: p. 23).

Hoy día, en el mercado ya existen sensores MEMS para muchas clases de aplicaciones; sin embargo, al tratarse de una tecnología relativamente nueva, comparada con los sensores convencionales, los sensores MEMS aún se encuentran en vías de desarrollo.

1.3.3. Entradas de un sensor inteligente

Una entrada es un terminal a la cual se le aplica una señal de voltaje, lo cual le permite al microcontrolador interpretar ciertas señales (Custodio *et al.*, 1999: p. 15).

1.3.4. Salidas de un sensor inteligente

Las salidas son terminales la cuales entregan señales de voltaje (Escalona, 2007, p. 7).

1.3.5. Acondicionamiento de señal.

Generalmente la salida del sensor es un dato útil, pero comúnmente resulta necesario adecuar dicha señal de salida para interpretarla en forma correcta por un sistema de procesamiento de la información como se muestra en la Figura 15-1 y más adelante ejecutar alguna acción con base en los datos detectados. Los circuitos utilizados para la adecuación de la señal de salida de un

sensor se conocen como acondicionadores de señal y su uso principal es convertir una señal en un formato más fácil de leer. Para realizar esta conversión, se llevan a cabo distintos procesos, los cuales incluyen: amplificación, linealización, filtrado, conversión, aislamiento eléctrico, excitación, etcétera (Corona *et al.*, 2014: p. 40).

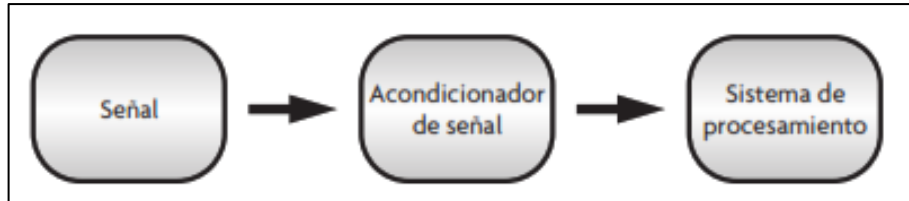


Figura 15-1. Sistema de medición

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 40)

1.3.6. Circuitos divisores

Para el acondicionamiento de sensores resistivos, los circuitos divisores son los más sencillos de utilizar, pues tienen la ventaja de implementarse con facilidad y a un bajo costo; sin embargo, su alta sensibilidad a variaciones de corriente los hace menos populares (Corona *et al.*, 2014: p. 41).

1.3.6.1. Divisor de Voltaje.

Un circuito divisor de voltaje permite obtener distintos niveles de voltaje, teniendo una única fuente, tal como se muestra en la Figura 16-1.

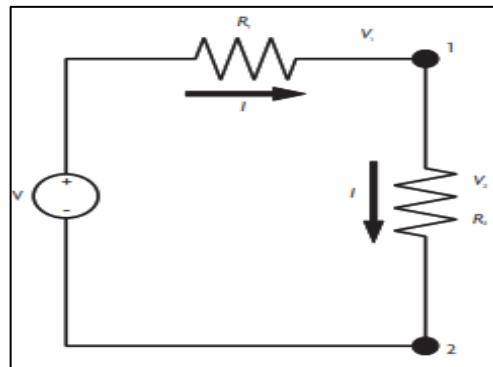


Figura 16-1. Circuito divisor de voltaje

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 41)

Si analizamos el circuito mediante el uso de la ley de mallas de Kirchhoff obtenemos la siguiente ecuación:

$$V = IR_1 + IR_2 \quad (1)$$

Al despejar la corriente obtenemos:

$$I = \frac{V}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

Si aplicamos la ley de Ohm sobre cada una de las resistencias obtenemos V_1 y V_2 en la forma:

$$V_1 = IR_1 = V \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

$$V_2 = IR_2 = V \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

En las ecuaciones (3) y (4) los voltajes V_1 y V_2 son una función del voltaje V aplicado al circuito, los voltajes sobre las resistencias V_1 y V_2 siempre serán menores a V . Los divisores de voltaje se usan, sobre todo, como auxiliares para la medición con sensores resistivos porque si se mantiene una resistencia fija se puede conocer el valor de la otra resistencia con el uso de la ley de Ohm, si son conocidos los voltajes V_1 o V_2 del divisor.

Así, al medir un voltaje sobre el divisor es posible saber el valor correspondiente de la resistencia del sensor y relacionar este, a su vez, con la magnitud física a detectar (Corona *et al.*, 2014: p. 42).

En este punto es importante resaltar la sensibilidad del circuito divisor a las tolerancias de las resistencias porque si se adquieren resistencias comerciales con tolerancias de 10%, el valor de salida del divisor variará respecto al cálculo, lo cual hace necesario medir los valores reales de resistencia y caracterizar el circuito antes de implementarlo (Corona *et al.*, 2014: p. 42).

1.3.6.2. Divisor de corriente.

Un circuito divisor de corriente es muy similar al circuito divisor de voltaje, la diferencia radica en el arreglo de resistencias porque ahora es paralelo y la fuente de alimentación es una fuente de corriente tal como se muestra en la Figura 17-1.

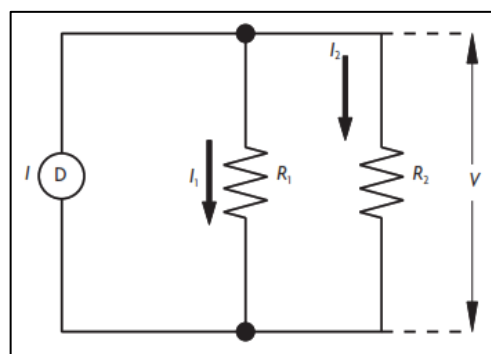


Figura 17-1. Circuito divisor de corriente

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 41)

Al aplicar la ley de Ohm se puede obtener el voltaje V como:

$$V_2 = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (5)$$

Ahora, a partir de la siguiente ecuación se puede calcular las corrientes I_1 e I_2 , y obtenemos:

$$I_1 = I \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (6)$$

$$I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (7)$$

En las ecuaciones (6) y 7 la corriente de alimentación del circuito se divide entre las dos resistencias. La aplicación de los divisores de corriente para el acondicionamiento de sensores resistivos es similar al de los divisores de voltaje; sin embargo, se prefieren estos últimos porque de manera práctica, resulta más sencillo medir voltajes (Corona *et al.*, 2014: p. 42).

1.3.7. Circuitos de Puente

Los circuitos de puente se utilizan para obtener la lectura de sensores resistivos y piezorresistivos, como las galgas extensiométricas, los RTD (Resistance Temperature Device) o fotorresistencias; son circuitos baratos y fáciles de implementar (Corona *et al.*, 2014: p. 43).

Para obtener la lectura de un sensor, los circuitos de puente se valen de las variaciones de resistencia de los sensores y los divisores de voltaje, de tal manera, el cambio en la resistencia del sensor se traduce en un cambio de voltaje entre dos terminales del circuito puente.

La ventaja de usar un circuito puente en lugar de un circuito divisor simple se da cuando el primero permite la lectura de variaciones del orden de menos de 1% de la resistencia nominal base, al mismo tiempo hace más robusto el sistema de medición respecto a variaciones de corriente, aunque la dependencia a las tolerancias de las resistencias se mantiene (Corona *et al.*, 2014: p. 43).

Los circuitos de puente utilizados para acondicionar la señal de salida de un sensor se conocen como puentes de Wheatstone y consisten en cuatro resistencias dispuestas en forma de un cuadrado y una fuente de excitación, ya sea de voltaje o corriente, conectada entre dos nodos opuestos y un medidor de voltaje conectado entre los otros dos nodos restantes tal como se muestra en la Figura 18-1.

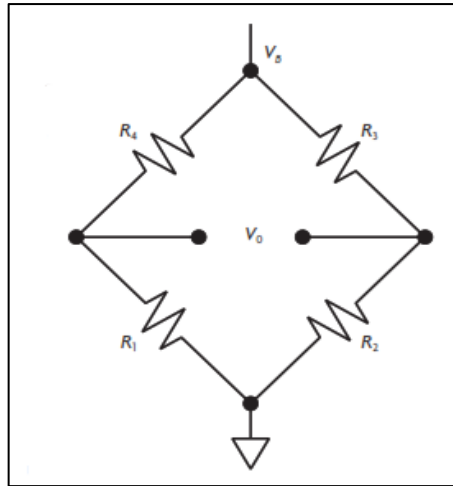


Figura 18-1. Puente de Wheatstone

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 43)

De forma más técnica, se puede establecer un puente de Wheatstone compuesto de dos arreglos, de dos resistencias en serie, conectados en paralelo, donde el voltaje a medir es aquel entre los dos nodos medios de los arreglos seriales. El voltaje medido V_o es:

$$V_o = V \frac{R_1}{R_1 + R_4} - V \frac{R_2}{R_2 + R_3} \quad 8)$$

Mediante el análisis de la ecuación anterior el puente de Wheatstone en realidad consiste en dos divisores de voltaje porque el voltaje de salida medido solo es la diferencia entre los voltajes de salida de los dos divisores (Corona *et al.*, 2014: p. 43).

Pero si en lugar de una de las resistencias del puente, digamos R_1 , se conecta un sensor (representado por una resistencia variable), entonces el puente se puede usar ya sea para detectar cuando un sistema alcanza un punto nulo o de estabilidad, o bien para medir los cambios en la magnitud de la resistencia del sensor.

Para ejemplificar el modo de uso de detección de punto nulo, piénsese en una habitación en la cual se requiere mantener una temperatura constante y donde la temperatura es detectada mediante un RTD; en este caso, si se coloca el RTD como parte de un circuito puente, entonces la temperatura de la habitación va a permanecer constante siempre y cuando el circuito puente permanezca en equilibrio; es decir, el voltaje V_0 del puente sea nulo. Pero para lograr dicho equilibrio es necesario determinar los valores de las resistencias fijas del circuito, de tal manera cuando el sensor registre la temperatura deseada, el equilibrio se mantenga, si no, de lo contrario, se altere. El cálculo de las resistencias puede apoyarse en obtener un V_o nulo con el cual se debe cumplir la relación descrita en la siguiente ecuación (Corona *et al.*, 2014: p. 43).

$$R_1 = R_4 \frac{R_2}{R_3} \quad (9)$$

Pero como R2 y R3 son fijas, el cociente de estas en (9) también es fijo; por tanto, tenemos:

$$R_1 = R_4 k \quad (10)$$

Si R4 también es fija, entonces se tiene un voltaje V0 nulo cuando el valor de la resistencia del sensor es tal que (10) se cumple; por tanto, para poder calcular las resistencias fijas es necesario conocer el valor de resistencia del sensor cuando se alcanza la temperatura deseada; así, proponiendo un valor de R4 se puede determinar el cociente K, para después calcular los valores de R2 y R3. El uso del puente de Wheatstone en modo de equilibrio se restringe a sistemas con realimentación, porque cuando el puente sale de equilibrio indica una variación en el sistema, lo cual detona una acción en busca de restablecer el equilibrio.

Si el puente de Wheatstone se usa para medir la variación de la magnitud de la resistencia del sensor, entonces se debe realizar una caracterización del puente; es decir, primero se debe establecer qué valor de voltaje Vo corresponde a qué valor de resistencia y, después, a qué magnitud física corresponde dicha resistencia. Para lograr un acondicionamiento adecuado, los valores de las resistencias fijas deben ser tales permitan un cambio legible de Vo ante una variación pequeña de R1; esto se puede lograr teniendo valores de resistencia iguales al valor nominal de R1. Para el caso de la medición de la variación de la magnitud de la resistencia de un sensor, se suelen utilizar puentes con más de un elemento variable; es decir, se usa más de un sensor (Corona *et al.*, 2014: p. 44).

Las configuraciones más usadas para medir variaciones de magnitud se muestran en la Figura 19-1.

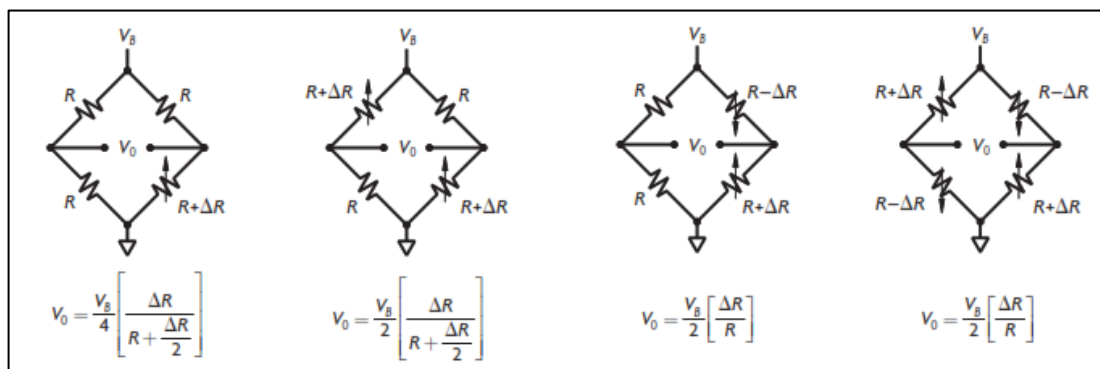


Figura 19-1. Configuraciones del puente de Wheatstone.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 44)

La configuración con un solo elemento variable suele usarse con sensores de temperatura o galgas extensiométricas. Por su parte, la primera configuración con dos elementos variables de la Figura 19-1 es usada de manera típica con sensores de presión, flujo o galgas; la diferencia de esta configuración con respecto a la configuración de un solo elemento variable se tiene el doble de ganancia. En tanto, la segunda configuración con dos elementos variables requiere los dos elementos variables cambien en direcciones opuestas; su principal uso es con galgas extensiométricas en pruebas de flexión.

Por último, la configuración con todos los elementos variables otorga la mayor ganancia a la salida y, además, es la configuración se utiliza para celdas de carga. La sensibilidad de un circuito puente se calcula como el cociente entre el voltaje de alimentación y la máxima salida del puente; por ejemplo, si se tiene una alimentación de 5 V y una salida máxima de 2.5 mV, la sensibilidad del puente sería 0.5 mV/V (Corona *et al.*, 2014: p. 44).

Si se observan las ecuaciones asociadas a cada configuración de puente, el comportamiento de estos es no lineal (excepto en el caso de la configuración con cuatro elementos variables), dicha no linealidad es inherente al puente. Para la implementación de los puentes de Wheatstone es común buscar la linealización de la salida del puente antes de enviar la información al sistema de procesamiento, a fin de facilitar la labor de este último.

La linealización de la salida del puente puede hacerse de forma digital o analógica; algunos circuitos analógicos típicos de linealización de puentes se muestran en la Figura 20-1 (Corona *et al.*, 2014: p. 44).

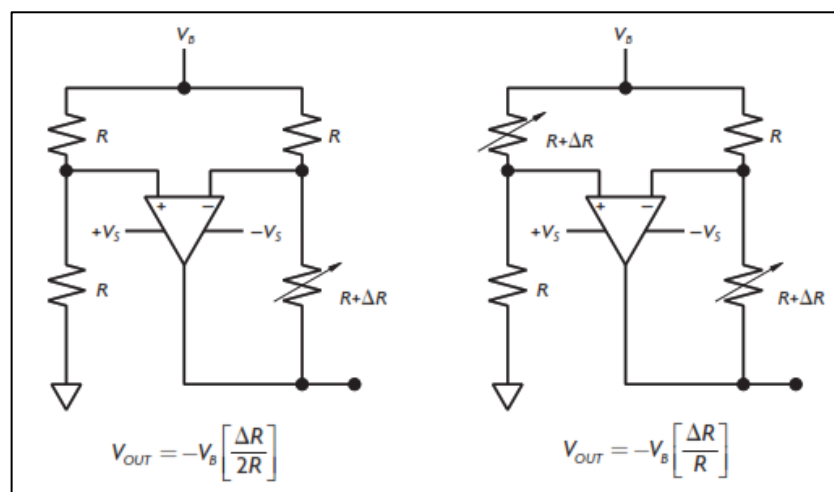


Figura 20-1. Circuitos de linealización de puentes de Wheatstone.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 45)

Los puentes de Wheatstone también pueden ser alimentados por una fuente de corriente, aunque no son tan populares como los divisores de corriente; sin embargo, sí son útiles cuando el puente se localiza lejos de la fuente porque la resistencia de los cables no induce a error en la medición, a diferencia de los circuitos puente alimentados por voltaje; además, a corriente constante todas las configuraciones de puente son lineales como se muestra en la Figura 21-1 (Corona *et al.*, 2014: p. 45).

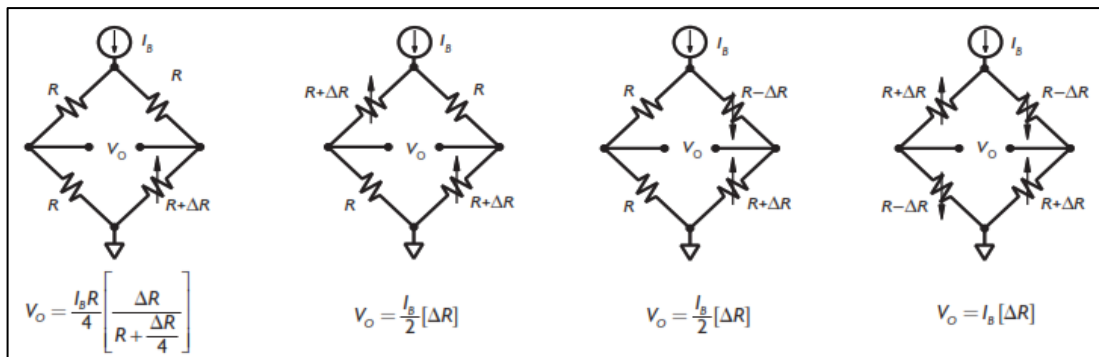


Figura 21-1. Puentes de Wheatstone de corriente constante.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 45)

1.3.8. Circuitos amplificadores.

Los circuitos amplificadores se caracterizan por su gran cantidad de aplicaciones en el acondicionamiento de señales, dada la existencia de una gran cantidad de configuraciones. A continuación, se presentan las configuraciones básicas de circuitos amplificadores basadas en un amplificador operacional. Un amplificador operacional, por lo común llamado OpAmp (por su nombre en inglés), es un circuito de amplificación con dos entradas y una sola salida destinado para ser usado con elementos externos, con o sin realimentación, los cuales definen la función u operación (Corona *et al.*, 2014: p. 46). Un amplificador operacional puede construirse a partir de elementos discretos como se muestra en la Figura 22-1.

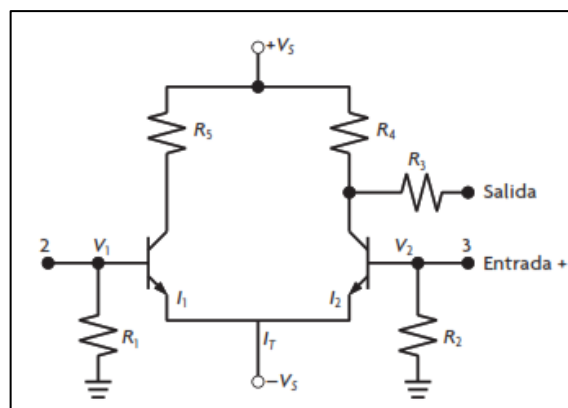


Figura 22-1. Circuito de un amplificador operacional.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 45)

El símbolo de un amplificador operacional se muestra en la Figura 23-1.

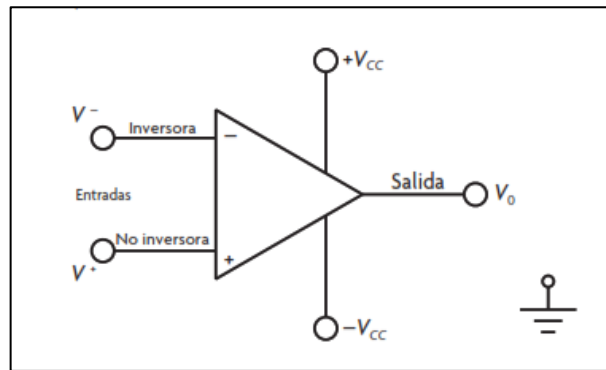


Figura 23-1. Símbolo del amplificador operacional.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 46)

El amplificador operacional se usa como un bloque o elemento más de los circuitos de acondicionamiento, es importante asumir las características ideales se consideran durante el análisis de circuitos (Boylestad y Nashelsky, 2009: pp. 641-659):

- **Ganancia infinita.** A la salida del amplificador operacional se puede contener cualquier valor de voltaje necesario para satisfacer las condiciones de entrada; es decir, las señales de entrada se pueden amplificar sin cota. Pero, en la realidad, el voltaje a la salida del amplificador operacional sí está acotado por las fuentes de alimentación
- **Ganancia nula en modo común.** Cuando las dos terminales tienen valores de voltaje iguales se dice: la ganancia a la salida es cero; es decir, no hay voltaje a la salida.
- **Voltaje nulo entre las entradas.** Si una de las terminales de entrada es conectada a una referencia a tierra, la otra se debe conectar al mismo potencial.
- **Voltaje de offset nulo.** Se considera la señal a la entrada se puede traducir exactamente igual a la salida del amplificador si se tiene una ganancia de 1. En dispositivos comerciales es posible contener voltajes de offset de entre $1e-6$ y $1e-3$ volts.
- **Impedancia infinita de entrada.** Las corrientes circulan por las entradas del amplificador son cero. Aunque en una aplicación real las corrientes de entrada no se nulifican, estas sí son bastante pequeñas con respecto al resto de las corrientes del circuito; para el caso de amplificadores construidos con transistores de efecto de campo, las corrientes en las entradas son del orden de $1e-12$ amperes, y en amplificadores constituidos por transistores bipolares son del orden de $1e-6$ amperes.

- **Impedancia nula a la salida.** Al amplificador operacional se puede conectar cualquier carga sin existan caídas de voltaje; de hecho, la impedancia de salida de la mayor parte de los amplificadores comerciales es de menos de 1 ohm.
- **Respuesta lineal en frecuencia.** La ganancia del amplificador no varía, si la frecuencia de la señal de entrada varía; además, no hay retardos en la respuesta. Si los amplificadores operacionales se usan a bajas frecuencias esto resulta cierto.

Los amplificadores operacionales se emplean en circuitos acondicionadores de señal para sensores y actuadores, con fines diversos, como amplificación, atenuación, filtrado, linealización o comparación de señales.

Para cumplir estas funciones, los amplificadores operacionales se conectan empleando diversas configuraciones, ya sean de lazo abierto, o con realimentación como se muestra en la Figura 24-1 y Figura 25-1

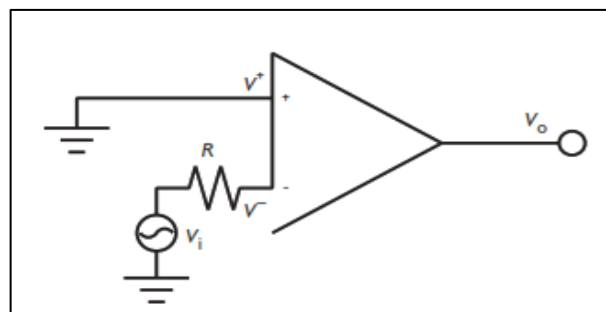


Figura 24-1. Amplificador operacional en lazo abierto.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 47)

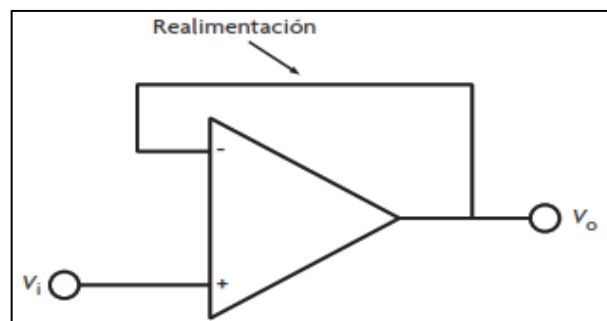


Figura 25-1. Amplificador operacional en realimentación.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 47)

A continuación, en la Figura 26-1 se muestran las configuraciones más comunes de lazo cerrado del amplificador operacional.

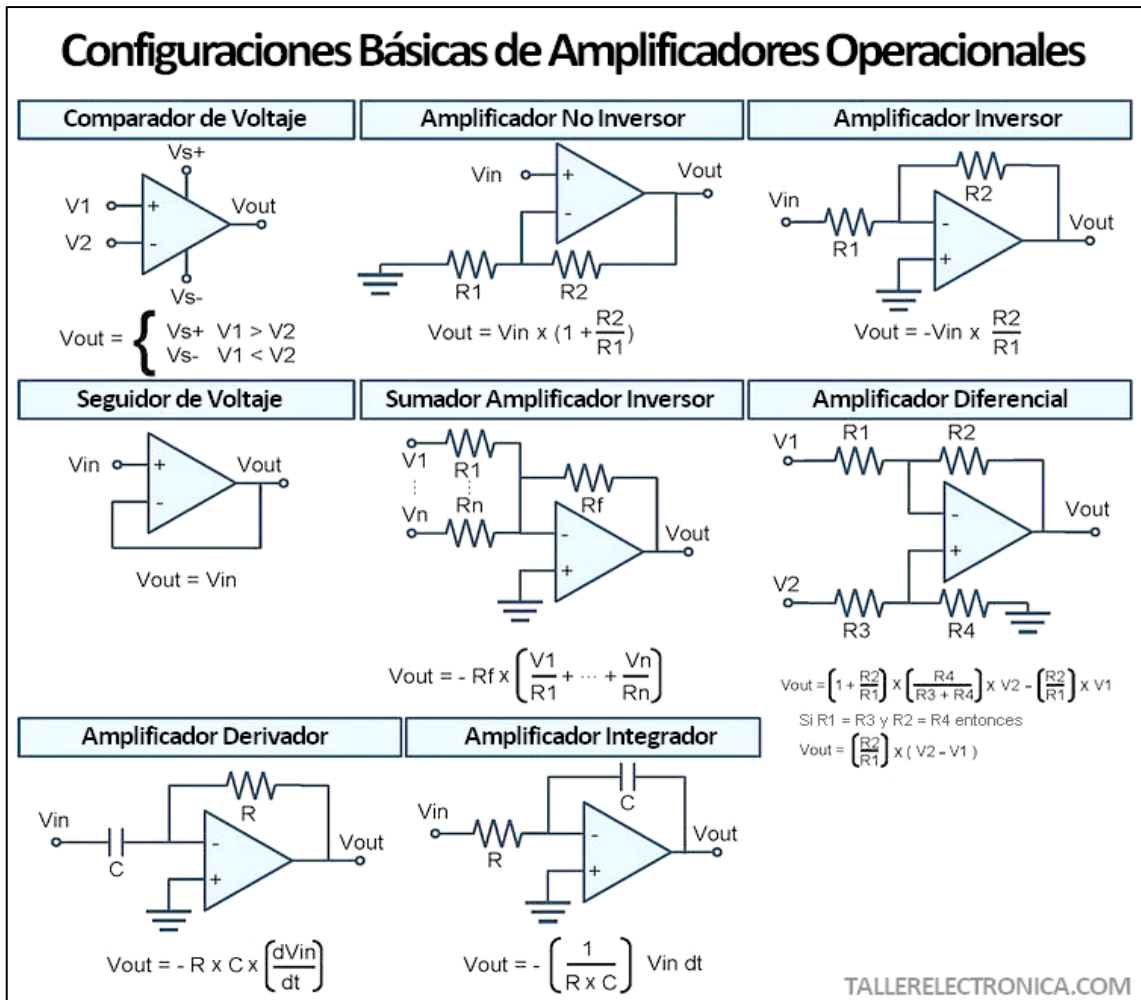


Figura 26-1. Configuraciones básicas de amplificadores operacionales.

Fuente: <https://tallerelectronica.com/2018/01/04/configuraciones-basicas-de-amplificadores-operacionales/?fbclid=IwAR18bQp7q2XYzlhVVT65iYaPkn1AUJBlm1leQ1GrCgLz56u6ytSd8y3Z7T0>

1.3.9. Circuitos convertidores.

Un circuito convertidor nos permite tomar un tipo de señal de entrada y transformarlo de manera se obtenga un tipo diferente de señal a la salida. Los convertidores son circuitos de uso frecuente en sistemas de medición, muchas veces resulta necesario convertir la señal de salida de un sensor para esta pueda ser interpretada por el sistema de procesamiento de la información.

A continuación, se analizan algunos de los circuitos convertidores más comunes (Corona *et al.*, 2014: p. 57).

1.3.9.1. Convertidor analógico-digital (ADC)

Los convertidores analógicos-digitales (ADC, por sus siglas en inglés) se utilizan para acoplar señales analógicas con circuitos digitales, como microcontroladores. La señal analógica será convertida en un voltaje o una corriente, según sea necesario. Durante la conversión analógico-digital se pueden distinguir tres procesos principales:

- La transición de tiempo continuo a tiempo discreto (muestreo de la señal).
- La cuantización de la amplitud de la señal.
- La correlación entre cantidades respecto a una referencia.

En los sistemas de sensado, los convertidores analógicos-digitales juegan un papel importante, porque son el nexo entre las señales de salida de diversos sensores y los elementos digitales de procesamiento de la información. Cuando se requiere utilizar un ADC para el acondicionamiento de una señal, es importante considerar la velocidad de la señal a tratar y la precisión con se desea convertir, además de las frecuencias a las se desea trabajar; en otras palabras, se debe conocer la velocidad de muestreo, la resolución y el ancho de banda necesarios para el correcto tratamiento de la señal.

Algunas arquitecturas alcanzan altas velocidades de operación; valiéndose del paralelismo, dichas arquitecturas pueden convertir señales del orden de los cientos de MHz. Otras arquitecturas pueden ser usadas para altas resoluciones (16 bits o más), con frecuencias máximas de operación del orden de las decenas de KHz (Corona *et al.*, 2014: p. 57). A continuación, se detallan cada una de las arquitecturas para conversores analógicos-digitales:

- **ADC de aproximaciones sucesivas.**

Este tipo de ADC constituye una arquitectura muy popular, permite velocidades de muestreo relativamente altas (del orden de MHz) sin ser muy compleja; la arquitectura básica de este se muestra en la Figura 27-1. El proceso de conversión empieza cuando se detecta la señal de inicio de conversión, lo provoca el bloque SHA (Sample&Hold, muestreo y espera) entre en modo de espera y todos los bits del registro de aproximación sucesiva (SAR) se lleven a cero, excepto el bit más significativo.

Luego, el dato en el SAR es convertido a una señal analógica equivalente si se compara respecto a la señal de entrada; si la señal de entrada es mayor el dato almacenado en el SAR, el bit más significativo se mantiene en 1, de lo contrario pasaría a 0; una vez definido el estado del bit más significativo, el segundo bit más significativo se lleva a 1 y se vuelve a llevar a cabo una comparación de señales; este proceso se sigue hasta todos los bits del SAR quedan definidos y las señales son equivalentes.

Esta arquitectura es muy utilizada para aplicaciones requieren de una velocidad de muestreo y precisión medios (Corona *et al.*, 2014: p. 58).

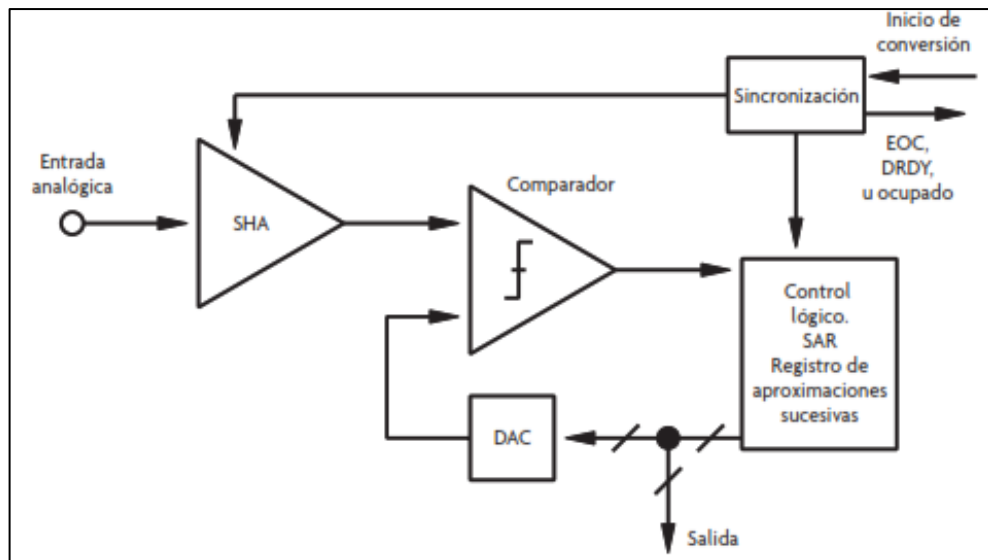


Figura 27-1. ADC de aproximaciones sucesivas.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 58)

- **ADC flash o paralelo**

Es la arquitectura ofrece las mayores velocidades de conversión. Un ADC paralelo de N bits utiliza un arreglo de 2^N resistencias y $2^N - 1$ comparadores. Dado el arreglo, cada comparador tiene un voltaje de referencia (establecido por un divisor de voltaje) es mayor al comparador ubicado por debajo de este en el arreglo.

De este modo, para una señal dada, todos los comparadores funcionan al mismo tiempo; así, cuando el valor de la señal de entrada es mayor a su voltaje de referencia dará un uno a la salida, y de lo contrario dará un cero.

Cuando se tiene la salida de todos los comparadores se utiliza un decodificador, el cual da un solo dato binario de N bits a la salida en lugar de 2^N salidas (Corona *et al.*, 2014: p. 58). En la Figura 28-1 se observa esta arquitectura.

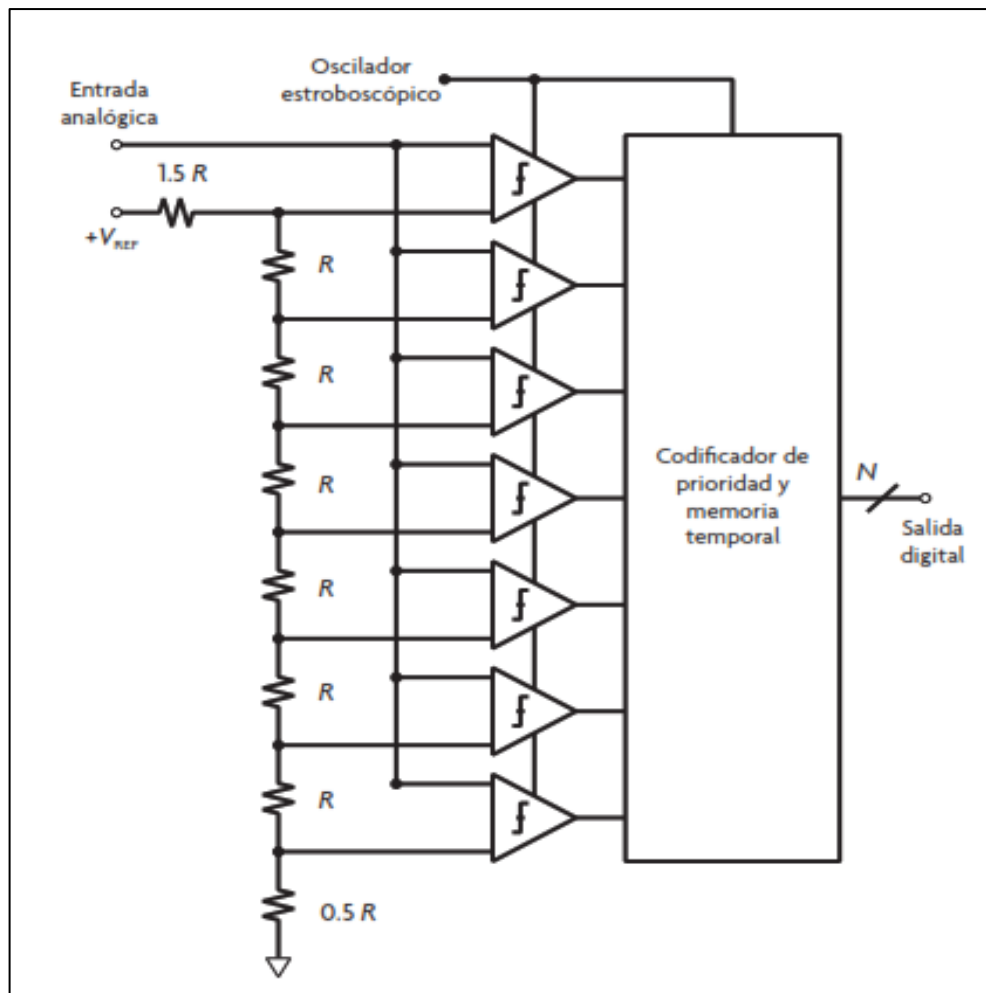


Figura 28-1. ADC paralelo de 3 bits.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 58)

- **ADC semiparalelo o de etapas**

Es la arquitectura más veloz para resoluciones de 16 bits. En esta arquitectura el proceso de conversión se divide en varias etapas, durante las cuales se lleva a cabo una conversión parcial y los bits convertidos son rotados hacia abajo y almacenados en un registro.

El proceso de conversión en cada etapa incluye un SHA, el cual toma la señal analógica y la manda a un ADC flash, cuya salida se conecta a un DAC, y la salida del DAC es restada de la señal original almacenada en el SHA, para producir una señal residual, la cual es amplificada después para esta varíe en escala completa en la siguiente etapa. C

Cuando la señal ha pasado por todas las etapas, se hace una corrección digital y, por último, se obtiene el dato digital, en la Figura 29-1 se pueden observar las etapas de esta arquitectura (Corona *et al.*, 2014: p. 59).

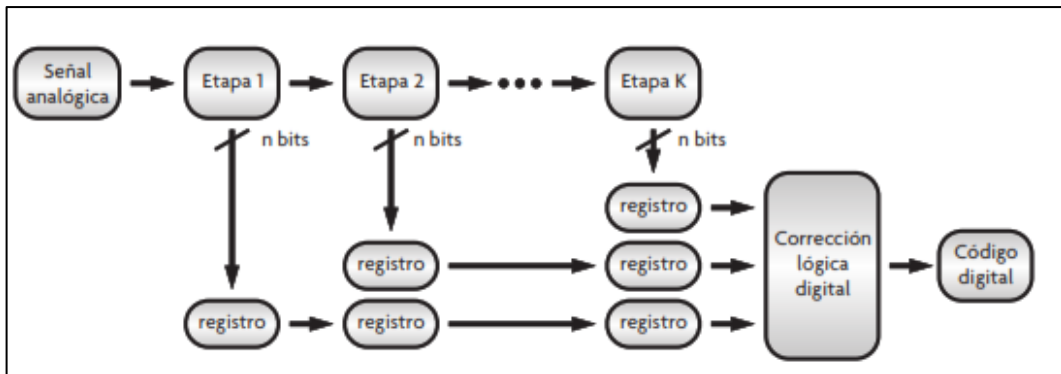


Figura 29-1. Canal ADC.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 59)

- **ADC integrador o de rampa**

Los ADC basados en esta arquitectura se utilizan en aplicaciones de alta precisión a bajas frecuencias. La conversión de datos en esta arquitectura se lleva a cabo en dos etapas; en la primera, la señal a convertir se hace la entrada al integrador durante un tiempo fijo, mientras en la segunda se lleva a cabo durante un periodo variable proporcional al valor de la señal de entrada.

La distinción de los voltajes de entrada se logra con el contador, el cual es puesto en cero al inicio de la conversión e inicia su conteo en la segunda etapa de la conversión, y continúa contando hasta el voltaje del comparador alcanza un valor en alto; así, el valor de la cuenta es el valor convertido como lo muestra la Figura 30-1 (Corona *et al.*, 2014: p. 59).

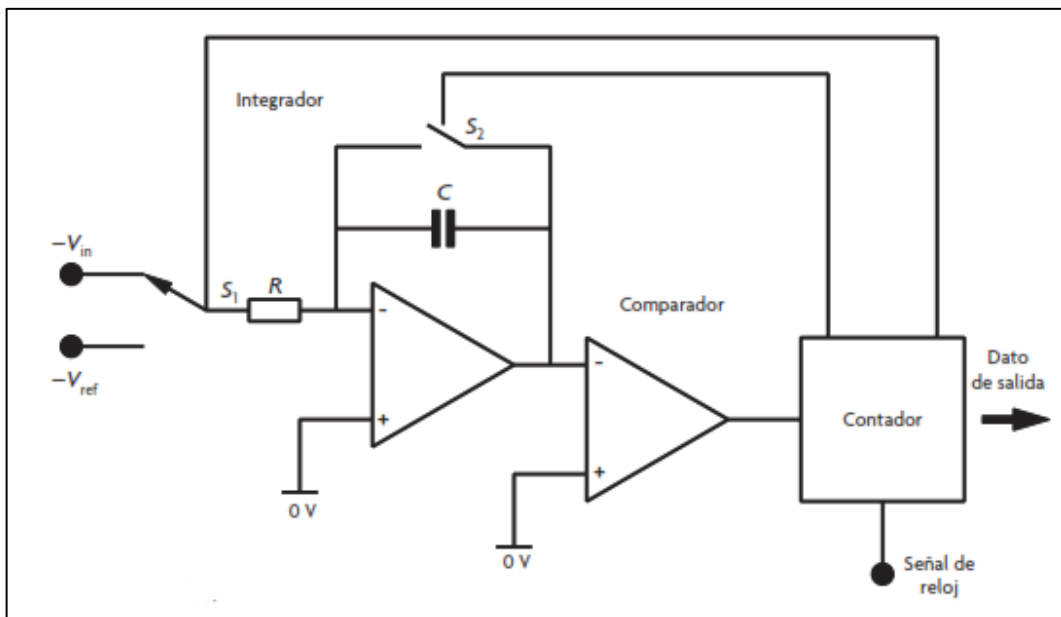


Figura 30-1. ADC integrador.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 59)

- **ADC Sigma-Delta**

La estructura de un convertidor Sigma-Delta de primer orden se muestra en la Figura 31-1. Para realizar la conversión en esta arquitectura, primero se muestrea la señal de entrada y después se sustrae una señal de realimentación de un DAC de un bit de la señal de entrada y el residual es acumulado por un integrador; la salida del integrador se cuantifica para generar una señal de un bit. Esta señal digital de salida determina, entonces, el signo de la señal de realimentación, la cual se vuelve a restar de la señal de entrada para obtener un nuevo bit de salida, hasta obtener el dato digital final (Corona *et al.*, 2014: p. 59).

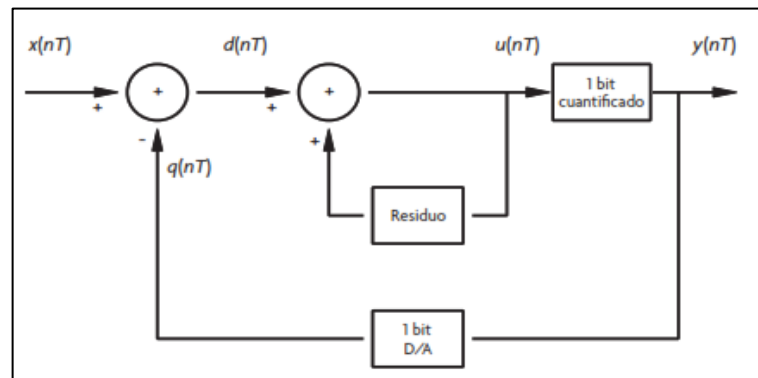


Figura 31-1. ADC Sigma-Delta.

Fuente: (Corona *et al.*, 2014: p. 59)

1.3.9.2. Filtros

La respuesta de un circuito de filtrado depende de los elementos, tal como se ha visto con las distintas configuraciones de circuitos amplificadores, y de cómo estén interconectados. Ahora bien, de la teoría de análisis de circuitos eléctricos sabemos la impedancia de los elementos pasivos como capacitores e inductores depende de la frecuencia de la fuente de excitación del circuito. A continuación, se ve cómo una selección adecuada de los valores y las conexiones entre estos elementos nos ayudan a construir circuitos permitan el paso selectivo de señales, también conocidos como filtros (Boylestad y Nashelsky, 2009: p. 655).

Los filtros son circuitos caracterizados por una entrada y una salida, de forma en esta última solo aparece parte de las componentes de frecuencia de la señal de entrada; es decir, es un circuito eléctrico se utiliza para eliminar una componente frecuencial de una señal a partir de una determinada frecuencia, se le denomina frecuencia de corte del filtro. Por tanto, son circuitos se pueden caracterizar por su función de transferencia $H(\omega)$, la cual toma un valor de uno, cuando el valor de la frecuencia se desea a la salida, y de cero, cuando se quiera rechazar dicha componente de frecuencia como muestra la Figura 32-1 (Corona, *et al.*, 2014: p. 64)

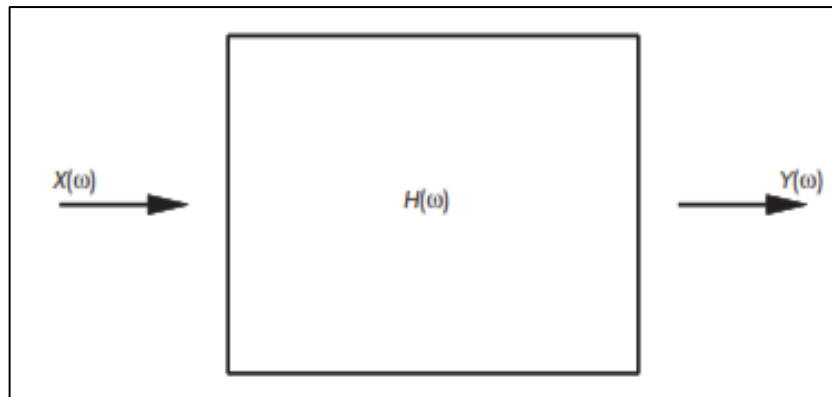


Figura 32-1: Modelo de bloque de un filtro

Fuente: (Corona, *et al.*, 2014: p. 64)

Los filtros se clasifican de acuerdo con dos criterios: las componentes lo constituyen y su respuesta en frecuencia. Según sus componentes se clasifican como (Corona, *et al.*, 2014: p. 64):

- **Pasivos.** Utilizan solo componentes pasivas, como resistencias, capacitores e inductores. Presentan la desventaja de no poder amplificar la señal de salida, lo cual es deseable en muchas aplicaciones.
- **Activos.** Se construyen con resistencias, capacitores y amplificadores operacionales. Presentan las ventajas de poder amplificar las señales de salida, además pueden prescindir de los inductores para lograr resultados análogos a los filtros pasivos, lo cual se traduce en un diseño más compacto.
- **De capacidades conmutadas.** Estos utilizan capacitores de conmutación en lugar de resistencias; los valores de resistencia deseados se consiguen variando la frecuencia de conmutación de los capacitores.
- **Digitales.** Realizan la función del filtro a través de algoritmos numéricos.

Según su respuesta en frecuencia, se pueden distinguir cuatro tipos básicos de filtros:

- Filtro pasa bajas
- Filtro pasa altas
- Filtro pasa banda
- Filtro rechaza banda

Los circuitos de filtrado tienen aplicaciones importantes dentro de las conversiones analógicas-digitales y digitales-analógicas; además, en sistemas de detección sirven para eliminar señales ambientales no deseadas pueden afectar las mediciones. A continuación, en la Figura 33-1, se describe de forma breve el funcionamiento de los filtros según su respuesta en frecuencia, donde se presentan los circuitos de filtrado pasivos (Corona, *et al.*, 2014: p. 64).

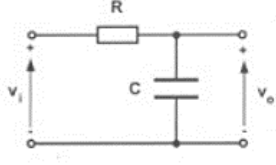
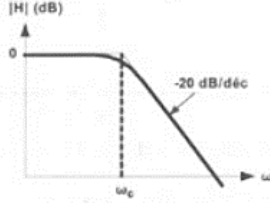
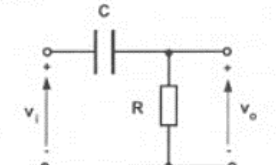
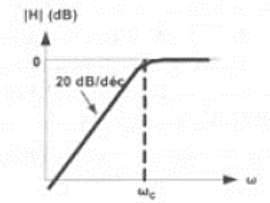
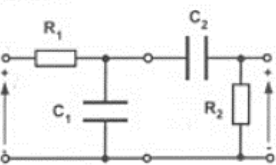
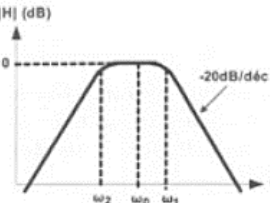
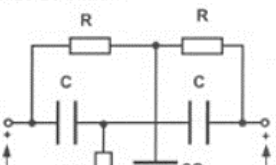
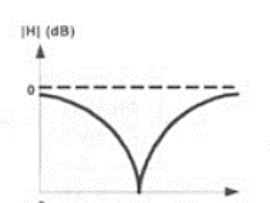
Tipo de filtro	Respuesta frecuencial	Relaciones de interés
Paso bajo 		$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}$ <p>Frecuencia de corte: $f_c = 1/2\pi RC$ $\omega_c = 2\pi f_c$</p> <p>Frecuencia de corte de n etapas iguales en cascada y aisladas: $f'_c = f_c \cdot \sqrt{2^{1/n} - 1}$</p>
Paso alto 		$H(j\omega) = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$ <p>Frecuencia de corte: $f_c = 1/2\pi RC$ $\omega_c = 2\pi f_c$</p> <p>Frecuencia de corte de n etapas iguales en cascada y aisladas: $f'_c = f_c / \sqrt{2^{1/n} - 1}$</p>
Paso banda 		$H(j\omega) = \frac{j\omega \tau_2}{1 + j\omega(\tau_1 + \tau_2 + a\tau_2) - \omega^2 \tau_1 \tau_2}$ <p>$\tau_1 = R_1 C_1$; $\tau_2 = R_2 C_2$; $a = R_1/R_2$ $\omega_1 = 1/\tau_1$; $\omega_2 = 1/\tau_2$ Pulsación central: $\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2}$</p>
Rechazo de banda 		$H(j\omega) = \frac{j\beta}{4 + j\beta}$ <p>$\beta = \omega/\omega_0 - \omega_0/\omega$ Pulsación central: $\omega_0 = 1/RC$</p>

Figura 33-1: Tipos de filtros pasivos

Fuente: <https://es.slideshare.net/beltry1/filtros-electronicos-pdf>

1.4. Tipos de sensores de nivel y proximidad

Los sensores de nivel y proximidad son muy usados en aplicaciones como envasado, sistemas de control para monitoreo de llenado, detección de obstáculos en sistemas inteligentes y en algunas configuraciones específicas en sistemas táctiles, para su aplicación en sistemas electrónicos, como teléfonos móviles, pantallas táctiles, etcétera (Corona, *et al.*, 2014: p. 141).

Los sensores de nivel y proximidad muchas veces son confundidos con los sensores de posición. No obstante, este tipo de sensores se limita a medir la proximidad de un objeto con respecto al

sensor, sin importar su orientación o determinar si el objeto está cerca del sensor para ser detectado, además de determinar el nivel de un contenedor en determinado porcentaje, estos pueden clasificarse de acuerdo con el principio de operación (Corona, *et al.*, 2014: p. 142)

1.4.1. Ultrasonicos

Los sensores ultrasónicos son muy utilizados en sistemas de medición no invasivos para determinar la distancia del emisor a un objeto dado. Por ejemplo, en la mayoría de los vehículos se usan para avisar al conductor la proximidad de un objeto cuando maneja en reversa; otra aplicación es la medición de distancias, profundidades y alturas cambian dinámicamente, etcétera. Un sensor ultrasónico también puede ser considerado un tranceptor, no solo puede usarse como un transductor de entrada, sino también como uno de salida (Corona, *et al.*, 2014: p. 142).

Las principales ventajas de este tipo de sensado, al ser una medición no invasiva, es decir, no requiere contacto alguno para realizar la medida, la variedad de objetos es posible medir es muy amplia. Debido a la naturaleza de la señal ultrasónica, es posible realizar mediciones en superficies variadas, líquidos y en ambientes hostiles. La señal ultrasónica se puede generar mediante diferentes técnicas, como electromagnéticas, ópticas, capacitivas y piezoeléctricas; de todas, esta última es una de las más utilizadas debido a su alta efectividad en comparación con las anteriores (Corona, *et al.*, 2014: p. 142).

En la actualidad en el mercado existen varios tipos de sensores ultrasónicos los cuales se diferencian por su tamaño, costo, voltaje de funcionamiento, rango de medición, etc.

1.4.1.1. HC - SR04

Este sensor es el más utilizado por los usuarios que desean medir distancias debido a que es muy accesible y de bajo costo, en la Figura 34-1 se puede observar el sensor HC-SR04 (Cytron Technologies, 2013, p. 3):



Figura 34-1: Sensor HC-SR04

Fuente: (Cytron Technologies, 2013, p. 3)

En la Tabla 1-1 se describen las principales características del sensor ultrasónico mostrado en la Figura 34-1.

Tabla 1-1. Características del sensor ultrasónico HC-SR04.

Voltaje de funcionamiento	5VDC
Corriente de trabajo	15mA
Rango de distancia	2cm – 400cm
Resolución	0.3cm
Tamaño	45mm x 20mm x 15mm
Número de transductores	2 (Emisor - Receptor)
Tipo de comunicación	PWM
Frecuencia de trabajo del transductor	40Khz
Pines	VCC- Trigger – Echo - GND
Costo	4,50 USD

Fuente: (Cytron Technologies, 2013, p. 3)

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En la Figura 35-1 se muestra el diagrama de tiempos del sensor HC-SR04, se evidencia que solo se necesita suministrar un pulso corto de 10uS a la entrada del disparador para iniciar el rango, y luego el módulo enviará una ráfaga de ultrasonido de 8 ciclos a 40 kHz y elevará su eco. El eco es un objeto de distancia que tiene un ancho de pulso y un rango proporcional.

Puede calcular el rango a través del intervalo de tiempo entre el envío de la señal de disparo y la recepción de la señal de eco. Se sugiere utilizar un ciclo de medición de más de 60 ms para evitar la señal de activación de la señal de eco.

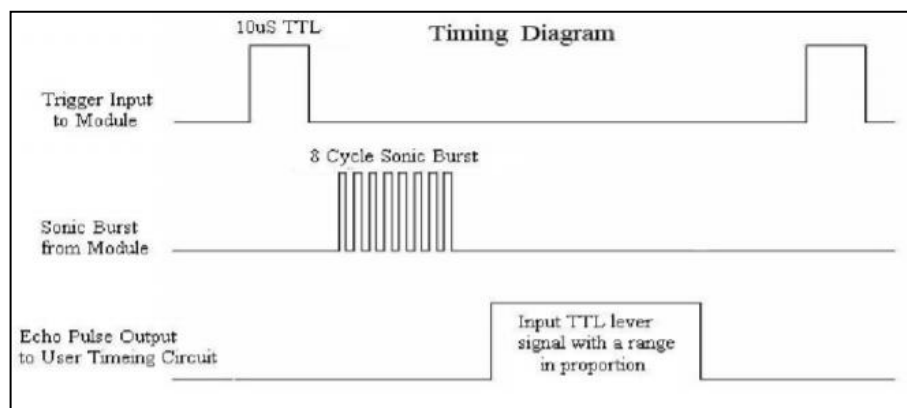


Figura 35-1. Diagrama de tiempos del sensor ultrasónico HC-SR04

Fuente: (Cytron Technologies, 2013, p. 7)

A continuación, en la Tabla 2-1 se muestran las ventajas y desventajas que tiene este tipo de sensor.

Tabla 2-1. Ventajas y desventajas del sensor ultrasónico HC-SR04.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Bajo costo • Resolución del sensor baja • Rango de medición de hasta 4m 	<ul style="list-style-type: none"> • El voltaje de funcionamiento es de 5VDC • Utiliza dos transductores uno para transmitir la señal y otro como receptor • Problemas al detectar personas.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

1.4.1.2. MB1000 LV-MaxSonar-EZ0

En la Figura 36-1 se muestra el sensor MB1000:

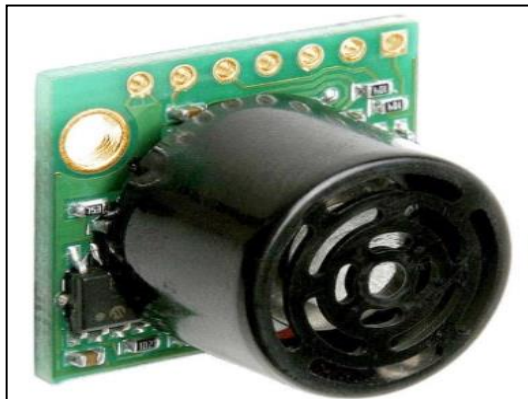


Figura 36-1. Sensor ultrasónico MB1000

Fuente: (MaxBotix, 2012, p. 1)

Las características de este sensor son las que se muestran en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1. Características del sensor ultrasónico MB1000.

Voltaje de funcionamiento	2.5 VDC – 5.5 VDC
Corriente de trabajo	2mA
Rango de distancia	0cm – 645cm
Resolución	2,54cm
Tamaño	19.9mm x 22.1mm x 15.5mm
Número de transductores	1 (Emisor - Receptor)
Tipo de comunicación	Serial, analógica, PWM.

Continuación de Tabla 3-1

Frecuencia de trabajo del transductor	42Khz
Pines	GND - VCC - RX - TX - AN – PWM - BW
Costo	29,95 USD

Fuente: (MaxBotix, 2012, p. 1)

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En la Figura 37-1 se muestra el diagrama de tiempos de este sensor, 250mS después del encendido, el LV-MaxSonar-EZ está listo para aceptar el comando RX. Si el pin RX se deja abierto o se mantiene alto, el sensor primero ejecutará un ciclo de calibración (49 ms) y luego tomará una lectura de rango (49 ms). Después del retraso de encendido, la primera lectura tomará unos ~ 100 ms adicionales. Las lecturas posteriores tomarán 49mS. El LV-MaxSonar-EZ verifica el pin RX al final de cada ciclo. Los datos de rango se pueden adquirir una vez cada 49 ms.

Cada período de 49 ms comienza cuando el RX es alto o abierto, después de lo cual el LV-MaxSonar-EZ envía la ráfaga de transmisión, después de lo cual el pin de ancho de pulso (PW) se establece en alto. Cuando se detecta un objetivo, el pin PW se baja. El pin PW es alto por hasta 37.5mS si no se detecta un objetivo.

El resto del tiempo de 49 ms (menos 4,7 ms) se gasta ajustando el voltaje analógico al nivel correcto. Cuando se mide una larga distancia inmediatamente después de una lectura de corta distancia, el voltaje analógico puede no alcanzar el nivel exacto dentro de un ciclo de lectura. Durante los últimos 4,7 ms, se envían los datos en serie.

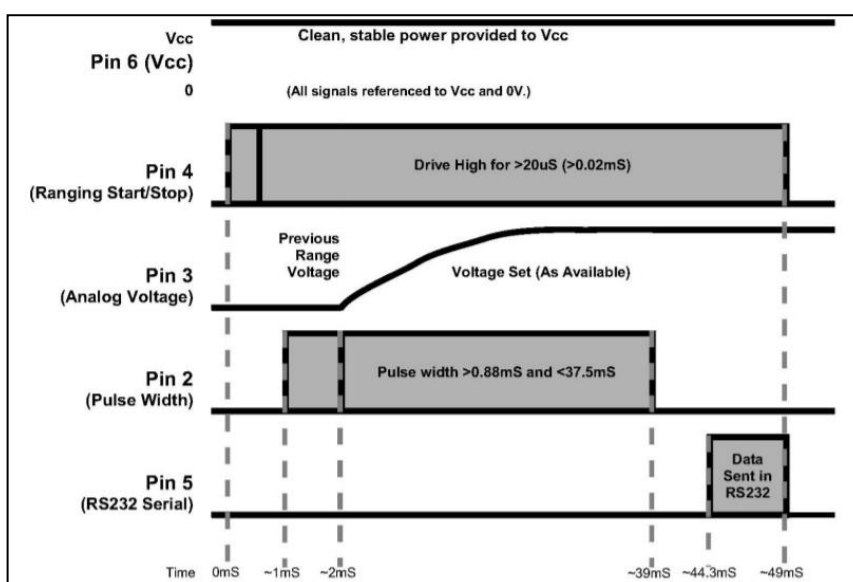


Figura 37-1. Diagrama de tiempos del sensor ultrasónico MB1000

Fuente: (MaxBotix, 2012, p. 1)

A continuación, en la Tabla 4-1 se muestran las ventajas y desventajas que tiene el sensor MB1000.

Tabla 4-1. Ventajas y desventajas del sensor ultrasónico MB1000.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de funcionamiento de 2.5 V hasta 5.5V. • Utiliza un solo transductor. • Rango de medición de hasta 6m • No tiene problemas al detectar personas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

1.4.1.3. GY-US42

El GY-US42 es un módulo sensor ultrasónico de alta calidad. Su principio de funcionamiento es: primero el transductor emite ondas ultrasónicas, después de ser irradiada al objeto medido, el transductor recibe y devuelve la onda acústica, y utiliza la diferencia de tiempo para calcular la distancia real.

En la Figura 38-1 se indica la estructura física que tiene el sensor GY-US42 y sus características se muestran en la Tabla 5-1.



Figura 38-1. Sensor ultrasónico GY-US42

Fuente: (Aliexpress, 2019)

Tabla 5-1. Características del sensor GY-US42.

Voltaje de funcionamiento	3VDC - 5VDC
Corriente de trabajo	9mA
Rango de distancia	20cm – 720cm

Continuación de Tabla 5-1

Resolución	1cm
Tamaño	21.5mm x 21mm x 24.5mm
Número de transductores	1 (Emisor - Receptor)
Tipo de comunicación	Serial, I2C, PWM.
Frecuencia de trabajo del transductor	40Khz
Pines	VCC - GND - CR - DT – INT - PS
Costo	11.68 USD

Fuente: (Aliexpress, 2019)

Realizado por: John Hidalgo, 2019

El módulo tiene 3 formas de leer datos: UART serie (nivel TTL), I2C, modo PWM de pulso. La velocidad en baudios del puerto serie 9600bps y 115200bps. I2C puede modificar la dirección interna para facilitar que un bus I2C conecte múltiples módulos al mismo tiempo. Salida PWM de pulso, igual que SR04. El módulo puede adaptarse a diferentes entornos de trabajo, enlace directo con el microcontrolador.

Conecte la computadora cuando necesite un módulo USB a TTL, conexión directa. Como resultado de enviar y recibir una onda ultrasónica integrada, el rango ciego de aproximadamente 20 cm, que varía dentro de 20 cm no es válido.

A continuación, en la Tabla 6-1 se muestran las ventajas y desventajas que tienen estos sensores.

Tabla 6-1. Ventajas y desventajas del sensor GY-US42.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de funcionamiento de 3 V hasta 5V. • Utiliza un solo transductor. • Rango de medición de hasta 7m • No tiene problemas al detectar personas. • Comunicación I2C. 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo alto • Zona muerta de 20cm. • Consumo de corriente medio.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

1.4.1.4. SRF08

Este buscador de rango ultrasónico de alto rendimiento Devantech es compacto y mide un rango increíblemente amplio de 3 cm a 6 m. El SRF08 se conecta a su microcontrolador a través del bus

I2C estándar de la industria. Este guardabosques es perfecto para su robot o cualquier otro proyecto que requiera información precisa de alcance. Su arquitectura se muestra en la Figura 39-1.

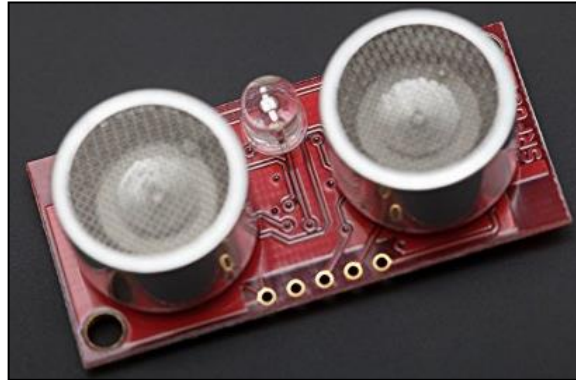


Figura 39-1. Sensor ultrasónico SRF08

Fuente: (Mechatronic Systems, 2019, p. 1)

Las características del sensor SFR08 se muestran en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1. Características del sensor ultrasónico SRF08.

Voltaje de funcionamiento	5VDC
Corriente de trabajo	15mA
Rango de distancia	3cm – 600cm
Resolución	0.5cm
Tamaño	43mm x 20mm x 17mm
Número de transductores	2 (Emisor - Receptor)
Tipo de comunicación	I2C
Frecuencia de trabajo del transductor	40Khz
Pines	VCC- SDA – SCL - GND
Costo	39,38 USD

Fuente: (Mechatronic Systems, 2019, p. 1)

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Hay tres comandos para iniciar un rango (80 a 82), los cuales deben ser enviados por el dispositivo maestro que tenga comunicación I2C, si se envía un 80 el resultado será en pulgadas, con 81 el resultado será centímetros y con un 82 el resultado será en microsegundos. Para iniciar un rango, escriba uno de los comandos anteriores en el registro de comandos y espere el tiempo necesario para completarlo y lea todos los resultados que desee. El búfer de eco se borra al comienzo de cada rango. El primer rango de eco se coloca en las ubicaciones 2,3. el segundo en 4,5, etc.

Si una ubicación (bytes alto y bajo) es 0, entonces no habrá más lecturas en el resto de los registros. El tiempo predeterminado y recomendado para completar el rango es de 65 ms, sin embargo, puede acortar esto escribiendo en el registro de rango antes de emitir un comando de rango. Los datos del sensor de luz en la ubicación 1 también se actualizarán después de un comando de rango.

A continuación, en la Tabla 8-1 se muestran las ventajas y desventajas que tiene el sensor SRF08.

Tabla 8-1. Ventajas y desventajas del sensor ultrasónico SRF08.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Rango de medida alto • Resolución del sensor baja • Comunicación I2C 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo • Utiliza dos transductores uno para transmitir la señal y otro como receptor • Voltaje de funcionamiento de 5V.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

1.5. Microcontrolador

Un microcontrolador es un circuito integrado, Figura 40-1, incorpora en su interior los bloques básicos para formar un sistema embebido o una PC en menor escala, es decir el microcontrolador es un chip en cuyo interior encontramos una CPU, Memoria, Reloj, Puertos de Comunicación y Módulos Periféricos de E/S (Flores, 2009, p. 1).



Figura 40-1. Microcontroladores, versión encapsulado PDIP

Fuente: (Flores, 2009, p. 1).

Cada uno de estos bloques internos, cumple una función específica y permite al diseñador un mejor control de los procesos del sistema, el CPU es un microprocesador en pequeño y de menor potencia, la Memoria, sirve para almacenar el Firmware o programa a ejecutar, el Reloj provee una señal de sincronización para todas las tareas del sistema, los Puertos de comunicación le permiten al microcontrolador tener comunicación bidireccional con otros microcontroladores o un PC, por ejemplo puerto RS232, USB, ISP, I2C, y los Módulos Periféricos de E/S, permiten el intercambio de información de tipo digital o analógica con el exterior del sistema, es dentro de estos Periféricos, se pueden encontrar: Puertos Digitales E/S, Conversores Analógico digital, Contadores, Temporizadores, Módulos PWM, entre otros (Flores, 2009, p. 2).

Además de su estructura un microcontrolador posee ciertas características de desarrollo, como son: su lenguaje de programación, el IDE para la escritura de programas, es programa la memoria interna, el hardware externo necesario para realizar esta grabación. Son estas características hacen la diferencia al momento de la elección correcta de un tipo de microcontrolador (Flores, 2009, p. 2).

1.5.1. PIC Y AVR

Existen decenas de empresas fabricantes de microcontroladores, podemos nombrar: Intel, Motorola, Texas Instrument, Microchip, Cypress, Atmel, entre otras. Pero dentro de toda esta gama de microcontroladores se destacan dos familias de microcontroladores: la familia AVR y la familia PIC, cuya popularidad es alta entre diseñadores de sistemas embebidos requieren un rendimiento alto y bajo costo, y eligen uno u otro ya sea por su nivel de integración, por su arquitectura, la disponibilidad de recursos o su lenguaje de programación (Flores, 2009, p. 2).

Los PIC son una familia de microcontroladores de 8 bits fabricados por la empresa estadounidense MICROCHIP, cuentan con un CPU RISC y memoria FLASH para el almacenamiento del Firmware. Por otro lado, los AVR son una familia de microcontroladores fabricada por la compañía noruega ATMEL, estos microcontroladores de 8 bits cuentan con una CPU RISC y su memoria de programa viene implementada en FLASH. Ambas familias cuentan con periféricos como Puertos Digitales, ADC, PWM, entre otros. Basado en esta descripción, los PIC y AVR son iguales, en cierto modo si, desde un punto de vista de estructura general, pero es el ámbito rodea esta estructura para el desarrollo de sistemas embebidos, es donde encontramos diferencia entre ambos microcontroladores, en indicadores como: Lenguaje de programación, IDE, interfases para la programación, reloj interno, voltaje de alimentación, potencia, costo, etc (Flores, 2009, p. 2).

1.5.1.1. Comunicación I2C

La comunicación I2C fue desarrollado a principios de la década de 1980 por la compañía Philips, uno de los principales fabricantes de productos electrónicos de consumo, que estaba buscando

una interfaz que pudiera usarse para permitir que los IC se comuniquen entre sí con una conexión de bajo costo y a velocidades moderadas. Philips logró reducir el número de líneas de datos del bus I2C al cambiar de comunicación serial paralela a síncrona (Baby-Dhivya y Madhumati, 2015, p. 1239)

1.5.1.2. Interfaz I2C

El I2C es un bus que facilita la comunicación entre microcontroladores, memorias y otros dispositivos con cierto nivel de inteligencia. Este bus consta de solo dos líneas una llamada SDA la cual transporta los bits de datos y la segunda llamada SCL que se usa como señal de reloj. Dentro de las especificaciones del bus I2C, un estándar se define un modo con una frecuencia de reloj máxima de 100k Hz y un modo rápido de frecuencia de reloj máxima de 400k Hz, el esquema para entender de mejor manera este tipo de comunicación se muestra en la Figura 41-1 (Valdez y Becker, 2015, p. 1).

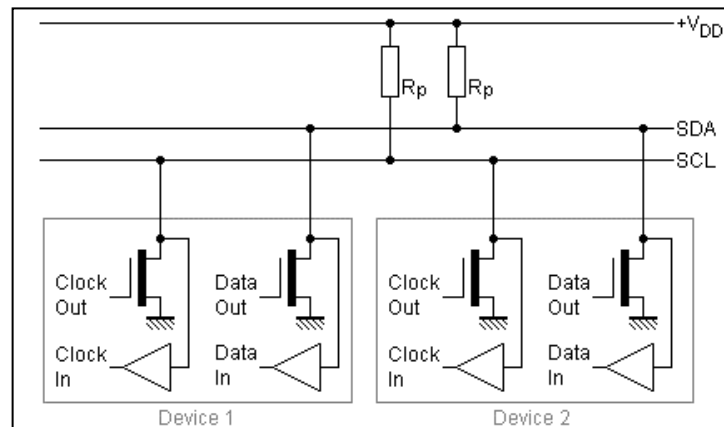


Figura 41-1. Esquema de la interfaz del bus I2C

Fuente: (Valdez y Becker, 2015, p. 1).

1.5.1.3. Direcciones del protocolo I2C

La comunicación básica I2C está utilizando transferencias de 8 bits o bytes. Cada dispositivo esclavo I2C tiene una dirección de 7 bits que debe ser única en el bus. Algunos dispositivos tienen una dirección I2C fija, mientras que otros tienen pocas líneas de dirección que determinan los bits más bajos de la dirección I2C. Esto hace que sea muy fácil tener todos los dispositivos I2C en el bus con una dirección I2C única. También hay dispositivos que tienen una dirección de 10 bits según lo permitido por la especificación (A Two-wire Serial Protocol, 2019).

La dirección de 7 bits representa los bits 7 a 1, mientras que el bit 0 se utiliza para indicar la lectura o la escritura en el dispositivo. Si el bit 0 (en el byte de dirección) se establece en 1, el dispositivo maestro leerá desde el dispositivo esclavo I2C (A Two-wire Serial Protocol, 2019).

1.5.1.4. Características del protocolo I2C.

Las características del protocolo I2C se detallan a continuación (Teja-Gunukula y Raouf-Mohammed, 2019):

- Sincrónico en la naturaleza: una transferencia de datos siempre es iniciada por un dispositivo maestro. Una señal de reloj (SCL) sincroniza la transferencia de datos. La velocidad del reloj puede variar sin interrumpir los datos. La velocidad de datos simplemente cambiará junto con los cambios en la velocidad del reloj.
- Modelo maestro / esclavo: el dispositivo maestro controla la línea del reloj (SCL). Esta línea dicta el tiempo de todas las transferencias de datos en el bus I2C.
- Transferencia de datos bidireccional: los datos pueden fluir en cualquier dirección en el bus I2C.
- Método de interfaz en serie: I2C usa solo señales SCL y SDA. La señal SCL es la señal del reloj en serie; La señal SDA se conoce como datos en serie. En realidad, la señal SDA puede transportar tanto la dirección como los datos.

1.5.1.5. Componentes del protocolo I2C.

Los componentes del protocolo I2C se detallan a continuación (Mankar *et al.*, 2014: p. 475):

- I2C master top se compone de registro de preescala, registro de comando, registro de estado, registro de transmisión y registro de recepción. El registro de preescala se usa para reducir la señal eléctrica de alta frecuencia a una frecuencia más baja por división entera. Los datos entran inicialmente en el registro de estado y, dependiendo de ello, el registro de comandos emite los comandos. El registro de transmisión y recepción decide si transmitir o recibir los datos y estos datos se transmiten en paralelo al registro de E / S de datos
- I2C Master Byte Controller es el controlador de comando de byte y el registro de desplazamiento de E / S de datos. El controlador de comando de byte es el corazón del tráfico de comunicación I2C a nivel de byte y es una máquina de estado que genera diferentes estados de operaciones de byte I2C en función de los bits de registro de comando. El registro de desplazamiento de E / S de datos es un componente que contiene y trata los datos asociados con las actuales transacciones de escritura y lectura de I2C.

- El controlador de bits I2C Master incluye un generador de reloj y un controlador de comando de bits. Durante la transmisión, los datos se desplazan poco a poco al controlador de bits de comando y desde allí se transfieren a SDA. Durante la recepción, los datos llegan a SDA y luego al controlador de bits.

1.5.1.6. Ventajas del protocolo I2C.

Las ventajas del protocolo I2C se detallan a continuación (Mankar *et al.*, 2014: p. 478):

- Se utiliza para aplicaciones sensibles a la seguridad, como conexiones de sensores, RFID, dispositivos biométricos, etc.
- Estándares de comunicación comunes entre microcontroladores y sensores.
- Cada dispositivo es reconocido por su dirección única y puede funcionar como transmisor o receptor, dependiendo de la función del dispositivo.
- Proporciona un sistema de seguridad mejorado
- Compatible con FPGA

1.5.2. Lenguajes de programación e IDE.

Los microcontroladores por ser un sistema digital programable, necesita de un código de programa o firmware incluya las instrucciones necesarias para realizar el control del sistema embebido. El lenguaje de programación de un microcontrolador es el Lenguaje Ensamblador (.asm), lenguaje de bajo nivel, este ensamblador posee algunas diferencias entre fabricante y fabricante, no es lo mismo el lenguaje ensamblador para INTEL para PIC o aun AVR. Pero dentro del mundo de los microcontroladores podemos encontrar Compiladores de un lenguaje de alto nivel a ensamblador o mejor aún a Lenguaje Maquina (.hex) (Flores, 2009, p. 2).

En cuanto a los microcontroladores PIC, además del lenguaje Ensamblador, podemos encontrar diferentes IDE y compiladores para C, C++ y Basic, sin embargo, estas herramientas de desarrollo no son gratis y tienen su costo, entre IDE más usados están: MPLAB, ICSIMULATOR, PICBASIC, y más. Así como en la familia AVR, existe una plataforma basada en un PIC, llamada PICAXE, es un chip PIC previamente grabado con un programa bootloader, permite programarlo en lenguaje Basic y vía el puerto serial del PC. Como se puede ver cada familia, PIC y AVR, tiene sus propias herramientas de programación, lenguajes e IDE, dependerá del conocimiento del diseñador la elección de uno u otro basado en el nivel dominio, se tenga de cierto lenguaje de programación, tomando en consideración la disponibilidad, gratuidad o paga, de estas herramientas (Flores, 2009, p. 2).

1.5.3. Interfaces de Programación.

Con interfaces de programación, se hace referencia al hardware externo necesario para programar o descargar el programa escrito en el IDE a la memoria Flash del microcontrolador, por ende, este hardware o programador debe conectarse a un puerto del PC. Es en este punto donde se encuentra una gran variedad de opciones para ambos chips, AVR o PIC (Flores, 2009, p. 3).

Dentro de la familia AVR, el chip dispone de un periférico específico para la programación de su memoria, el puerto ISP, el cual es un puerto serial formado por 3 pines del microcontrolador, son estos pines, se conectan a un programador y este a un puerto del PC, para realizar el grabado o “quemado” del chip.

Existen diferentes opciones para el hardware programador como puertos del PC, es decir existen un programador por puerto paralelo, un programador USB, un programador serial, etc. Sin embargo, lo simple de estos programadores, por ejemplo, el Sample Electronics Programmer o el STK200 ambos para trabajar con el puerto paralelo del PC (Flores, 2009, p. 3).

CAPITULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

Este capítulo contiene las fases de desarrollo del sensor inteligente, en la primera etapa se describe los requerimientos que debe cumplir el dispositivo, la segunda etapa es el diseño e implementación del prototipo de sensor inteligente donde se muestran los diagramas de flujo de la programación del sensor para obtener una comunicación I2C con cualquier dispositivo maestro y el diagrama para poder detectar los pulsos del eco receptados por el transductor ultrasónico, en la tercera etapa se realiza la optimización de hardware y software del prototipo de sensor inteligente. Finalmente, la cuarta etapa es la evaluación final del sensor JA-002.

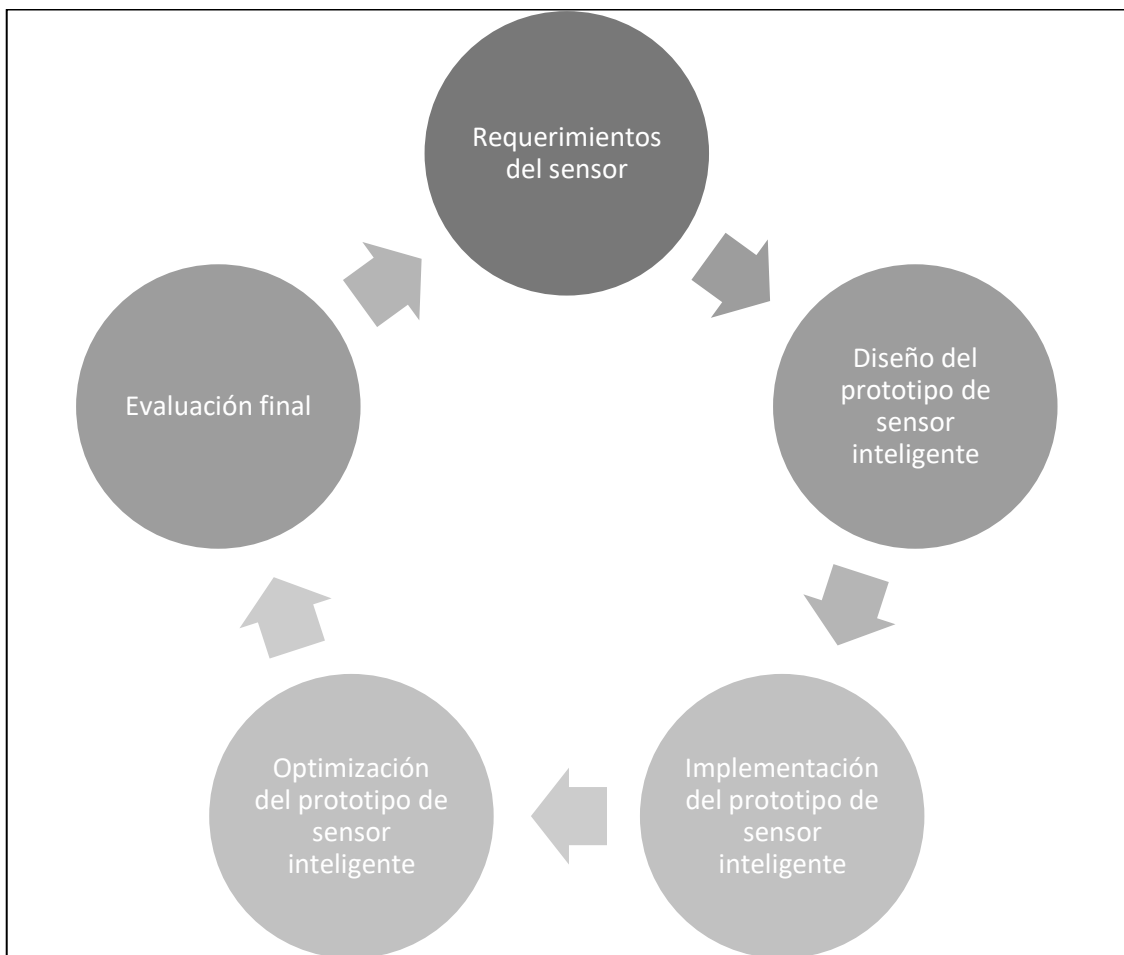


Figura 1-2. Etapas de desarrollo del sensor inteligente.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

2.1. Requerimientos para el diseño del sensor

En la actualidad existen varios dispositivos electrónicos que ayudan a las personas no videntes a su movilización como se detalló en el capítulo anterior, pero no todos son buenos y poseen varias restricciones en su funcionamiento, el sensor propuesto se orienta para la utilización en el dispositivo Eyeclip el cual actualmente tiene las siguientes características:

- **Diseño ultra portable:** Es un dispositivo con un peso menor a 40g y tiene un tamaño de 5cm, además se lo puede colocar en la mayoría de las prendas. Detecta obstáculos desde 30cm hasta 1,5m los cuales pueden ser pequeños.
- **Funciona correctamente en ambientes con temperaturas desde 20°C hasta 40°C.**
- **Gran autonomía:** Duración de 10 horas con funcionamiento continuo.
- **El sensor es un círculo de 16mm de diámetro que se siente en la parte frontal del dispositivo.** A través de este componente se detectan los obstáculos que están frente al usuario.

Este dispositivo utiliza el sensor MB1000 de Maxbotics el cual es el más próximo a las características deseables del dispositivo Eyeclip. El problema radica en el precio que tiene este producto y algunas de las características que se detalla en el capítulo anterior. Por lo cual mediante el análisis de varios sensores que pueden utilizarse en el Eyeclip podemos establecer los requerimientos que debe tener el sensor propuesto a fabricar en este trabajo de titulación. Estos requerimientos se muestran en la Tabla 1-2.

Tabla 1-2. Requerimientos a cumplir el sensor inteligente

Voltaje de funcionamiento	3.3 VDC
Corriente de trabajo	Baja (2mA – 6mA)
Rango de distancia	35cm – 200cm
Resolución	(1cm-5cm)
Tamaño	25mm x 23mm x 16mm
Número de transductores	1 (Emisor - Receptor)
Interfaz de comunicación	I2C
Frecuencia de trabajo del transductor	42Khz
Costo P.V.P	Bajo (2USD - 6USD)

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Mediante la tabla anterior se establece que el voltaje de funcionamiento de nuestro sensor debe ser de 3.3 VDC debido a que la mayoría de los dispositivos y en especial Eyeclip llevan dentro una batería de una celda (3.3V) para su alimentación. El consumo de corriente del sensor debe ser bajo porque el dispositivo debe permanecer en un funcionamiento mínimo de 8 horas durante el día para que la persona no vidente pueda realizar sus actividades sin interrupción.

El rango de distancia se establece de 35cm a 200cm porque Eyeclip funciona mediante vibración y sonido el cual cambia de frecuencia proporcionalmente a la distancia. Mediante pruebas que se realizó con el sensor MB1000 en el rango de 1cm a 35cm no se muestra mayor diferencia en cuanto a vibración y sonido. Es por esto por lo que el sensor a fabricar puede tener una zona muerta de hasta 35cm lo cual no alteraría en nada el funcionamiento de Eyeclip.

Debido a que el dispositivo es pequeño y liviano se requiere utilizar un solo transductor tanto para la emisión y recepción de ondas ultrasónicas. La comunicación que requiere el sensor propuesto es I2C porque facilita la comunicación con el microcontrolador maestro y también en proyectos futuros será factible conectar varios sensores a nuestro Eyeclip. Es importante que el sensor a desarrollarse debe ser de bajo costo, por lo cual se elegirá el hardware necesario para cumplir con las especificaciones.

2.2. Diseño e implementación del prototipo de sensor inteligente

2.2.1. Selección de hardware

2.2.1.1. Elección del transductor

En el capítulo anterior se estudió varios principios de transducción, uno de ellos, el principio de transducción piezoeléctrico, el cual ayuda a enviar y recibir señales ultrasónicas fácilmente. Partiendo de los requerimientos establecidos anteriormente, es claro que se debe utilizar un transductor que pueda trabajar a la vez como emisor y receptor.

Para esto se elige el transductor FBULS1612P, de fabricación china, el cual se adapta a los requerimientos que se tiene para la fabricación del sensor. Las características de este transductor se detallan en la Tabla 2-1 que se muestra a continuación:

Tabla 2-2. Características del transductor FBULS1612P.

Salida:	Analógica
Diámetro:	16mm
Color:	Negro
Material del case:	Plástico
Frecuencia:	40Khz \pm 2Khz
Transmisión de sonido Nivel de presión:	120dB min
Capacitancia:	2100pF
Temperatura de funcionamiento:	-30 a 80 °C
Ángulo de haz total -6dB:	50 ° \pm 10 °
Voltaje de conducción máx:	120Vp-p
Costo:	\$ 1,00

Fuente: <https://spanish.alibaba.com/g/10mm-ultrasonic-transducer-40khz.html>

Realizado por: John Hidalgo, 2019

El transductor FBULS1612P se muestra en la Figura 2-2. Se observa que tiene características similares al sensor MB1000 por lo cual es el óptimo para el funcionamiento del sensor a fabricar.



Figura 2-2. Transductor FBULS1612P

Fuente: <https://spanish.alibaba.com/g/10mm-ultrasonic-transducer-40khz.html>

2.2.1.2. Elección del microcontrolador

Anteriormente se realizó una comparación entre microcontroladores PIC Y AVR, como se estableció, en la actualidad se están utilizando más los microcontroladores AVR debido a que tienen mayor ventaja que otros. El dispositivo Eyeclip utiliza un Atmega 328P para realizar todas sus funciones de procesamiento de información.

Por lo cual se ha decidido utilizar también un Atmega 328P para la fabricación del sensor debido a sus excelentes características que incluyen la rentabilidad, baja disipación de energía, bloqueo de programación por motivos de seguridad, contador de temporizador real con oscilador separado.

Este microcontrolador normalmente se utiliza en aplicaciones de sistemas integrados como arduinos. En la Tabla 3-2 se muestran las características que poseen el microcontrolador Atmega 328P.

Tabla 3-2. Características del microcontrolador Atmega 328P.

Número de pines:	28
CPU:	RISC 8-Bit AVR
Voltaje de operación:	1.8 to 5.5 V
Memoria de programa:	32KB
Tipo de memoria de programa:	Flash
SRAM	2048 Bytes
EEPROM	1024 Bytes
ADC	10 bits
Oscilador	Interno de 8MHZ (se puede elevar hasta 20Mhz)
Temporizadores:	8-Bit x 2 & 16-Bit x 1
I2C:	Si
Temperatura de operación:	-40 °C a +85 °C
Paquetes:	8-pin PDIP 32-lead TQFP 28-pad QFN/MLF 32-pad QFN/MLF

Fuente: (Atmel, 2015)

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Es importante destacar de este microcontrolador que el voltaje de funcionamiento es de 1.8 V a 5.5V. Es decir que está dentro del rango del voltaje de funcionamiento requerido para el sensor propuesto a diseñar. A demás posee comunicación I2C y UART con lo cual se puede realizar un análisis más detallado de las señales que se recibirá en el transductor ultrasónico.

La temperatura de funcionamiento del μc también se adapta al sensor. Debido a que el sensor a diseñarse debe ser ligero y de menor tamaño se va a utilizar el paquete 32-lead TQFP el cual se muestra en la Figura 3-2:

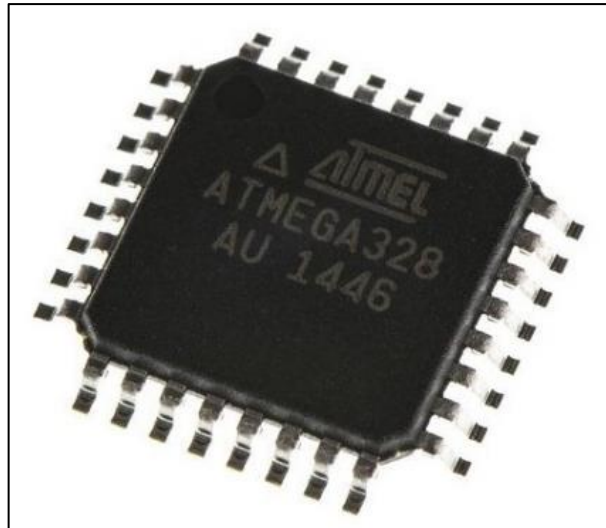


Figura 3-2. Microcontrolador Atmega 328P

Fuente: (Atmel, 2015)

2.2.2. Diseño del prototipo de sensor inteligente

Primero se analizó el funcionamiento de los sensores anteriormente estudiados y se dedujo que la parte más importante para que el sensor tenga un funcionamiento óptimo es el acondicionamiento de señal que se tiene para recibir el eco y de esta manera sea posible medir la distancia.

El diagrama electrónico del prototipo de sensor realizado en Proteus se muestra en la Figura 4-2. Este diagrama consta de dos partes, la etapa de emisión de pulsos a 42 KHz y la etapa de recepción y acondicionamiento de señal del eco para posteriormente procesarla por el microcontrolador.

En las primeras pruebas se utilizó dos transductores uno emisor y otro receptor con el fin de analizar el acondicionamiento de señal óptimo, además se utiliza un microcontrolador Atmega 328p funcionando a 20 MHz y el acondicionamiento de señal obtenido del sensor MB1000 de Maxbotics que se puede observar dentro del Datasheet del Anexo E.

El primer sensor inteligente desarrollado fue en base al sensor HC - SR04 el cual necesita suministrar un pulso corto de 10us a la entrada del disparador para iniciar el rango, y luego el módulo enviará una ráfaga de ultrasonido de 8 ciclos a 42 KHz. El eco es un objeto de distancia que tiene un ancho de pulso y un rango proporcional a la distancia el cual debe ser procesado por otro microcontrolador para obtener la distancia.

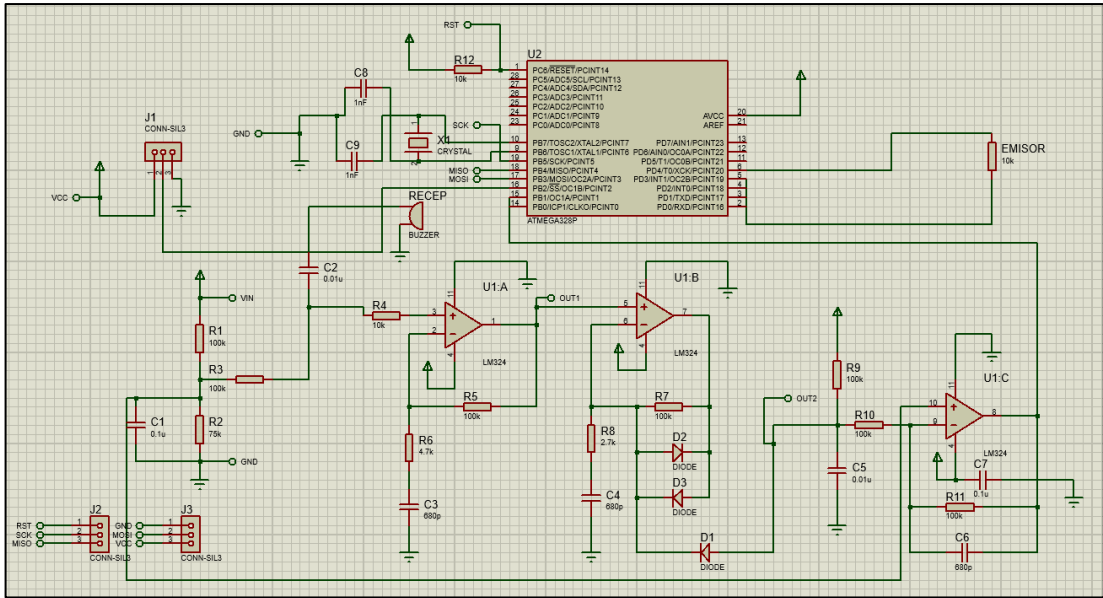


Figura 4-2. Diagrama electrónico del prototipo de sensor inteligente.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Se realizó esta prueba para comprobar el correcto funcionamiento del acondicionamiento de señal del sensor MB1000. El diagrama de bloques establecido para comprobar el funcionamiento del sensor se muestra en la Figura 5-2.

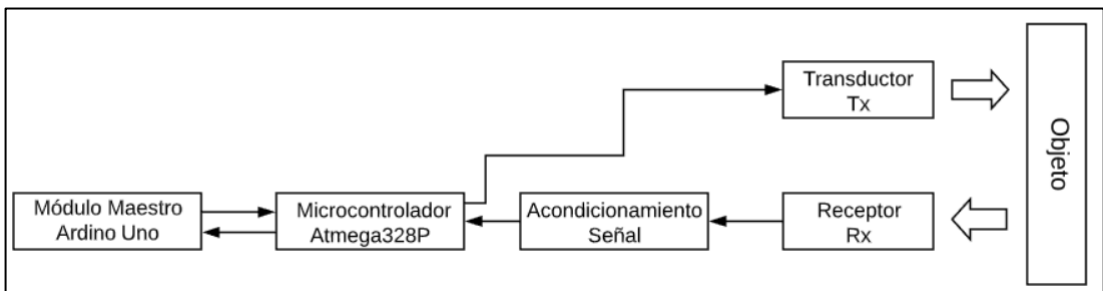


Figura 5-2. Diagrama de comprobación del funcionamiento de sensor inteligente.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

2.2.3. Etapa de emisión de pulsos ultrasónicos

La primera etapa fue desarrollar el software necesario para emitir los pulsos a 42 KHz. En base al estudio realizado al sensor HC-SR04 se comprobó mediante un osciloscopio que el número de pulsos generado por el microcontrolador es de 8 y debido a que se decidió trabajar con un Atmega 328P el programa utilizado para programar este microcontrolador fue el Atmel Studio 6.2. El diagrama de flujo para emisión de los 8 pulsos se puede evidenciar en la Figura 6-2.

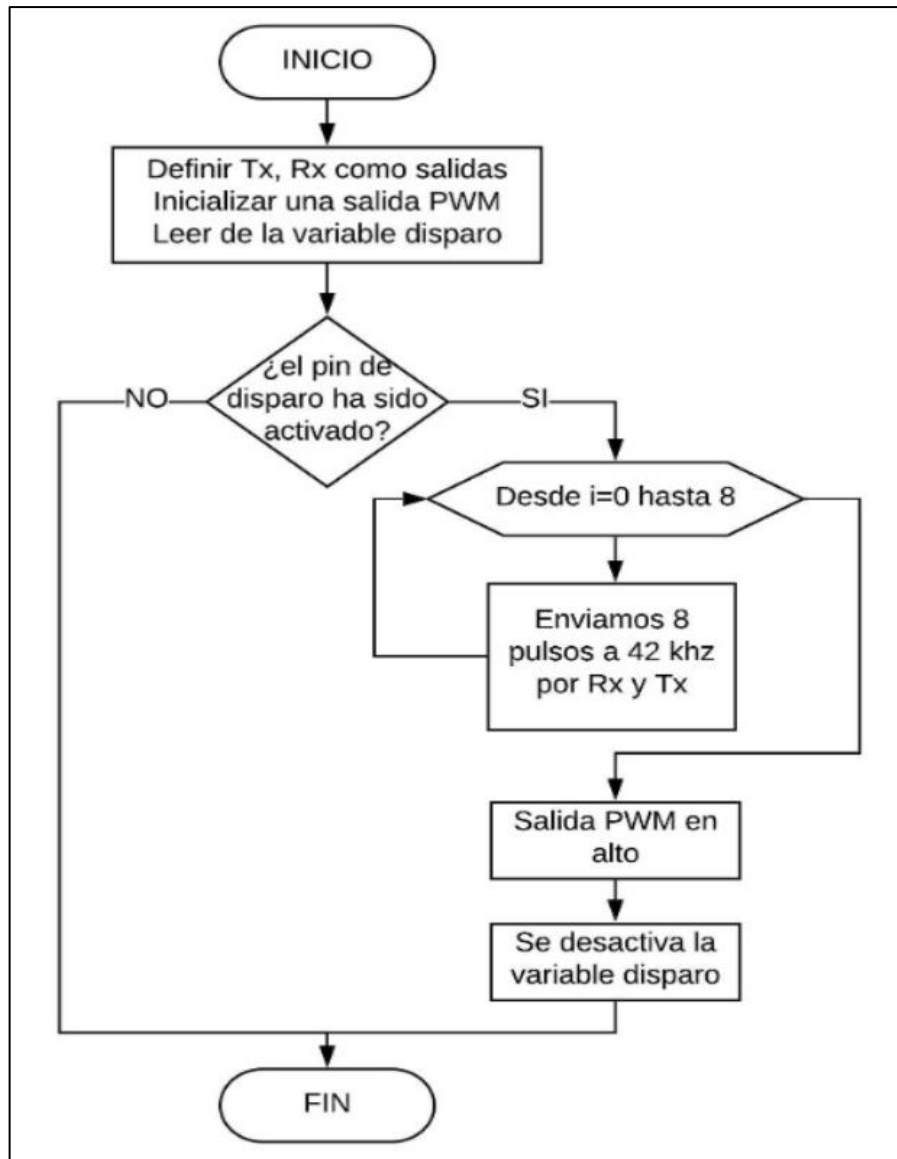


Figura 6-2. Diagrama de flujo para emitir 8 pulsos ultrasónicos.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

2.2.4. Etapa de recepción de pulsos ultrasónicos

A continuación, se desarrolló el software para la recepción del eco y emisión del pulso PWM por el pin D10 del Atmega328P el cual sigue el siguiente diagrama de flujo mostrado en la Figura 6-2.

El algoritmo que se representa en la Figura 7-2 es sencillo y corto. Primero configuramos los registros para los puertos. Por lo que se definen los pines como salidas. Esos deben ser: TX out1, TX out2 y el pin de salida del eco. Luego se configuran los pines para disparar una interrupción.

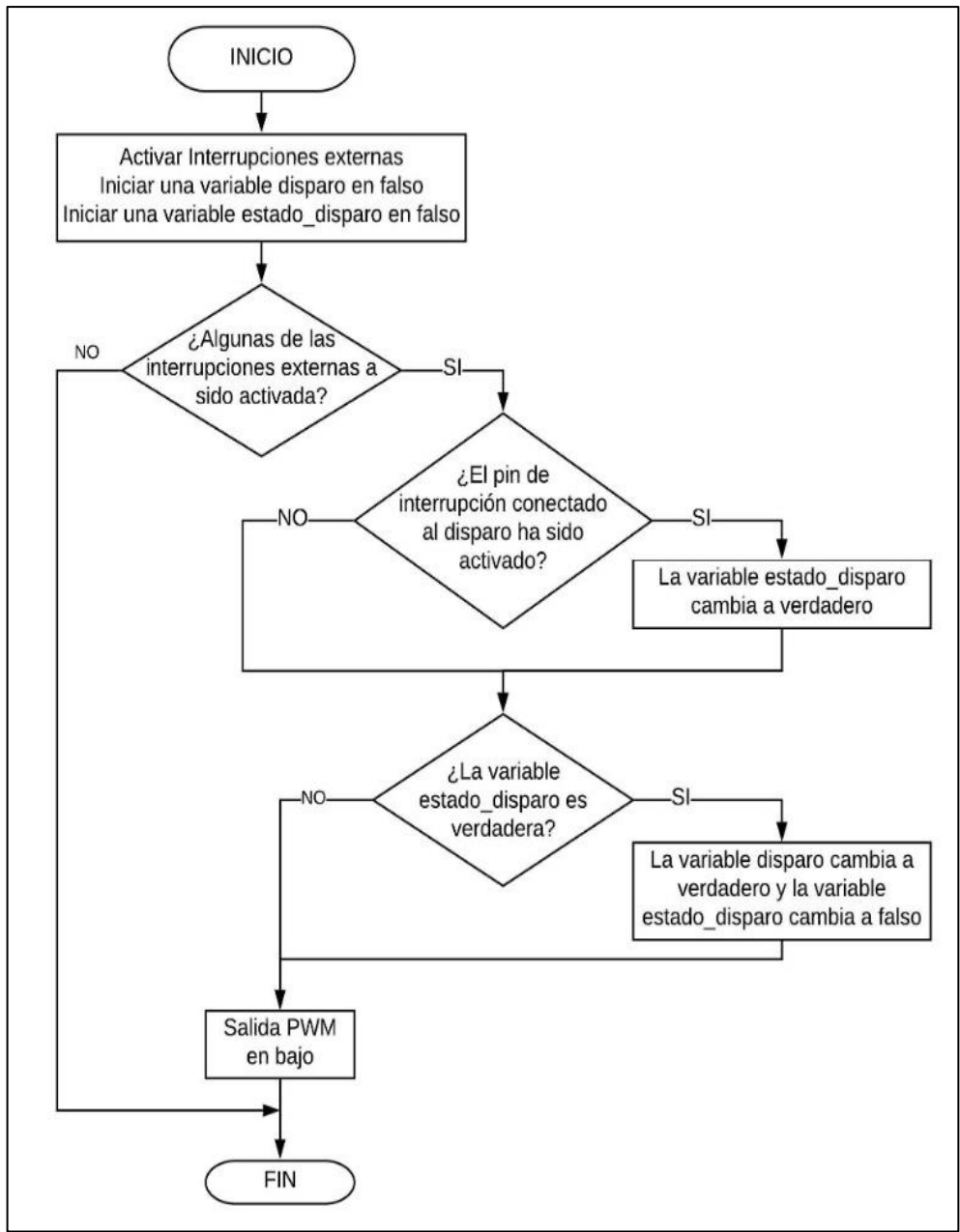


Figura 7-2. Diagrama de flujo para recepción del eco y emisión del pulso PWM.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En el vector de interrupción, si algunas de las interrupciones externas están en nivel lógico alto, eso significa que el pin de activación se activó para que se inicie el código, esto activará el bucle infinito. Primero se crea los 8 ciclos de 42 KHz en Tx out1 y Tx out 2 pines y eso enviará la onda de sonido de 42 KHz para ello se debe establecer un retraso de 11.9us, se hace este proceso 8 veces y luego se establece el pin PWM elegido en alto.

Ahora, cuando se detecta la señal rebotada, se configura el pin de eco en bajo y el pulso termina.

2.2.5. Etapa de acondicionamiento de señal.

Se estudió el acondicionamiento de señal que tiene el sensor MB1000 de Maxbotics para la recepción del eco, se utilizan amplificadores operacionales y una serie de elementos pasivos los cuales se los analiza mediante simulaciones en Multisim. Se muestra en la Figura 8-2.

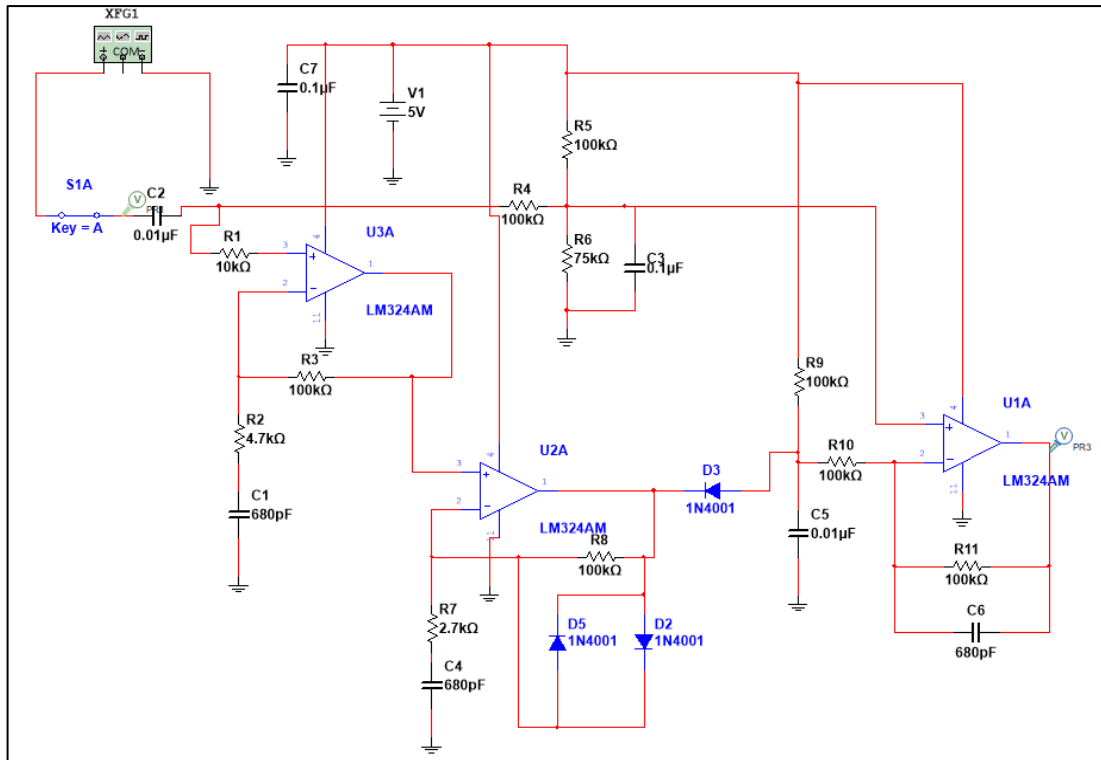


Figura 8-2. Acondicionamiento de señal del sensor MB1000

Realizado por: John Hidalgo, 2019

2.2.5.1. Simulación de filtros del acondicionamiento de señal del sensor MB1000.

Cuando se recibe la señal del eco, esta puede venir con corriente directa la cual es bloqueada con C2 que es un capacitor cerámico de 0.01μF.

Entonces así R4 solo recibe la lectura de la corriente alterna del transductor, es decir, el capacitor C2 actúa como un filtro de DC. En la Figura 9-2 se analiza la primera etapa del circuito de acondicionamiento de señal del eco.

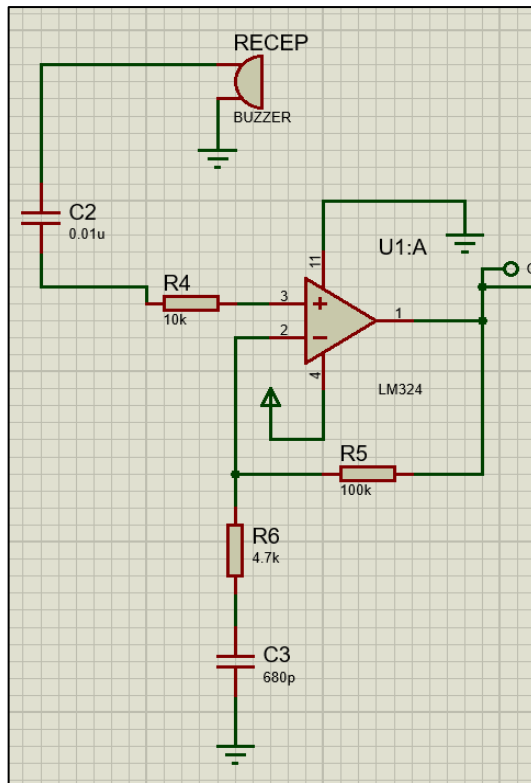


Figura 9-2. Primera etapa de acondicionamiento de señal

Realizado por: John Hidalgo, 2019.

Para comprender mejor el funcionamiento de esta etapa se procedió a realizar la simulación en Multisim con un generador de señales, el cual es configurado como se muestra en la Figura 10-2.

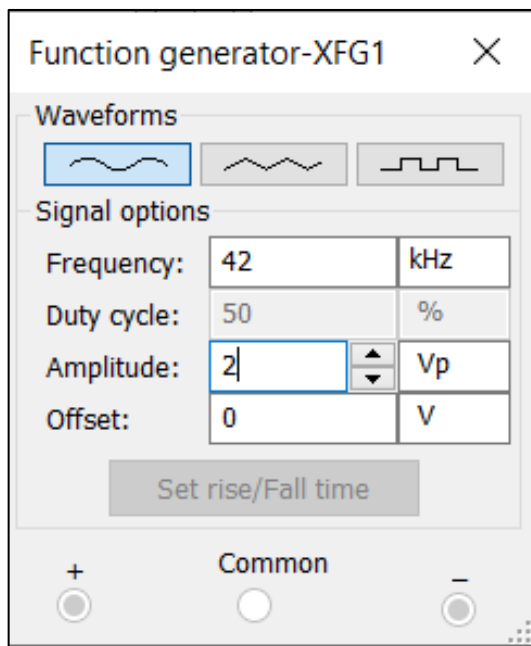


Figura 10-2. Configuración del generador de señal

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Con la configuración de los parámetros de la Figura 9-2 se genera una señal similar a la del eco que recibe el transductor ultrasónico. Se establece una frecuencia de trabajo de 42 KHz como se mencionó en los requerimientos. Es evidente que la señal de eco va a ser alterna con una amplitud de 2 en su valor pico (Vp), que es la amplitud que genera un eco al chocar las ondas ultrasónicas con un objeto.

El circuito simulado se muestra en la Figura 11-2 en el cual se muestra 3 indicadores PR1 (Eco), PR2 (Filtro DC) y PR3 (Salida primera etapa acondicionamiento señal).

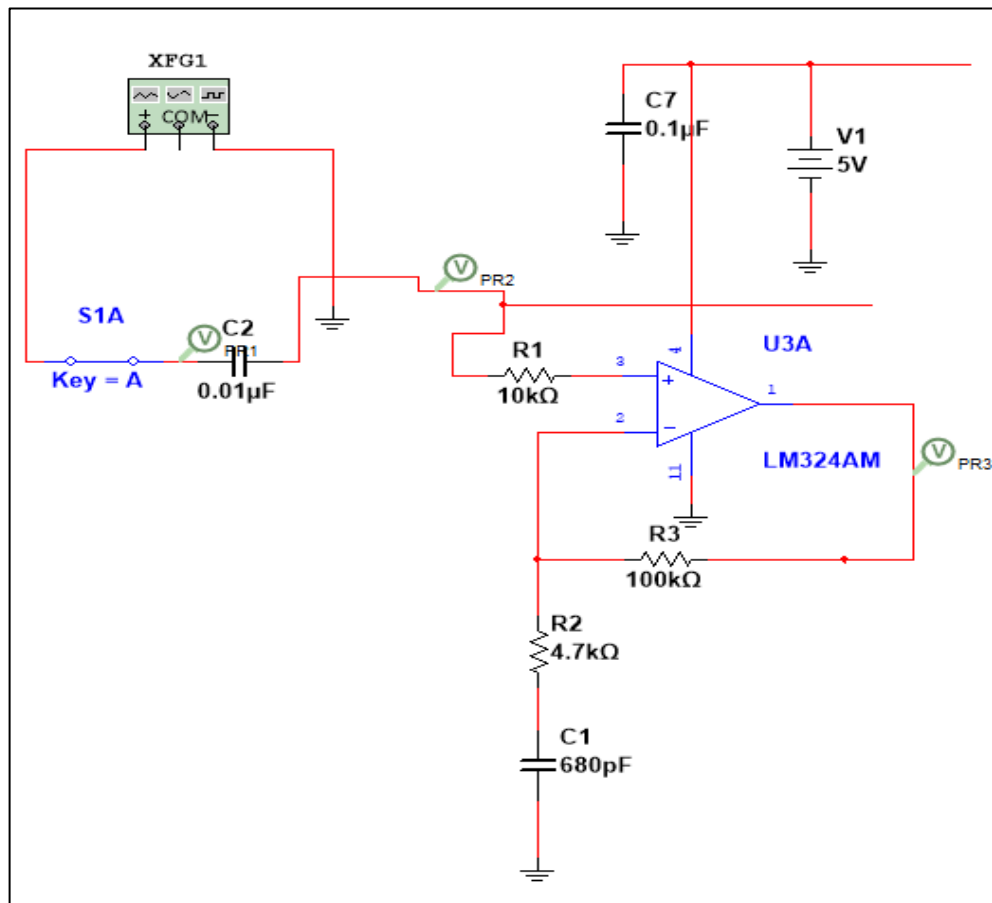


Figura 11-2. Circuito de simulación para la recepción de señal eco

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Una vez ejecutada la simulación durante un intervalo de 500µs el resultado es el que se aprecia en la Figura 12-2. Donde la gráfica de color rojo corresponde a la señal del eco resultante del generador de señales, la de color verde es la misma gráfica, pero en esta se quita el valor DC debido al filtro C2 mencionado anteriormente, la gráfica de color azul es la que se obtiene a la salida del primer amplificador operacional, en ella se evidencia una atenuación de la señal de entrada y esta solo tiene valores positivos.

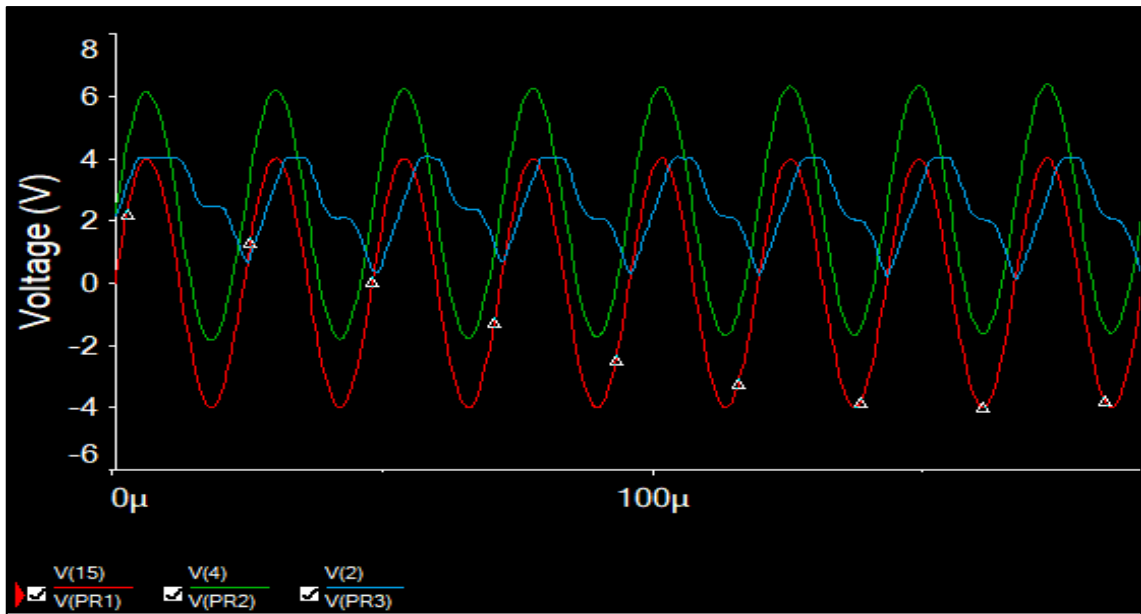


Figura 12-2. Señales resultantes de la primera etapa en PR1, PR2 y PR3.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En la Figura 13-2, se muestra la segunda etapa del acondicionamiento de señal.

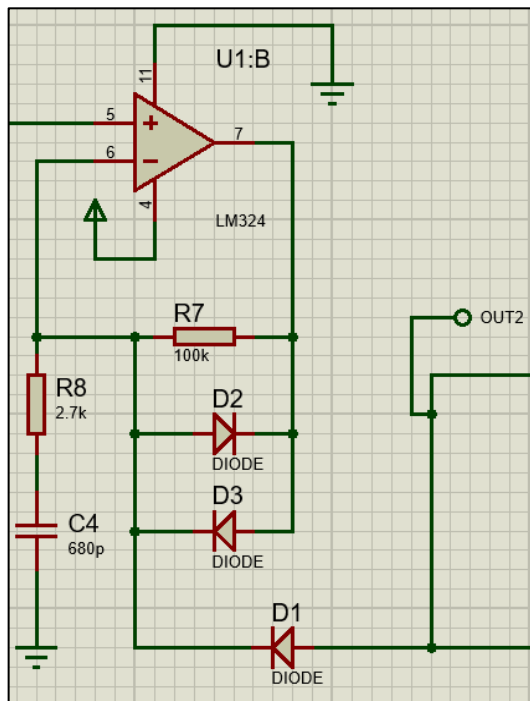


Figura 13-2. Segunda etapa de acondicionamiento de señal

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En esta etapa se utilizan una serie de diodos rectificadores los cuales ayudan a estabilizar de mejor manera la señal de eco que es receptada por el transductor ultrasónico. Las formas de señales resultantes de los indicadores de está simulación se muestra en la Figura 14-2.

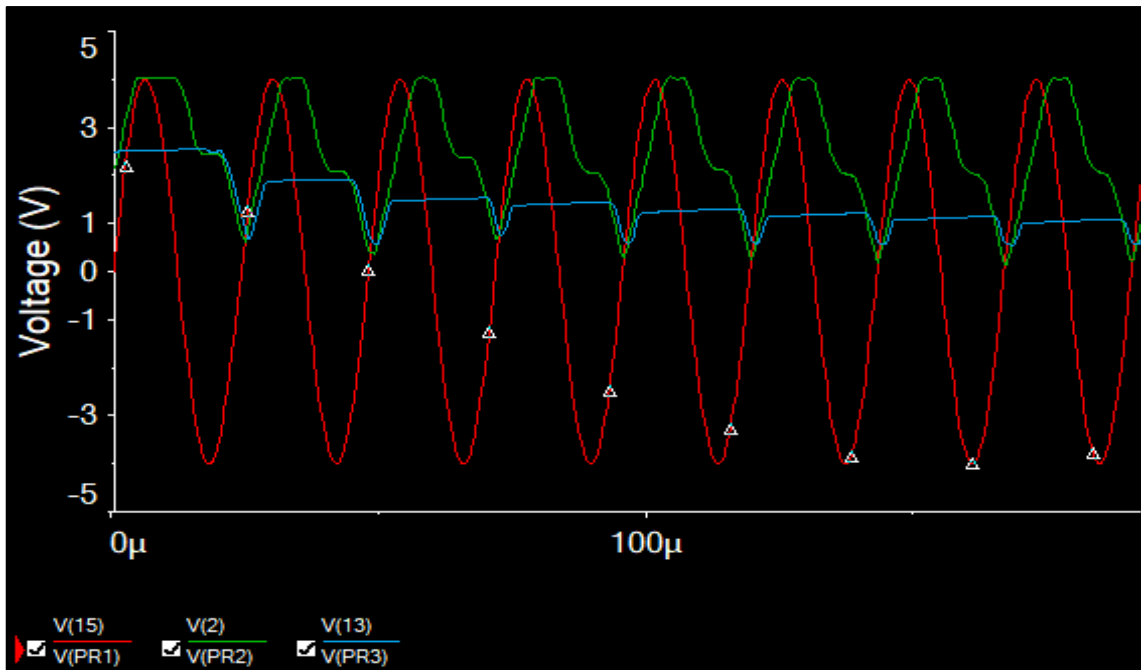


Figura 14-2. Señales resultantes de la segunda etapa del acondicionamiento de señal.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

La señal de color azul muestra la salida de esta etapa, se puede apreciar que la señal se recorta debido a los diodos rectificadores. Finalmente, para comprender la tercera etapa se optó por simular todo el circuito acondicionador de señal para determinar la señal de salida definitiva. La respuesta de la simulación es la que muestra la Figura 15-2.

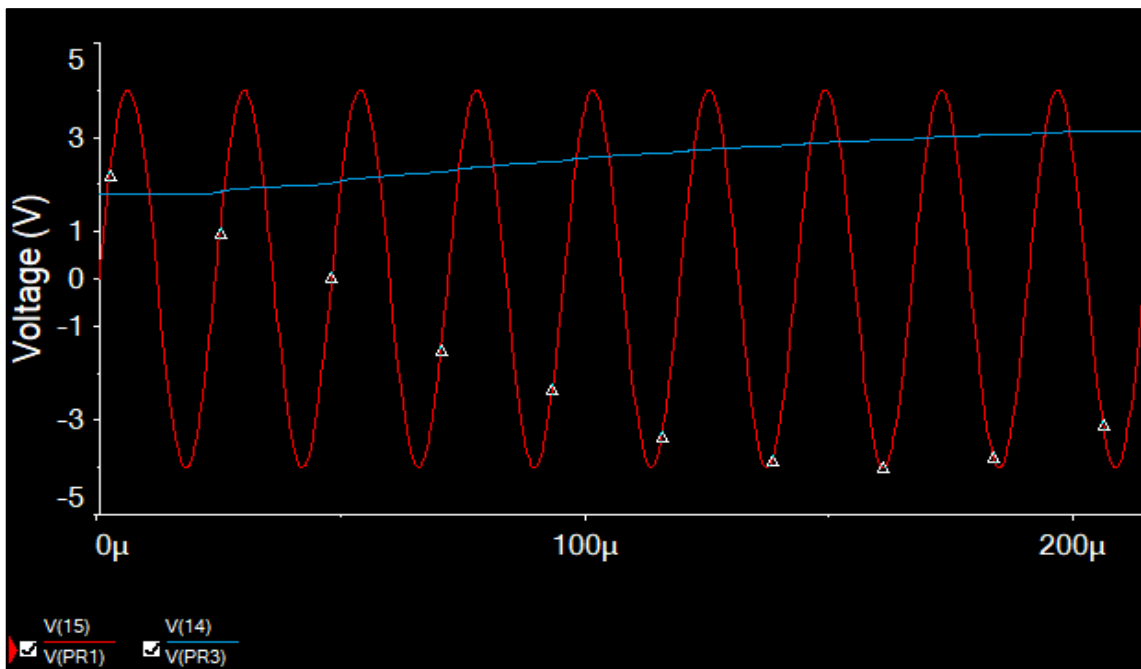


Figura 15-2. Resultantes al sumar todas las etapas del acondicionamiento de señal.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En la gráfica de color azul se indica la salida del acondicionamiento de señal, mientras que la gráfica de color rojo muestra el eco simulado por el generador de señales. Mediante esta imagen se establece que el acondicionamiento de señal obtenido del sensor Mb1000 de Maxbotics proporciona una salida positiva que varía en función del eco recibido, mientras más ondas de eco se reciba mayor crece la señal de salida del acondicionamiento de señal.

Debido a que las simulaciones del circuito acondicionador de señal no son consistentes porque no se puede simular correctamente el eco que recibirá el transductor ultrasónico, se procedió a realizar un primer prototipo del sensor inteligente en un protoboard.

2.2.6. Implementación en el protoboard del primer prototipo de sensor inteligente

Una vez finalizado el estudio del diagrama esquemático del sensor inteligente se procedió a implementar el primer prototipo en un protoboard siguiendo el diagrama electrónico mostrado en la figura 3-2. Los materiales necesarios para la implementación se muestran en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2. Materiales para la implementación del primer prototipo de sensor

Cantidad	Descripción
1	Atmega328P
1	Oscilador 20Mhz
2	Transductores ultrasónicos FBULS1612P
2	Capacitores cerámicos 22pf
3	Capacitores cerámicos 680pF
2	Capacitores cerámicos 0.1uF
2	Capacitores cerámicos 0.01uF
3	Diodos rectificadores 1N4004
7	Resistencias 100Kohm
2	Resistencias 10Kohm
1	Resistencia de 4.7Kohm
1	Resistencia de 2.7Kohm
1	Resistencia de 75Kohm
1	LM324 (Amplificador Operacional)

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En la Figura 16-2 se muestra el circuito electrónico del sensor inteligente implementado en una protoboard con los materiales detallados en la Tabla 4-2.

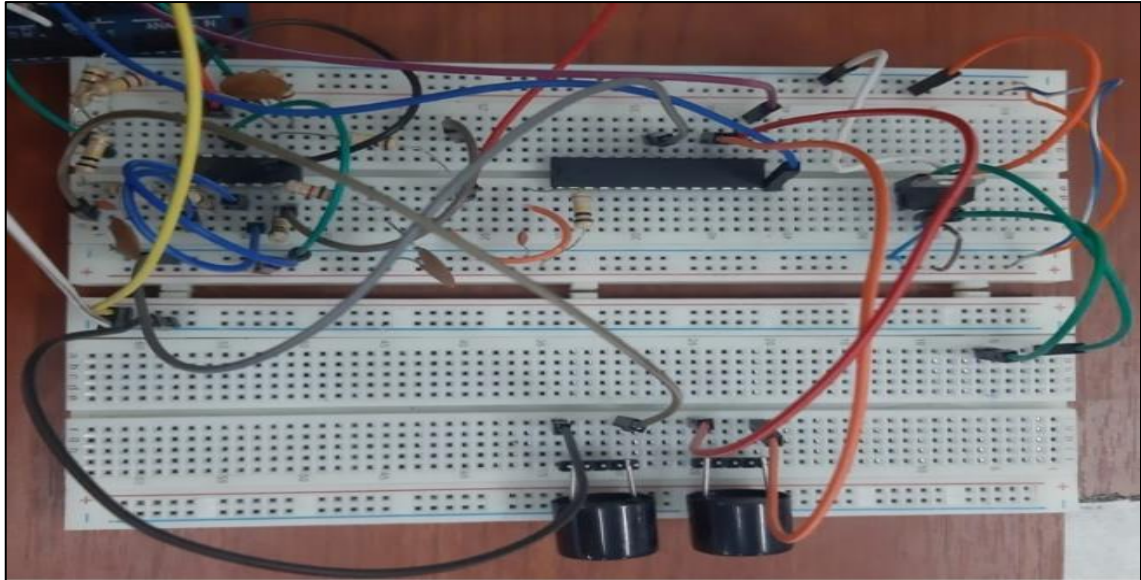


Figura 16-2. Implementación en protoboard del sensor inteligente.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

2.2.7. Evaluación del primer prototipo en protoboard de sensor inteligente.

Una vez programado el microcontrolador Atmega 328P siguiendo los algoritmos de la Figura 5-2 y Figura 6-2, se realizó pruebas con el fin de verificar el correcto funcionamiento del primer prototipo de sensor inteligente bajo el escenario mostrado en la Figura 17-2 con segmentación en intervalos de 30cm de distancia. Para realizar las primeras pruebas de medición se utilizó una caja de cartón de 21cm x 21cm x 7cm, como el primer prototipo de sensor inteligente está programado en base al funcionamiento del sensor HC-SR04, este tendrá una salida PWM y mediante un sistema maestro (Arduino Uno) se calcula la distancia.

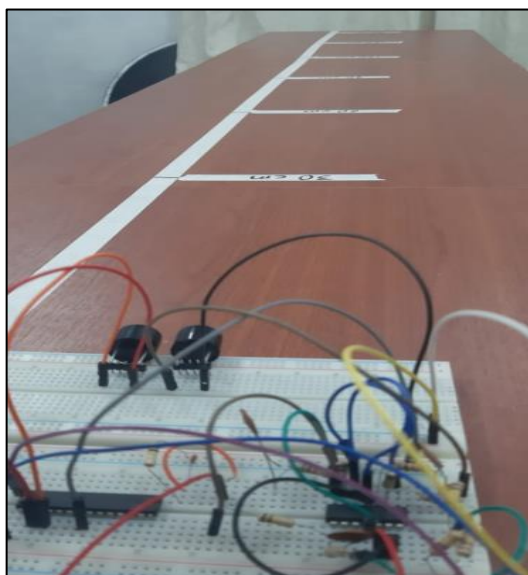


Figura 17-2. Escenario de prueba para el primer prototipo de sensor.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

El algoritmo para calcular la distancia mediante este ancho de pulso es bastante conocido y se lo detalla a continuación:

$$velocidad = \frac{distancia\ recorrida}{tiempo} \quad (1)$$

Donde la velocidad es la del sonido=340m/s, pero usaremos las unidades en cm/us debido a que trabajaremos en centímetros y microsegundos, el tiempo es aquel que se tarda en llegar el ultrasonido al objeto y regresar al sensor. La distancia recorrida es dos veces la distancia hacia el objeto, reemplazando en la siguiente ecuación tenemos:

$$\frac{340m}{s} \times \frac{1s}{1000000us} \times \frac{100cm}{1m} = \frac{2d}{t}$$

$$d(cm) = 0,017 * t(us) \quad (2)$$

La ecuación (2) es la que se debe utilizar en el sistema embebido esclavo para poder calcular la distancia mediante el ancho de pulso que proporciona nuestro sensor inteligente, los datos de las pruebas realizadas en base al escenario de la Figura 16-2, se muestran en la Tabla 5-2. Se estableció para el rango de medida de 1cm hasta 180cm.

Tabla 5-2. Distancia medida con el primer prototipo de sensor armado en un protoboard.

Distancia real (cm)	Distancia medida por el sensor inteligente (cm)
10	10
20	20
30	30
40	41
50	51
60	61
70	72
80	No mide (2cm)
90	No mide (4cm)
100	No mide (6cm)
110	No mide (1cm)
120	No mide (0cm)
130	No mide (4cm)

Continuación de Tabla 5-2.

140	No mide (8cm)
150	No mide (5cm)
160	No mide (4cm)
170	No mide (6cm)
180	No mide (7cm)

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En la Tabla 5-2 se muestra un intervalo de 10cm hasta llegar a 180cm, es claro que en mediciones cortas el sensor funciona correctamente, pero cuando se requiere medir distancias más allá de 75cm el sensor no logra recibir completamente el eco ultrasónico y debido a esto emite un ancho de pulso que no es correcto.

Mediante el estudio realizado al sensor HC SR04 en el capítulo anterior se evidenció que en su diagrama electrónico utiliza un MAX232 el cual se lo utiliza para generar voltajes fuera del rango de la fuente de alimentación.

Con esta característica las ondas ultrasónicas emitidas por el transductor emisor serían mayores en amplitud y no se perderían fácilmente en el medio. Hay que tener en cuenta que el acondicionamiento de señal utilizado en este primer prototipo funciona correctamente, caso contrario no se tendría ninguna medición.

Una de las soluciones para medir distancias largas es incrementar un MAX232 en la etapa de emisión de pulsos ultrasónicos, pero al usar este componente se incrementará el consumo de corriente en el sensor y no cumpliría con los requerimientos que antes se mencionaron.

Otra de las razones posibles por las cuales el sensor no puede medir distancias largas es debido a que con el uso de cables en un protoboard pueden existir pérdidas de energía durante la etapa de recepción. Para solucionar este problema se debe realizar una placa de circuito impreso.

2.2.8. *Diseño del circuito impreso del primer prototipo de sensor inteligente.*

Para elaborar el circuito impreso del sensor inteligente se utilizó el software Proteus 8 con el cual mediante el uso de la herramienta PCB Layout se obtuvo el diagrama de circuito impreso del primer prototipo de sensor mostrado en la Figura 18-2.

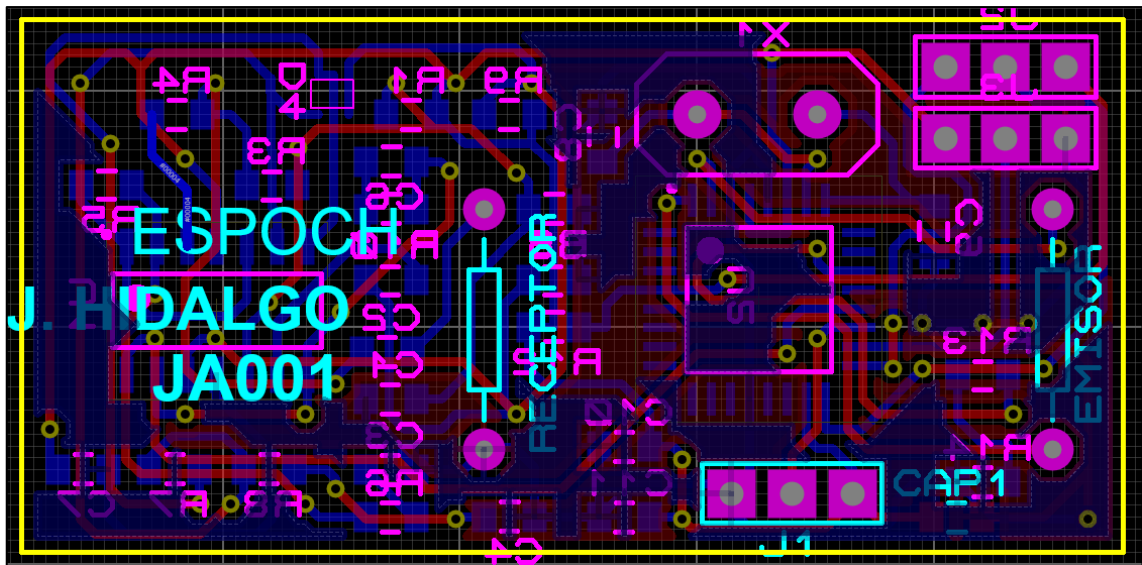


Figura 18-2. Diseño del PCB para el primer prototipo de sensor inteligente.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En este diseño se utilizó una PCB de doble capa y todos los elementos utilizados fueron de montaje superficial (SMD). A través del estudio que se realizó en el capítulo anterior sobre diseño profesional de PCB's se establecen algunas reglas para evitar problemas al trabajar con altas frecuencias, las cuales se detallan a continuación:

- Utilización de capacitores de desacople, estos deben ir lo más cercano a los pines de la fuente de alimentación.
- Correcta utilización de capas de señal, si en la capa superior las pistas de señal están hechas de forma horizontal en la capa inferior deben estar de forma vertical.
- Se debe generar un plano general para la tierra
- Las pistas no deben tener ángulos de 90° debido a que pueden contribuir con las EMI (Interferencias Electromagnéticas).

Luego de diseñar la PCB profesional del prototipo y verificar que se cumplan con las normas para trabajar en altas frecuencias sin imprevistos, se procede a la fabricación, mediante la utilización de un router CNC como se observa en la Figura 19-2.

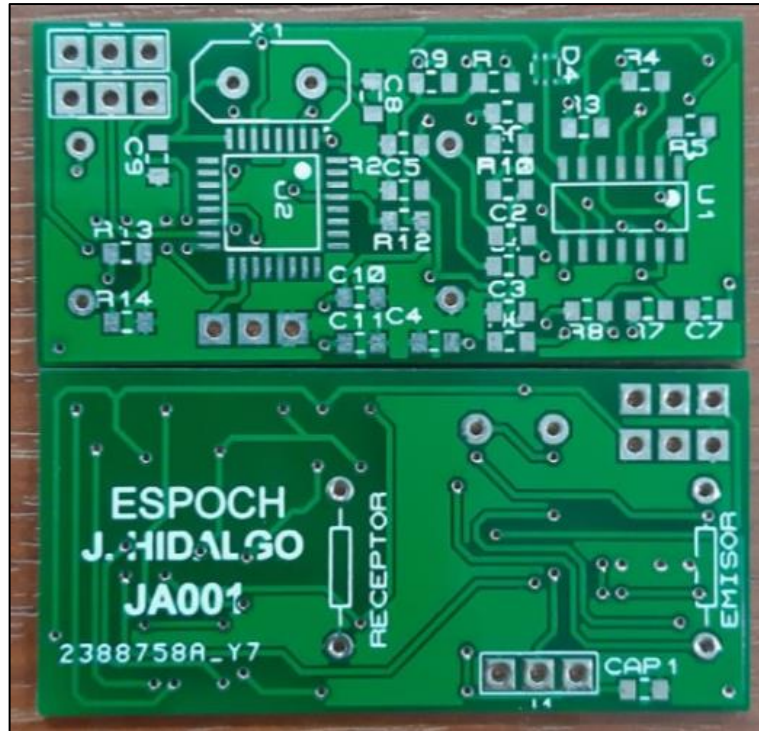


Figura 19-2. PCB profesional del primer prototipo de sensor

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Después de realizar el proceso de soldadura de los componentes electrónicos en la PCB se obtiene el siguiente resultado mostrado en la Figura 20-2.

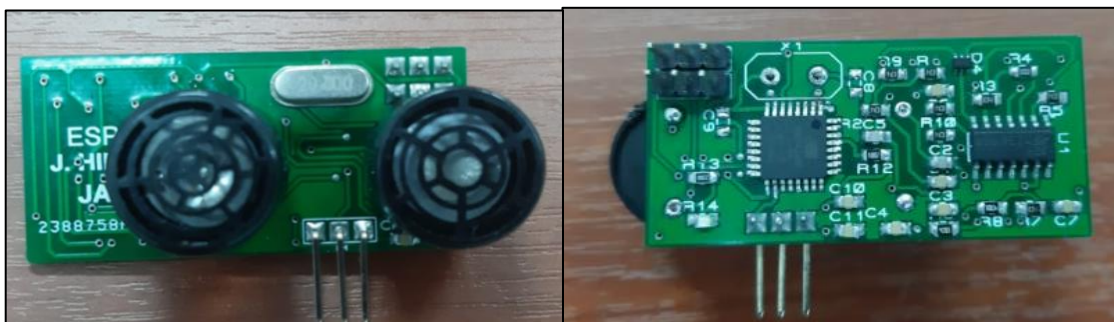


Figura 20-2. Implementación de PCB profesional del primer prototipo de sensor

Realizado por: John Hidalgo, 2019

2.2.9. Evaluación del primer prototipo en PCB de sensor inteligente

El Atmega328P de este sensor es programado a través ICSP (Programación Serial En Circuito) mediante el software Atmel Studio. Una vez finalizado todo el ensamblaje y programado mediante los algoritmos utilizados anteriormente, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 6-2.

Tabla 6-2. Distancia medida con el primer prototipo de sensor.

Distancia real (cm)	Distancia medida por el sensor inteligente (cm)	Distancia real (cm)	Distancia medida por el sensor inteligente (cm)
10	10	100	103
20	20	110	No mide (1cm)
30	30	120	No mide (0cm)
40	41	130	No mide (4cm)
50	51	140	No mide (8cm)
60	61	150	No mide (5cm)
70	72	160	No mide (4cm)
80	83	170	No mide (6cm)
90	93	180	No mide (7cm)

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Esta vez se logró obtener mediciones de hasta 1m, pero no cumple con los requerimientos establecidos al inicio de este capítulo por lo que se optó por mejorar el algoritmo de emisión y recepción de ondas ultrasónicas y utilizar el mismo acondicionamiento de señal.

2.3. Optimización del sensor inteligente

Para la optimización del sensor inteligente se realizará cambios tanto en software como en hardware como se describe a continuación:

2.3.1. Optimización en hardware del sensor inteligente.

Para la optimización del hardware del sensor inteligente se utilizó un solo transductor para la emisión y recepción de pulsos ultrasónicos, también el microcontrolador funciona a 8Mhz, es decir, no se va a usar un oscilador externo ya que no requiere un mayor procesamiento de información.

De esta manera disminuirá el tamaño de la PCB, lo que ayuda a cumplir con los requerimientos establecidos. Los materiales por utilizar en el nuevo prototipo de sensor inteligente optimizado se muestran en la Tabla 7-2.

Tabla 7-2. Materiales para la implementación del prototipo de sensor optimizado

Cantidad	Descripción
1	Atmega328P
1	Transductores ultrasónicos FBULS1612P
3	Capacitores cerámicos 680pF
2	Capacitores cerámicos 0.1uF
2	Capacitores cerámicos 0.01uF
2	BAV99 (Diodo rectificador de alta conmutación)
7	Resistencias 100Kohm
2	Resistencias 10Kohm
1	Resistencia de 4.7Kohm
1	Resistencia de 2.7Kohm
1	Resistencia de 75Kohm
1	LM324 (Amplificador Operacional)

Realizado por: John Hidalgo, 2019

2.3.1.1. Diagrama electrónico del sensor inteligente JA-002

El nuevo diagrama esquemático del sensor inteligente se muestra en la Figura 21-2

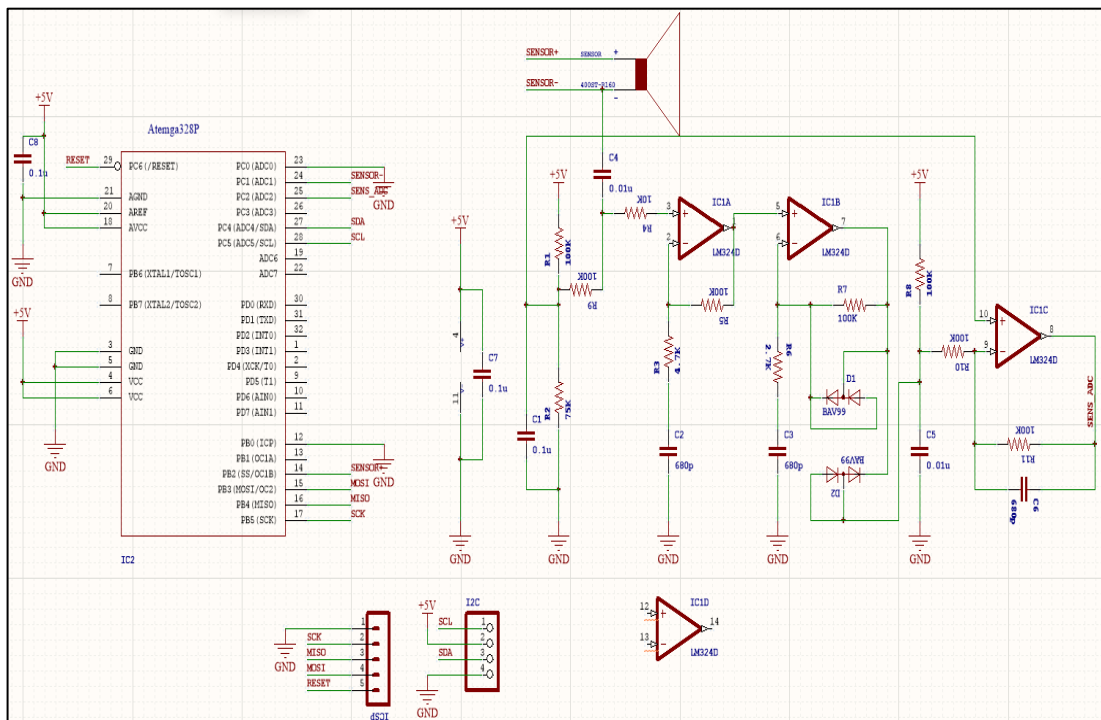


Figura 21-2. Diagrama electrónico del sensor optimizado

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Se utilizó el mismo acondicionamiento de señal estudiando anteriormente y debido a que necesitamos mejorar el software para el análisis de la recepción del eco, se decide utilizar una comunicación I2C. Para que mediante una interfaz entre el sensor y el computador sea posible realizar un análisis de la respuesta en el tiempo en Matlab. Esto ayudará a encontrar el algoritmo adecuado en función de los picos de operación para que el sensor funcione correctamente.

2.3.1.2. Diseño del PCB del sensor inteligente optimizado

Con el estudio realizado anteriormente sobre el diseño profesional de PCB se realizó el diseño del nuevo sensor inteligente optimizado tomando en cuenta los requerimientos tanto de tamaño y el tipo de comunicación del sensor. El nuevo diseño de la PCB profesional optimizada se muestra en la Figura 22-2.

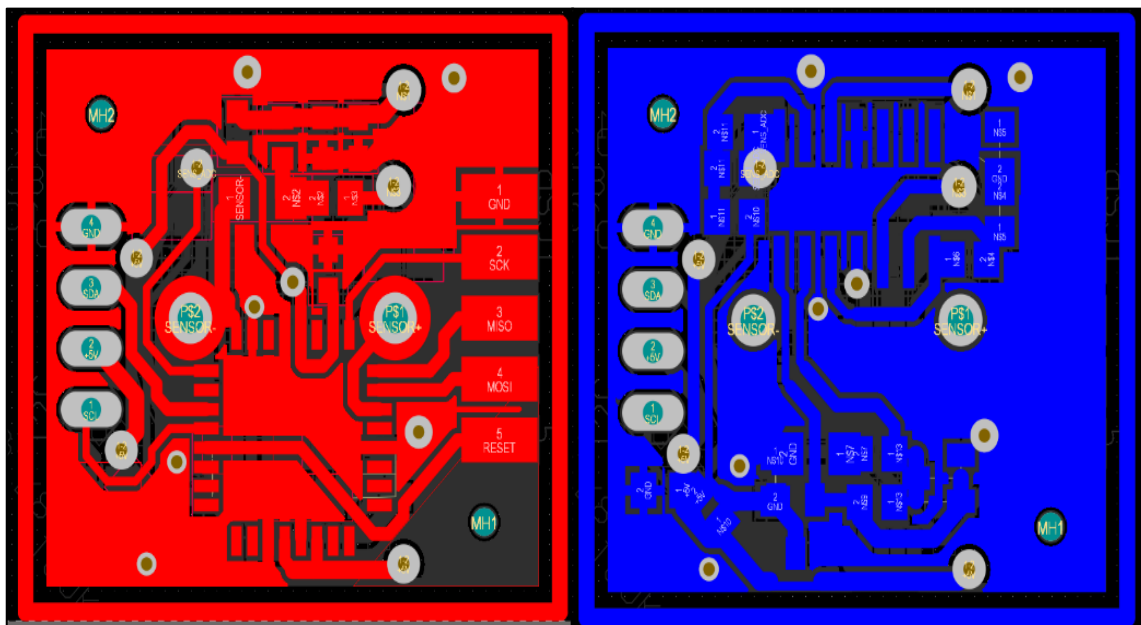


Figura 22-2. PCB optimizada del sensor inteligente JA-002

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Este diseño se lo realizó en Altium Designer debido a que brinda más beneficios en comparación con Proteus, los cuales se los detalló en el anterior capítulo y también porque en empresas manufactureras a gran escala utilizan este software para diseñar PCB's profesionales.

Luego de mandar a fabricar la PCB diseñada y soldar los componentes SMD como se muestra en el Anexo C se obtiene el resultado mostrado en la Figura 23-2.

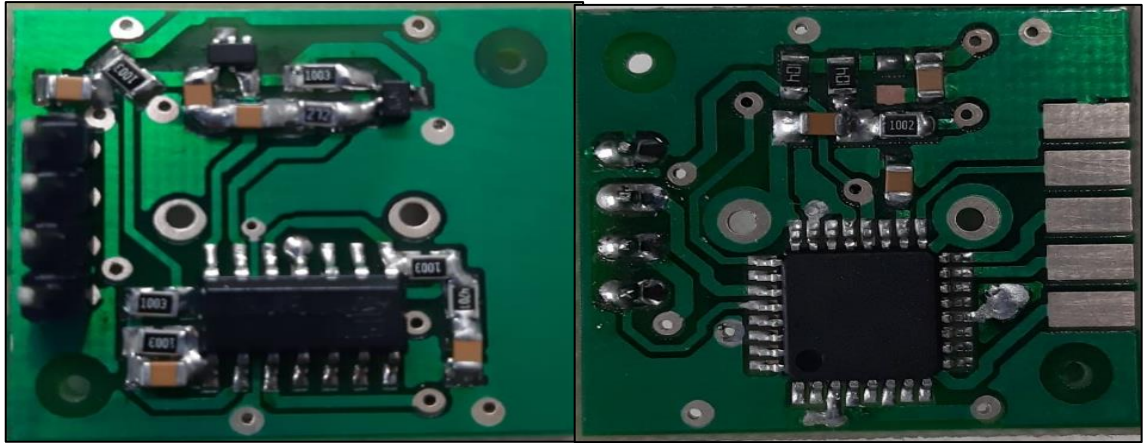


Figura 23-2. Implementación de PCB optimizada del sensor JA-002

Realizado por: John Hidalgo, 2019

2.3.1.3. Ensamble final del sensor inteligente optimizado.

Todos los componentes utilizados fueron de montaje superficial para disminuir el tamaño y peso del sensor inteligente. El ensamble final del sensor es el mostrado en la Figura 24-2, con el cual se realizará pruebas para definir el algoritmo con el cual se recepte de mejor manera el eco recibido por el transductor ultrasónico.

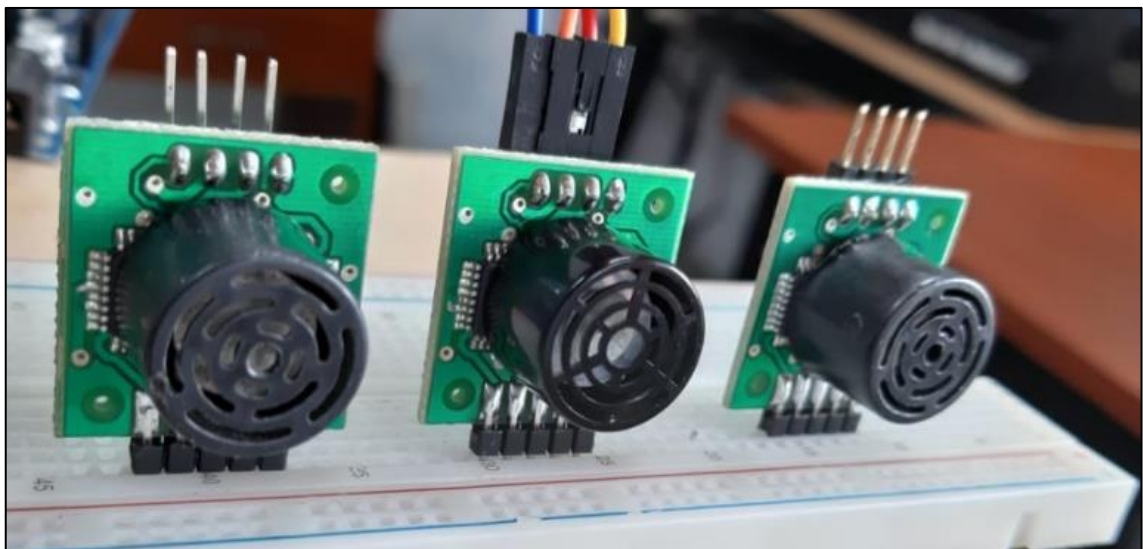


Figura 24-2. Ensamble final del sensor JA-002

Realizado por: John Hidalgo, 2019

2.3.2. Optimización de software del sensor inteligente.

Para optimizar de mejor manera el algoritmo de programación de nuestro sensor inteligente y lograr analizar los datos analógicos receptados por el transductor ultrasónico se realizó una comunicación entre el sensor y el computador el cual se muestra en la Figura 25-2.

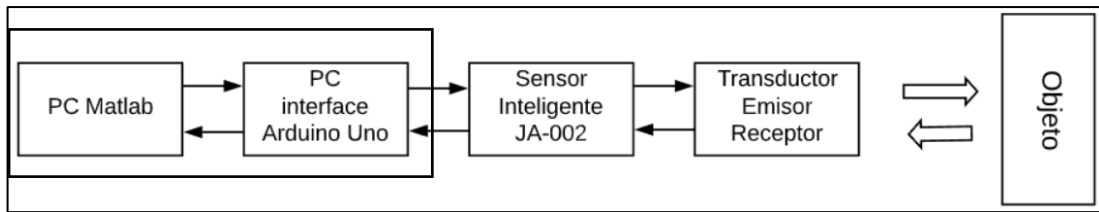


Figura 25-2. Diagrama para la comunicación entre el sensor y el computador.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

2.3.2.1. Algoritmo para la comunicación I2C entre el sensor JA002 y el módulo maestro

Mediante la comunicación entre el computador, la PC interfaz y el sensor fue posible analizar los datos analógicos receptados por el microcontrolador del sensor, el algoritmo programado en el sensor para la comunicación I2C es el que se muestra en la Figura 26-2.

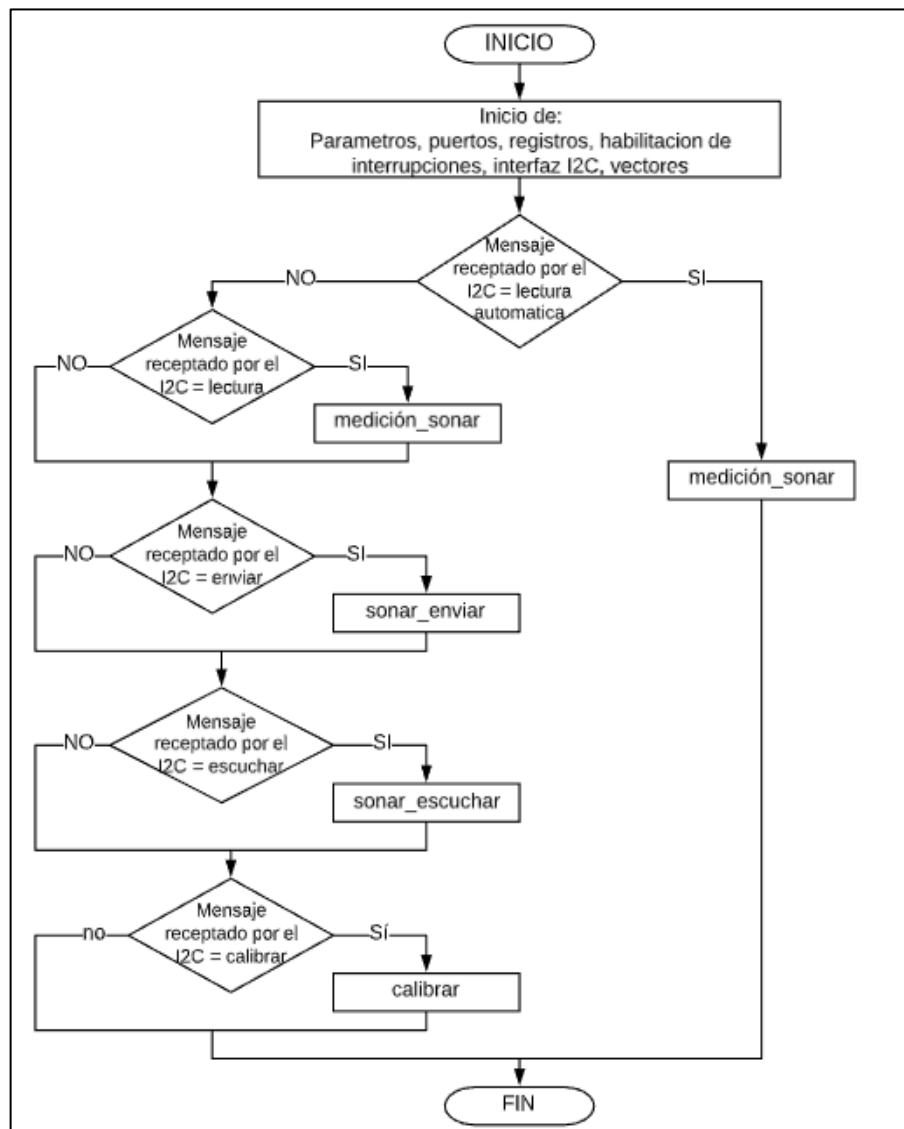


Figura 26-2. Diagrama del algoritmo para comunicación I2C

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Se observa que en este algoritmo se inicializa todos los parámetros dentro del microcontrolador para que la comunicación I2C entre el sensor y el Arduino (PC interfaz) sea correcta. Los comandos enviados por el Arduino a través del I2C al sensor son:

- Lectura automática: Ejecuta la función medición sonar.
- Lectura: Ejecuta la función medición sonar.
- Enviar: Ejecuta la función sonar enviar.
- Escuchar: Ejecuta la función sonar escuchar.
- Calibrar: Ejecuta la función calibrar.

Cada una de las funciones detalladas anteriormente también están programadas dentro del microcontrolador. Las funciones que serán utilizadas por Matlab para realizar el análisis de la señal analógica recibida por el sensor inteligente son:

- Calibrar
- Sonar
- Enviar
- Sonar - escuchar.

2.3.2.2. Configuración de la interfaz Realterm desde Matlab.

La PC interfaz actúa como un puente I2C a UART para que el computador pueda fácilmente obtener los datos enviados por el sensor. Así es posible leer los datos enviados por el sensor a la PC. Se utilizó la interfaz Realterm con cual se recopila los datos para almacenarlos en un archivo y posteriormente abrir ese archivo en Matlab.

La configuración realizada en Matlab para abrir la interfaz Realterm se muestra en la Figura 27-2.

```
hrealterm = actxserver('realterm.realtermintf');  
hrealterm.baud = 115200;  
hrealterm.Port = '5';  
hrealterm.PortOpen = 5;  
hrealterm.CaptureFile = FNAME;  
invoke(hrealterm, 'startcapture');  
fid = fopen('C:\temp\capture.txt', 'r');
```

Figura 27-2. Algoritmo para abrir la interfaz Realterm desde Matlab.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En esta configuración es muy importante establecer la velocidad de comunicación con la cual se está trabajando el puerto COM (1152000 Baudios), que el computador le asigna a la PC interfaz (Arduino). Así también establecer el nombre del archivo en el cual se almacenarán los datos obtenidos por el Realterm a través del puerto serial.

El programa que se realizó en Matlab simplemente pretende obtener los datos calibrados y reales del sensor para posteriormente analizarlos y establecer un algoritmo que nos ayude a la detección del Eco receptado por el transductor.

2.3.2.3. Algoritmo de calibración del sensor inteligente optimizado

Cuando el sensor es encendido, inmediatamente realiza una función de calibración la cual está dada por el algoritmo mostrado en la Figura 28-2.

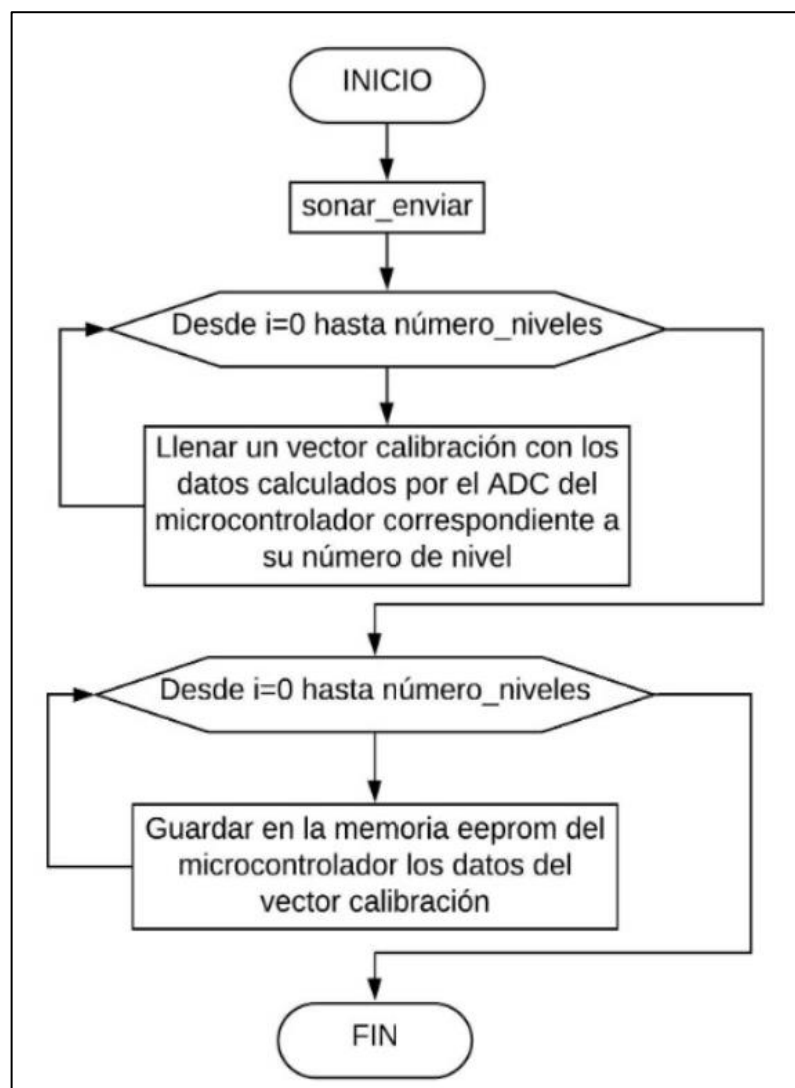


Figura 28-2. Algoritmo para la función de calibración

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En este algoritmo se utiliza la función *sonar_enviar* que se muestra en la Figura 27-2 para emitir los pulsos ultrasónicos a través del transductor. Luego se almacena en un vector los datos calculados por el ADC del microcontrolador y los guarda en la memoria Eeprom del microcontrolador para su posterior análisis en Matlab.

2.3.2.4. Algoritmo para el envío de pulsos ultrasónicos del sensor inteligente optimizado.

La función *sonar_enviar* envía 13 pulsos a través del transductor ultrasónico. Después el transductor debe actuar como receptor, para lo cual uno de los pines conectados al transductor se lo debe definir como entrada. El tiempo en blanco que se define es de vital importancia ya que de este depende la disipación de energía que queda en el transductor al momento de enviar los pulsos. Este tiempo depende del tipo de transductor que se esté utilizando y se lo define mediante el análisis de señal que se realiza en Matlab. Esto se plasma en la Figura 29-2.

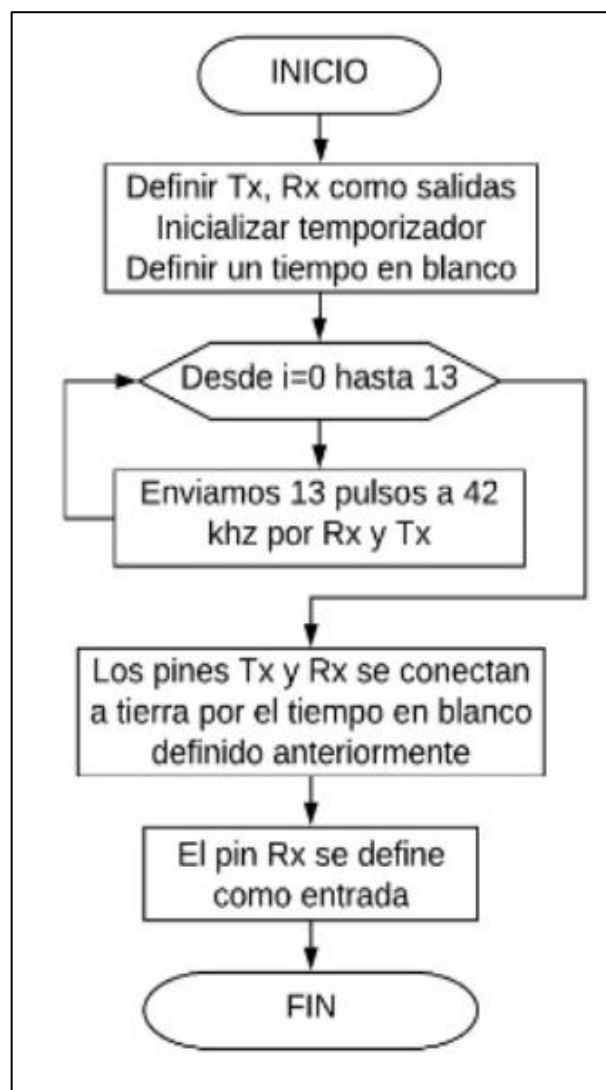


Figura 29-2. Diagrama de la función *sonar_enviar*

Realizado por: John Hidalgo, 2019

2.3.2.5. Evaluación del algoritmo para emisión de pulsos ultrasónicos.

Una vez implementadas estas funciones dentro del microcontrolador y mediante la interfaz entre el sensor y el computador se procedió a verificar que la frecuencia y número de pulsos sean los correctos como se estableció en la programación para ello se utilizó un osciloscopio con el cual obtuvo la señal de pulsos mostrada en la Figura 30-2.



Figura 30-2. Evaluación de la señal de pulsos ultrasónicos

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En la figura mostrada anteriormente se evidencia que los pulsos generados son 13 pero la frecuencia no es la correcta porque el osciloscopio muestra una frecuencia de 5.13Khz. Este problema se dio debido a la frecuencia del microcontrolador que no está trabajando a 8Mhz.

2.3.2.6. Configuración de fuses en el Atmega328p.

Para que el Atmega328P funcione a 8Mhz se necesitó configurar los fuses del microcontrolador de la siguiente manera:

- Low: 0xE2
- High: 0xDE
- Ext: 0xFD

Para esto se utilizó el programa AVRDUDESS 2.8, el cual me permite realizar una configuración interna de los fuses de cualquier microcontrolador AVR como se muestra en la Figura 31-2.

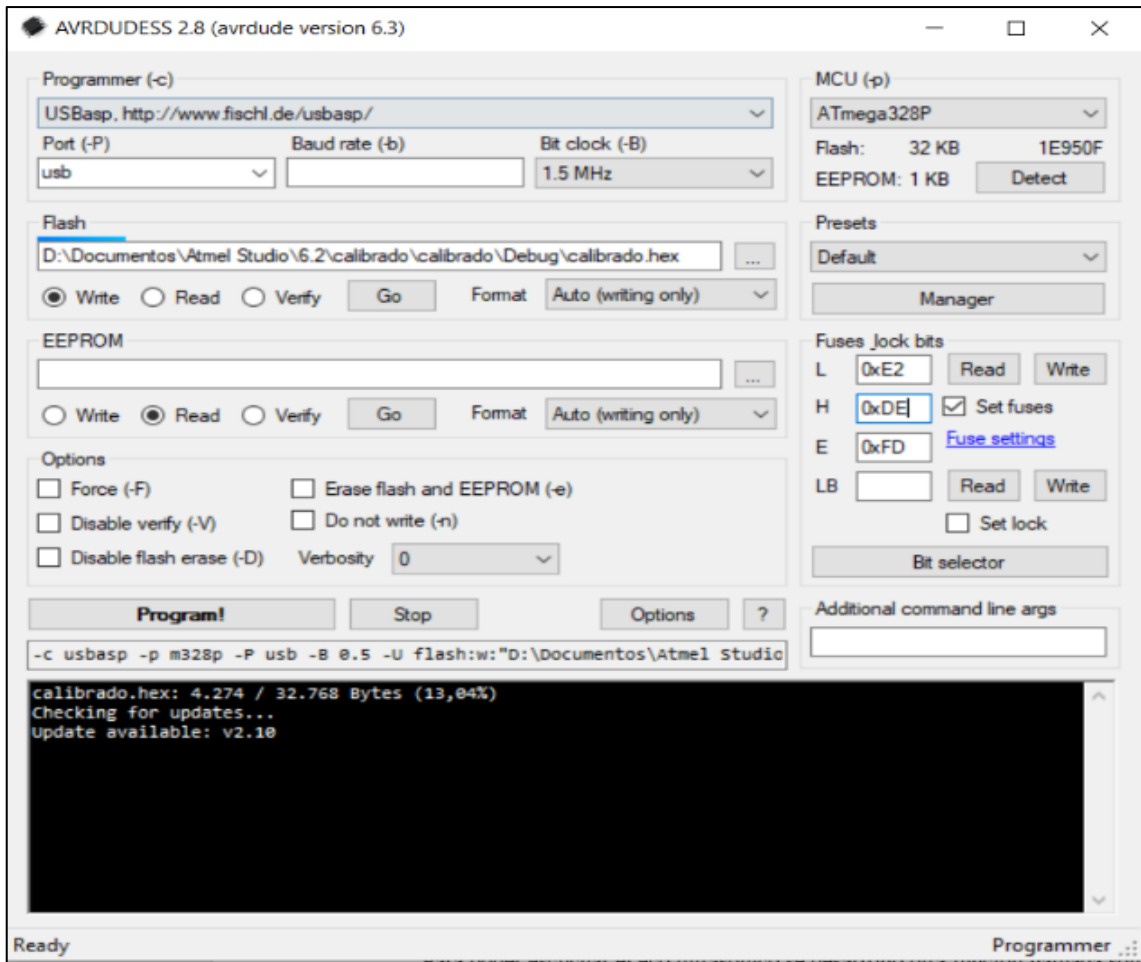


Figura 31-2. Configuración interna de los fuses en el microcontrolador.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Con la configuración realizada anteriormente se establece la frecuencia del reloj interno del Atmega 328p a 8MHz. Con ayuda del programa en línea Engbedded Atmel AVR® Fuse Calculator, se establecieron los valores de los bytes: alto, bajo y extendido, como se muestra en la Figura 32-2.

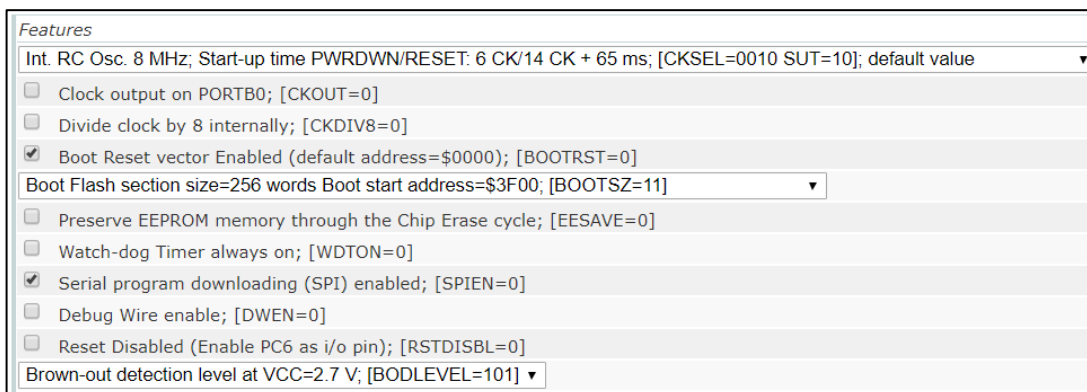


Figura 32-2. Configuración interna de los fuses en el microcontrolador.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Luego de realizar la configuración correcta de los fusibles del microcontrolador y medir nuevamente con el osciloscopio la señal en el transductor se obtuvo el resultado mostrado en la Figura 33-2.



Figura 33-2. Configuración interna de los fusibles en el microcontrolador.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Este es el resultado de la medición tanto de RX y TX del transductor ultrasónico, se evidencia que los pulsos generados son 13 en cada canal. También se observa que la frecuencia está cerca a 42KHz. Además, en la gráfica de RX de color amarillo se muestra una señal que corresponde a la recepción del eco a través del transductor ultrasónico.

2.3.2.7. Algoritmo para escuchar el eco ultrasónico.

Para escuchar el eco ultrasónico y analizar su señal analógica dentro del microcontrolador se desarrolló otra función llamada sonar_escuchar, la cual se muestra en la Figura 34-2.

Esta función simplemente recepta el eco ultrasónico y los datos calculados por el ADC del microcontrolador los guarda en un vector el cual posteriormente es enviado a través del I2C para graficarlo en Matlab.

La función que se necesita crear a partir de este análisis es la que nos permitirá encontrar el pulso para calcular la distancia hacia cualquier objeto.

El número de niveles se establece en 450 intervalos de 100us de separación porque se eligió un equilibrio entre la resolución de medición, la capacidad de rango máximo y el tamaño de la matriz que puede caber en la memoria RAM del Atmega328P.

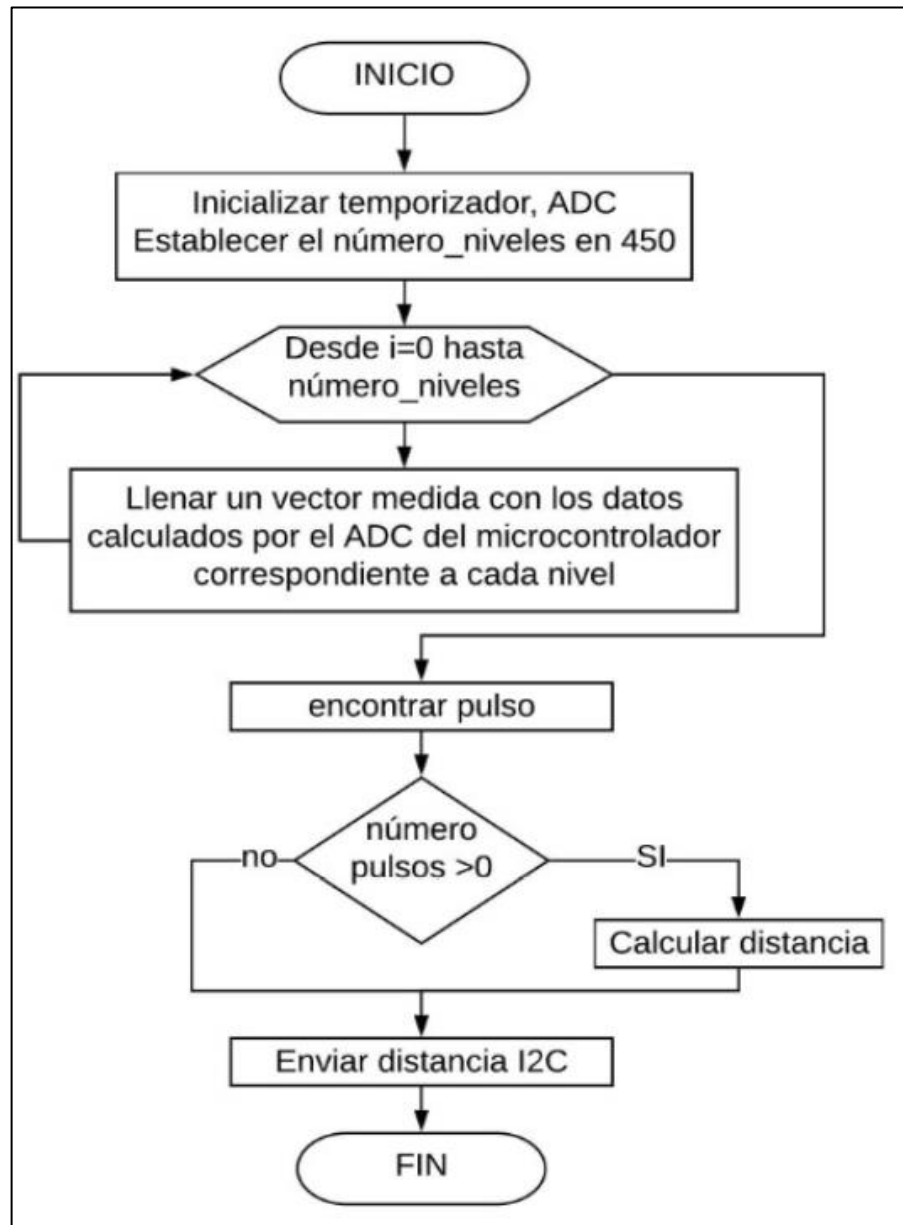


Figura 34-2. Diagrama de la función sonar_escuchar.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

2.3.2.8. Análisis en Matlab de la señal receptada por el sensor inteligente optimizado.

Una vez ejecutado el programa de Matlab los datos visualizados se muestran en la Figura 35-2.

Para esta prueba la calibración se realizó con el sensor frente a una pared situada a 3m de distancia, consecuencia de ello en la parte derecha de la Figura 35-2 se aprecia un pulso cerca del índice 200.

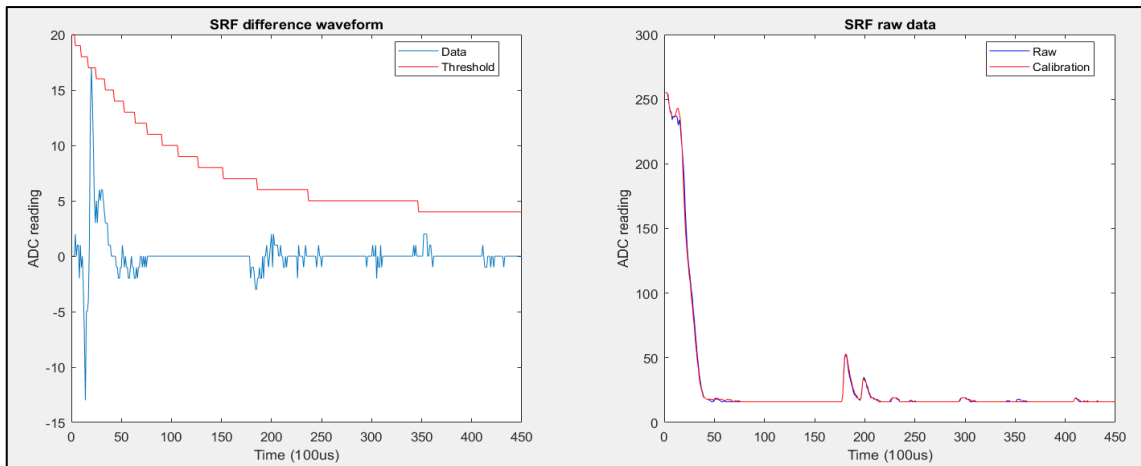


Figura 35-2. Procesamiento de la señal receptada en el sensor optimizado – 3m.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Debido a que en un objeto la onda de sonido reflejada no solo depende del tamaño sino también de la distancia del objeto, el modelo que se eligió para la curva de umbral es una curva de decaimiento exponencial que se ajustó en Matlab con el parámetro inicial en 20 y final en 5. Esto se aprecia en la gráfica de la izquierda de la Figura 34-2 que está de color rojo, mientras que la gráfica de color azul corresponde al resultado de la resta entre la lectura obtenida por el ADC del microcontrolador y el vector de calibración. En la gráfica derecha se obtiene la curva de calibración de color rojo y la de color azul nos indica el resultado de la resta entre la lectura obtenida por el ADC del microcontrolador, el vector de calibración y la curva de umbral. Para la prueba siguiente se puso un objeto a 80cm del sensor, obteniendo el siguiente resultado mostrado en la Figura 36-2.

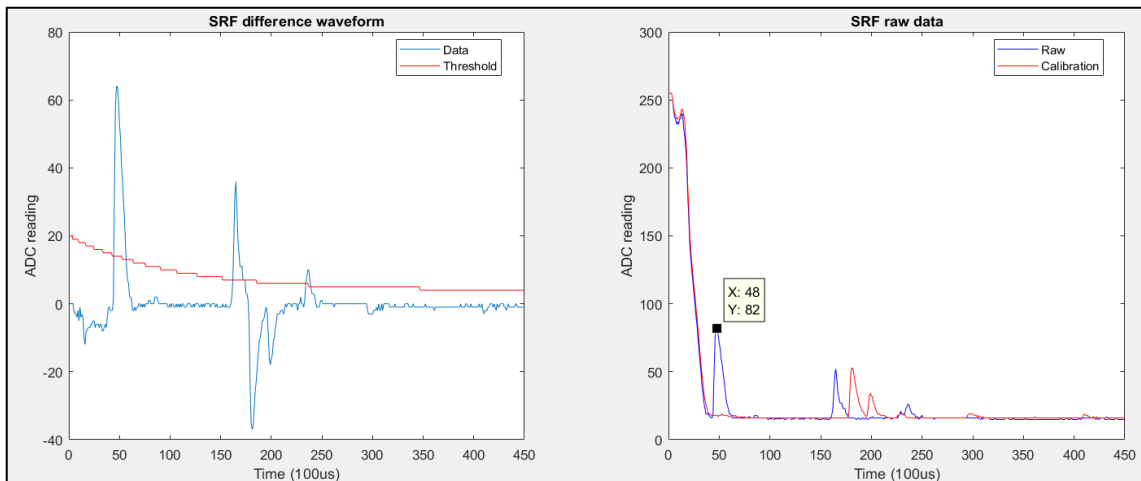


Figura 36-2. Procesamiento de la señal receptada en el sensor optimizado – 80cm

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Para este análisis solo se tomará en cuenta las curvas situadas a la derecha de la Figura 35-2, en donde se aprecia la curva de calibración y la curva generada por los datos calculados por el ADC del microcontrolador.

Se evidencia que sobre la curva de color rojo existe un pico azul en el nivel 48 y otro pico cerca del nivel 150. Si tomamos en cuenta la (3) se logra definir una nueva fórmula para calcular la distancia en base a este nuevo análisis.

El tiempo total viene dado por la ecuación:

$$tiempo_{total} = tiempoblanco[us] + nivel * 100[us] \quad (3)$$

Simplificando (2) se obtiene lo siguiente:

$$\frac{34[cm]}{1000[us]} = \frac{2d}{t_{total}[us]}$$

Luego tenemos:

$$d[cm] = \frac{17 * tiempo_total}{1000}$$

Finalmente, la ecuación para calcular la distancia es la siguiente:

$$d[cm] = \frac{17*(tiempoblanco+nivel*100)}{1000} \quad (4)$$

El valor del tiempo en blanco programado en el microcontrolador para las primeras pruebas fue de 220us. Si se aplica la fórmula a la Figura 35-2 en donde el nivel es 48, la distancia calculada sería de 85cm. Mediante el análisis de (4) es evidente que mientras más grande es el tiempo en blanco que tiene el sensor no podrá tomar medidas de distancia pequeñas.

Analizando la gráfica derecha de la Figura 35-2, se observa que el valor del ADC del microcontrolador en los primeros 16 niveles es relativamente alto, esto se debe a que el tiempo en blanco aún no es el suficiente para alcanzar a disipar la energía que queda en el transductor ultrasónico.

Se incrementa el tiempo en blanco a 1500us y se procede a realizar una nueva prueba bajo los mismos parámetros mencionados anteriormente, los resultados se muestran en la Figura 37-2.

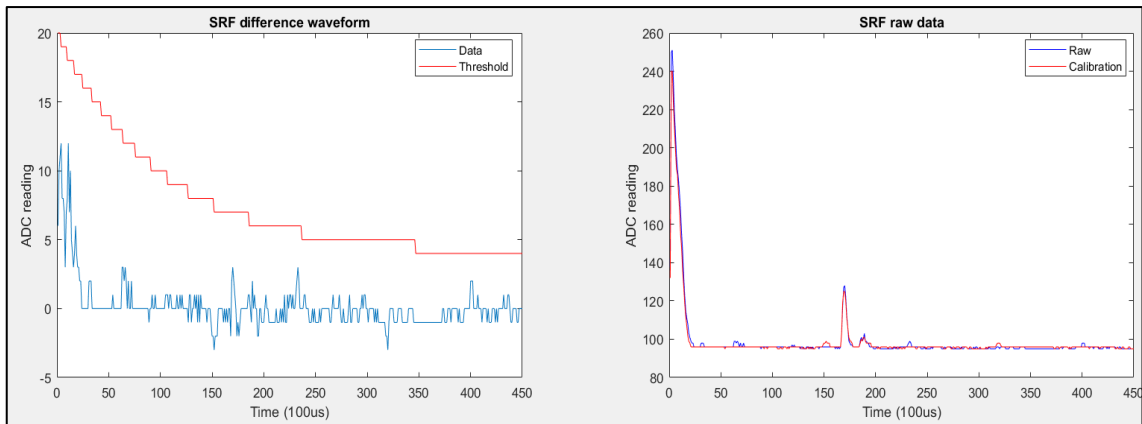


Figura 37-2. Procesamiento de la señal receptada en el sensor optimizado -3m 1500us.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

La parte derecha de la Figura 36-2 evidencia que, al subir el tiempo en blanco del sensor, las lecturas del ADC del microcontrolador al momento de recibir el eco ultrasónico son más reales y no tiene lecturas erróneas en los primeros niveles. Bajo esta condición y aplicando la fórmula dada en (4), se puede calcular la distancia mínima que el sensor inteligente puede medir. En este caso, para un nivel 1, es decir el mínimo, la distancia calculada sería de 27cm. Para un objeto situado a 80cm el resultado se muestra en la Figura 38-2.

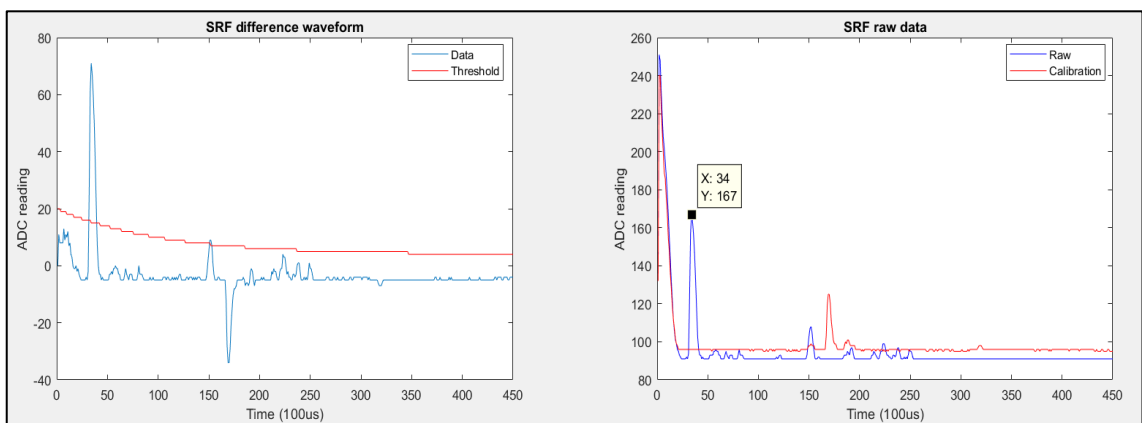


Figura 38-2. Procesamiento de la señal receptada en el sensor optimizado 80cm -1500us.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Esta vez se obtiene el pico en el nivel 34, mediante la ecuación (4) que definió el cálculo de la distancia. Se obtiene una distancia sensada de 83cm. Para obtener una mejor lectura de las distancias a medir frente a cualquier objeto se debe realizar la correcta calibración, es decir no debe existir ningún objeto frente al sensor al momento de calibrarlo.

A la derecha de la Figura 39-2 en color rojo se observa la curva de calibración correcta para lograr medir la distancia a cualquier objeto fácilmente. Esta calibración se la realizó con el sensor apuntando al cielo, por ello se evidencia que no existe ningún pico que sobresale en la curva.

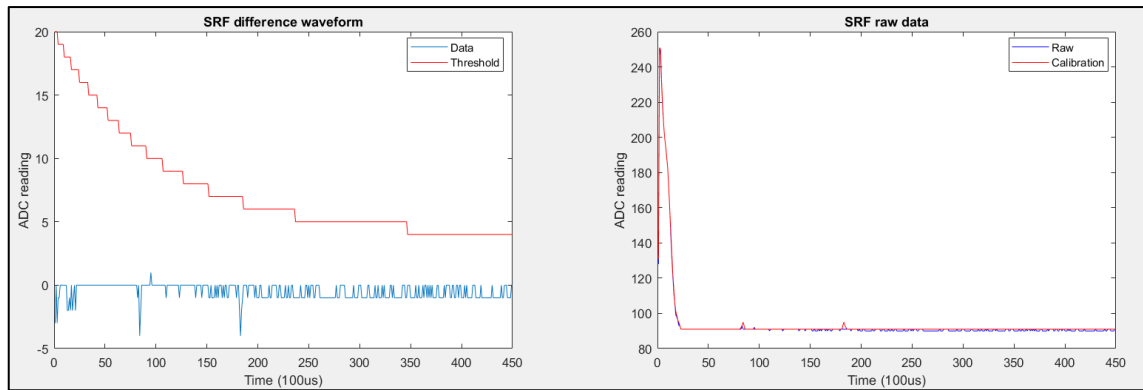


Figura 39-2. Procesamiento de señal recibida en el sensor optimizado apuntando al cielo.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

2.3.2.9. Algoritmo para encontrar el pulso recibido por el sensor inteligente optimizado

Al terminar el análisis de las gráficas mostradas anteriormente se desarrolló el algoritmo para encontrar el nivel en el cual se encuentra pulso de recepción de las ondas ultrasónicas, el cual sigue el algoritmo mostrado en la Figura 40-2.

Este diagrama de flujo ayuda a encontrar el número de nivel en el cual se encuentra el pulso recibido por el transductor ultrasónico, mediante una comparación realizada entre el valor analógico del ADC del microcontrolador, la suma entre la curva de disparo y la curva de calibración.

En la Figura 38-2, es evidente que se tendrá dos números de niveles en los cuales el valor del ADC es mayor, por lo tanto, el promedio de estos dos será el número de nivel exacto con el cual se debe calcular la distancia.

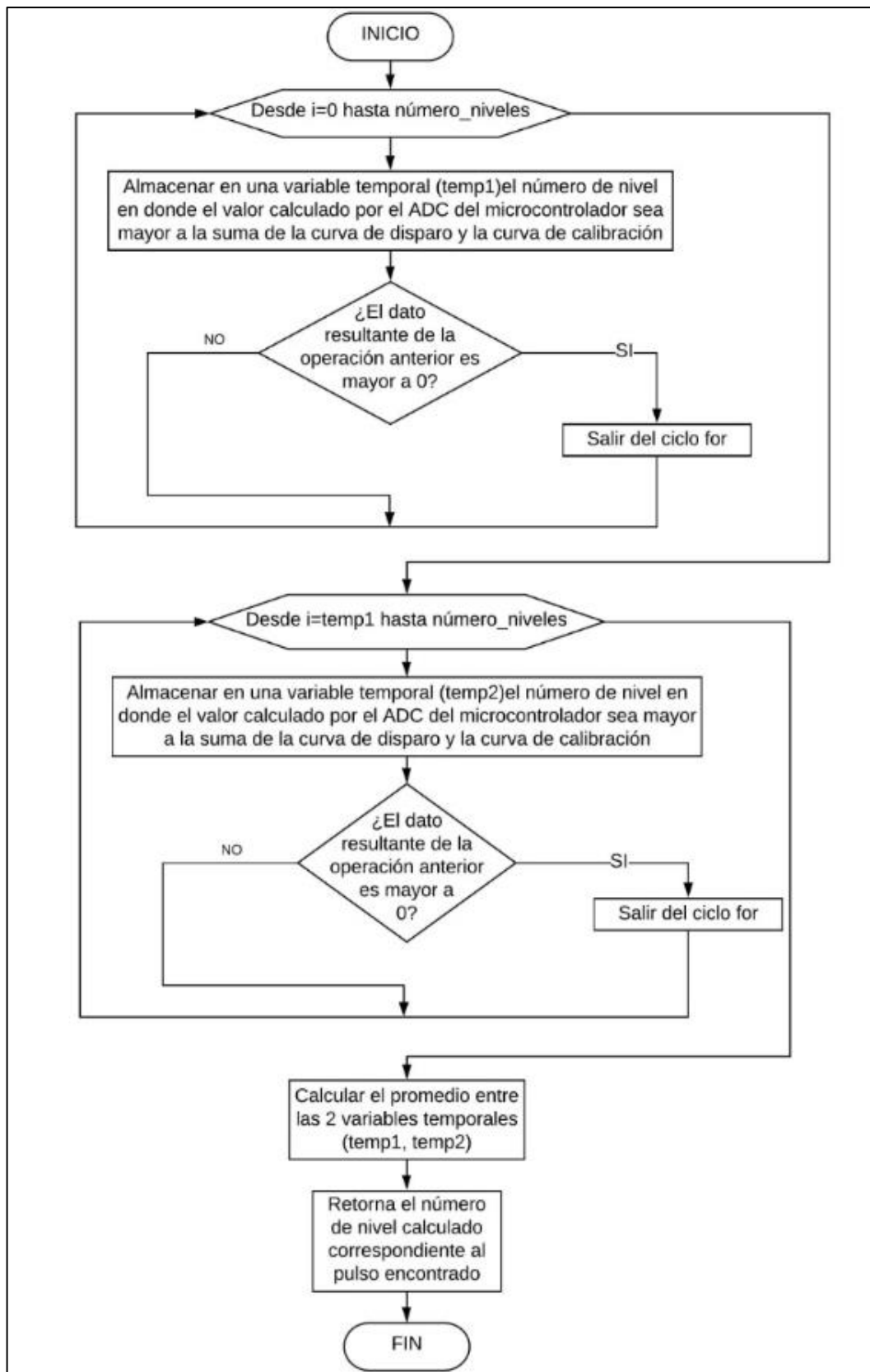


Figura 40-2. Diagrama del algoritmo para detectar el pulso recibido en el sensor JA-002

Realizado por: John Hidalgo, 2019

2.4. Evaluación final del funcionamiento del sensor inteligente optimizado.

La evaluación del funcionamiento del sensor inteligente optimizado es la última etapa en el desarrollo del presente trabajo de titulación para lo cual se realizó varias pruebas con diferentes tipos de objetos a detectar.

2.4.1. Materiales y herramientas para la evaluación del sensor inteligente optimizado.

Para la evaluación final del prototipo de sensor inteligente optimizado se utilizó un Arduino Uno que actúa como módulo maestro para recibir mediante comunicación I2C la distancia medida por el sensor inteligente. Para mostrar la distancia se usó el monitor serial del IDE de Arduino.

2.4.1.1. Arduino Uno.

Es una placa electrónica que posee un microcontrolador Atmega328P que cuenta con pines analógicos y digitales. Además, incluye un resonador de 16 MHz, un conector USB, una cabecera ICSP, un conector de alimentación, y un botón de reseteo. Esto se muestra en la Figura 41-2. Basta conectarlo a un computador para que entre en funcionamiento.

Este módulo se lo utiliza para realizar la comunicación I2C con el sensor y como fuente de alimentación debido a que poseen salidas de voltaje de 5VDC y 3.3VDC.



Figura 41-2. Arduino UNO

Realizado por: John Hidalgo, 2019.

2.4.1.2. Monitor serial IDE Arduino.

Es el 'cable' entre el Arduino Uno y el computador. Permite enviar y recibir mensajes útiles para la depuración y también control de Arduino. La interfaz se muestra en la Figura 42-2. Con ayuda del monitor serial del IDE de Arduino es posible observar el valor de distancia en cm que es enviado por el I2C desde el sensor inteligente optimizado. La configuración del monitor serial del IDE de Arduino se observa en la Figura 43-2.

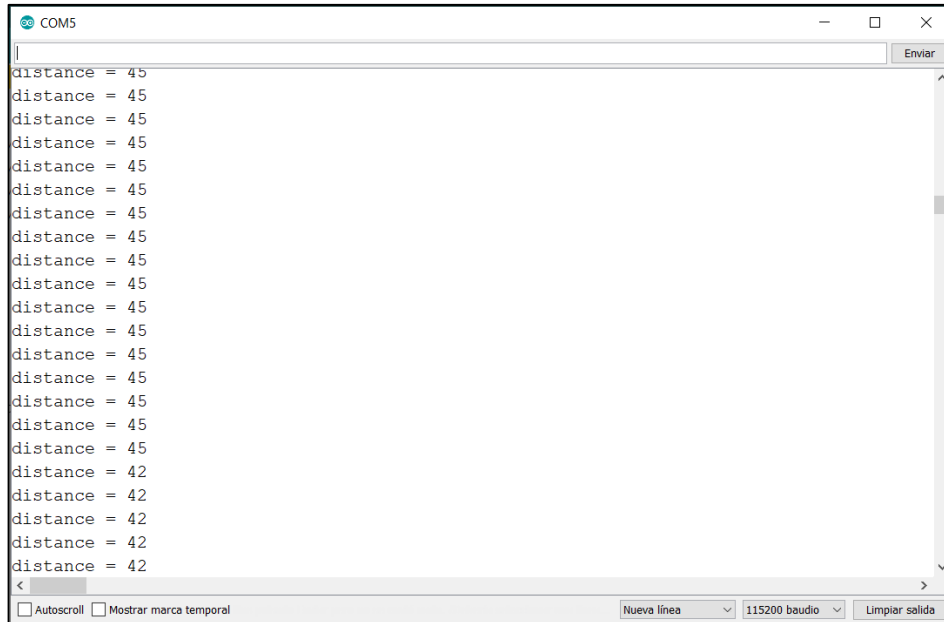


Figura 42-2. Monitor serial IDE Arduino

Realizado por: John Hidalgo, 2019

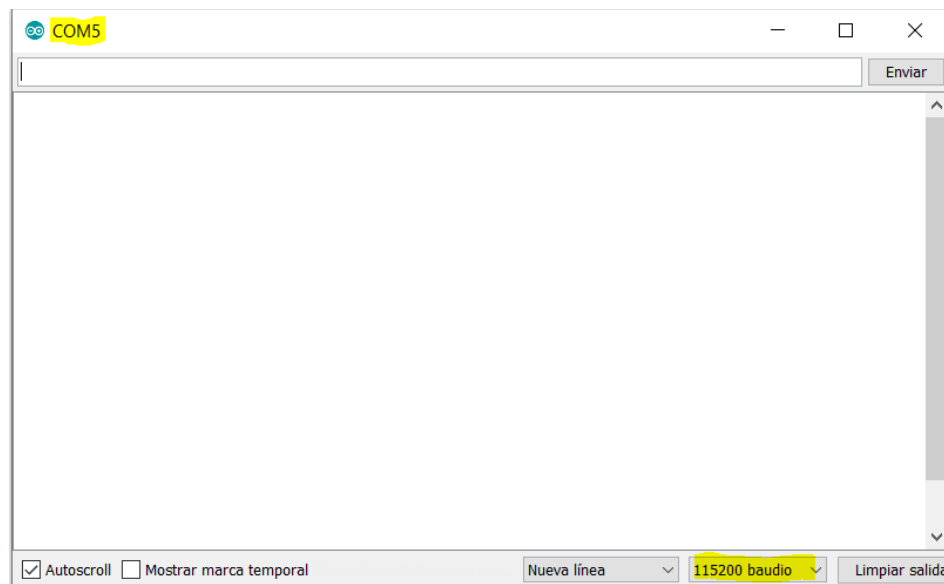


Figura 43-2. Configuración del monitor serial IDE Arduino

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Para que la comunicación entre el Arduino Uno y el computador sea correcta se deben configurar dos parámetros importantes dentro del monitor serial, los cuales se observan en la Figura 42-2.

Estos parámetros son el puerto COM asignado por el computador para el Arduino uno es el 5 y la velocidad de comunicación configurada en el Arduino uno es de 115200 baudios. Estos parámetros son importantes al momento de establecer la comunicación entre la interfaz y la PC y deben ser configurados.

2.4.2. *Escenario para la evaluación del sensor optimizado.*

En la Figura 44-2 se observa un esquema del escenario con el cual se realizaron las pruebas para evaluar el funcionamiento del sensor, este escenario se muestra en el Anexo D.

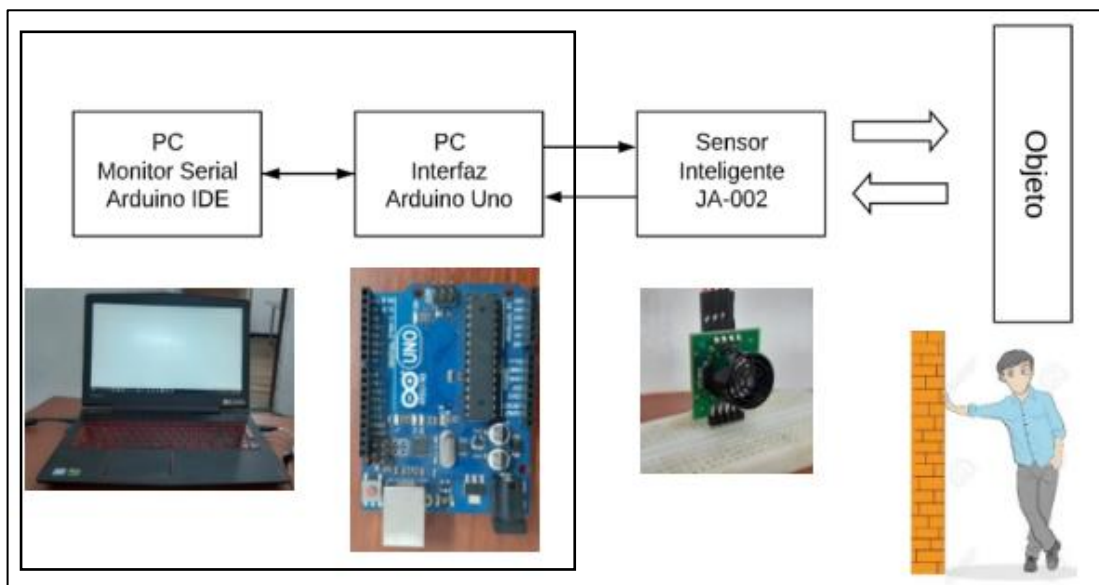


Figura 44-2. Esquema del escenario para la evaluación final del sensor optimizado

Realizado por: John Hidalgo, 2019

CAPITULO III

3. ANALISIS DE RESULTADOS

3.1. Introducción

El análisis de resultados permite evaluar el correcto funcionamiento del sensor inteligente diseñado, para lograr cumplir con los requerimientos establecidos en el capítulo anterior. Se evaluó el comportamiento del sensor frente a varios objetos a detectar como: cartón, ropa, plástico y madera, que son los materiales con los cuales una persona no vidente se topa a diario en su vida cotidiana. El proceso de análisis se detalla en la Figura 1-3.

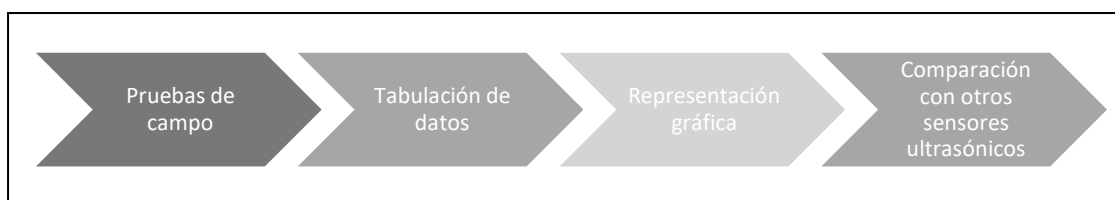


Figura 1-3. Proceso para el análisis de resultados.

Realizado por: John Hidalgo, 2019.

Para el desarrollo de este capítulo se realizaron varias pruebas de campo con diferentes materiales a detectar, logrando tener una tabla de resultados por cada prueba realizada, luego se procede a interpretar estos resultados mediante la representación de graficas para obtener las características del sensor desarrollado. Finalmente, se realiza la comparación con los otros sensores detallados en los capítulos anteriores para destacar sus ventajas frente a estos. A continuación, se desarrolla el análisis por etapas.

3.2. Resultados de las pruebas de campo realizadas con el sensor JA-002.

Para realizar las diferentes pruebas de campo se tomó como referencia el escenario planteado en la Figura 43-2 en donde se utiliza un Arduino uno como módulo maestro para obtener la medida de la distancia calculada por el sensor inteligente y mostrarla en un computador, se tomó como referencia una distancia de 1cm a 300cm con un intervalo de 2cm para realizar las mediciones.

Se realizaron las pruebas con varios materiales como cartón, plástico, madera, ropa y las mediciones resultantes se muestran tabuladas en el Anexo A. En el Gráfico 1-3 se muestra el resultado que se obtuvo al realizar las mediciones frente a un objeto de cartón.

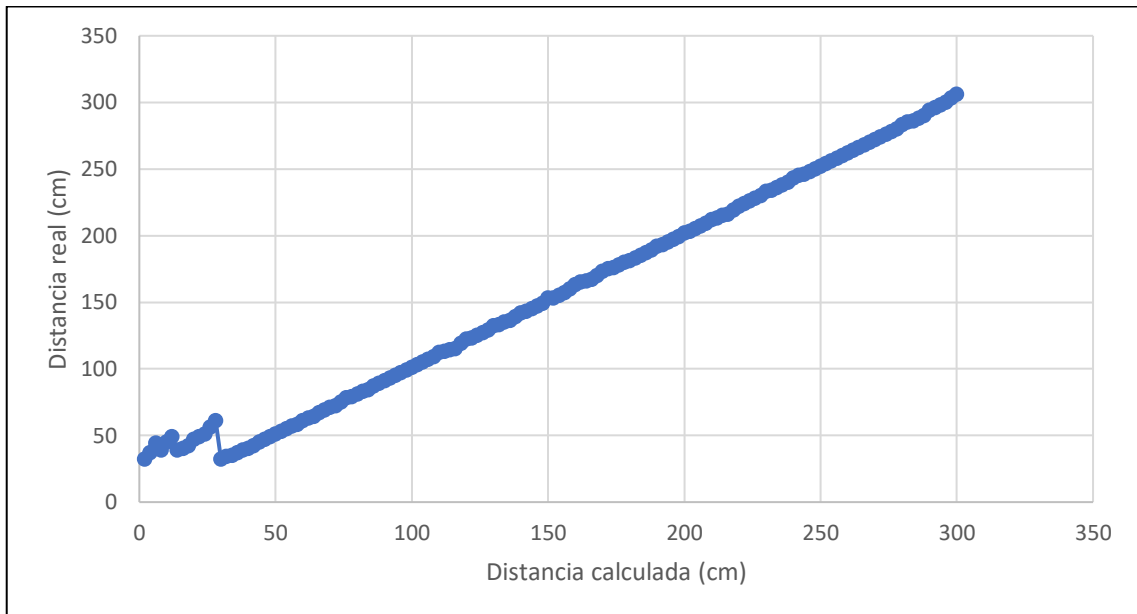


Gráfico 1-3. Mediciones con el sensor JA-002 frente a un objeto de cartón.

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En el Gráfico 1-3 se evidencia que en el rango de 30cm a 300cm el comportamiento del gráfico es lineal, mientras que bajo los 30cm no existe una relación directa entre la distancia real y la distancia medida. El segundo material que se utilizó en la prueba de campo fue el plástico, en el Gráfico 2-3 se muestra el resultado que se obtuvo al realizar las mediciones.

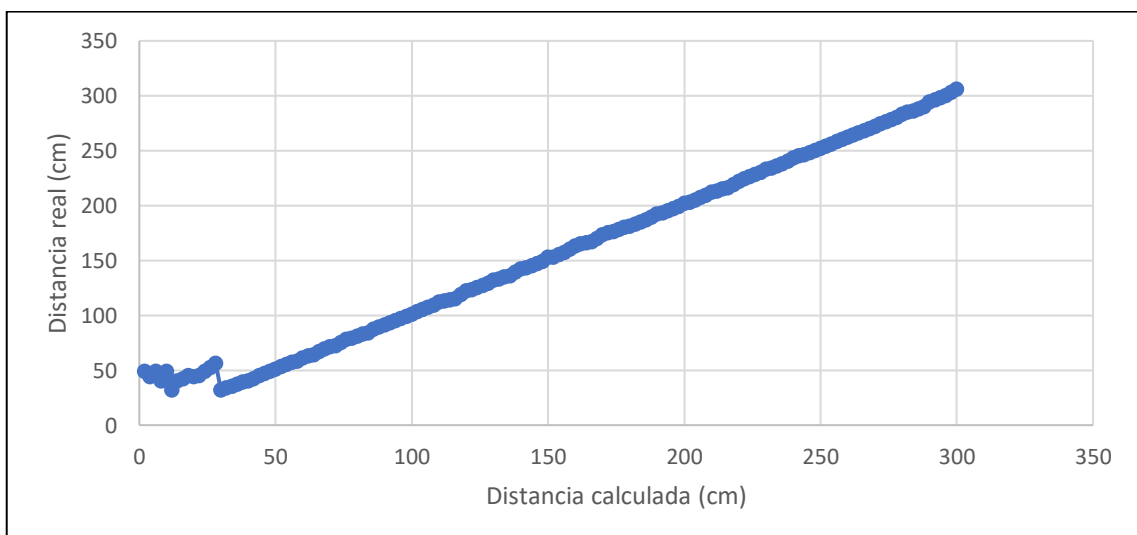


Gráfico 2-3. Mediciones con el sensor JA-002 frente a un objeto de plástico.

Realizado por: John Hidalgo, 2019.

En el Gráfico 2-3 se evidencia el mismo comportamiento que en el Gráfico 1-3, en el rango de 30cm a 300cm el comportamiento de la gráfica es lineal, mientras que bajo los 30cm no existe una relación directa entre la distancia real y la distancia medida. El tercer material que se utilizó en la prueba de campo fue la madera y en el Gráfico 3-3 se muestran los resultados obtenidos.

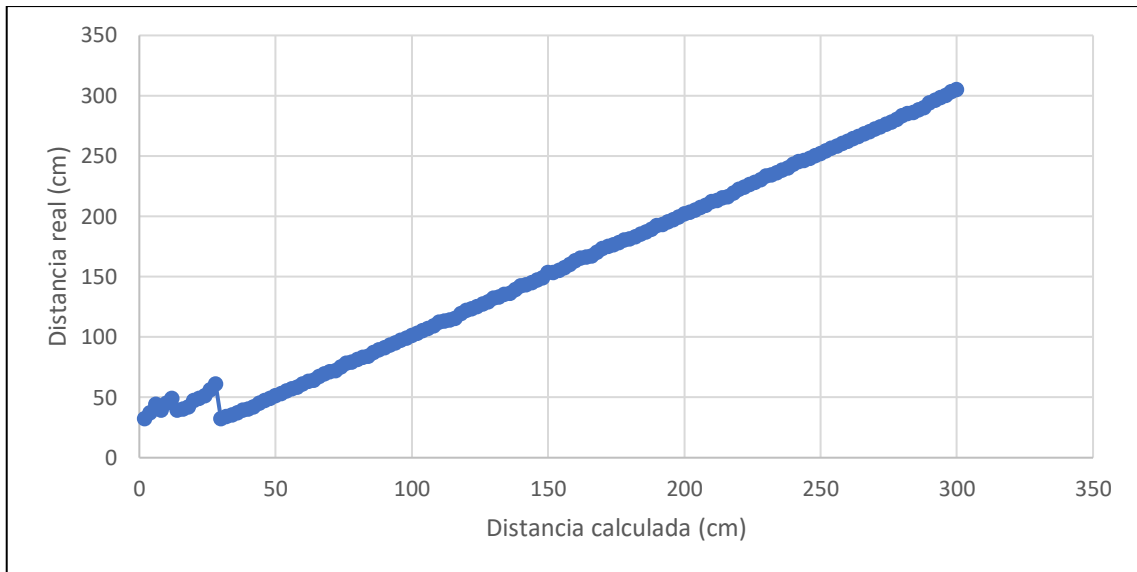


Gráfico 3-3. Mediciones con el sensor JA-002 frente a un objeto de madera.

Realizado por: John Hidalgo, 2019.

En el Gráfico 3-3 también se muestra que bajo los 30cm no existe una relación directa entre la distancia real y la distancia medida. Finalmente se realizó las pruebas con el sensor frente a ropa, para lo cual se utilizó a una persona vestida, en el Gráfico 4-3 se muestran los resultados.

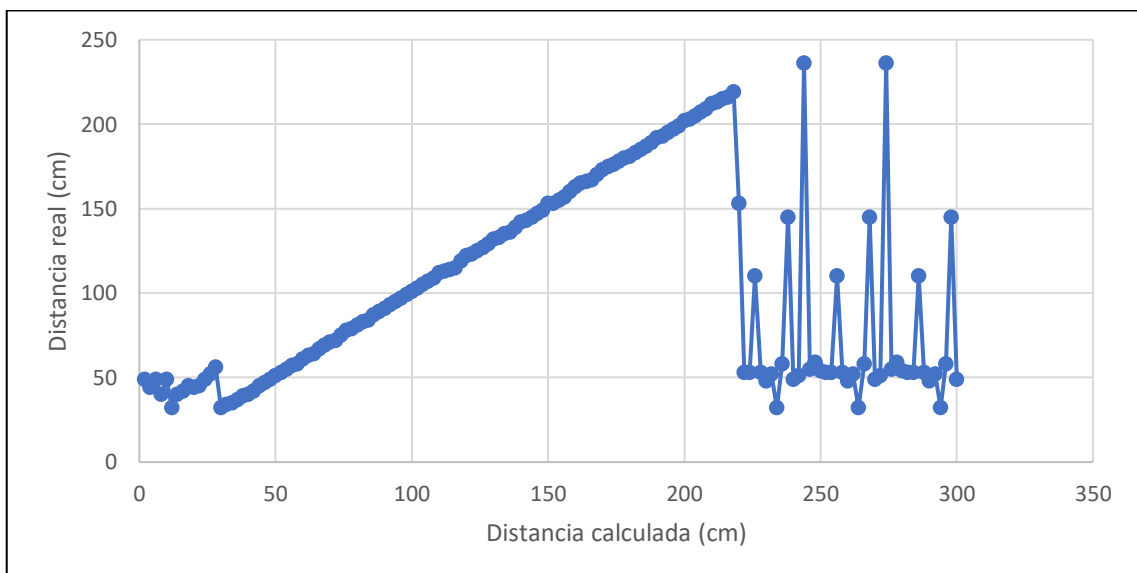


Gráfico 4-3. Mediciones con el sensor JA-002 frente a una persona con su vestimenta.

Realizado por: John Hidalgo, 2019.

En el Gráfico 4-3 se muestra que en el rango de 30cm a 218cm el comportamiento de la gráfica es lineal, mientras que bajo los 30cm y sobre los 218cm no existe ninguna relación directa entre la distancia real y la distancia medida. Para la caracterización del sensor inteligente JA-002 se tomó el rango de 30cm a 218cm con el cual coinciden todos los materiales.

3.3. Caracterización del sensor inteligente JA-002

En la caracterización del sensor inteligente JA-002, se evaluó el rango, alcance, resolución, precisión, exactitud, repetibilidad y la sensibilidad. Lo que permitirá determinar si se cumple con los requerimientos establecidos para el desarrollo del sensor inteligente mencionados en el capítulo anterior.

3.3.1. Rango

El rango de un sensor está especificado por los valores mínimos y máximos de la entrada y salida del sensor, mediante el Anexo A y con las gráficas mostradas anteriormente con los diferentes materiales se evidencia que para el sensor JA-002 el rango de entrada y salida son las que se muestran en la Tabla 1-3:

Tabla 1-3. Rango del sensor JA-002.

	Mínimo(cm)	Máximo(cm)
Rango de Entrada	30	218
Rango de Salida	32	219

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En el Gráfico 5-3 se muestra el rango de entrada y salida del sensor inteligente JA-002.

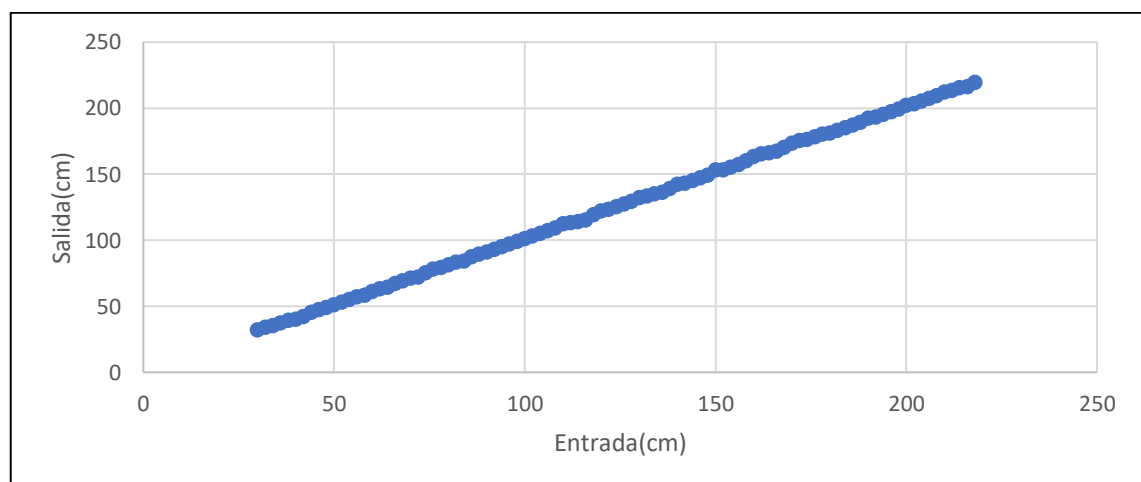


Gráfico 5-3. Rango del sensor JA-002.

Realizado por: John Hidalgo, 2019.

En la Gráfico 5-3 se muestra el comportamiento lineal del sensor en un rango de 30cm a 218cm.

3.3.2. Alcance

El alcance es la variación que tiene el sensor inteligente JA-002 entre la entrada y la salida. A continuación, se muestra el proceso para calcular el alcance de entrada y salida del sensor mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Alcance} = O_{max} - O_{min} \quad (1)$$

$$\text{Alcance de entrada} = O_{max} - O_{min} = 219 [cm] - 32 [cm] = 187 [cm]$$

$$\text{Alcance de salida} = I_{max} - I_{min} = 218 [cm] - 30 [cm] = 188 [cm]$$

Se establece que el alcance de entrada del sensor es de 187cm y el de salida de 185cm.

3.3.3. Resolución

La resolución del sensor JA-002 representa el más pequeño incremento de la entrada que presenta una respuesta. Si la entrada es discreta se expresa en función de porcentaje tal como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\text{res}(\%) = \frac{\Delta_{max}I}{I_{max}-I_{min}} 100 \quad (2)$$

Mediante prácticas se obtiene el valor de $\Delta_{max}I = 2 [cm]$

$$\text{res}(\%) = \frac{2}{218 [cm] - 30 [cm]} 100 = 1,0638 \%$$

3.3.4. Precisión

La precisión del sensor JA-002 está relacionada con la dispersión del conjunto de valores obtenidos por un sensor, de mediciones repetidas de una magnitud. Cuanto menor es la dispersión mayor la precisión. Una medida común de la variabilidad de las medidas es la desviación estándar de las mediciones y la precisión se puede estimar como una función de ella. El cálculo para obtener la desviación estándar se muestra en la siguiente ecuación:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{N}} \quad (3)$$

Para aplicar la ecuación (3) se utilizó la tabla del Anexo B la cual contiene una tabulación del error entre el valor real y el valor medido. Finalmente, el resultado obtenido es el que se muestra a continuación en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Precisión del sensor JA-002.

Desviación estándar	
S	0,700613107

Realizado por: John Hidalgo, 2019

3.3.5. Exactitud

La exactitud del sensor JA-002, se refiere a que tan próximo al valor real se encuentra del valor medido. Para obtener este valor se hace uso del error máximo que presentan los datos, mediante el análisis de la tabla del anexo 2 se evidencia que el error máximo es: -3 cm.

3.3.6. Repetitividad

La repetitividad o reproducibilidad del sensor JA-002 se refiere a la habilidad del sensor para dar idénticas salidas a la misma entrada en diferentes mediciones a intervalos grandes de tiempo. Los errores en la precisión de los instrumentos causan falta de repetibilidad. El ruido eléctrico y la histéresis también puede contribuir a la pérdida de este factor.

Para una entrada de 36 cm al examinar en un rango de 5 segundos con intervalos de 100 ms tenemos el resultado que se muestra en el Gráfico 6-3.

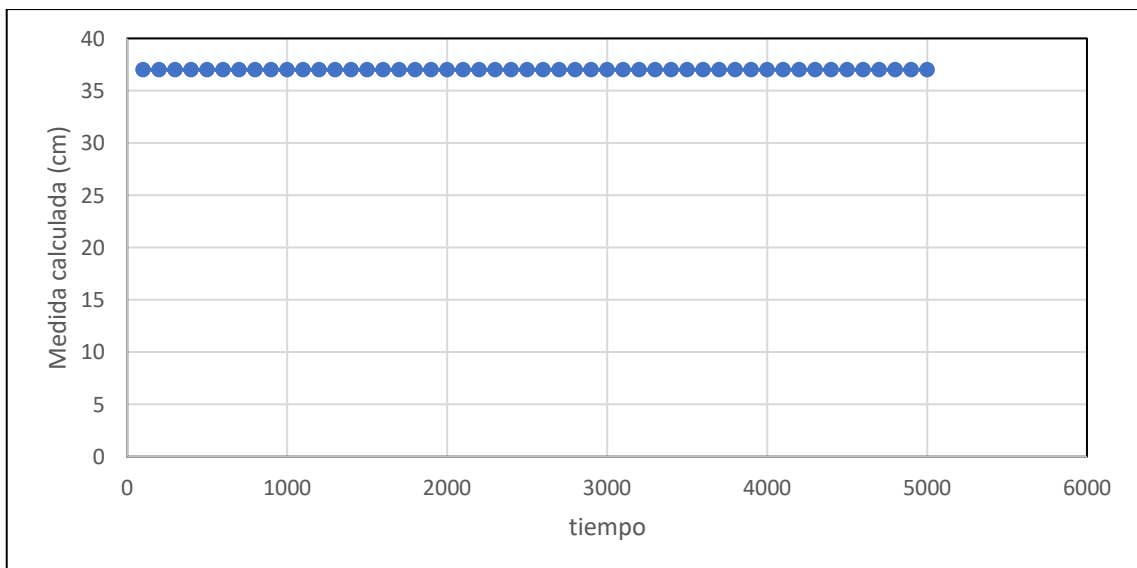


Gráfico 6-3. Repetitividad del sensor JA-002 a 36cm, rango de 5s e intervalo de 100ms.

Realizado por: John Hidalgo, 2019.

3.3.7. Sensibilidad

La sensibilidad del sensor JA-002 es la tasa de cambio de la salida con respecto a la entrada, está dada por la siguiente ecuación.

$$\text{sensibilidad} = \frac{\Delta O}{\Delta I} = \frac{dO}{dI} \quad (4)$$

Para este caso se tomaron los intervalos mostrados en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3. Intervalos de entrada y salida del sensor inteligente JA-002

Entrada [cm]	Salida [cm]
44	45
50	51

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Aplicando la fórmula (4) se tiene lo siguiente:

$$\text{sensibilidad} = \frac{51 - 50}{45 - 44} = 1$$

3.4. Análisis de costos del sensor inteligente JA-002

Una vez terminada la fabricación del sensor inteligente JA-002 se realiza el análisis del costo total para compararlo con los otros sensores comerciales existentes en el mercado. Para ello se muestra la Tabla 4-3, en la cual se encuentran detallados cada uno de los elementos utilizados para fabricar el sensor con su respectivo precio.

Tabla 4-3. Costo de materiales del sensor JA-002.

Cantidad	Descripción	Costo
1	Atmega328P	1,18
1	Transductores ultrasónicos FBULS1612P	1,00
3	Capacitores cerámicos 680pF	0,01
2	Capacitores cerámicos 0.1uF	0,01
2	Capacitores cerámicos 0.01uF	0,01
2	BAV99 (Diodo rectificador de alta conmutación)	0,04
7	Resistencias 100Kohm	0,01
2	Resistencias 10Kohm	0,01
1	Resistencia de 4.7Kohm	0,01

Continuación de Tabla 4-3

1	Resistencia de 2.7Kohm	0,01
1	Resistencia de 75Kohm	0,01
1	LM324 (Amplificador Operacional)	0,05
1	PCB	1,00
Total (A)		3,35

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Es evidente que el precio de los materiales del sensor inteligente es relativamente bajo, a este precio vamos a incluir la mano de obra y obtendremos el precio final. Los otros costos se evidencian en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3. Costo de materia prima y mano de obra del sensor JA-002.

Costo de materia prima (A)	3,35
Costo de mano de obra (B)	1,00
Total (C)	4,35

Realizado por: John Hidalgo, 2019

El costo total de fabricación del sensor inteligente JA-002 es de 4,35 USD. Para obtener el precio de venta al público del sensor JA-002 debemos aumentarle el 20% del valor total que sería la ganancia que se tiene, para esto se aplica la siguiente ecuación.

$$P.V.P = C + \left(C * \frac{20}{100} \right) \quad (5)$$

$$P.V.P = 5,22 \text{ USD}$$

El precio de venta al público del sensor inteligente JA-002 es de 5,22 USD.

3.5. Características del sensor inteligente JA-002

Una vez realizado el análisis del sensor inteligente JA-002 se procede a obtener su tabla de características, siendo las que se muestran en la Tabla 6-3.

Tabla 6-3. Características del sensor inteligente JA-002.

Voltaje de funcionamiento	3.3 VDC – 5 VDC
Corriente de trabajo	4.8mA
Rango de distancia	30cm – 218cm

Continuación de Tabla 6-3.

Resolución	1.06 cm
Tamaño	25mm x 23mm x 16mm
Número de transductores	1 (Emisor - Receptor)
Tipo de comunicación	I2C
Frecuencia de trabajo del transductor	42Khz
Pines	VCC – GND – SDA - SCL
Costo	5,22 USD

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Se caracterizó el sensor inteligente JA-002 con los mismos parámetros investigados de los otros sensores de distancia comerciales.

3.6. Discusión de resultados

La discusión de resultados pretende sintetizar los resultados obtenidos para poder redactar de mejor manera las conclusiones del presente trabajo de titulación.

3.6.1. Zona muerta y rango de medición máximo del sensor inteligente JA-002.

El Gráfico 7-3 hace referencia a la zona muerta y el rango de medición máximo que tiene el sensor inteligente JA-002 frente a los 4 diferentes tipos de materiales estudiados.

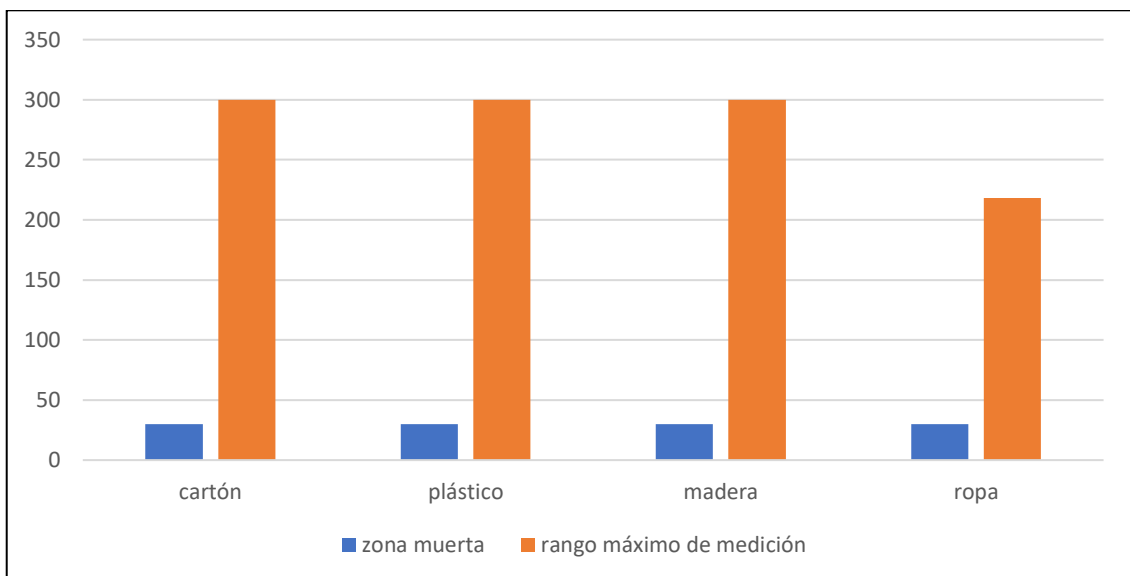


Gráfico 7-3. Zona muerta del sensor JA-002 frente a diferentes tipos de materiales.

Realizado por: John Hidalgo, 2019.

En el Gráfico 7-3 en las barras de color azul se evidencia que existe una misma zona muerta en la medición de distancia con los diferentes tipos de materiales, es decir, en una distancia de 0cm a 30cm el sensor inteligente JA-002 no va a mostrar medidas de distancia reales. Por lo contrario, en las barras de color naranja se muestra que no con todos los materiales se llega a un mismo rango máximo de medición, el material con el cual se obtuvo menos rango de medición es la ropa debido a que en este tipo de material las ondas ultrasónicas se pierden con mayor facilidad.

3.6.2. Comparación de mediciones de distancia con diferentes tipos de materiales

Para comparar las mediciones obtenidas por el sensor inteligente frente a diferentes materiales se toma como referencia la Tabla 7-3, en la cual se muestra 4 medidas reales y los resultados de distancia obtenidos por el sensor con los diferentes tipos de materiales.

Tabla 7-3. Comparación de resultados obtenidos con JA-002 a diferentes distancias.

Distancia Real (cm)	Distancia Medida (cm)			
	Cartón	Plástico	Madera	Ropa
28	61	56	61	56
30	32	32	32	32
218	219	219	219	219
220	222	222	222	153

Realizado por: John Hidalgo, 2019

En base a la Tabla 6-3 se obtiene el Gráfico 8-3 con el cual se estudia de mejor manera el comportamiento del sensor inteligente JA-002.

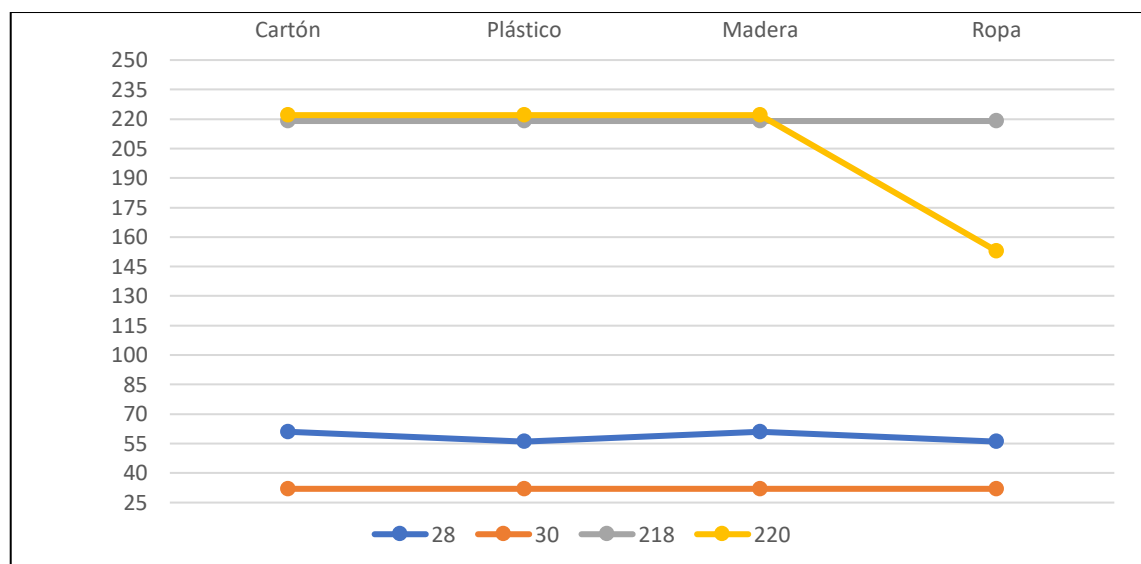


Gráfico 8-3. Comparación de mediciones de distancia con diferentes tipos de materiales

Realizado por: John Hidalgo, 2019.

En el Gráfico 7-3, la línea de color azul muestra el comportamiento que tiene el sensor frente a un objeto situado a 28cm de distancia, es evidente que los valores calculados por el sensor JA-002 no son reales debido a que tienen un rango de error muy alto como se muestra en el gráfico, en la gráfica de color naranja se muestra el comportamiento del sensor frente a un objeto a 30cm de distancia, el comportamiento muestra un línea recta debido a que en todos los tipos de materiales la distancia calculada por el sensor es la misma y en este caso corresponde a los 30cm.

Para mediciones de distancias altas se muestra la gráfica de color gris en la cual se tiene un objeto a 218cm de distancia, es evidente que el comportamiento es lineal porque esta distancia está dentro del rango de medición del sensor inteligente, pero en la gráfica de color amarillo que corresponde a una distancia de 220cm se observa que el comportamiento es lineal en todos los materiales a excepción de la ropa con lo cual se comprueba que el sensor no puede medir distancias que sean mayores a 218cm con este tipo de material.

3.6.3. Comparación del sensor JA-002 con otros sensores ultrasónicos comerciales.

Para realizar la comparación del sensor inteligente JA-002 se tomaron en cuenta 4 sensores ultrasónicos que existen en el mercado los cuales se detallan en la Tabla 8-3.

Tabla 8-3. Comparación del sensor JA-002 frente a otros sensores ultrasónicos.

	HC-SR04	MB1000	GY-US42	SRF08	JA-002
Voltaje de funcionamiento	5VDC	2.5 VDC – 5.5 VDC	3VDC - 5VDC	5VDC	3.3 VDC – 5 VDC
Corriente de trabajo	15mA	2mA	9mA	15mA	4.8mA
Rango de distancia	2cm – 400cm	0cm – 645cm	20cm – 720cm	3cm – 600cm	30cm – 218cm
Resolución	0.3cm	2,54cm	1cm	0.5cm	1,06 cm
Tamaño	45mm x 20mm x 15mm	19.9mm x 22.1mm x 15.5mm	21.5mm x 21mm x 24.5mm	43mm x 20mm x 17mm	25mm x 23mm x 16mm
Número de transductores	2 (Emisor - Receptor)	1 (Emisor - Receptor)	1 (Emisor - Receptor)	2 (Emisor - Receptor)	1 (Emisor - Receptor)
Tipo de comunicación	PWM	Serial, PWM, analógica	Serial, I2C, PWM.	I2C	I2C

Continuación de Tabla 8-3

Frecuencia de trabajo del transductor	40KHz	42KHz	40KHz	40KHz	42 KHz
Pines	VCC- Trigger - Echo - GND	GND - VCC - RX - TX - AN - PWM - BW	VCC - GND - CR - DT - INT - PS	VCC- SDA - SCL - GND	VCC - GND - SDA - SCL

Realizado por: John Hidalgo, 2019

El primer parámetro que se comparó de todos los sensores fue el voltaje de funcionamiento, debido a que el dispositivo Eyeclip solo posee una batería de una celda en su estructura, el voltaje obligatorio que debe manejar el sensor ultrasónico debe ser de 3.3 VDC, para este caso el sensor HC-SR04 y el SRF08 poseen una gran desventaja frente al JA-002. Otro parámetro que se analiza es la corriente de trabajo de los diferentes sensores ultrasónicos, para lo cual se muestra el Gráfico 9-3.

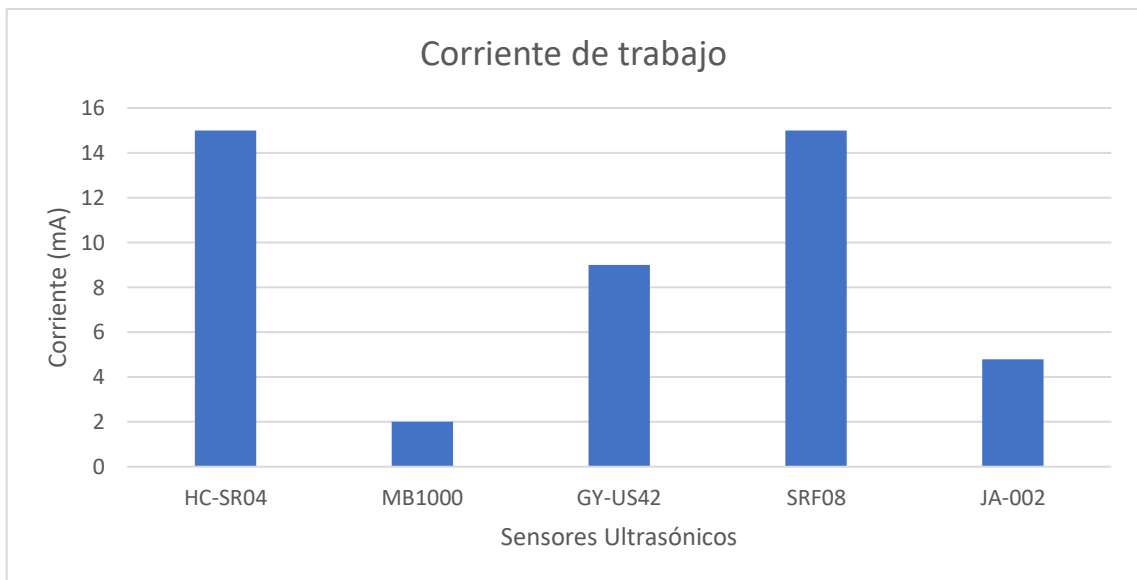


Gráfico 9-3. Corriente de trabajo de diferentes sensores ultrasónicos.

Realizado por: John Hidalgo, 2019.

De la corriente de trabajo que tenga cualquier sensor ultrasónico depende la duración del dispositivo Eyeclip, como se muestra en el Gráfico 8-3 los sensores que menos corriente manejan son el JA-002 y el MB1000 los cuales obtienen mayor ventaja frente al resto, esto es debido al acondicionamiento de señal que utilizan porque la mayoría de componentes utilizados son pasivos como resistencias, capacitores y no necesitan ningún tipo de amplificación para aumentar el voltaje de las ondas ultrasónicas emitidas por el transductor.

En el Gráfico 10-3 se muestra el rango de distancia que tiene cada sensor ultrasónico.

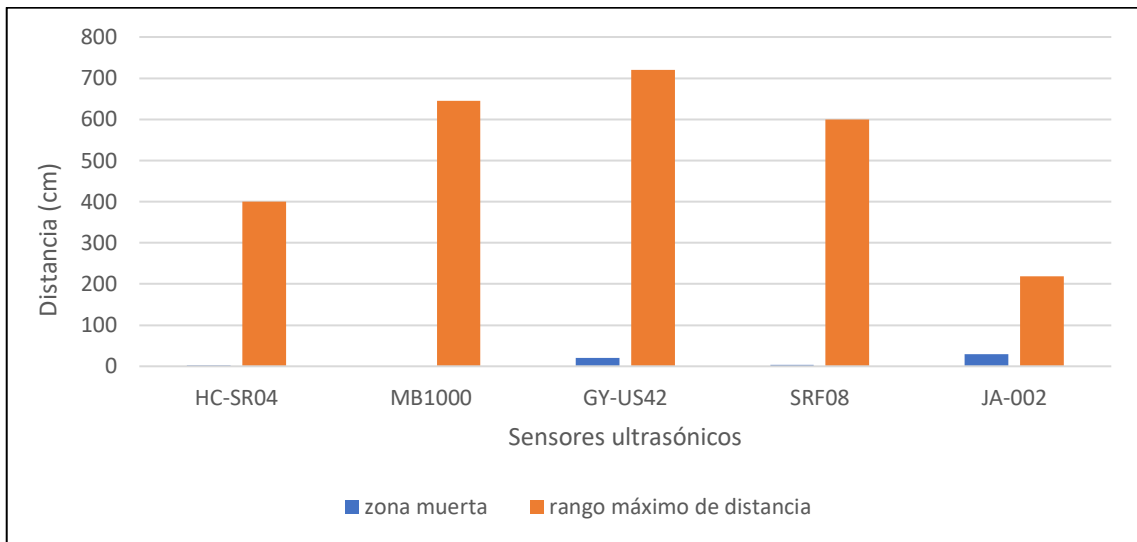


Gráfico 10-3. Rango de distancia de los diferentes tipos de sensores ultrasónicos.

Realizado por: John Hidalgo, 2019.

En el Gráfico 9-3 se observa la zona muerta y el rango máximo de distancia que pueden medir los diferentes tipos de sensores ultrasónicos estudiados, se evidencia que el sensor JA-002 posee una zona muerta muy alta lo cual es una desventaja frente a los otros sensores, sin embargo, en la aplicación que tendrá el sensor inteligente esta zona muerta no tiene importancia porque en los requerimientos establecidos en el capítulo anterior se estableció un rango de medición de 35cm a 200cm lo cual si cumple el sensor inteligente desarrollado.

Otro parámetro importante para analizar dentro de los sensores de distancia ultrasónicos es la resolución que tienen, para ello se realiza el estudio del Gráfico 11-3.

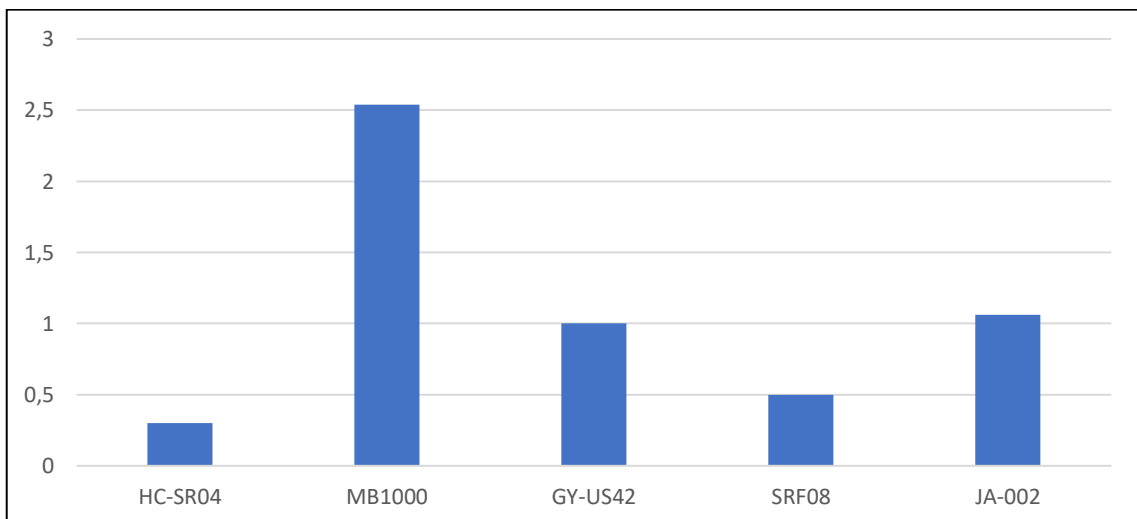


Gráfico 11-3. Resolución de los diferentes tipos de sensores ultrasónicos.

Realizado por: John Hidalgo, 2019.

En este aspecto la resolución del sensor HC-SR04 es la más baja, lo cual hace que tenga una gran ventaja frente a los otros sensores incluyendo el JA-002, analizando los requerimientos establecidos anteriormente es evidente que el valor obtenido en la resolución del sensor inteligente se encuentra dentro del rango definido por lo cual no tendría ningún inconveniente trabajando juntamente con el dispositivo Eyeclip.

Otra característica que se menciona en la Tabla 6-3 son las dimensiones que tienen los diferentes tipos de sensores ultrasónicos, en base a los requerimientos el sensor debe ser pequeño y debe poseer un solo transductor para emitir y recibir las ondas ultrasónicas, los sensores MB1000, GY-US42 y JA-002 sacan ventaja frente a los otros dos debido a que son pequeños y poseen un solo transductor, lo cual los hace ideales para el uso con el dispositivo Eyeclip.

En la Tabla 6-3 también se estudia el tipo de comunicación que tienen los sensores ultrasónicos, para este análisis en el capítulo uno se estudió el tipo de comunicación I2C el cual era el más recomendado para trabajar con sensores debido a que se puede conectar varios sensores a la vez a un módulo maestro. El sensor GY-US42, SRF08 y JA-002 son los únicos que poseen comunicación I2C, con lo cual tienen una gran ventaja frente a los otros dos.

Cualquier objeto, ya sea sólido o líquido, reflejará las ondas de sonido de 42 kHz de vuelta al sensor y será detectado. Esto evita la necesidad de comprar un sensor especial para detectar su objetivo, incluso si el tipo de objetivo varía a lo largo de la aplicación. Incluso los objetos porosos y no sólidos se detectan cuando se colocan frente al sensor, mediante la Tabla 6-3 se muestra que solo los sensores MB1000 y JA-002 poseen una frecuencia de trabajo en el transductor de 42KHz, lo cual los hace ideales para las aplicaciones en dispositivos que ayuden a personas no videntes.

3.6.4. Comparación del costo del sensor JA-002 con otros sensores comerciales.

Para analizar el costo del sensor inteligente JA-002 se analiza la Tabla 9-3 en la cual se muestran los diferentes tipos de sensores ultrasónicos estudiados con sus respectivos precios de mercado.

Tabla 9-3. Comparación del costo del sensor JA-002 con otros sensores ultrasónicos.

Sensor Ultrasónico	HC-SR04	MB1000	GY-US42	SRF08	JA-002
Costo	4,50 USD	29,95 USD	11,68 USD	39,38 USD	5,22 USD

Realizado por: John Hidalgo, 2019

Para visualizar de mejor manera los precios de los diferentes sensores ultrasónicos se muestra el Gráfico 12-3.

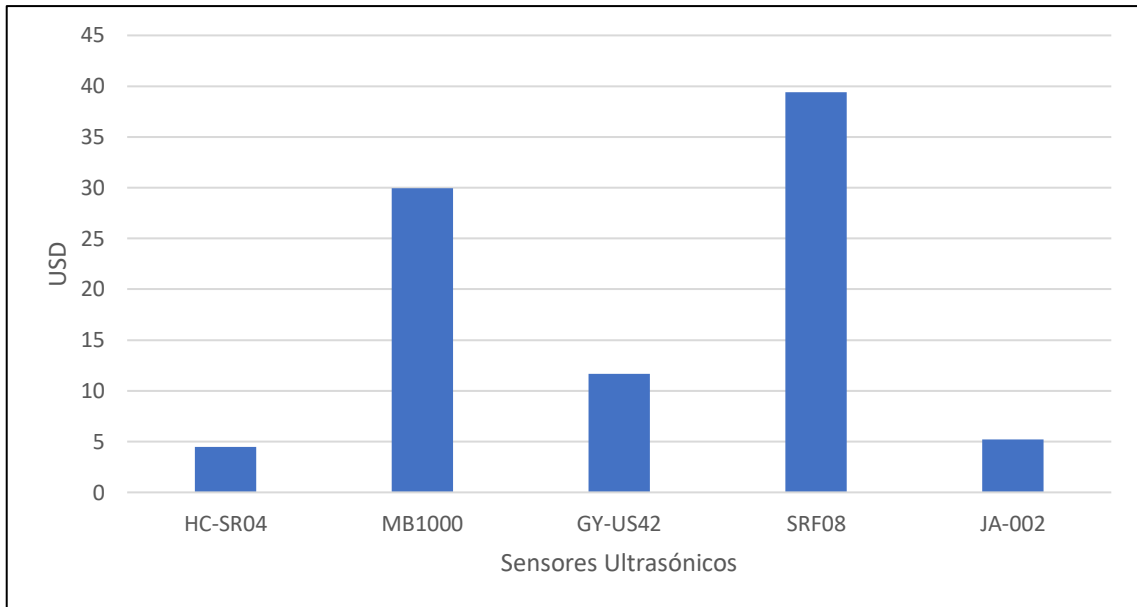


Gráfico 12-3. Precio de los diferentes tipos de sensores ultrasónicos.

Realizado por: John Hidalgo, 2019.

En el Gráfico 11-3 se comprueba que el sensor ultrasónico que menor costo tiene es el HC-SR04 y después se encuentra el sensor desarrollado JA-002. A pesar de que el número de componentes utilizados en el sensor inteligente JA-002 es menor que los utilizados en el HC-SR04 el precio de este último es menor, esto se debe a que el proceso de manufactura en masa de cualquier dispositivo electrónico es barato, es decir, si al sensor JA-002 se lo realiza en grandes cantidades el precio puede disminuir aún más, logrando así que sea el más accesible en el mercado.

CONCLUSIONES

Una vez concluido el presente trabajo de titulación, se llegó a las siguientes conclusiones:

- El primer prototipo JA-001 desarrollado consistió en dos transductores para la acción ultrasónica, uno de recepción y otro de transmisión. Las distancias de medición alcanzadas con este prototipo llegaron hasta 100 cm, por lo que este fue descartado y se dio inicio a un nuevo diseño.
- El segundo prototipo optimizado JA-002 desarrollado constó de un solo transductor de acción ultrasónica, el mismo que debido al algoritmo de control implementado funciona en un primer momento como transmisor y luego como receptor. Este prototipo cumplió con los requerimientos planteados en la fase de diseño.
- Se realizaron varias pruebas con el sensor JA-002 sobre cuatro diferentes tipos de materiales: cartón, plástico, madera y ropa. Los resultados obtenidos evidenciaron que la distancia mínima de detección es 30 cm, con una máxima de 300 cm sobre todos los materiales a excepción del objeto ropa para el cual su distancia máxima fue de 218 cm.
- En general se determinó mediante pruebas controladas que el sensor JA-002 presenta las siguientes características: alcance de 188cm, resolución del 1,0638%, precisión de 0.7006, exactitud de -3cm y sensibilidad de 1. En base a estas características se puede concluir que el sensor inteligente JA-002 se puede utilizar en aplicaciones de navegación para personas no videntes.
- Finalmente, el sensor inteligente JA-002 tiene un voltaje de funcionamiento de 3.3V a 5V, un consumo de corriente de 4.8mA, rango de distancia de 30cm a 218cm, tamaño de 25mm x 23mm x 16mm, comunicación I2C y un costo de 5,22 USD por lo cual se concluye que el dispositivo desarrollado cumple con los requerimientos establecidos previamente.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la calibración inicial con el sensor apuntando hacia el cielo donde no existe ningún objeto que pueda ser detectado inicialmente.
- Para la fabricación de cualquier dispositivo electrónico que trabaje a altas frecuencias se recomienda utilizar elementos electrónicos de montaje superficial para evitar tener problemas con las interferencias electromagnéticas.
- Se recomienda utilizar el sensor inteligente JA-002 para aplicaciones en donde se requieran obtener mediciones de largas distancias, debido a que la zona muerta del sensor es amplia.
- En el presente estudio se consideró el análisis del primer pulso receptado para determinar la detección de un objeto. Sin embargo, se recomienda el análisis de todos los pulsos para determinar características de reflexión y refracción de las ondas ultrasónicas por parte del objeto en estudio y así determinar propiedades del material.
- Se recomienda realizar pruebas con el sensor JA-002 en dispositivos de navegación de personas no videntes.

GLOSARIO

OMS	Organización mundial de la salud
CONADIS	Consejo nacional para la integración de la persona con discapacidad
MIT	Instituto de Tecnología de Massachusetts
DC-9	Avión de pasajeros bimotor de corto-medio alcance
RC	Resistencia - Capacitor
DSP	Procesador digital de señales
D/A	Convertor digital - analógico
V/F	Tensión - frecuencia
USIC	Chip de interfaz de sensor universal
DAC	Convertor digital – analógico
RISC	Grupo reducido de instrucciones para computadoras
RS232	Estándar recomendado 232
RAM	Memoria de acceso aleatorio
ROM	Memoria de solo lectura
UTI	Interfaz de transductor universal
RTD	Detector de temperatura de resistencia
CMOS	Semiconductor complementario de óxido metálico
FPGA	Matriz de puertas lógicas programable en campo
MEMS	Sistemas micro electromecánicos
OpAmp	Amplificador operacional
ADC	Convertor analógico – digital.
SAR	Registro de aproximación sucesiva
SHA	Muestreo y espera
TTL	lógica transistor a transistor
UART	Transmisor-Receptor Asíncrono Universal
I2C	Circuito inter-integrado
SDA	Dato serial
SCL	Serial reloj
CPU	Unidad central de procesamiento
USB	Universal serial bus
IDE	Entorno de desarrollo integrado
PIC	Circuito integrado programable
RFID	Identificación por radiofrecuencia

MCU	Microcontrolador
IDP	Plataforma de desarrollo integrado
C	Es un lenguaje de programación de propósito general
C++	Incremento de Cy se refiere a que C++ es una extensión de C
EDA	Automatización de diseño electrónico
VSM	Modelado de sistema virtual
PCB	Placa de circuito impreso
DIP	Empaquetado/paquete de doble hilera
TQFP	Encapsulado cuadrado plano de perfil bajo
QFN	Encapsulado para dispositivos con ausencia de terminales físicos
SMD	Dispositivo de montaje superficial
EMI	Interferencias electromagnéticas
CNC	Control numérico computarizado
ICSP	Programación serial en circuito
PC	Computador personal
RX	Recepción
TX	Transmisión

BIBLIOGRAFÍA

A TWO-WIRE SERIAL PROTOCOL. *I2C Info – I2C Bus , Interface and Protocol I2C Info – I2C Bus , Interface and Protocol* [blog]. 2019. [Consulta: 30 septiembre 2019]. Disponible en: <https://i2c.info/>

ALIEXPRESS. *GY-US42 Flight Control Ultrasonic Ranging Module* [blog]. 2019. [Consulta: 15 de agosto 2019]. Disponible en: <https://www.aliexpress.com/item/32842735401.html>.

APRENDIENDO ARDUINO. *Pantalla LCD I2C en Arduino* [blog].2016. [Consulta: 3 noviembre 2019]. Disponible en: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/category/i2c/>

ATMEL. *ATmega328P* [en línea]. 2015. [Consulta: 27 octubre 2019]. Disponible en: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf

BABY-DHIVYA, Sangepu. & MADHUMATI, G. L. "*Implementation and Verification of I 2 C Single - Master Multiple Slave Bus Controller using System Verilog and UVM*". *International Journal of VLSI System Design and Communication Systems* [en línea], 2015, (India), pp. 1239–1243. [Consulta: 25 septiembre 2019]. ISSN 2322-0929. Disponible en: <http://www.ijvdc.org/uploads/653412IJVDCS7255-207.pdf>.

BOYLESTAD, Robert. & NASHELSKY, Louis. *Electrónica : teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. 10ma ed. México: Pearson Educación, 2009. ISBN 9786074422924.

CAZAR, Ramiro. et al. "*Universidad y Discapacidad: la discapacidad en la Universidad Central del Ecuador*". *Revista Ciencias Sociales* [en línea], 2017, (Ecuador), pp. 194–204. [Consulta: 15 agosto 2019]. Disponible en: <http://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/CSOCIALES/article/view/1232/1220>

CORONA, Leonel., ABARCA, Griselda. & MARES, Jesús. *Sensores y actuadores aplicaciones con arduino*. México, Azcapotzalco: Grupo Editorial Patria, 2014. ISBN 9786074389364.

CUSTODIO, Angel., BRAGÓS, Ramon. & PALLÁS, Ramon. "*Sensores inteligentes: una historia con futuro*". *Ramas de Estudiantes del IEEE* [en línea], 1999, España. pp. 13–18.

[Consulta: 13 agosto 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/41793881_Sensores_inteligentes_una_historia_con_futuro.

CYTRON TECHNOLOGIES. *HC-SR04 User's Manual* [en línea], Malaysia, 2013. [Consulta: 19 septiembre 2019]. Disponible en: <http://web.eece.maine.edu/~zhu/book/lab/HC-SR04%20User%20Manual.pdf>

ESCALONA, Iván. *Transductores y sensores en la automatización industrial*. El Cid Editor, 2007. ISBN 11475776.

FLORES, Omar. *Batalla de Microcontroladores ¿AVR o PIC?* [en línea]. El Salvador: Universidad Tecnológica de El Salvador. [Consulta: 20 septiembre 2019]. Disponible en: https://microcontroladores2utec.files.wordpress.com/2009/11/180909_articulo_colaboracion_boletin_fica_omar_otoniel_flores.pdf.

KONOLIGE, Kurt. et al. *A Low-Cost Laser Distance Sensor*, IEEE International conference in Robotics and Automation [en línea], 2008, USA, pp. 3002–3008. [Consulta: 20 agosto 2019]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/224318681_A_low-cost_laser_distance_sensor

LABCENTER ELECTRONICS. *PROTEUS DESIGN Getting Started Guide* [en línea]. 2019. [Consulta: 24 septiembre 2019]. Disponible en: <https://labcenter.s3.amazonaws.com/downloads/Tutorials.pdf>.

MANKAR, Jayant. et al. *Review of I2C Protocol*, International Journal of Research in Advent Technology [en línea], 2014, India, pp. 474–479. [Consulta: 2 octubre 2019]. E-ISSN: 2321-9637. Disponible en: <http://www.ijrat.org>

MAXBOTIX. *LV-MaxSonar-EZO MB100* [en línea]. USA, 2012.[Consulta: 22 agosto 2019]. Disponible en: https://www.maxbotix.com/documents/LV-MaxSonar-EZ_Datasheet.pdf.

MECHATRONIC SYSTEMS. *Devantech SRF08 UltraSonic Ranger* [en línea]. 2019. pp. 1–16. [Consulta: 19 septiembre 2019]. Disponible en: <http://coecsl.ece.illinois.edu/ge423/DevantechSRF08UltraSonicRanger.pdf>

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. *10 Datos sobre la ceguera y la discapacidad*

visual [blog]. 2014. [Consulta: 16 agosto 2019]. Disponible en: https://www.who.int/features/factfiles/blindness/blindness_facts/es/index2.html.

OPENLAB PRO. *RealTerm Serial Terminal for embedded debugging : Guide* [blog]. 2012. [Consulta: 26 septiembre 2019]. Disponible en: <https://openlabpro.com/guide/realterm-guide/>.

REALTERM. *Serial Terminal* [blog]. 2019. [Consulta: 22 septiembre 2019]. Disponible en: <https://realterm.sourceforge.io/>.

SANTILLÁN, Luis. & NUÑEZ, María. Diseño y construcción de un bastón electrónico como ayuda a personas con discapacidad visual [en línea] (Trabajo de Titulación). (Ingeniería) Escuela Superior Politécnica de CHimborazo, Riobamba, Ecuador. 2010. [Consulta: 29 agosto 2019]. Disponible en: <http://dspace.espace.edu.ec/handle/123456789/611>

TEJA-GUNUKULA, Surya. & RAOOF-MOHAMMED, Hawzhin. *Inter-Integrated Circuit (I2C) Interface* [en línea]. [Consulta: 1 noviembre 2019]. Disponible en: https://www.cae.tntech.edu/~mmahmoud/teaching_files/grad/ECE6110/Slides/ECE6110_I2C.pdf.

VALDEZ, Jonathan. & BECKER, Jared. *Understanding the I2C Bus* [en línea], Texas Instruments. USA. 2015. [Consulta: 29 septiembre 2019]. Disponible en: <http://www.ti.com/lit/an/slva704/slva704.pdf>.

ANEXOS

ANEXO A: TABULACIÓN DE DATOS DE LAS MEDIDAS DE DISTANCIA OBTENIDAS CON EL SENSOR JA-002 FRENTE A DIFERENTES OBJETOS DE DIVERSOS MATERIALES.

Distancia Real (cm)	Distancia Medida (cm)			
	Cartón	Plástico	Madera	Ropa
2	32	49	32	49
4	37	44	37	44
6	44	49	44	49
8	39	40	39	40
10	45	49	45	49
12	49	32	49	32
14	39	40	39	40
16	40	42	40	42
18	42	45	42	45
20	47	44	47	44
22	49	45	49	45
24	51	49	51	49
26	56	52	56	52
28	61	56	61	56
30	32	32	32	32
32	34	34	34	34
34	35	35	35	35
36	37	37	37	37
38	39	39	39	39
40	40	40	40	40
42	42	42	42	42
44	45	45	45	45
46	47	47	47	47
48	49	49	49	49
50	51	51	51	51
52	53	53	53	53
54	55	55	55	55
56	57	57	57	57

58	58	58	58	58
60	61	61	61	61
62	63	63	63	63
64	64	64	64	64
66	67	67	67	67
68	69	69	69	69
70	71	71	71	71
72	72	72	72	72
74	75	75	75	75
76	78	78	78	78
78	79	79	79	79
80	81	81	81	81
82	83	83	83	83
84	84	84	84	84
86	87	87	87	87
88	89	89	89	89
90	91	91	91	91
92	93	93	93	93
94	95	85	85	85
96	97	97	97	97
98	99	99	99	99
100	101	101	101	101
102	103	103	103	103
104	105	105	105	105
106	107	107	107	107
108	109	109	109	109
110	112	112	112	112
112	113	113	113	113
114	114	114	114	114
116	115	115	115	115
118	119	119	119	119
120	122	122	122	122
122	123	123	123	123
124	125	125	125	125
126	127	127	127	127

128	129	129	129	129
130	132	132	132	132
132	133	133	133	133
134	135	135	135	135
136	136	136	136	136
138	139	139	139	139
140	142	142	142	142
142	143	143	143	143
144	145	145	145	145
146	147	147	147	147
148	149	149	149	149
150	153	153	153	153
152	153	153	153	153
154	155	155	155	155
156	157	157	157	157
158	160	160	160	160
160	163	163	163	163
162	165	165	165	165
164	166	166	166	166
166	167	167	167	167
168	170	170	170	170
170	173	173	173	173
172	175	175	175	175
174	176	176	176	176
176	178	178	178	178
178	180	180	180	180
180	181	181	181	181
182	183	183	183	183
184	185	185	185	185
186	187	187	187	187
188	189	189	189	189
190	192	192	192	192
192	193	193	193	193
194	195	195	195	195
196	197	197	197	197

198	199	199	199	199
200	202	202	202	202
202	203	203	203	203
204	205	205	205	205
206	207	207	207	207
208	209	209	209	209
210	212	212	212	212
212	213	213	213	213
214	215	215	215	215
216	216	216	216	216
218	219	219	219	219
220	222	222	222	153
222	224	224	224	53
224	226	226	226	53
226	228	228	228	110
228	230	230	230	53
230	233	233	233	48
232	234	234	234	52
234	236	236	236	32
236	238	238	238	58
238	240	240	240	145
240	243	243	243	49
242	245	245	245	51
244	246	246	246	236
246	248	248	248	55
248	250	250	250	59
250	252	252	252	54
252	254	254	254	53
254	256	256	256	53
256	258	258	258	110
258	260	260	260	53
260	262	262	262	48
262	264	264	264	52
264	266	266	266	32
266	268	268	268	58

268	270	270	270	145
270	272	272	272	49
272	274	274	274	51
274	276	276	276	236
276	278	278	278	55
278	280	280	280	59
280	283	283	283	54
282	285	285	285	53
284	286	286	286	53
286	288	288	288	110
288	290	290	290	53
290	294	294	294	48
292	296	296	296	52
294	298	298	298	32
296	300	300	300	58
298	303	303	303	145
300	306	306	305	49

ANEXO B: TABULACIÓN DE DATOS DE LAS MEDIDAS DE DISTANCIA OBTENIDAS CON EL SENSOR JA-002 EN UN RANGO DE 30CM A 218CM CON EL RESPECTIVO ERROR CALCULADO.

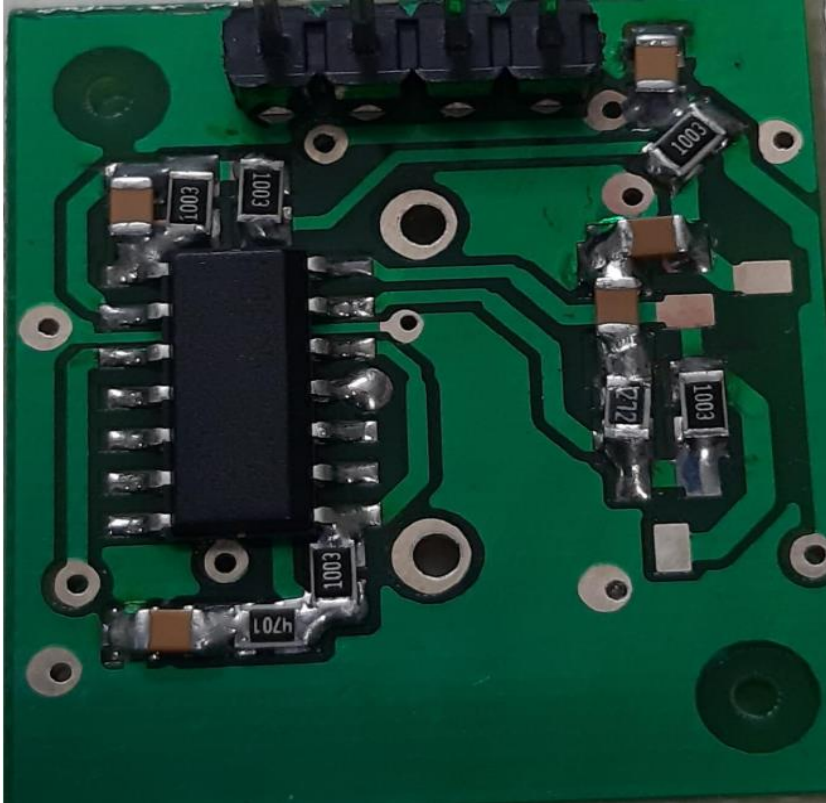
Distancia Real (cm)	Distancia Medida (cm)	Error
30	32	-2
32	34	-2
34	35	-1
36	37	-1
38	39	-1
40	40	0
42	42	0
44	45	-1
46	47	-1
48	49	-1
50	51	-1
52	53	-1
54	55	-1
56	57	-1
58	58	0
60	61	-1
62	63	-1
64	64	0
66	67	-1
68	69	-1
70	71	-1
72	72	0
74	75	-1
76	78	-2
78	79	-1
80	81	-1
82	83	-1
84	84	0
86	87	-1
88	89	-1

90	91	-1
92	93	-1
94	85	-1
96	97	-1
98	99	-1
100	101	-1
102	103	-1
104	105	-1
106	107	-1
108	109	-1
110	112	-2
112	113	-1
114	114	0
116	115	1
118	119	-1
120	122	-2
122	123	-1
124	125	-1
126	127	-1
128	129	-1
130	132	-2
132	133	-1
134	135	-1
136	136	0
138	139	-1
140	142	-2
142	143	-1
144	145	-1
146	147	-1
148	149	-1
150	153	-3
152	153	-1
154	155	-1
156	157	-1
158	160	-2

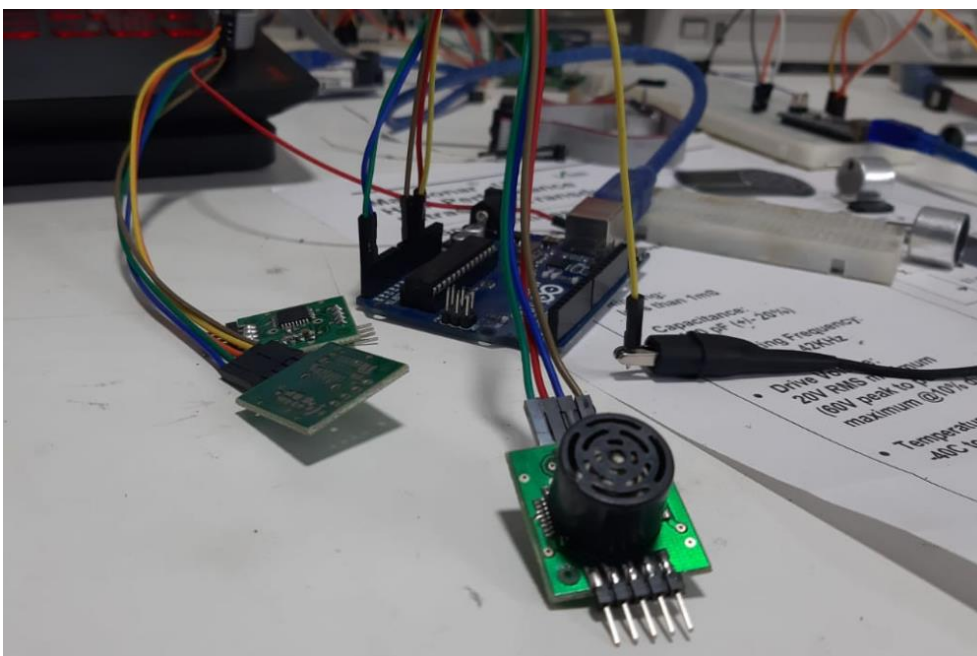
160	163	-3
162	165	-3
164	166	-2
166	167	-1
168	170	-2
170	173	-3
172	175	-3
174	176	-2
176	178	-2
178	180	-2
180	181	-1
182	183	-1
184	185	-1
186	187	-1
188	189	-1
190	192	-2
192	193	-1
194	195	-1
196	197	-1
198	199	-1
200	202	-2
202	203	-1
204	205	-1
206	207	-1
208	209	-1
210	212	-2
212	213	-1
214	215	-1
216	216	0
218	219	-1

ANEXO C: ENSAMBLE DEL SENSOR INTELIGENTE JA-002

- Ubicación y suelda de componentes electrónicos SMD



- Ubicación del transductor ultrasónico en la PCB



ANEXO D: PRUEBAS DE CAMPO DEL SENSOR INTELIGENTE JA-002

- Segmentación de distancias para pruebas de campo.



- Escenario para mediciones de distancia con el sensor JA-002



- Pruebas de medición de distancia con cartón



- Pruebas de medición de distancia con madera



- Pruebas de medición de distancia con plástico



- Pruebas de medición de distancia con vestimenta.



- ATMEGA328P



ATmega328P

8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System
Programmable Flash

DATASHEET

Features

- High performance, low power AVR[®] 8-bit microcontroller
- Advanced RISC architecture
 - 131 powerful instructions – most single clock cycle execution
 - 32 × 8 general purpose working registers
 - Fully static operation
 - Up to 16MIPS throughput at 16MHz
 - On-chip 2-cycle multiplier
- High endurance non-volatile memory segments
 - 32K bytes of in-system self-programmable flash program memory
 - 1Kbytes EEPROM
 - 2Kbytes internal SRAM
 - Write/erase cycles: 10,000 flash/100,000 EEPROM
 - Optional boot code section with independent lock bits
 - In-system programming by on-chip boot program
 - True read-while-write operation
 - Programming lock for software security
- Peripheral features
 - Two 8-bit Timer/Counters with separate prescaler and compare mode
 - One 16-bit Timer/Counter with separate prescaler, compare mode, and capture mode
 - Real time counter with separate oscillator
 - Six PWM channels
 - 8-channel 10-bit ADC in TQFP and QFN/MLF package
 - Temperature measurement
 - Programmable serial USART
 - Master/slave SPI serial interface
 - Byte-oriented 2-wire serial interface (Phillips I²C compatible)
 - Programmable watchdog timer with separate on-chip oscillator
 - On-chip analog comparator
 - Interrupt and wake-up on pin change
- Special microcontroller features
 - Power-on reset and programmable brown-out detection
 - Internal calibrated oscillator
 - External and internal interrupt sources
 - Six sleep modes: Idle, ADC noise reduction, power-save, power-down, standby, and extended standby

- I/O and packages
 - 23 programmable I/O lines
 - 32-lead TQFP, and 32-pad QFN/MLF
- Operating voltage:
 - 2.7V to 5.5V for ATmega328P
- Temperature range:
 - Automotive temperature range: -40°C to +125°C
- Speed grade:
 - 0 to 8MHz at 2.7 to 5.5V (automotive temperature range: -40°C to +125°C)
 - 0 to 16MHz at 4.5 to 5.5V (automotive temperature range: -40°C to +125°C)
- Low power consumption
 - Active mode: 1.5mA at 3V - 4MHz
 - Power-down mode: 1µA at 3V

- **LM324**

LM324, LM324A, LM324E, LM224, LM2902, LM2902E, LM2902V, NCV2902

Single Supply Quad Operational Amplifiers

The LM324 series are low-cost, quad operational amplifiers with true differential inputs. They have several distinct advantages over standard operational amplifier types in single supply applications. The quad amplifier can operate at supply voltages as low as 3.0 V or as high as 32 V with quiescent currents about one-fifth of those associated with the MC1741 (on a per amplifier basis). The common mode input range includes the negative supply, thereby eliminating the necessity for external biasing components in many applications. The output voltage range also includes the negative power supply voltage.

Features

- Short Circuited Protected Outputs
- True Differential Input Stage
- Single Supply Operation: 3.0 V to 32 V
- Low Input Bias Currents: 100 nA Maximum (LM324A)
- Four Amplifiers Per Package
- Internally Compensated
- Common Mode Range Extends to Negative Supply
- Industry Standard Pinouts
- ESD Clamps on the Inputs Increase Ruggedness without Affecting Device Operation
- NCV Prefix for Automotive and Other Applications Requiring Unique Site and Control Change Requirements; AEC-Q100 Qualified and PPAP Capable
- These Devices are Pb-Free, Halogen Free/BFR Free and are RoHS Compliant



ON Semiconductor®

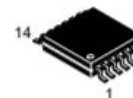
www.onsemi.com



PDIP-14
N SUFFIX
CASE 646

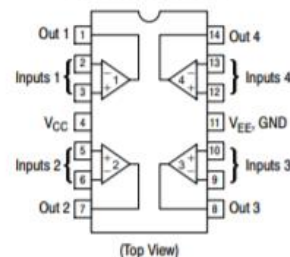


SOIC-14
D SUFFIX
CASE 751A



TSSOP-14
DTB SUFFIX
CASE 948G

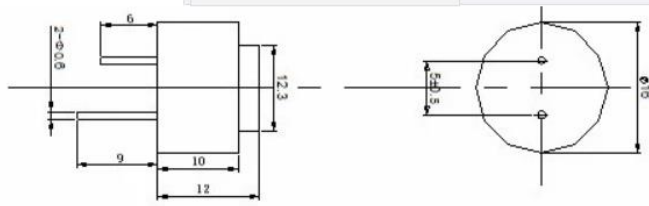
PIN CONNECTIONS



ORDERING INFORMATION

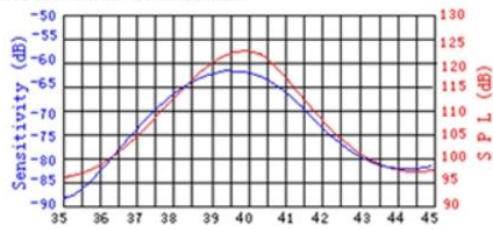
See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 10 of this data sheet.

- **Transductores ultrasónicos FBULS1612P**



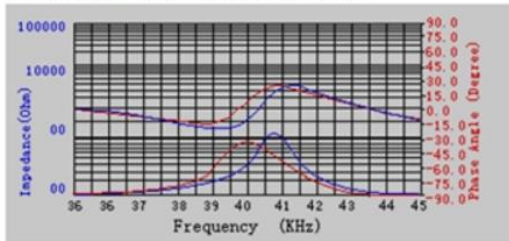
Sensitivity/Sound Pressure Level

Tested under 10Vrms@30cm

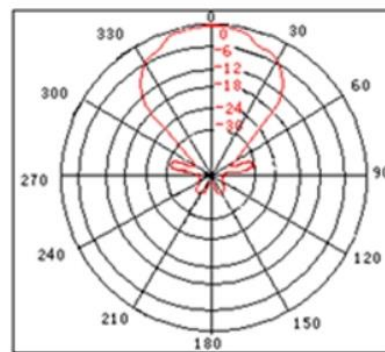


Impedance/Phase Angle vs. Frequency

Tested under 1Vrms Oscillation Level



Frequency (KHz)
Beam Angle: Tested at 40.0Khz frequency



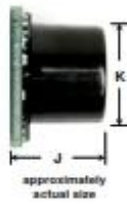
- Sensor MB1000

MB1000

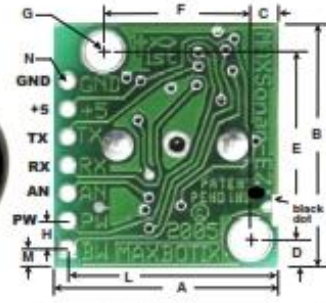
LV-MaxSonar® -EZ0™ High Performance Sonar Range Finder



With 2.5V - 5.5V power the LV-MaxSonar® -EZ0™ provides very short to long-range detection and ranging, in an incredibly small package. The LV-MaxSonar® -EZ0™ detects objects from 0-inches to 254-inches (6.45-meters) and provides sonar range information from 6-inches out to 254-inches with 1-inch resolution. Objects from 0-inches to 6-inches typically range as 6-inches. The interface output formats included are pulse width output, analog voltage output, and serial digital output.



approximately actual size



A	0.785"	19.9 mm	H	0.100"	2.54 mm
B	0.870"	22.1 mm	J	0.610"	15.5 mm
C	0.100"	2.54 mm	K	0.645"	16.4 mm
D	0.100"	2.54 mm	L	0.735"	18.7 mm
E	0.670"	17.0 mm	M	0.0605"	1.7 mm
F	0.510"	12.6 mm	N	0.038" dia	1.0 mm dia
G	0.124" dia	3.1 mm dia			weight, 4.3 grams

values are nominal

Features

- Continuously variable gain for beam control and side lobe suppression
- Object detection includes zero range objects
- 2.5V to 5.5V supply with 2mA typical current draw
- Readings can occur up to every 50mS, (20-Hz rate)
- Free run operation can continually measure and output range information
- Triggered operation provides the range reading as desired
- All interfaces are active simultaneously
- Serial, 0 to Vcc, 9600Baud, 81N
- Analog, (Vcc/512) / inch
- Pulse width, (147uS/inch)
- Learns ringdown pattern when commanded to start ranging
- Designed for protected indoor environments
- Sensor operates at 42KHz
- High output square wave sensor drive (double Vcc)

Benefits

- Very low cost sonar ranger
- Reliable and stable range data
- Sensor dead zone virtually gone
- Lowest power ranger
- Quality beam characteristics
- Mounting holes provided on the circuit board
- Very low power ranger, excellent for multiple sensor or battery based systems
- Can be triggered externally or internally
- Sensor reports the range reading directly, frees up user processor
- Fast measurement cycle
- User can choose any of the three sensor outputs

Beam Characteristics

The LV-MaxSonar® -EZ0™ has the most sensitivity of the LV-MaxSonar® -EZ™ product line, yielding a controlled wide beam with high sensitivity. Sample results for measured beam patterns are shown below on a 12-inch grid. The detection pattern is shown for;

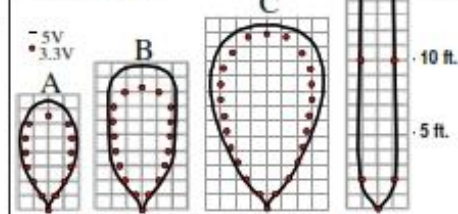
(A) 0.25-inch diameter dowel, note the narrow beam for close small objects,

(B) 1-inch diameter dowel, note the long narrow detection pattern,

(C) 3.25-inch diameter rod, note the long controlled detection pattern,

(D) 11-inch wide board moved left to right with the board parallel to the front sensor face and the sensor stationary. This shows the sensor's range capability.

Note: The displayed beam width of (D) is a function of the specular nature of sonar and the shape of the board (i.e. flat mirror like) and should never be confused with actual sensor beam width.



beam characteristics are approximate

MaxBotix® Inc.

MaxBotix, MaxSonar & EZ0 are trademarks of MaxBotix Inc.
LV-EZ0™ - patent 7,679,996 - Copyright 2005 - 2012

Page 1
Email: info@maxbotix.com
Web: www.maxbotix.com

PD100014

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS PARA EL APRENDIZAJE
Y LA INVESTIGACIÓN
UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 27 / 11 / 2019

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: John Alexander Hidalgo Aguirre
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Facultad de Informática y Electrónica
Carrera: Ingeniería en Electrónica Control y Redes Industriales
Título a optar: Ingeniero en Electrónica Control y Redes Industriales
f. Analista de bibliotecas responsable: