
	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-06	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	1 de 2

Neiva, 18 de septiembre de 2019

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Daniel Felipe Medina Pimentel, con C.C. No. 1075274569.

Gentil Alexis Perdomo Artunduaga, con C.C. No. 1082805373.

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado.

Titulado Reconocimiento de un ambiente mediante técnicas de análisis de señales ultrasónicas

presentado y aprobado en el año 2019 como requisito para optar al título de Ingeniero Electrónico

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS**



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

Daniel F. Medina P.



EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

[Signature]

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS					
DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA 1 de 4

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: RECONOCIMIENTO DE UN AMBIENTE MEDIANTE TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE SEÑALES ULTRASÓNICAS.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Medina Pimentel Perdomo Artunduaga	Daniel Felipe Gentil Alexis

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Mosquera Cerquera	Vladimir

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO ELECTRÓNICO

FACULTAD: INGENIERÍA

PROGRAMA O POSGRADO: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

CIUDAD: NEIVA

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2019



NÚMERO DE PÁGINAS: 71

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas ☒ Fotografías ☒ Grabaciones en discos ☐ Ilustraciones en general ☒ Grabados ☐
Láminas ☐ Litografías ☐ Mapas ☐ Música impresa ☐ Planos ☐ Retratos ☐ Sin ilustraciones ☐ Tablas
o Cuadros ☐

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA						
	GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 4

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Adobe Acrobat Reader DC

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN *(En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):*

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Fenómenos ondulatorios	Wavelets phenomenon
2. Redes Neuronales	Neural Networks
3. Entorno controlado	Controlled environment
4. Sistema ultrasónico	Ultrasonic system
5. Envolvente de eco	Echo Envelope

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Este trabajo presenta un sistema capaz de reconocer objetos en un ambiente controlado mediante el uso de técnicas de procesamiento digital de señales y redes neuronales. Se estudiaron los diversos fenómenos ondulatorios y la influencia del ruido ambiental para la creación de un ambiente capaz de mantener las condiciones externas aisladas como una alternativa para garantizar el transito libre de las ondas ultrasónicas a través de este. Se realizó un análisis e implementación de un sistema ultrasónico para adquirir información junto con algunos elementos que lo conforman tales como la infraestructura mecánica, arreglos sensoriales, sistemas de control y recepción de ecos además de un generador de ondas mecánicas para cumplir con los requerimientos propuestos. Se presenta un sistema de adquisición de datos el cual adecua la señal recibida y la muestrea a una determinada



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 4
--------	--------------	---------	---	----------	------	--------	--------

frecuencia a través de una tarjeta programable que también se encarga de coordinar todos los procesos que conforman el sistema relacionado al hardware. Por último, se ejecuta un procesamiento a nivel de software, de modo tal que los datos adquiridos son filtrados, organizados y adecuados mediante el uso de técnicas de procesamiento digital de señales para la obtención de patrones característicos los cuales son encaminados al entrenamiento de una red neuronal encargada de reconocer el objeto u objetivo analizado que será mostrada en una interfaz gráfica.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

This work presents a system capable of recognizing objects in a controlled environment through the use of digital signal processing techniques and neural networks. The various wave phenomena and the influence of environmental noise were studied to create an environment capable of maintaining isolated external conditions as an alternative to guarantee the free transit of ultrasonic waves through it. An analysis and implementation of an ultrasonic system was carried out to acquire information along with some elements that comprise it such as mechanical infrastructure, sensory arrangements, control systems and echo reception in addition to a mechanical wave generator to meet the proposed requirements. A data acquisition system is presented which adapts the received signal and samples it at a certain frequency through a programmable card that also coordinates all the processes that make up the hardware-related system. Finally, a software-level processing is executed, so that the acquired data is filtered, organized and adequate through the use of digital signal processing techniques to obtain characteristic patterns which are aimed at training a neural network responsible for recognizing the object or objective analyzed that will be displayed in a graphical interface.



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	4 de 4
--------	--------------	---------	---	----------	------	--------	--------

APROBACIÓN DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: VLADIMIR MOSQUERA CERQUERA

Firma:

Vladimir Mosquera C.

Nombre Jurado: JOSE DE JESUS SALGADO PATRON

Firma:

Nombre Jurado: JULIÁN ADOLFO RAMÍREZ GUTIÉRREZ

Firma:

RECONOCIMIENTO DE UN AMBIENTE MEDIANTE TÉCNICAS DE
ANÁLISIS DE SEÑALES ULTRASÓNICAS



GENTIL ALEXIS PERDOMO ARTUNDUAGA
DANIEL FELIPE MEDINA PIMENTEL

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NEIVA
2019

RECONOCIMIENTO DE UN AMBIENTE MEDIANTE TÉCNICAS DE
ANÁLISIS DE SEÑALES ULTRASÓNICAS

GENTIL ALEXIS PERDOMO ARTUNDUAGA
DANIEL FELIPE MEDINA PIMENTEL

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

DIRECTOR
I. E. VLADIMIR MOSQUERA CERQUERA, M. SC.

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRONICA
NEIVA
2019

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

*A mis padres Gentil Perdomo y Fainory Artunduaga,
mis hermanos Katherine y Aldemar Perdomo Artunduaga,
a la memoria de mi gran amigo y compañero Jonathan Laguna Garzón.*
Gentil Alexis Perdomo

*A mis padres Rubén Darío Medina, Emperatriz Pimentel,
mis hermanas Norma Lucia y Laura Sofía Medina Pimentel
Mi abuelo Humberto Medina Galindo*
Daniel Felipe Medina

AGRADECIMIENTOS

Le agradecemos a Dios por darnos la oportunidad de culminar este trabajo, nuestros familiares, amigos y demás personas que estuvieron presentes durante este largo proceso, a la Universidad Surcolombiana por darnos la oportunidad de formarnos ética y profesionalmente, a los ingenieros y docentes del programa de ingeniería electrónica por la formación académica y en especial al ingeniero Vladimir Mosquera Cerquera por su amistad, apoyo y confianza.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS	16
2. MARCO TEORICO	17
2.1 ONDAS	17
2.2 FENOMENOS ONDULATORIOS	17
2.3 SISTEMAS ULTRASONICOS	20
2.3.1 Adquisición de características del entorno	20
2.3.2 Propiedades geométricas	20
2.4 METODOS DE ADQUISICIÓN	21
2.4.1 Sonar de diferenciación de objetos basado en redes neuronales	22
2.4.2 Método ultrasónico de reconocimiento de formas basado en técnicas frecuenciales e inteligencia computacional	23
2.5 PROCESAMIENTO DE SEÑALES ULTRASONICAS	23
2.5.1 Técnica de TOF por umbral	24
2.5.2 Técnica envolvente del eco	25
2.5.3 Transformada de Fourier	26
2.4.4 Transformada de Hilbert	27
2.6 REDES NEURONALES ARTIFICIALES	28
2.6.1 Mapas auto organizados (SOM)	29
2.6.2 Fitting App	30

3.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.....	31
3.1	ENTORNO CONTROLADO	31
3.2	SISTEMA DE BARRIDO ULTRASÓNICO.....	33
3.2.1	Arreglo sensorial	34
3.2.2	Direccionamiento del arreglo	35
3.2.3	Generación del haz ultrasónico	36
3.3	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	37
3.3.1	Adecuación de la señal	38
3.3.2	Multiplexación	39
3.3.3	Dispositivo de adquisición y sincronización	40
3.4	PROCESAMIENTO.....	43
3.4.1	Filtrado	44
3.4.2	Detección de eco	45
3.4.3	Obtención de patrones	46
3.4.4	Redes neuronales	46
3.5	INTERFAZ DE USUARIO.....	47
4.	RESULTADOS.....	49
5.	CONCLUSIONES	¡Error! Marcador no definido.
6.	RECOMENDACIONES	67
	BIBLIOGRAFIA	¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fenómeno de reflexión.	18
Figura 2. Refracción de una onda.	18
Figura 3. Difracción de una onda.	19
Figura 4. Interferencia de dos ondas.	19
Figura 5. Eco captado por un transductor.	22
Figura 6. Técnica de tiempo de vuelo.	25
Figura 7. Técnica de la envolvente del eco.	26
Figura 8. Técnica usando transformada de Fourier.	27
Figura 9. Representación gráfica de la función Hilbert en MatLab.	28
Figura 10. Modelo de redes neuronales.	29
Figura 11.(a) SOM rectangular. (b) SOM hexagonal.	30
Figura 12. Diagrama a bloques del sistema general.	31
Figura 13. Esquema entorno controlado.	31
Figura 14. Entorno Controlado.	32
Figura 15. Objetos utilizados.	33
Figura 16. Etapas sistema barrido ultrasónico.	33
Figura 17. Arreglo sensorial en cruz.	34
Figura 18. Sistema de direccionamiento del arreglo sensorial.	35
Figura 19. Esquema generación del haz ultrasónico.	36
Figura 20. Oscilador puente de Wien.	36
Figura 21. Sistema de adquisición de datos.	38
Figura 22. Esquema adecuación de la señal.	38
Figura 23. Esquema eléctrico amplificadores receptores.	39
Figura 24. Esquema multiplexación de los receptores.	40
Figura 25. Esquema general del sistema.	41
Figura 26. Diagrama de procesos.	42
Figura 27. Esquema de conexiones de la tarjeta NI MyDAQ.	43
Figura 28. Esquema general de procesamiento.	43

Figura 29. Proceso de filtrado.	44
Figura 30. Proceso detección de eco.	45
Figura 31. Proceso detección de envoltente.	45
Figura 32. Proceso obtención de patrones.	46
Figura 33. Proceso de reconocimiento usando Fitting App.	47
Figura 34. Proceso de reconocimiento usando SOM.	47
Figura 35. Interfaz de usuario reconocimiento de entorno.	48
Figura 36. Interfaz de usuario para reconocimiento de objetos.	48
Figura 37. Amplificador de alta potencia.	49
Figura 38. Oscilador puente de Wien.	50
Figura 39. Tarjeta de sincronización de la atapa de transmisión.	50
Figura 40. Etapa de acondicionamiento de las señales de los receptores.	51
Figura 41. Multiplexación.	51
Figura 42. Acondicionamiento de las señales de control para el multiplexor.	52
Figura 43. Control del motor pasó a paso de la etapa de direccionamiento del arreglo sensorial.	52
Figura 44. Respuesta del receptor 1 a cada objeto.	53
Figura 45. Respuesta del receptor 2 a cada objeto.	53
Figura 46. Respuesta del receptor 3 a cada objeto.	54
Figura 47. Respuesta del receptor 4 a cada objeto.	54
Figura 48. Respuesta del receptor 5 a cada objeto.	54
Figura 49. Respuesta del receptor 6 a cada objeto.	55
Figura 50. Respuesta del receptor 7 a cada objeto.	55
Figura 51. Respuesta del receptor 8 a cada objeto.	55
Figura 52. Identificación del cilindro usando Fitting App.	56
Figura 53. Identificación de la semi-esfera usando Fitting App.	57
Figura 54. Identificación de la pirámide con Fitting App.	57
Figura 55. Identificación del cubo usando Fitting App.	58
Figura 56. Ubicación de los objetos en la prueba 1.	59
Figura 57. Reconocimiento del entorno en la prueba 1.	59

Figura 58. Ubicación de los objetos en la prueba 2.	60
Figura 59. Identificación del entorno en la prueba 2.	60
Figura 60. Ubicación de los objetos en la prueba 3.	61
Figura 61. Reconocimiento del entorno en la prueba 3.	61
Figura 62. Ubicación de los objetos en la prueba 4.	62
Figura 63. Reconocimiento del entorno en la prueba 4.	62

RESUMEN

Este trabajo presenta un sistema capaz de reconocer objetos en un ambiente controlado mediante el uso de técnicas de procesamiento digital de señales y redes neuronales. Se estudiaron los diversos fenómenos ondulatorios y la influencia del ruido ambiental para la creación de un ambiente capaz de mantener las condiciones externas aisladas como una alternativa para garantizar el tránsito libre de las ondas ultrasónicas a través de este. Se realizó un análisis e implementación de un sistema ultrasónico para adquirir información junto con algunos elementos que lo conforman tales como la infraestructura mecánica, arreglos sensoriales, sistemas de control y recepción de ecos además de un generador de ondas mecánicas para cumplir con los requerimientos propuestos. Se presenta un sistema de adquisición de datos el cual adecua la señal recibida y la muestrea a una determinada frecuencia a través de una tarjeta programable que también se encarga de coordinar todos los procesos que conforman el sistema relacionado al hardware. Por último, se ejecuta un procesamiento a nivel de software, de modo tal que los datos adquiridos son filtrados, organizados y adecuados mediante el uso de técnicas de procesamiento digital de señales para la obtención de patrones característicos los cuales son encaminados al entrenamiento de una red neuronal encargada de reconocer el objeto u objetivo analizado que será mostrada en una interfaz gráfica.

ABSTRACT

This work presents a system capable of recognizing objects in a controlled environment through the use of digital signal processing techniques and neural networks. The various wave phenomena and the influence of environmental noise were studied to create an environment capable of maintaining isolated external conditions as an alternative to guarantee the free transit of ultrasonic waves through it. An analysis and implementation of an ultrasonic system was carried out to acquire information along with some elements that comprise it such as mechanical infrastructure, sensory arrangements, control systems and echo reception in addition to a mechanical wave generator to meet the proposed requirements. A data acquisition system is presented which adapts the received signal and samples it at a certain frequency through a programmable card that also coordinates all the processes that make up the hardware-related system. Finally, a software-level processing is executed, so that the acquired data is filtered, organized and adequate through the use of digital signal processing techniques to obtain characteristic patterns which are aimed at training a neural network responsible for recognizing the object or objective analyzed that will be displayed in a graphical interface.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad hay un vasto conocimiento en relación a la facilidad con la que los murciélagos pueden detectar presas y objetos en la oscuridad gracias a la ecolocalización. La generación de ondas mecánicas provenientes de la laringe de estos mamíferos y su emisión a través de la nariz o la boca oscilando en un rango de frecuencias que va desde los 15 Hz hasta los 200.000 Hz dependen del lugar y la técnica de caza lo que permite obtener información de su presa como por ejemplo el tamaño, velocidad y dirección o la ubicación de obstáculos presentes durante su vuelo en ambientes de poca o nula iluminación.

La necesidad del hombre por crear sistemas con la capacidad de desempeñar funciones de forma independiente trae consigo avances en el campo de la navegación autónoma entendida como la capacidad de ir de un punto del espacio a otro evitando obstáculos. La creación de sistemas autónomos que pueden aprender y reconocer el entorno por el cual se desplazan además de establecer trayectorias en tiempo real depende de la velocidad de procesamiento ya que la fidelidad de la información adquirida tiene que garantizar un bajo porcentaje de error en relación a la identificación de objetos cuya posición puede ser estática o dinámica.

Los sistemas ultrasónicos son mecanismos con la capacidad de generar ondas mecánicas longitudinales con frecuencias superiores a los 20.000 Hz. Estas frecuencias correspondientes a las ondas ultrasónicas se pueden producir mediante vibraciones elásticas de un cristal de cuarzo inducidas por resonancia con un campo eléctrico alterno aplicado (efecto piezoeléctrico) cuyas aplicaciones potenciales se encuentran en el campo de la medicina e ingeniería en áreas como salud, cartografía submarina, medición de niveles en procesos industriales, resistencia e identificación de materiales, navegación aérea y submarina, entre otras.

Una de las principales ventajas del uso de sistemas ultrasónicos se encuentra en la identificación de objetos o entornos en ambientes con ausencia de luz y/o presencia de elementos traslucidos o miméticos lo que dificulta el uso de cámaras ópticas así los sistemas con la capacidad de generar ondas mecánicas y recibir ecos con información de un ambiente son una mejor opción.

La implementación del procesamiento digital de señales fundamentado como la manipulación matemática de señales está orientado a mejorar o modificar una señal de información a través de técnicas o transformaciones. Técnicas como la transformada discreta de Fourier, la transformada del coseno, la transformada de wavelet, entre otras, convierten señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia lo que permite realizar análisis más sencillos y eficaces como por ejemplo aplicaciones en la que se requiere la eliminación del ruido, la manipulación de determinados componentes frecuenciales y la elaboración de algunos tipos de filtros.

El uso de redes neuronales para el reconocimiento de patrones presentes en señales de información previamente procesados a través de técnicas de procesamiento digital de señales representa grandes ventajas. Debido a que las redes neuronales son una forma de simulación de características propias de los seres humanos entre las cuales la más destacada es la experiencia adquirida de situaciones previamente conocidas para la solución de problemas relacionados a estas para conformar un modelo artificial del cerebro humano capaz de evaluar e interpretar los datos obtenidos y poder llegar a una solución determinada han adquirido gran importancia en sistemas que requieren el desarrollo de tareas únicas y bien definidas.

Este trabajo está enfocado a implementar un sistema capaz de reconocer e identificar patrones provenientes de señales mecánicas adquiridas en un ambiente controlado. Por medio de transductores piezoeléctricos configurados como un transmisor y múltiples receptores encargados de generar ondas ultrasónicas al aire

que al chocar con los objetos presentes en el ambiente generan ecos que son recibidos con el objetivo de producir pequeñas señales eléctricas con información pertinente para extraer patrones característicos que ingresan a una red neuronal dedicada al reconocimiento y a la identificación del objeto lo que resulta en un producto final que es un entorno visual en el cual se presentan los resultados deseados.

El estado del arte en relación a los sistemas ultrasónicos se encuentra que la mayoría de trabajos están enfocados con el uso de sensores ultrasónicos para la medida de distancias, continuidad y resistencia de materiales. La gran cantidad de investigaciones orientadas al diseño de este tipo de sistemas están a nivel de maestría aunque se han encontrado algunas investigaciones relacionadas con el tema en cuestión en las cuales el desarrollo matemático es extenso y enfocado a otras situaciones propias de los distintos autores debido a esto se propone un análisis de objetos mediante el uso de las técnicas de procesamiento digital de señales orientadas a ondas ultrasónicas y diferentes tipos de arreglos sensoriales para brindar un mejor entendimiento y las ventajas de trabajar con las técnicas de procesamiento de señales junto con el ultrasonido, lo que abre una puerta a este campo de estudio de la ingeniería con el objetivo de ayudar a futuras investigaciones relacionadas con esta temática a nivel regional.

1. OBJETIVOS

Objetivo general

Desarrollar un sistema de adquisición y análisis de características de un entorno controlado a través de procesamiento de señales ultrasónicas, con el fin de generar patrones característicos que al ser procesados permitan su identificación y posterior representación visual tridimensional.

Objetivos específicos

- Crear un entorno controlado para ejecución de pruebas.
- Diseñar un sistema de adquisición de datos para obtener una representación adecuada de la información proveniente de los sensores ultrasónicos.
- Diseñar una topología de sensores (un emisor, múltiples receptores) con un número adecuado de emisores y receptores buscando la configuración que brinde los mejores resultados utilizando el menor número de elementos.
- Obtener los patrones característicos de cada ambiente en función de los objetos contenidos.
- Diseñar e implementar un algoritmo computacional en Matlab® que permita obtener las características de los objetos presentes en el ambiente para determinar su forma y posición.
- Diseñar pruebas para validar los resultados mediante el uso de imágenes captadas del ambiente.
- Diseñar un GUI de Matlab® para la visualización de resultados.

2. MARCO TEÓRICO

Dado que las señales mecánicas y eléctricas poseen una determinada cantidad de componentes frecuenciales es necesario realizar un procesamiento adicional con el objetivo de extraer información de interés, lo cual se traduce en patrones destinados al entrenamiento de una red neuronal encargada de analizar nuevos datos y posteriormente decidir qué patrón corresponde a cada conjunto de datos. Por tanto en este capítulo se enfatizarán los conceptos básicos para la comprensión del reconocimiento de objetos mediante el uso de técnicas de procesamiento digital de señales y redes neuronales.

2.1 ONDAS

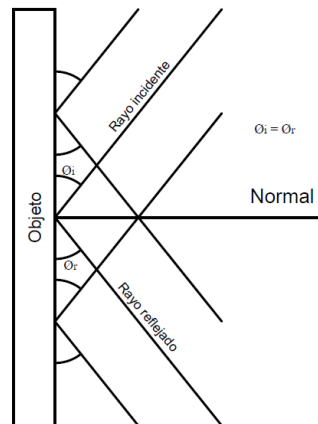
Las ondas acústicas de alta frecuencia (ultrasonido) [15] al requerir de un medio para su propagación se encuentran expuestas a la influencia de factores externos tales como el viento, la lluvia y el ruido ambiental. El uso de entornos aislados permite controlar la influencia de factores externos para garantizar el comportamiento uniforme de cada operación dentro de este y así aplicar técnicas de procesamiento digital de señales que representan dichas señales como funciones matemáticas para su análisis y manipulación con el objetivo de obtener la información deseada.

2.2 FENÓMENOS ONDULATORIOS

La producción de ecos y su incidencia en un determinado punto lleva al análisis de fenómenos como la reflexión, refracción, interferencia, entre otros que afectan la dirección e intensidad del haz de señal ultrasónico en un objeto dando como resultado señales eco con direcciones e intensidades diferentes al de la onda incidente.

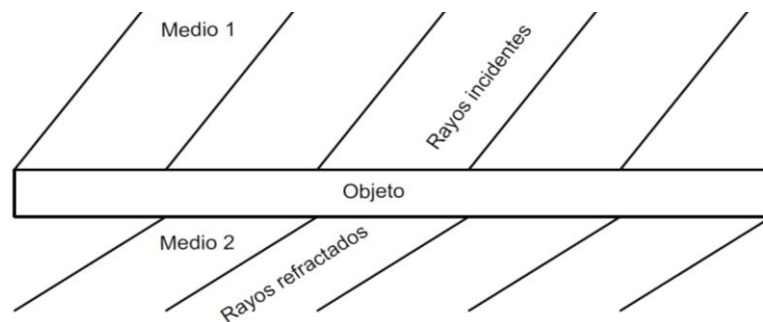
La *reflexión* es el fenómeno ondulatorio que se presenta cuando una onda choca contra un obstáculo manifestando un cambio en la dirección y la propagación de la onda.

Figura 1. Fenómeno de reflexión.



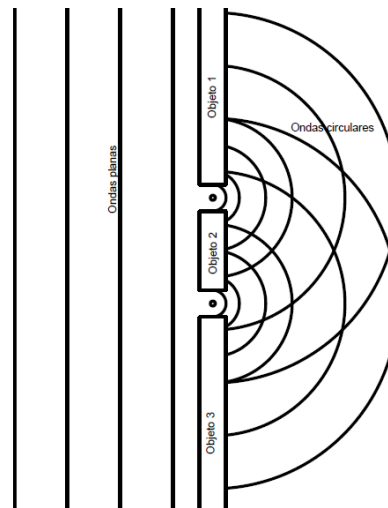
La *refracción* es el fenómeno ondulatorio que se presenta cuando una onda cambia de medio de propagación, se manifiesta con un cambio en la velocidad de la onda.

Figura 2. Refracción de una onda.



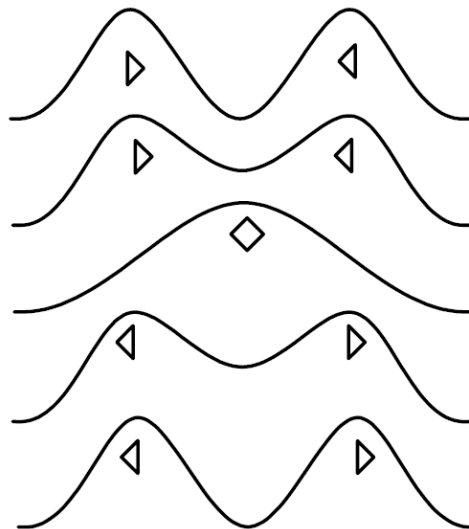
La *difracción* es el fenómeno ondulatorio que se presenta cuando la onda pasa a través de un orificio de tamaño menor que la longitud de onda o pasa cerca a un obstáculo, se manifiesta por que la onda se curva al pasar por la abertura y bordea al obstáculo.

Figura 3. Difracción de una onda.



La interferencia es el fenómeno ondulatorio que se presenta cuando en un punto inciden más de una onda, se manifiesta por que en dicho punto la elongación de la onda es la suma algebraica de las elongaciones de las ondas incidentes.

Figura 4. Interferencia de dos ondas.



2.3 SISTEMAS ULTRASÓNICOS

Los sistemas ultrasónicos permiten obtener información mediante el análisis de las ondas mecánicas mediante el análisis que se propagan en un ambiente y al chocar con irregularidades producen cambios a nivel temporal y espectral que se pueden interpretar al ser capturadas por elementos receptores dispuestos estratégicamente en el entorno.

2.3.1 Adquisición de características del entorno Existen muchas propiedades que pueden caracterizar un entorno tales como el material que la compone, rugosidad, profundidad y altura, lo que hace posible modificar propiedades a través de la inserción de objetos al entorno.

Al disponer de un generador de campo ultrasónico y un arreglo de elementos receptores es posible diferenciar objetos para identificar un entorno a través del análisis de variaciones que presentan los ecos resultantes del choque con cada objeto presente, producto de sus propiedades geométricas y acústicas

2.3.2 Propiedades geométricas En [12] se tiene en cuenta que cada elemento, objeto o superficie consta de propiedades únicas que proporcionan información y permiten diferenciarlos tanto física como acústicamente lo que hace posible determinar varios tipos de formas que pueden clasificarse en.

Planos, es una superficie lisa que actúa como un espejo acústico, la cual si es lo suficientemente extensa puede contener la totalidad del haz ultrasónico del transductor empleado, por el contrario, si la superficie es pequeña se producirán ecos más débiles debido a la menor extensión de la superficie reflectante y a la interferencia destructiva con los ecos producidos por la difracción de los bordes del plano.

Bordes, corresponden a esquinas convexas y superficies de gran curvatura donde el punto de reflexión es prácticamente independiente de la posición del transductor y generan ecos débiles que solo se detectan a corta distancia

Esquinas, es la intersección de dos planos con un determinado ángulo formando una superficie cóncava, por ejemplo, intersecciones de paredes, puertas y demás cerramientos de interior pueden interpretarse como esquinas cuya característica diferencial radica en la reflexión que producen los rebotes entre los planos.

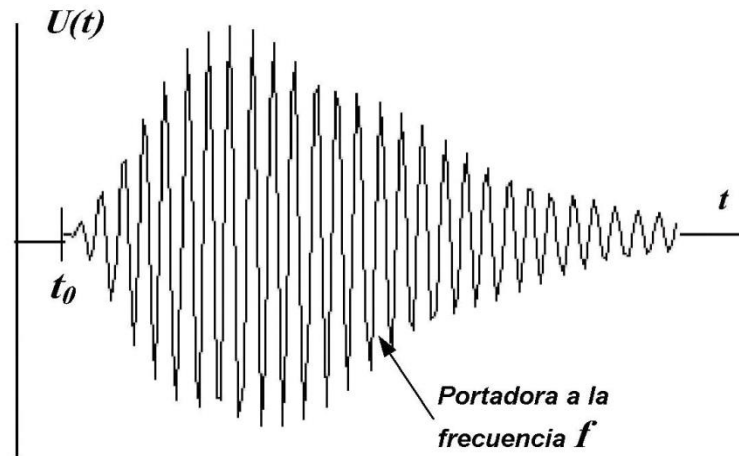
Rugosidades superficiales, conjunto de irregularidades superficiales de paso relativamente pequeño, lo ligadas a la forma, correspondiente a las huellas dejadas en la superficie real por el procedimiento de elaboración y otras influencias.

Las rugosidades que exhiben un patrón repetitivo son denominadas periódicas; sin embargo, las rugosidades aleatorias no exhiben una periodicidad visible. Por otra parte, pueden presentar anisotropía o ser isotrópicas y los parámetros pueden ser evaluados sobre un área o sobre el perfil de una sección.

2.4 MÉTODOS DE ADQUISICIÓN

En [6] la emisión de ondas ultrasónicas como método de exploración está fundamentada en la propagación de vibraciones hacia un determinado medio con una respectiva dirección a fin de recibir un frente de onda resultante y modificado por las características del entorno circundante recorrido. Su emisión puede darse de dos formas, continua que es la propagación de ondas ininterrumpidas al medio o pulsada en la cual la señal de excitación del transductor emisor se realiza por medio de un tren de pulsos con señales de duración finita, de este modo cuando el tren de ondas en forma de vibraciones choca o golpea con un obstáculo este produce ecos resultantes que llegan a los transductores receptores para ser recogidos lo que produce una señal eléctrica similar a la de la siguiente figura.

Figura 5. Eco captado por un transductor.



Así, se proponen varias configuraciones sensoriales para la adquisición de ecos ultrasónicos entre las cuales se destacan

- Un solo sensor, que actúa como transmisor y receptor.
- Un par transmisor-receptor.

donde se basan en la medición del tiempo de vuelo donde se registra el tiempo que tarda el sistema en recibir el eco desde el instante en que se emitió el haz ultrasónico, con lo que se puede determinar la distancia entre el emisor y el obstáculo.

2.4.1 Sonar de diferenciación de objetos basado en redes neuronales Trabajo realizado por Barshan, Ayrala y Utete en el cual se tienen solo dos transductores a y b actuando cada uno como transmisor y receptor alternativamente ampliando el rango de visión en comparación a los sistemas con un único transmisor ultrasónico.

El algoritmo implementado usa las diferencias en la amplitud máxima de los ecos obtenidos para identificar planos y esquinas e incluye diferencias entre los tiempos de vuelo correspondientes a los ecos captados por separado en cada receptor. Sin embargo, los tipos de obstáculos reconocibles son limitados por este motivo la decisión de usar una red neuronal de 232 neuronas de entrada al usar 58 muestras

de cada una de las señales de diferencia entrantes generadas al barrer la zona de exploración de izquierda a derecha entre dos ángulos límites. Complementando la red con 100 neuronas ocultas y 21 neuronas de salida de las cuales 7 codifican el tipo de obstáculo, otras 7 la distancia y las ultimas 7 la orientación. Su entrenamiento se lleva a cabo escogiendo como patrones los distintos tipos de objetos a identificar, ubicándolos en distintas posiciones dentro del rango de exploración común a los sensores.

2.4.2 Método ultrasónico de reconocimiento de formas basado en técnicas frecuenciales e inteligencia computacional Es un sistema que consta de dos transmisores y dos receptores manejados por un microcontrolador que gestiona la emisión y adquisición de los ecos mientras que una computadora procesa la información para obtener mediciones como la distancia, orientación e identificación de los objetos cuyo proceso se puede dividir en dos partes

- Primero se obtienen 4 perspectivas de los objetos al accionar cada transmisor por separado y recibir los ecos por cada receptor los cuales serán almacenados.
- Segundo, el desarrollo de una metodología para disminuir y discriminar los diferentes ecos. Lo que se traduce básicamente en el uso de cruces por cero de la función derivada aplicada a la envolvente del eco principal.

una vez mencionado esto, el clasificador empleado se compone de un banco de X redes neuronales (RNAs) y un algoritmo sencillo de decisión encargados de reconocer la forma del objeto examinado, lo que nos representa ventajas en el aspecto de tener un buen porcentaje de aciertos con solo cuatro señales de eco tomadas con un montaje estático de transductores.

2.5 PROCESAMIENTO DE SEÑALES ULTRASÓNICAS

Durante la evolución de los sistemas ultrasónicos se desarrollaron métodos para analizar los ecos captados por los sistemas, estos métodos de procesamiento permiten obtener información específica de características básicas del entorno

debido a que la forma del eco varía dependiendo de la forma de las superficies reflectoras y del material que son construidas.

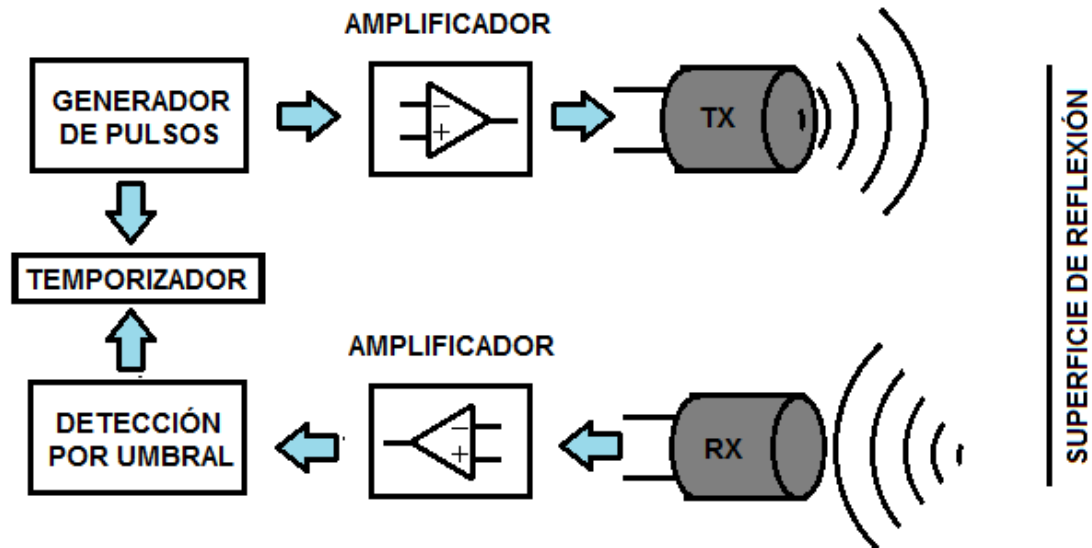
La cantidad de información o detalles varían dependiendo del método de procesamiento que se elija, la cantidad de elementos receptores y el tipo de adquisición realizada, estos métodos de procesamiento varían en complejidad a la hora de implementarse, a continuación se describen dos métodos ampliamente utilizados y una técnica de procesamiento digital de señales que podría ser útil a la hora de realizar este tipo de procesamiento y teniendo en cuenta que el sistema se encuentra trabajando en modo pulso-eco.

Los ecos o señales ultrasónicas captadas por los receptores contienen mucha información de las superficies donde se originan, por eso es importante elegir una técnica adecuada para obtener la información precisa de interés, por ejemplo si se desea conocer la distancia a la que se encuentra un objeto sin importar sus características geométrica, basta con realizar un análisis del tiempo de vuelo por umbral y siguiente obtener la medida de la distancia a la cual se encuentra, pero en el caso de este trabajo es importante reconocer los objetos presentes en el entorno a fin de diferenciar los entornos dependiendo de la posición de cada objeto, para este fin es importante utilizar procesamiento más detallado de las señales captadas, para esto son usadas la técnica de la envolvente y la técnica de Fourier obteniendo información a nivel temporal y frecuencial respectivamente.

2.5.1 Técnica de TOF por umbral En [7] es comúnmente utilizado para determinar la distancia de objetos u obstáculos presentes en el campo de radiación del transductor ultrasónico utilizando un circuito temporizador que contabiliza el tiempo desde que se inicia la transmisión hasta que se presenta una señal eco en el receptor. Esta técnica suele tener un margen de error que depende del valor de umbral que se elija el cual determina el valor mínimo que debe presentar la señal en el receptor para determinar si es un eco, después el tiempo generado por el

circuito temporizador es multiplicado por la velocidad de la onda utilizada (en este caso velocidad del sonido=343.3 m/s) obteniendo así la medida de la distancia.

Figura 6. Técnica de tiempo de vuelo.



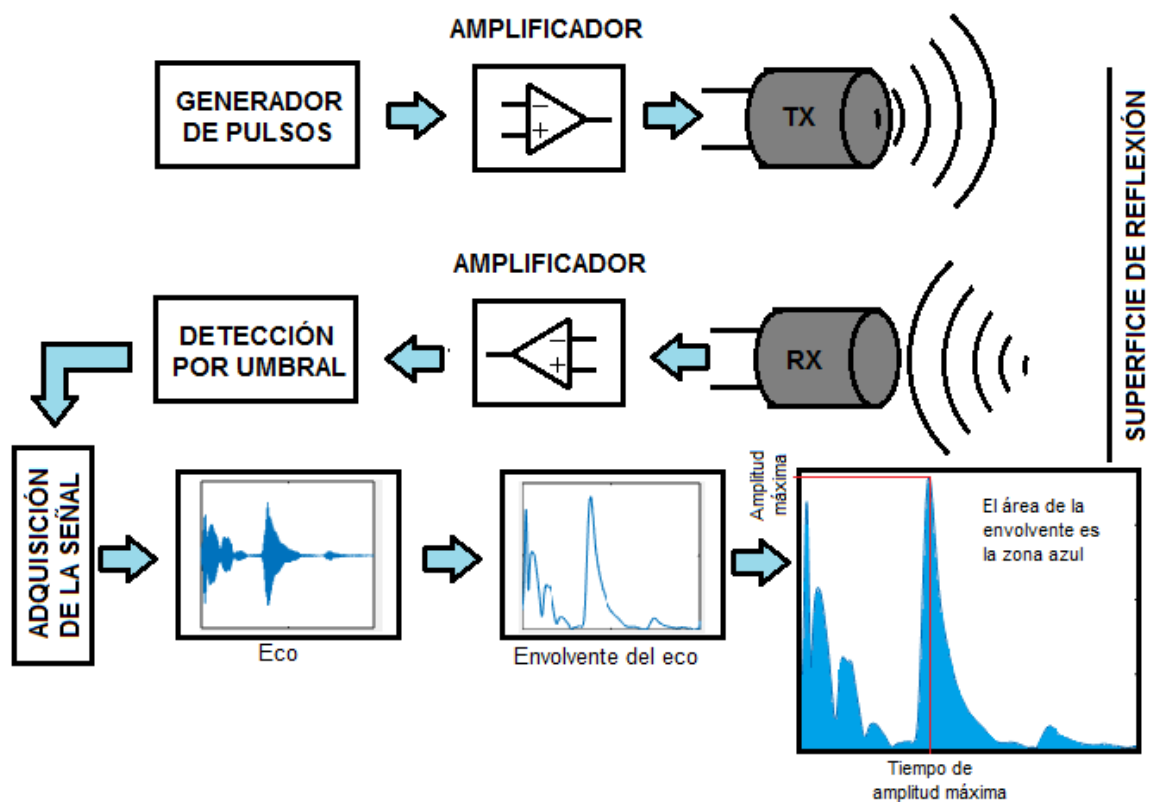
Este método es muy utilizado en aplicaciones simples como radares donde se puede utilizar un mismo transductor como emisor y receptor pues no es necesario realizar procesamiento para triangulación del punto de reflexión.

2.5.2 Técnica envolvente del eco Este método captura en forma digital toda la señal recibida en cada transductor, es muy común utilizar varios elementos receptores distribuidos espacialmente lo que permite obtener ecos diferentes en cada punto de recepción donde los ecos obtenidos varían en función de la morfología de la superficie reflectora.

Existen varios parámetros que se pueden tomar para analizar la información y poder determinar patrones característicos de diferentes objetos tales como la máxima amplitud, el área de la envolvente, la derivada de la envolvente y la forma característica de la señal, dependiendo la complejidad de la aplicación y la diferencia geométrica de los objetos se puede seleccionar diferentes parámetros

para trabajar, por ejemplo cuando los objetos son diferenciables en tamaño, material y forma basta con analizar aspectos como la máxima amplitud, área de la envolvente y derivada de la envolvente, pero como en este caso los objetos guardan algunas similitudes en cuanto a sus características geométricas es necesario el análisis completo de la envolvente del eco, pues en esta se encuentran ciertas características a nivel temporal que permiten diferenciar los objetos presentes.

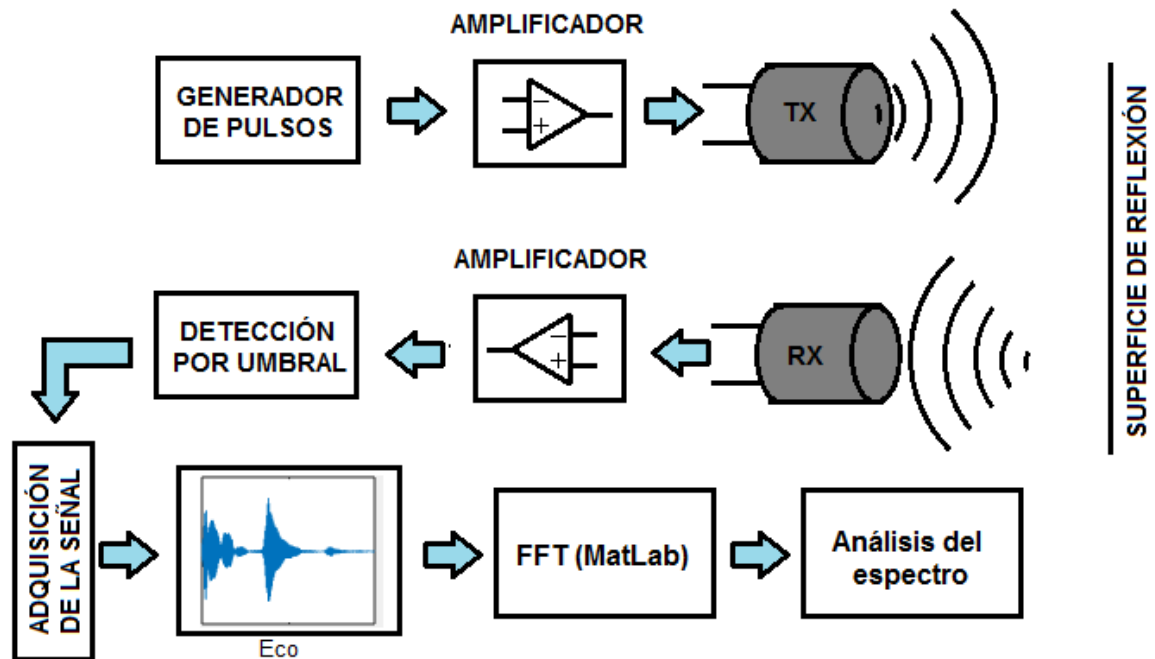
Figura 7. Técnica de la envolvente del eco.



2.5.3 Transformada de Fourier La transformada de Fourier permite identificar las frecuencias que componen una señal al llevarla del dominio temporal al frecuencial. La reflexión producida por una señal en una superficie hace que se produzcan contribuciones constructivas y destructivas respectivamente debido al desplazamiento de fase producto de la reflexión de diferentes puntos de la superficie lo que genera la presencia de componentes frecuenciales en cada receptor al

depender del objeto y obstáculo presente frente al cono de transmisión; sin embargo, este método no puede producir una estimación directa de la distancia pues su análisis se hace a nivel frecuencial.

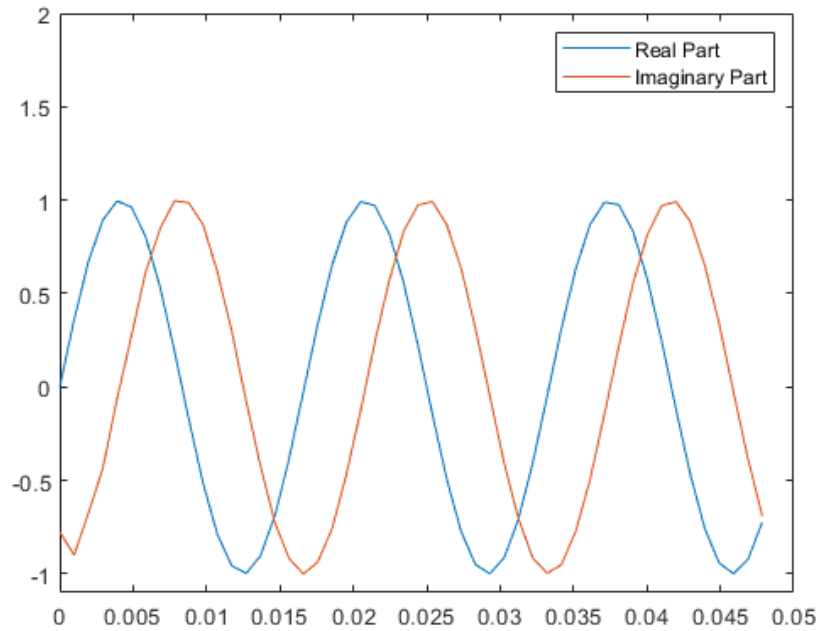
Figura 8. Técnica usando transformada de Fourier.



2.4.4 Transformada de Hilbert La transformada de Hilbert [14] facilita la formación de una señal analítica útil en áreas de las comunicaciones especialmente el procesamiento de señales de pasa banda. La función Hilbert de la caja de herramienta de MatLab calcula la transformada de Hilbert para unos datos de entrada y da como salida un resultado complejo de la misma longitud donde la parte real es la información original y la parte imaginaria es la actual transformada o comúnmente llamada señal analítica. Una propiedad clave de la señal analítica de tiempo discreto es que su transformada z es cero en la mitad inferior del círculo unitario.

La transformada de Hilbert se relaciona con los datos reales mediante un cambio de fase de 90° como lo muestra la figura 9.

Figura 9. Representación gráfica de la función Hilbert en MatLab



2.6 REDES NEURONALES ARTIFICIALES

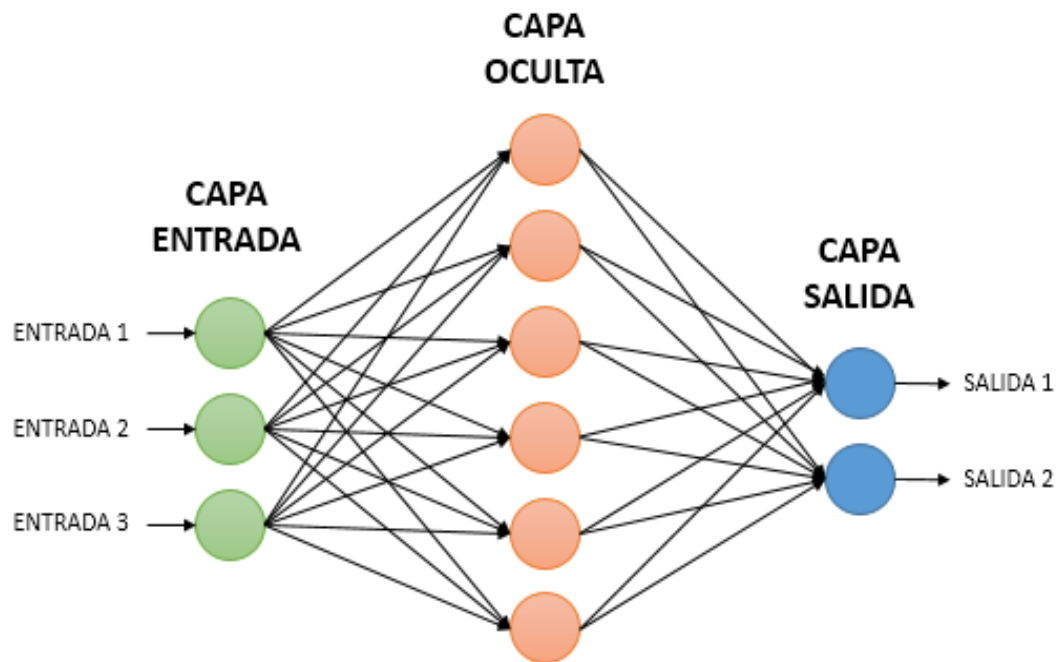
En [11] el reconocimiento de patrones presentes en la información obtenida de los receptores es fundamental al momento de diferenciar los objetos en el entorno, cuya importancia radica principalmente en áreas como la automatización y robótica.

Las redes neuronales artificiales se basan en bloques, procesadores independientes o neuronas conectados entre sí transmitiéndose información y ejecutando un procesamiento en paralelo de modo que las líneas que conectan las neuronas constan de unos pesos que le permiten a la red neuronal realizar funciones lógicas a las entradas ponderadas por los pesos de cada conexión.

Las RNA son sistemas con la capacidad de reconocer eventos mediante el aprendizaje de estos por medio de ejemplos ilustrativos de cada caso lo que

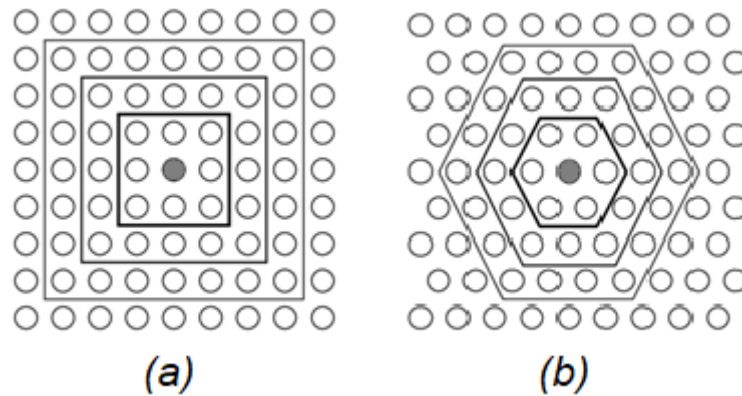
representa una ventaja al ser capaz de responder ante información nueva, incompleta o distorsionada ya que esta generaliza los casos y se auto organizan.

Figura 10. Modelo de redes neuronales.



2.6.1 Mapas auto organizados (SOM) Los mapas auto organizados o SOM [17] están constituidos por una capa de entrada de N neuronas donde se usa una neurona para cada variable de entrada, estas transmiten la información de entrada de la red a la siguiente capa, la capa de salida está formada por M neuronas y se encarga del procesamiento de los datos y de encontrar los patrones característicos de cada clase. Esta capa por lo general se organiza en forma bidimensional ya sea rectangular o hexagonal.

Figura 11.(a) SOM rectangular. (b) SOM hexagonal.



2.6.2 Fitting App Es una aplicación [14] que permite ajustar una variedad de curvas y superficies a los datos por medio de una interfaz interactiva. Esta aplicación permite realizar tareas comunes como ajuste de modelos, realiza la regresión lineal o no lineal, interpolación, suavizado a una ecuación personalizada.

Evaluación y comparación de modelos, muestra estadística de una banda de ajuste, intervalos de confianza y residual, eliminación de valores atípicos y evaluación de ajustes con datos de validación.

Visualización de curvas y superficies, crea, traza y compara ajustes múltiples.

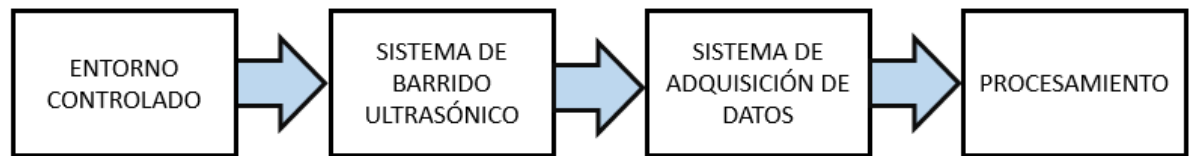
Procesos de automatización, genera un código en MatLab para ajustar y trazar curvas y superficies o exportar ajustes al área de trabajo para un análisis más detallado.

Como cada problema de ajuste de curvas es diferente, la aplicación permite explorar de manera eficiente una variedad de algoritmos para encontrar una solución a su problema de ajuste de datos.

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Este capítulo describe el proceso de diseño e implementación del sistema que se divide en cuatro etapas, entorno controlado, sistema de barrido ultrasónico, sistema de adquisición de datos y procesamiento, como se ilustra en la figura 12.

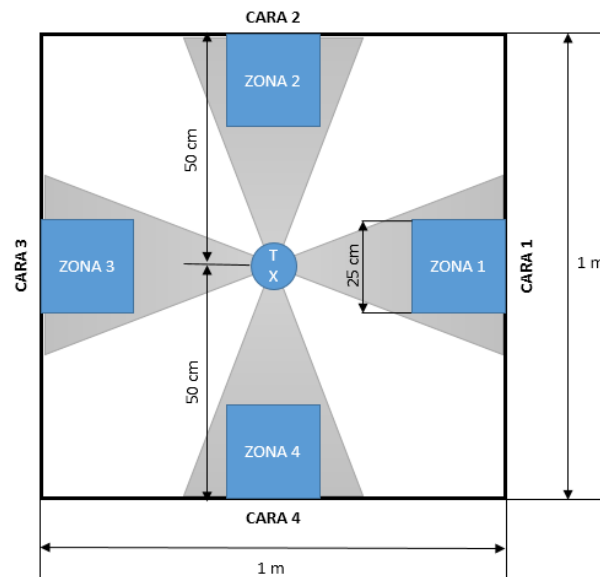
Figura 12. Diagrama a bloques del sistema general.



3.1 ENTORNO CONTROLADO

Teniendo en cuenta que las ondas acústicas son contaminadas con facilidad por ruido mecánico producido por fuentes externas, es necesaria la creación de un entorno controlado, el cual proporciona un medio de propagación limpio, aislando las vibraciones externas y evitando la reverberación.

Figura 13. Esquema entorno controlado



El diseño del entorno controlado se basó en la ubicación y el tamaño de los diferentes objetos. Para el tamaño de los objetos se tomó en cuenta la apertura del haz de 60° el cual genera un frente de onda de 34 cm a una distancia de 30 cm del transmisor, esto establece que las aristas de los objetos no deben exceder los 30 cm asegurando así la mayor incidencia de la onda ultrasónica sobre ellos, por lo tanto las dimensiones del entorno son de 1 m de largo por 1 m de ancho por 50 cm de altura, con la ubicación del transmisor en el centro como lo muestra la figura 13.

La implementación del entorno controlado precisó de un material con un bajo índice de reflexión acústica, teniendo esto en cuenta se usó espuma de poliuretano ya que esta posee la característica requerida y además es asequible en el mercado, sin embargo, debido a la falta de rigidez de la espuma, fue necesaria la construcción de un armazón en tubería de PVC con las medidas especificadas con anterioridad como se muestra en la figura 14.

Figura 14. Entorno Controlado



Se usaron cuatro objetos, un cubo, un cilindro, una pirámide de cuatro caras y una semiesfera tal como se muestra en la figura 15. El cubo, el cilindro y la pirámide

fueron elaborados en lámina metálica de 1/8" con el fin de generar un alto índice de reflexión, y la semiesfera fue elaborada en poliestireno el cual cuenta con un índice de reflexión menor a la lámina, pero mayor a la espuma.

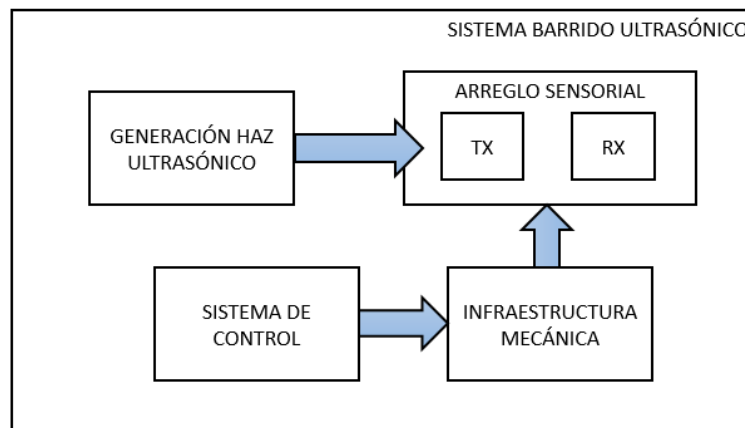
Figura 15. Objetos utilizados.



3.2 SISTEMA DE BARRIDO ULTRASÓNICO

Los objetos se ubican en posiciones definidas frente a cada cara del entorno, al establecer una topología sensorial unidireccional de único transmisor y múltiples receptores es necesario orientar dicho arreglo hacia cada cara, para esto se

Figura 16. Etapas sistema barrido ultrasónico.

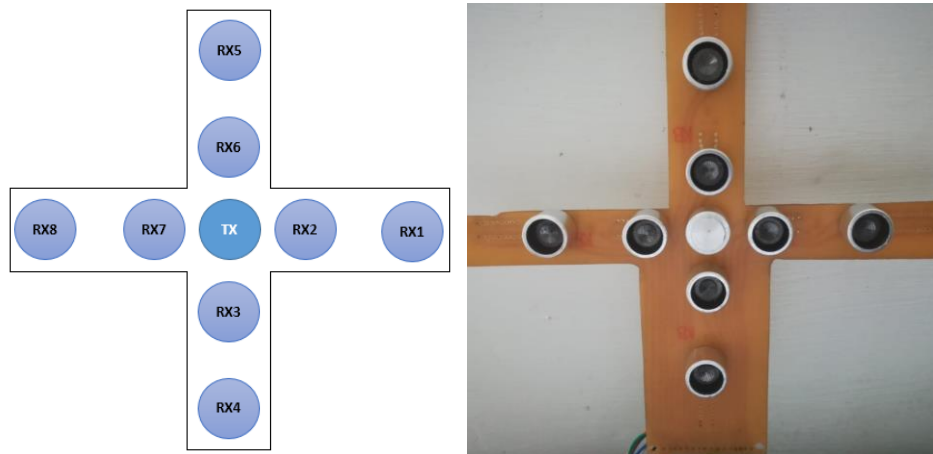


construye un sistema capaz de realizar un barrido ultrasónico compuesto por diferentes etapas como se muestra en la figura 16

3.2.1 Arreglo sensorial La importancia de obtener los ecos en distintos puntos creó la necesidad de usar varios elementos receptores en el arreglo, también se realizó una adecuada elección del tipo de transductor que debía garantizar que el transmisor ofreciera una alta presión acústica para la generación de la onda ultrasónica y los receptores tuvieran buena sensibilidad para lograr captar los ecos.

Se decidió usar una configuración en cruz como la mostrada en la figura 17 la cual es adecuada para este tipo de aplicaciones ya que minimiza el rebote de la señal del trasmisor en la superficie de soporte, el transmisor fue ubicado en el centro del arreglo lo que permite crear simetría espacial con los elementos receptores.

Figura 17. Arreglo sensorial en cruz



Para establecer las distancias entre los receptores y el transmisor se tuvo en cuenta la longitud de onda (λ), los elementos receptores más cercanos se encuentran a 17 mm que equivale a 2λ , y los elemento más alejados a 51,5 mm o 4λ aproximadamente.

Después de realizar pruebas con diferentes sensores, para la transmisión fue seleccionado el sensor ultrasónico waterproof de 16mm con una frecuencia central de operación de 40 KHz que brinda una excelente presión acústica y un largo rango de alcance, como señal de excitación se usó una onda senoidal con amplitud entre 80 y 160 Vp-p. Para recepción de la señal ultrasónica se utilizaron los sensores TCT 40-16R/T 16mm, puesto que brindaron una mayor sensibilidad a las vibraciones que otros tipos de sensores.

3.2.2 Direccionamiento del arreglo Al construir el arreglo sensorial fue necesario contar con un soporte para este, el cual le brinda la posibilidad de orientarse en diferentes direcciones buscando así captar la información de las 4 caras del entorno, para esto se utilizó una base elaborada en acrílico donde el arreglo es anclado, esta base reposa sobre un motor paso a paso, el cual le permite la movilidad requerida.

Después de tener la estructura mecánica que soporta el arreglo sensorial se debe contar con el sistema capaz de manejar el motor paso a paso permitiendo orientarse hacia las posiciones donde se hará el barrido ultrasónico, el sistema general enviara la petición de girar el arreglo y el sistema de control se encargara de definir en qué sentido y cuantos pasos dará el motor para ubicarse correctamente.

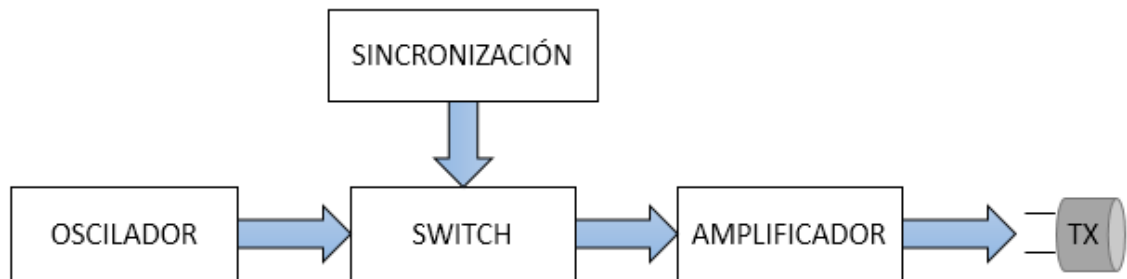
Fue usado un motor de 48 pasos, teniendo en cuenta que el arreglo se orienta hacia las 4 caras del entorno, los giros se hacen cada 12 pasos.

Figura 18. Sistema de direccionamiento del arreglo sensorial



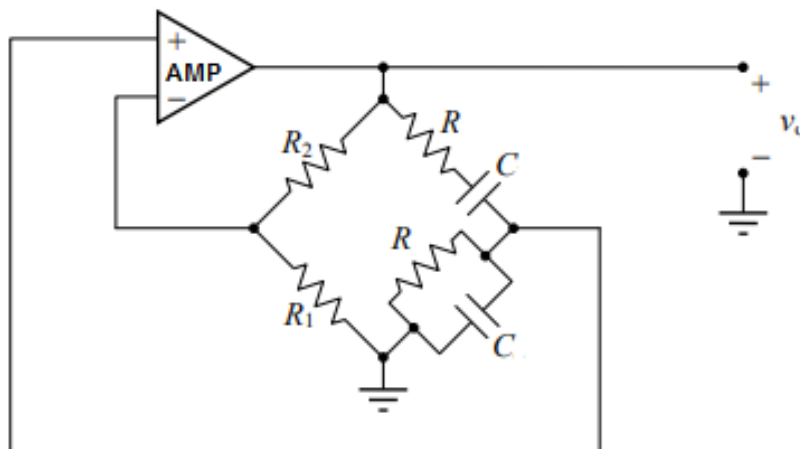
3.2.3 Generación del haz ultrasónico En esta etapa se describen los componentes, el proceso de análisis, diseño e implementación utilizados para generar la señal de excitación para el transmisor ultrasónico teniendo en cuenta el esquema de la figura 18.

Figura 19. Esquema generación del haz ultrasónico.



Según el esquema mostrado en la figura 19 se puede apreciar que el sistema se compone de 4 bloques donde cada uno cumple una función primordial para la generación de la señal requerida la cual es de 40kHz y amplitud de 160Vp-p. Se empezó por diseñar un oscilador utilizando el puente de Wien por su fácil implementación, su esquema se muestra en la figura 20.

Figura 20. Oscilador puente de Wien.



Fuente: Osciladores senoidales, Universidad del Rosario.

Donde, como amplificador se usó el dispositivo LF353 y las ecuaciones [1] y [2] para obtener los valores de las resistencias y los capacitores para la frecuencia deseada.

$$f_o = \frac{1}{2 * \pi * R * C} \quad [1]$$

$$R_2 = 2 * R_1 \quad [2]$$

De este modo se obtuvo la señal senoidal de 40kHz con una amplitud de 12Vp-p, Luego el bloque de sincronización se presentan dos condiciones para iniciar el proceso, la primera condición, detectar cuando se debía activar el transmisor a través de un switch análogo controlado por medio de una serie de amplificadores operacionales encargados de aumentar la señal proveniente de la tarjeta de control NI MyDAQ con el fin de controlar el paso de la señal del oscilador puente de Wien anteriormente descrito y la segunda detectar los cruces por cero donde inician los semiciclos positivos de la señal fundamental. Cuando las dos condiciones se presentan el hardware genera un pulso que se mantiene durante 4 ciclos completos los cuales sirven de entrada a un amplificador de alta potencia PA85A que se encarga de aumentar la amplitud de la señal por un factor de 12 para producir una señal senoidal con la suficiente potencia para estimular el material piezoeléctrico del sensor implementado lo que da como resultado el haz ultrasónico deseado.

3.3 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Los sistemas DAQ basados en computadora han adquirido gran fuerza gracias a que se aprovecha la gran capacidad de almacenamiento y procesamiento que ofrecen las computadoras actualmente, debido a la necesidad de adquirir las señales en cada elemento receptor, su frecuencia de muestreo y el número de muestras, se optó por el uso de la tarjeta My DAQ ya que está ofrece una alta tasa de muestreo y fácil comunicación serial. Figura 21.

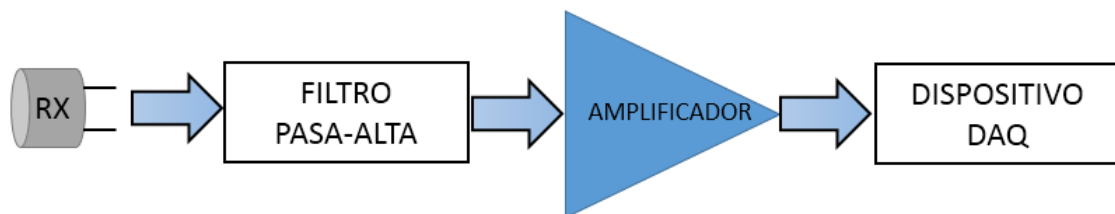
Figura 21. Sistema de adquisición de datos.



Fuente: <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>

3.3.1 Adecuación de la señal Los receptores piezoeléctricos tienen la capacidad de generar señales eléctricas del rango de los milivoltios cuando son deformados por las vibraciones que reciben del medio en que se encuentren, estas señales son propensas a atenuarse y ser contaminadas por ruido, teniendo en cuenta el esquema de la figura 22, se diseñó una etapa de adecuación para asegurar que los ecos capturados lleguen sin alteraciones hasta el dispositivo de adquisición de datos.

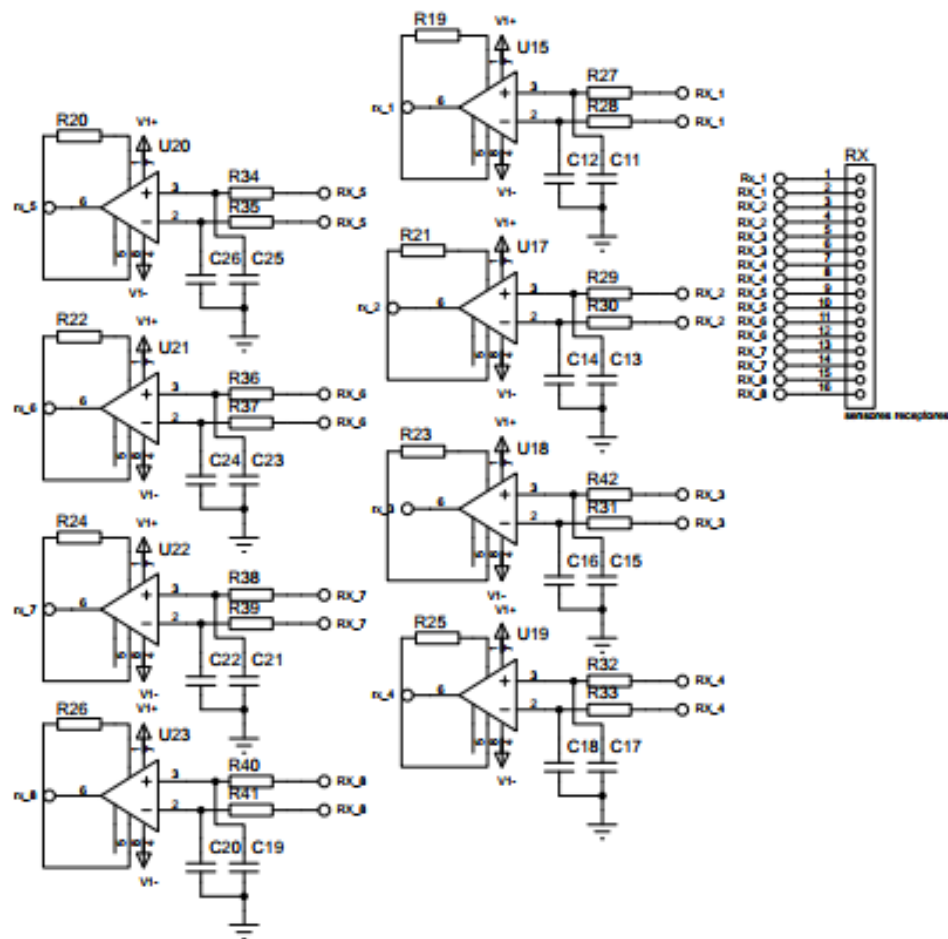
Figura 22. Esquema adecuación de la señal.



Debido a que se contó con varios elemento receptores fue necesario elaborar una etapa de filtrado y amplificación para cada receptor, el filtro pasa-altas se diseñó con una frecuencia de corte de 500 Hz con el fin de eliminar el ruido generado por la red de suministro eléctrico, para los amplificadores fue usado el dispositivo AD-

620 un amplificador de instrumentación, el cual brinda una alta impedancia de entrada y resistencia al ruido electromagnético, los amplificadores se configuraron con una ganancia igual a 20 con el objeto de aumentar el voltaje de los receptores y de esta forma evitar pérdidas de información, en el esquema eléctrico de la figura 23 se puede apreciar la configuración utilizada.

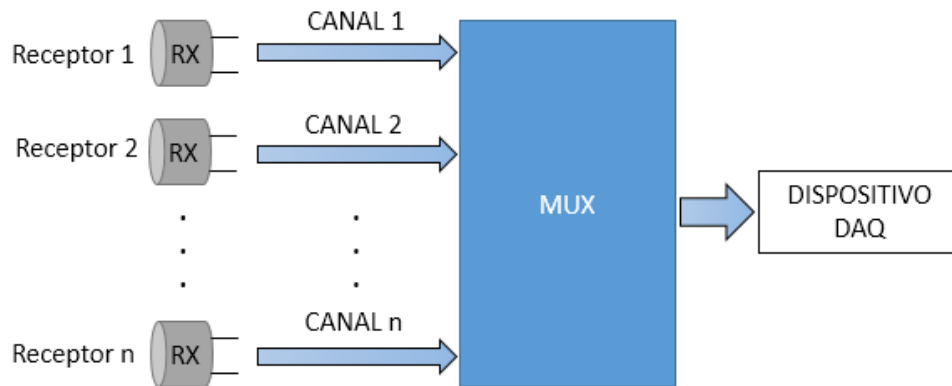
Figura 23. Esquema eléctrico amplificadores receptores.



3.3.2 Multiplexación Una de las principales limitaciones a la hora de usar varios receptores es adquirir los datos de cada uno a la vez, esto obliga a usar sistemas DAQ con múltiples canales de adquisición que trabajen en paralelo, contar con un sistema de este tipo es una gran ventaja pues se analiza la respuesta de cada receptor en las mismas condiciones, el principal problema de esto es el costo de

adquirir una tarjeta DAQ con estas características, teniendo en cuenta lo anterior se implementó un circuito multiplexor como el mostrado en la figura 24. El cual establece los canales de comunicación entre el dispositivo de adquisición y los elementos receptores.

Figura 24. Esquema multiplexación de los receptores.

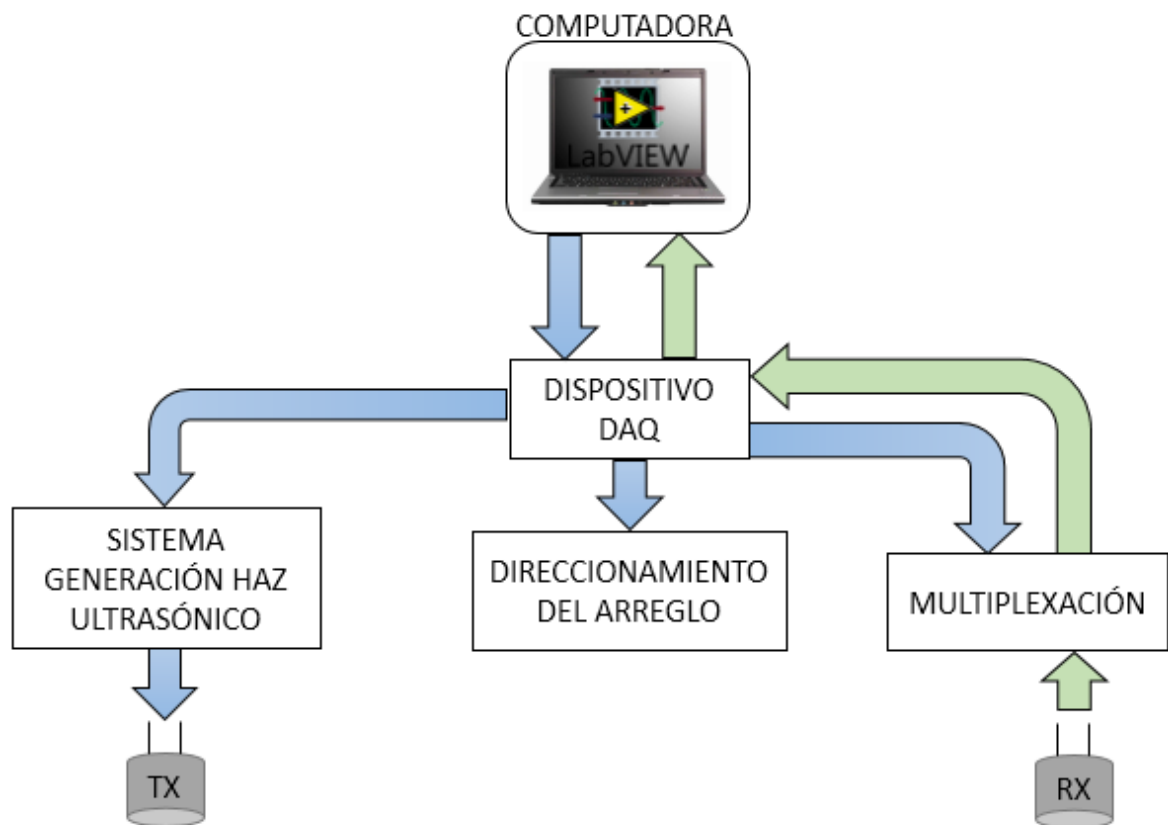


El dispositivo CD4051 es un multiplexor de señales analógicas que cuenta con 8 canales de entrada, 3 canales de selección binaria y una salida o entrada común, así el proceso de selección de cada sensor ultrasónico consiste establecer un canal del multiplexor a la tarjeta NI MyDAQ por medio de las 3 entradas selectoras que reciben impulsos eléctricos a modo de código binario adecuados previamente por amplificadores operacionales. El procedimiento anteriormente descrito corresponde a la medición de un solo sensor por cada combinación de impulsos eléctricos introducidos a las entradas selectoras de modo tal que la tarjeta de control debe generar las 8 posibles combinaciones para realizar la medición de los 8 elementos receptores usados en la topología sensorial.

3.3.3 Dispositivo de adquisición y sincronización Como el sistema requiere la integración de varias etapas se implementó la sincronización de todas a través del uso de la DAQ, pues sus salidas digitales y el entorno de programación LabView la hacen una herramienta adecuada para este tipo de aplicaciones, además ofrece

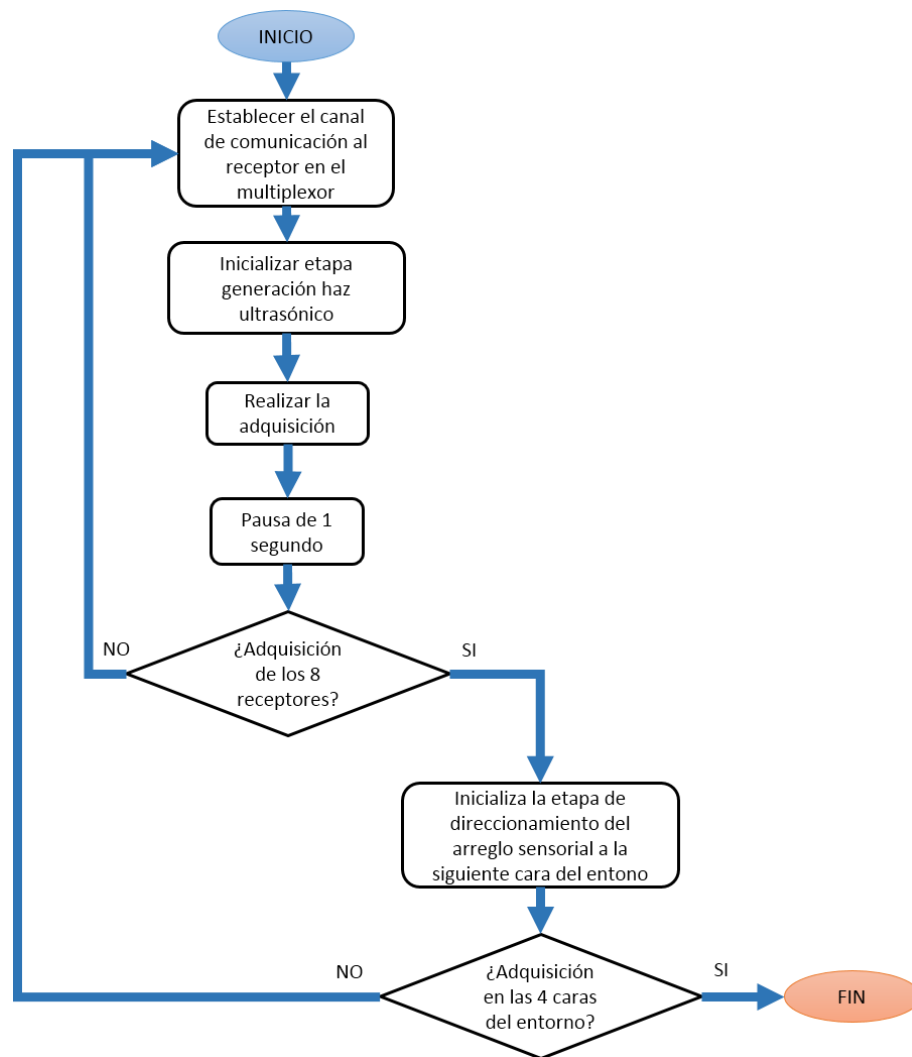
una resolución de 16 bits a una tasa de muestreo de 200.000 muestras por segundo lo que permitió adquirir las señales de todos los elementos receptores. La figura 25 muestra un esquema general del sistema.

Figura 25. Esquema general del sistema.



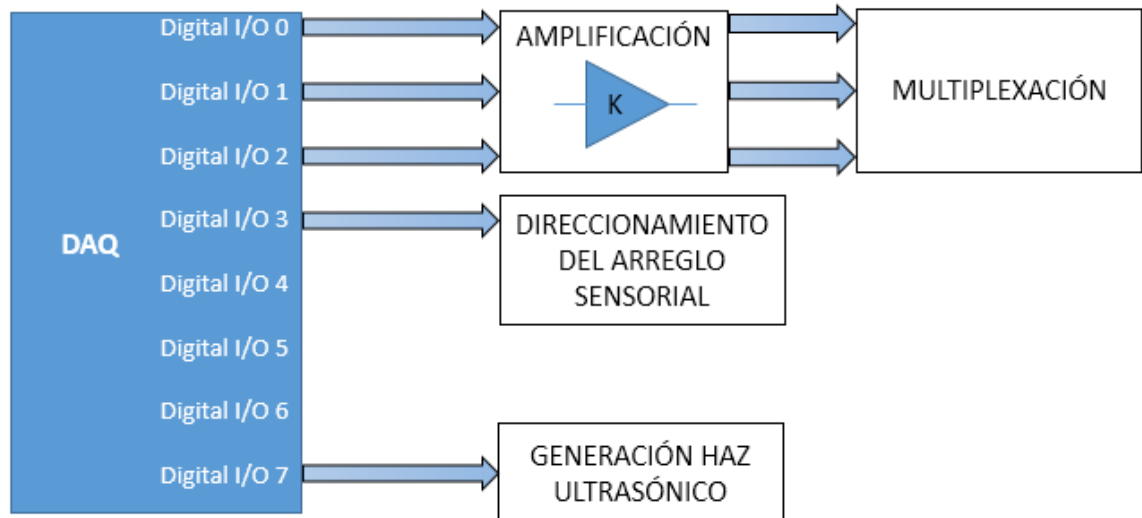
A continuación, en la figura 26 se presenta el diagrama de proceso diseñado para la tarjeta MyDAQ y en la cual se realiza el proceso de adquisición y sincronización de las etapas.

Figura 26. Diagrama de procesos.



Al realizar el análisis de funcionamiento mediante los esquemas mostrados en las figuras 25 y 26 se procedió a realizar el diseño, como lo muestra la figura 27 fueron utilizadas las salidas digitales 0, 1 y 2 para establecer la línea de comunicación en el multiplexor para seleccionar al receptor que se requiera, estas señales fueron amplificadas para adecuarlas al nivel lógico necesario para llevar a cabo la operación del multiplexor, la salida digital 3 se encargó de activar la etapa de direccionamiento del arreglo sensorial y por último la salida digital 7 se usó para enviar la señal que activa la etapa de generación del haz ultrasónico.

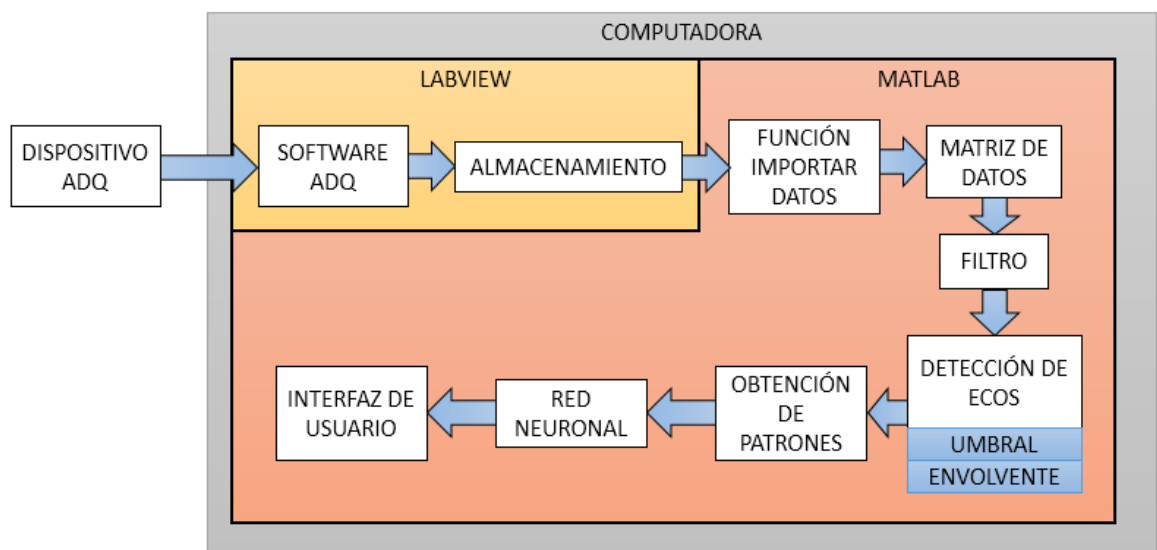
Figura 27. Esquema de conexiones de la tarjeta NI MyDAQ



3.4 PROCESAMIENTO

En esta sección se describe el proceso realizado a los datos para el análisis y obtención de los patrones característicos de cada objeto tal como se muestra en la figura 28.

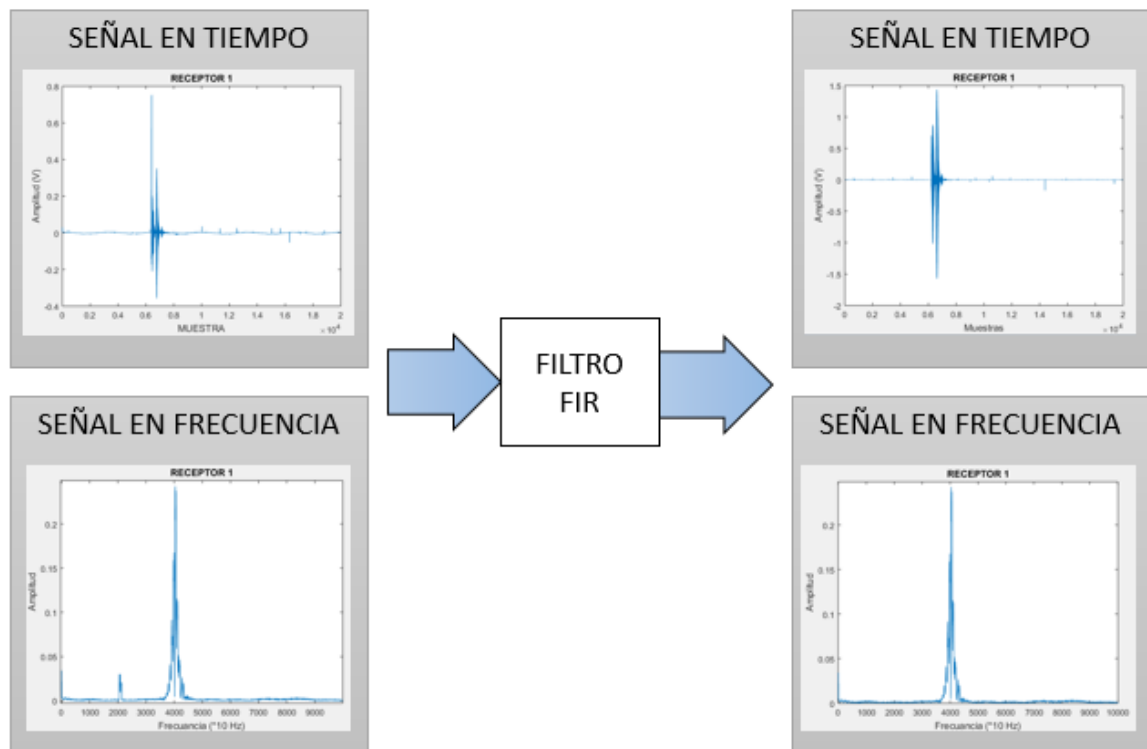
Figura 28. Esquema general de procesamiento.



El sistema de adquisición a través de su software permite almacenar las señales de los receptores creando archivos en el disco duro de la computadora, también se implementó un script de MatLab que extrae los datos anteriormente almacenados y genera una matriz para su procesamiento y análisis.

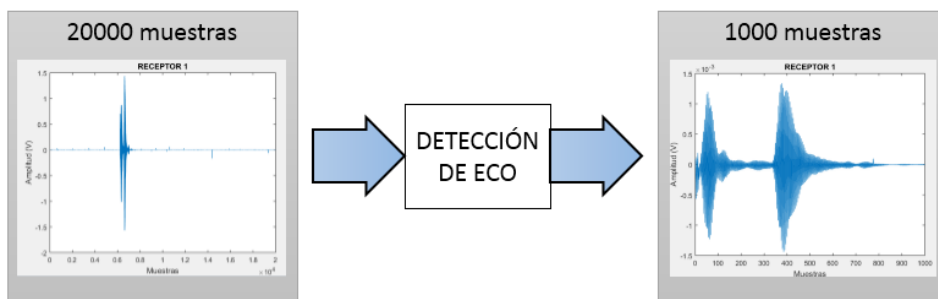
3.4.1 Filtrado Se analizó el espectro de Fourier en magnitud de las señales recibidas, y se observó que la mayor concentración de energía se encontraba en la banda de 30 kHz a 50 kHz, con la presencia de componentes de altas y bajas frecuencias debidas al ruido mecánico y electromagnético, para solucionar este problema utilizando Matlab se implementó un filtro digital pasa banda con frecuencias de corte de 30 kHz y 50 kHz, se realizaron diferentes diseños de filtros utilizando funciones de MatLab, los mejores resultados se obtuvieron usando la función FIR como se muestra en la figura 29.

Figura 29. Proceso de filtrado.



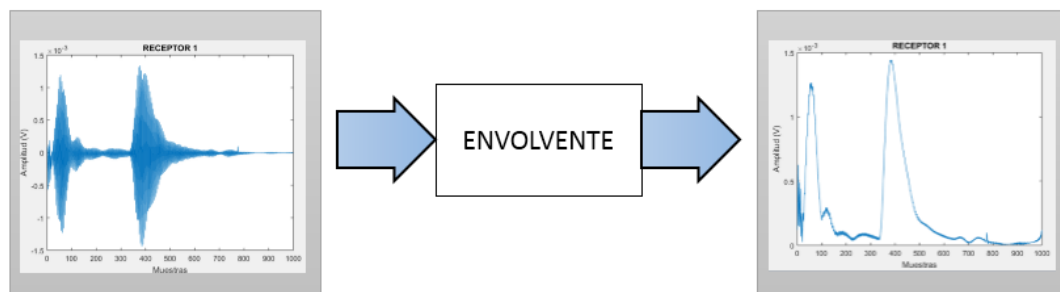
3.4.2 Detección de eco El sistema realiza la adquisición de 20.000 muestras de cada elemento receptor, de las cuales solo el 5% contienen la información que representa el eco, por lo tanto, se implementó un algoritmo de detección de eco por umbral, el cual se encarga de extraer de cada señal las 1.000 muestras necesarias, esto ayuda a optimizar el proceso eliminando los datos innecesarios. La figura 30 muestra los resultados de este proceso.

Figura 30. Proceso detección de eco.



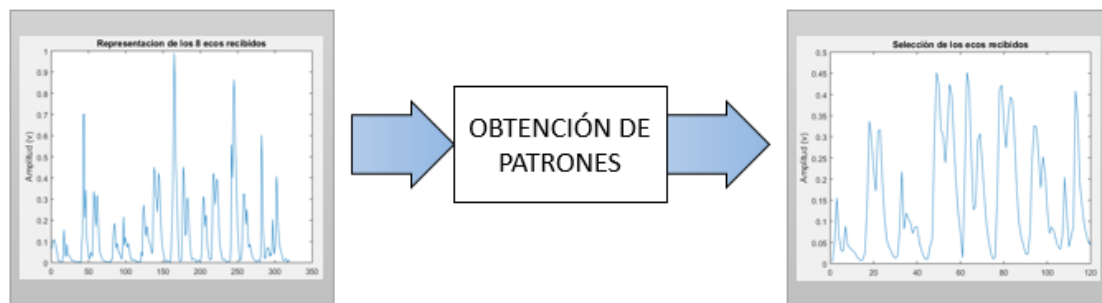
Posteriormente se observó que a nivel temporal se presentaba información suficiente para generar patrones característicos de cada objeto, como se muestra en la figura 31, de este modo se implementó un script que genera la envolvente de cada señal, al analizarlas se encontró que estas conservaban sus características, en diferentes pruebas de un mismo objeto, sin embargo, cuando este se cambiaba se presentaban grandes modificaciones, lo que hizo posible el reconocimiento de los distintos objetos.

Figura 31. Proceso detección de envolvente.



3.4.3 Obtención de patrones Al realizar el análisis de las envolventes de los ecos durante muchas pruebas se observó que la principal información se encontraba en el segundo pico de cada señal, como lo muestra el esquema de la figura 32, por consiguiente, se diseñó un algoritmo capaz de agrupar las envolventes de los 8 receptores y extraer la información representativa para generar el vector de ecos de cada objeto.

Figura 32. Proceso obtención de patrones.

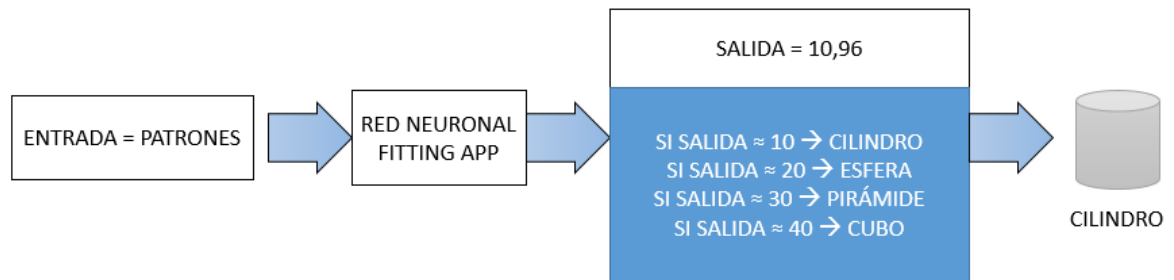


3.4.4 Redes neuronales Las redes neuronales son potentes herramientas a la hora de realizar la clasificación o reconocimiento de un evento además del amplio avance que se ha logrado en el campo de los sistemas inteligentes, por lo cual son ideales para este tipo de aplicaciones.

Matlab cuenta con herramientas y funciones que facilitan la creación de redes neuronales, además los scripts implementados generan adecuadamente las matrices de entrenamiento y los vectores de entrada para la red. Durante la implementación de esta etapa se realizaron dos diseños usando el software Matlab, uno utilizando la herramienta 'nnstart' creando una red de tipo Fitting App y otra usando la función 'newsom'.

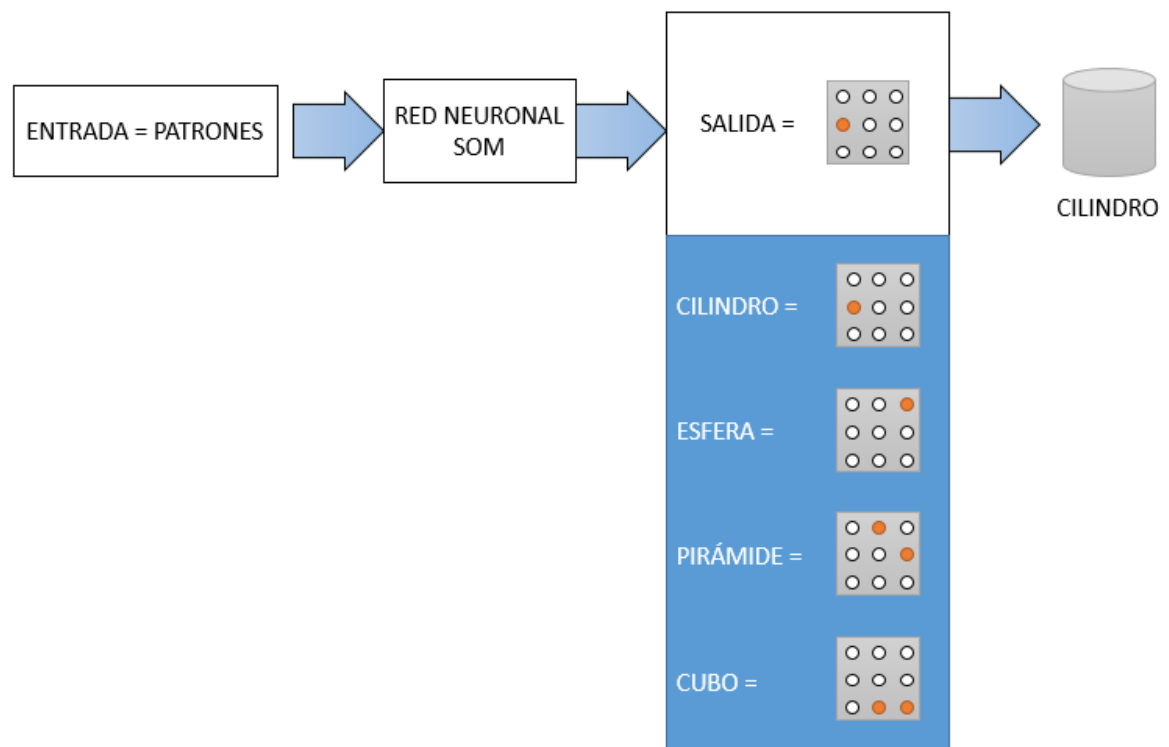
Como lo muestra la figura 33, la red Fitting App representa cada evento con un valor numérico, cuando se ingresa un valor a la entrada de la red lo clasifica y a la salida entrega un número que se aproximara al valor que representa el evento con el que tenga más similitud.

Figura 33. Proceso de reconocimiento usando Fitting App.



La red SOM mostró el resultado mediante la activación de ciertas neuronas dependiendo del estímulo o evento que se presente a la entrada. La figura 34 muestra un esquema de este proceso.

Figura 34. Proceso de reconocimiento usando SOM.



3.5 INTERFAZ DE USUARIO

La etapa final fue diseñar una interfaz gráfica amigable en la cual el usuario pudo manipular el sistema sin la necesidad de intervenir en los scripts diseñados, para este fin se utilizó el entorno grafico de Matlab GUI. La figura 35 muestra la interfaz

para el manejo del sistema usando la red SOM y la figura 36 muestra la interfaz usando la red Fitting App.

Figura 35. Interfaz de usuario reconocimiento de entorno.



Figura 36. Interfaz de usuario para reconocimiento de objetos.



4. RESULTADOS

En cada una de las figuras mostradas a continuación se evidencian el hardware construido para cada etapa del sistema, las placas de circuitería electrónica implementadas, con sus respectivos elementos de configuración además de las entradas y salida tales como puntos de acceso y salida para señales de control o alimentación eléctrica proporcionada por las distintas fuentes de voltaje.

El amplificador de potencia mostrado en la figura 37 encargado de amplificar la señal proveniente del switch analógico se encuentra fijo a un disipador de calor con el objetivo de evitar sobrecalentamientos y posteriores daños en este, de modo tal que los elementos están cubiertos debido al tamaño de este mismo. Además cuenta con tres pines de alimentación dual, de salida y un potenciómetro que permite ajustar la ganancia.

Figura 37. Amplificador de alta potencia.



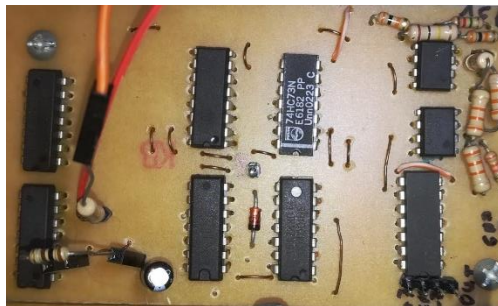
En la figura 38 se muestra el oscilador puente de Wien implementado con un amplificador operacional y sus respectivos pines. Tres correspondientes a la polarización necesaria para su funcionamiento y uno aparte por el cual la señal de alta frecuencia entra al switch análogo.

Figura 38. Oscilador puente de Wien.



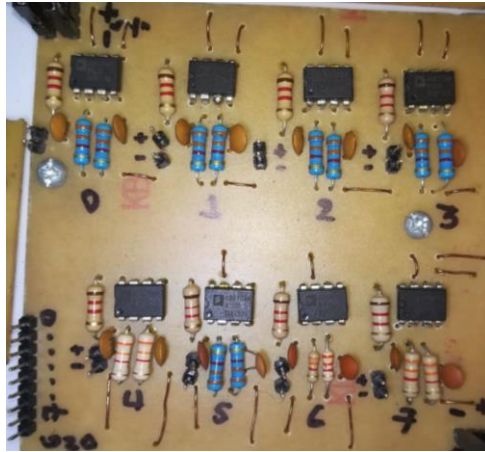
En la figura 39 se muestra el circuito implementado para la sincronización de la etapa de transmisión en donde se evidencian los pines de alimentación, entrada de la señal del oscilador puente de wien, el pin de control de la tarjeta NI MyDAQ y el pin de salida del switch análogo junto con amplificadores operacionales cuya función fue descrita en el capítulo 3.

Figura 39. Tarjeta de sincronización de la etapa de transmisión.



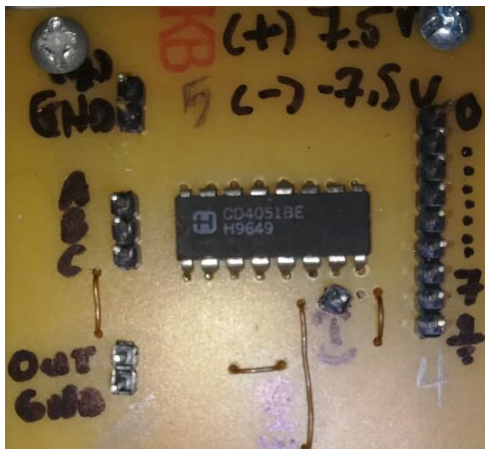
Como se puede apreciar en la figura 40 se implementaron ocho (8) amplificadores de instrumentacion con su correspondiente filtro pasa altas a la entrada de estos. Ademas se pueden evidencias los pines de entrada de los sensores ultrasonicos receptores, pines de la alimentacion de los amplificadores y el sistema de enfriamiento, pines de salida a los cuales llegara la señal amplicada y los correspondientes tornillos de soporte usados para fijar la blaquela a una placa estatica.

Figura 40. Etapa de acondicionamiento de las señales de los receptores.



El multiplexor mostrado en la figura 41 se encuentra soldado junto con los pines de entrada enumerados del 0 al 7 para la identificación del canal de cada sensor por separado, selección etiquetados como A, B y C respectivamente y alimentación.

Figura 41. Multiplexación.



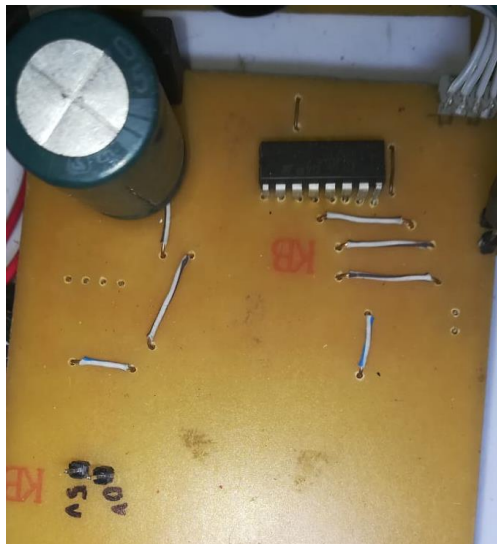
El sistema de adecuacion mostrado en la figura 42, corresponde a la amplificacion de la señal de entrada de multiplexor anteriormente mencionado en la cual se toman las tres entradas destinadas al control de este y se pasa a traves de amplificadores operacionales no inversores con una ganancia de 2 suficiente para aumentar el valor de voltaje de estos.

Figura 42. Acondicionamiento de las señales de control para el multiplexor.



La figura 43 muestra la fuente de alimentación y el elemento de control para el motor paso a paso que controla el movimiento del sistema de barrido descrito en capítulo 3, donde se evidencia el circuito integrado L293D encargado de controlar el movimiento del motor con sus respectivos pines de control y alimentación.

Figura 43. Control del motor pasó a paso de la etapa de direccionamiento del arreglo sensorial.



Durante el proceso de análisis de la información adquirida se necesitó comparar la respuesta de cada receptor a los diferentes objetos para evidenciar como la envolvente de los ecos presentaba variaciones. Todas las pruebas fueron

realizadas bajo las mismas condiciones, las siguientes figuras muestran la respuesta de los receptores a los diferentes objetos.

Figura 44. Respuesta del receptor 1 a cada objeto.

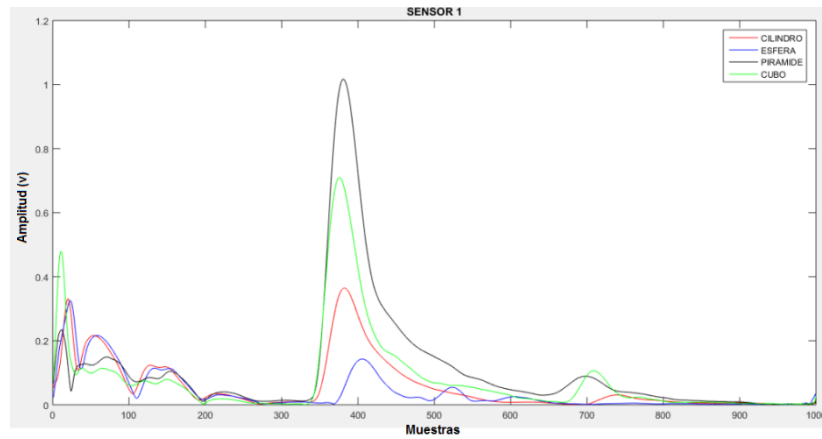


Figura 45. Respuesta del receptor 2 a cada objeto.

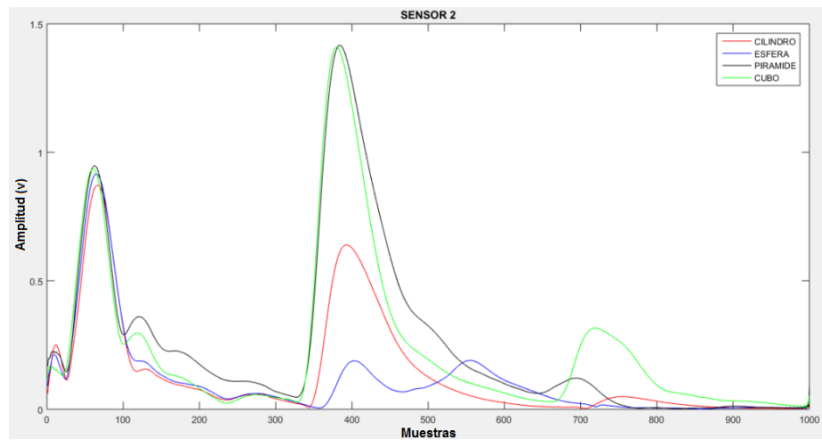


Figura 46. Respuesta del receptor 3 a cada objeto.

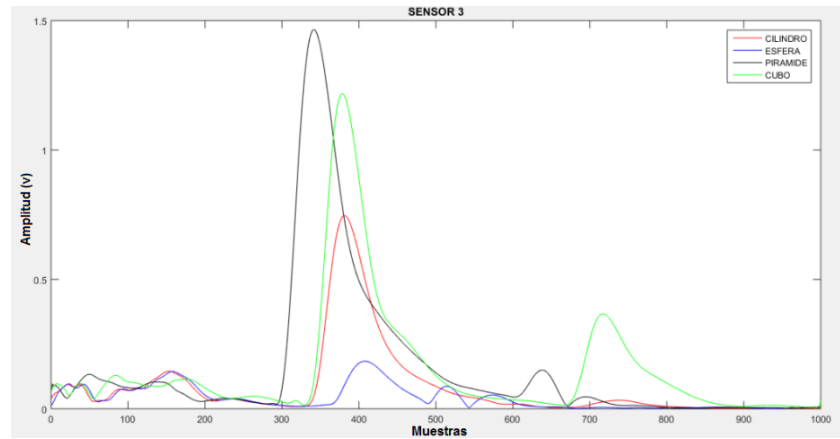


Figura 47. Respuesta del receptor 4 a cada objeto.

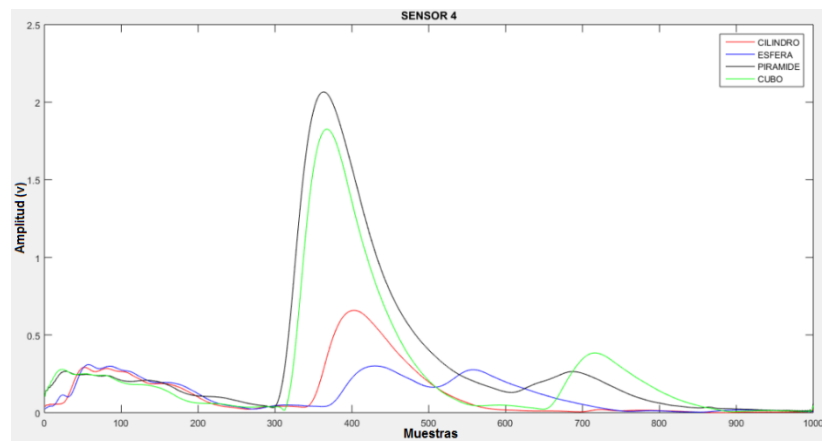


Figura 48. Respuesta del receptor 5 a cada objeto.

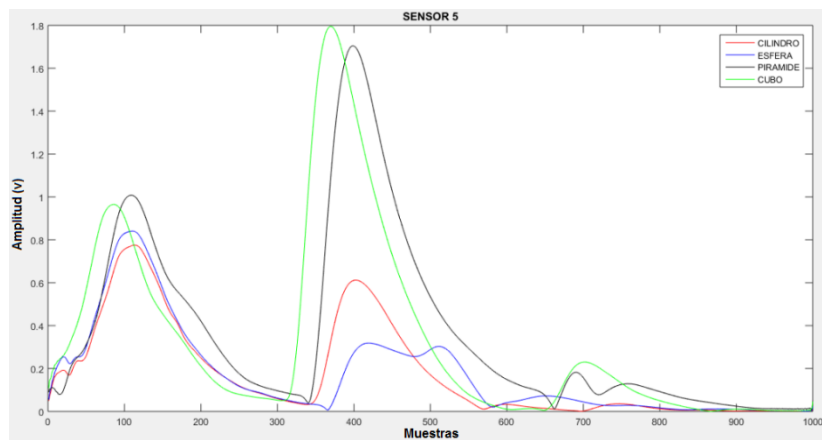


Figura 49. Respuesta del receptor 6 a cada objeto.

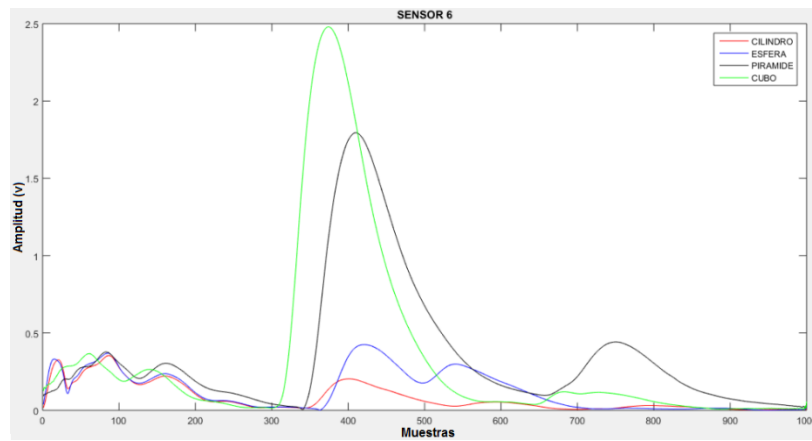


Figura 50. Respuesta del receptor 7 a cada objeto.

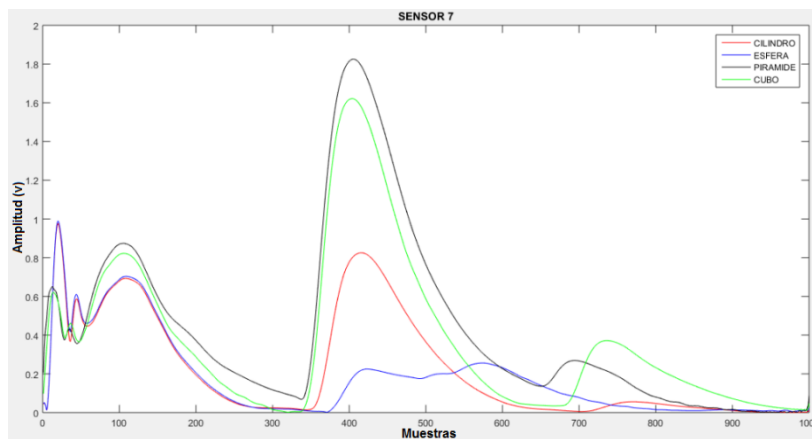
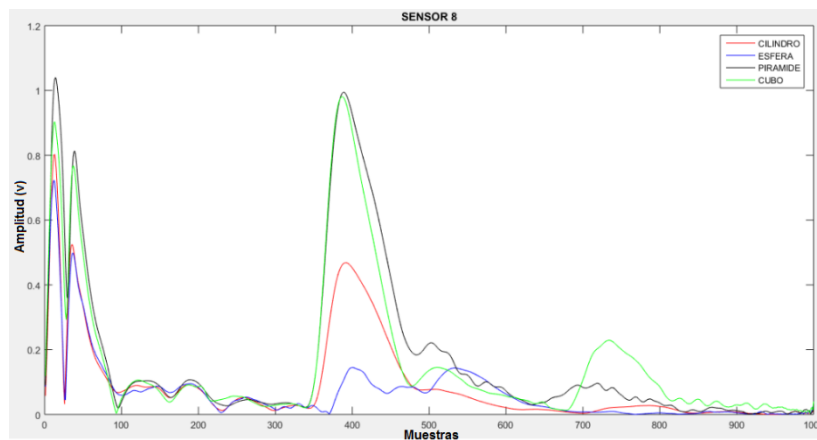


Figura 51. Respuesta del receptor 8 a cada objeto.



El uso de la red neuronal *Fitting App* presento un excelente funcionamiento en la cara donde se tomaron los datos de aprendizaje, sin embargo se encontraron problemas de reconocimiento en las demás caras del entorno producto de la similitud de algunas figuras y de la dinámica del sistema pues cuando el objeto es cambiado de lugar ciertas propiedades como la distancia, el ángulo de incidencia del haz ultrasónico y las propiedades del entorno varían, aunque dichos cambios sean mínimos se puede evidenciar su efecto en el sistema cuando se trabaja con este tipo de red.

Las figuras 52, 53, 54 y 55 muestran los resultados de reconocimiento de los diferentes objetos en la cara 1 del entorno.

Figura 52. Identificación del cilindro usando Fitting App.



Figura 53. Identificación de la semiesfera usando Fitting App.



Figura 54. Identificación de la pirámide con Fitting App.



Figura 55. Identificación del cubo usando Fitting App.



El uso de la red neuronal SOM mostro mayor robustez a la hora del proceso de reconocimiento de los objetos, haciendo posible la identificación del entorno. Se realizaron 4 pruebas donde se varia la posición de los objetos y en otros casos se retiran algunos de ellos

En la *prueba 1* se utilizaron los 4 objetos como se muestra en la figura 56, en la cara 1 se utilizó la semiesfera, en la cara 2 el cilindro, en la cara 3 el cubo y en la cara 4 la pirámide.

Figura 56. Ubicación de los objetos en la prueba 1.



Al inicializar el proceso de adquisición, carga de datos y análisis de datos a través de la interfaz de usuario se obtiene el resultado mostrado en la figura 57.

Figura 57. Reconocimiento del entorno en la prueba 1.



En la *prueba 2* se utilizaron 3 objetos que fueron reubicados, en la cara 1 se ubicó el cilindro, en la cara 3 la semiesfera y en la cara 4 el cubo, la cara 2 se dejó sin presencia de objeto. Esto se muestra en la figura 58.

Figura 58. Ubicación de los objetos en la prueba 2.



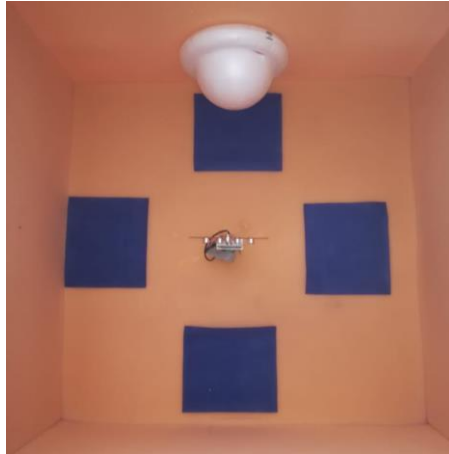
El procesamiento de la información adquirida muestra como resultado en la interfaz de usuario lo mostrado en la figura 59, donde se evidencia el reconocimiento de las diferentes figuras en cada cara.

Figura 59. Identificación del entorno en la prueba 2.



En la *prueba 3* se usó un objeto el cual fue ubicado en la cara 3 del entorno, las otras tres caras del entorno se dejaron sin presencia de objeto, esto se puede ver en la figura 60.

Figura 60. Ubicación de los objetos en la prueba 3.



La figura 61 muestra los resultados de la prueba que se visualizaron en la interfaz de usuario.

Figura 61. Reconocimiento del entorno en la prueba 3.



En la *prueba 4* se usaron 2 objetos como puede verse en la figura 62, la cara 1 y cara 2 se dejaron sin presencia de objeto, en la cara 3 se utilizó la semiesfera y en la cara 4 el cilindro.

Figura 62. Ubicación de los objetos en la prueba 4.



La figura 63 muestra los resultados de la prueba 4 en la interfaz de usuario.

Figura 63. Reconocimiento del entorno en la prueba 4.



5. CONCLUSIONES

Mediante el uso de técnicas de procesamiento digital de señales y de filtrado se logró extraer la información de interés de los datos obtenidos por medio del sistema de adquisición. Al limitar el rango frecuencial del filtro implementado en el programa MatLab se obtuvo una señal representativa cuya frecuencia fundamental se encuentra en los 40.000 Hz y una alta cantidad de muestras lo que concuerda los parámetros de diseño establecidos; sin embargo, la cantidad de muestras fue demasiado alta ya que solo unas cuantas poseían información relevante de modo que se usó la transformada de Hilbert para determinar una serie de curvas envolventes de la señal filtrada y limitada, de este modo las muestras con valores innecesarios eran descartadas mientras que los datos más valiosos eran separados del resto.

Se evidencio que el uso de algoritmos computacionales para el manejo de datos fue de gran ayuda debido a complicaciones en la estructura de la información al aplicarse a diversos métodos de análisis en el software MatLab. Distintos métodos de procesamiento digital de señales requerían de datos dispuestos de tal forma que permitieran analizar toda la información, lo que presento conflicto con los arreglos creados al momento de importar los datos provenientes del sistema de adquisición ya que estos fueron almacenados en una matriz cuyas propiedades fueron modificadas con el objetivo de adecuar los datos al método que se quería implementar lo cual se traduce en un trabajo arduo y extensivo ya que la extracción de información es algo que requiere de un buen manejo de datos y compresión de información con el fin de garantizar el éxito del producto final.

Al diseñar dos topologías de redes neuronales bajo criterios diferentes e implementarlas en un entorno de programación visual se confirmó el rendimiento de estas al reconocer el objeto en base a la información con la cual fue previamente entrenada. Ciertas topológicas de RNA trabajaron mejor que otras, aunque ambas tienen la capacidad de reconocer patrones, interpretarlos y llegar a una decisión, los

resultados fueron muy evidentes demostrando que la red neuronal SOM (mapas auto organizados) es mucho más robusta que la Fitting app.

El ambiente controlado cumplió un papel importante al aislar el sistema de barrido ultrasónico de factores externos como el sonido y la humedad ambiental. Dicho ambiente al estar compuesto por tubería PVC y paredes de espuma capas de mitigar los efectos acústicos externos a este, crea un entorno de circulación libre para las nuevas ondas ultrasónicas que genera el sistema de transmisión lo que garantiza que los datos adquiridos serán única y exclusivamente producto de lo que suceda en su interior.

El uso de objetos de diferentes materiales y las variaciones en su forma sirvió de análisis para determinar la intensidad con la cual los ecos ultrasónicos producidos dentro del ambiente controlado llegaban a los transductores ultrasónicos receptores. Las propiedades de los materiales varían según la composición de la que estén hechos, lo que implica variaciones en sus características intrínsecas y la forma en la cual responden ante fenómenos externos como se pudo evidenciar en los resultados donde los ecos más contundentes y de mayor amplitud fueron producidos por figuras metálicas a comparación de los relacionados con la figura de poliestireno.

La implementación de un sistema de sincronización en la tarjeta programable NI MyDAQ represento grandes ventajas a comparación de los microcontroladores. la tarjeta NI MyDAQ consta de una interfaz de programación gráfica para controlar varios procesos a la vez de manera consecutiva y confiable además de tener una alta capacidad para muestrear señales análogas lo que la hizo una opción viable; por el contrario, el uso de un microcontrolador resulto un proceso mucho más engorroso debido a que la comunicación con el computador era mucho más lenta, la tasa de muestreo no cumplía con los requerimientos mínimos sin mencionar que son más costosos a comparación de la tarjeta NI MyDAQ la cual fue suministrada por la universidad Surcolombiana para la ejecución de este trabajo.

El uso de un arreglo sensorial compuesto por un solo transmisor y varios elementos receptores permitió obtener la mayor cantidad de ecos posibles. al tener varios receptores dispuestos no solo horizontalmente sino verticalmente la cantidad de perspectivas obtenidas de un mismo objeto aumento la efectividad del sistema debido a que la dirección e intensidad de los ecos producidos por el haz ultrasónico que irradia el objeto varía según su forma lo que hace más fácil su identificación al tener mucha más información que depende de la posición del sensor que la obtuvo.

A medida que los requerimientos de energía fueron aumentando se implementó un amplificador operacional de alta potencia. El transductor piezoeléctrico usado consta de una impedancia demasiado alta lo que lo hace apto para generar señales ultrasónicas que recorren una distancia mayor a comparación de otros cuyo requerimiento energético es mucho menor y en consecuencia su rango de acción es poco, de este modo se necesitó de un amplificador operacional de alta potencia PA85a que generara una señal con un nivel capaz de excitar el material piezoeléctrico y generar la onda mecánica ya que los amplificadores operacionales tradicionales no cumplían con los requerimientos necesarios para esta operación. Se debe tener en cuenta que una transmisión continua o de larga duración genera problemas en el transmisor al producir calentamiento y pérdidas de las propiedades piezoeléctricas.

El uso de un sistema de sincronización adicional al de la tarjeta de adquisición de datos descrita anteriormente surgió en base a la necesidad de controlar la cantidad de pulsos a enviar al ambiente controlado. La implementación de lógica digital hizo posible esta operación ya que el envío de ondas constantemente provoco interferencia en los elementos receptores provocando errores en la medición de los ecos.

La influencia del ruido introducido por la red eléctrica represento un problema en la ejecución de la toma de datos. Al ser un sistema cuya alimentación energética proviene de la red eléctrica general y no de una batería, se introducía una señal de

60 Hz al sistema lo que se evidenciaba en el sistema de adquisición al ver las señales de interés sobre una señal mucho más grande como la anteriormente mencionada por tal motivo la adición de un filtro pasa altas a los elementos amplificadores de la señal de entrada del sistema de adquisición contribuyo a la solución de esto.

6. RECOMENDACIONES

El proceso realizado por el sistema de adquisición implementado junto con el uso de tarjetas programables, arreglos sensoriales, multiplexores y amplificadores de instrumentación representan un buen ejemplo a seguir en casos donde las señales de análisis sean muy pequeñas. Aunque la topología sensorial implementada para la recepción de ecos cumplido su papel satisfactoriamente al recibir distintas perspectivas del eco producido en cada figura, la tarjeta programable no se recomienda en casos donde la adquisición de datos deba realizarse en tiempo real y en presencia de objetos móviles debido a que esta solo consta de dos conversores A/D lo que limita su uso a dos sensores por cada ejecución cuando la topología sensorial implementada consta de al menos ocho transductores así provocó la implementación de un sistema de adquisición de datos serial por medio del uso de un multiplexor encargado de seleccionar cada sensor por separado y la limitación a objetos estáticos fueron unos de los parámetros establecidos en el desarrollo de este trabajo. Del análisis realizado anteriormente una propuesta de mejoramiento para este sistema consiste en el uso de elementos con una alta tasa de muestro (mayor a 80.000 Hz) y múltiples conversores A/D.

Las técnicas de procesamiento digital de señales implementadas fueron de gran utilidad ya que permitieron separar información importante de todos los datos adquiridos. Aunque la técnica implementada permitió la extracción de información satisfactoriamente, existen muchas otras que se tuvieron en consideración pero que no se implementaron debido a su complejidad matemática. Por este motivo, se recomienda la implementación de otro tipo de técnicas de procesado de señales a este trabajo para establecer puntos de comparación y análisis a partir de diferentes enfoques.

Con el objetivo de obtener muchos más puntos de enfoque o perspectivas de un mismo objeto, se recomienda aumentar la cantidad de transmisores receptores de modo tal que se conforme un sistema de malla o arreglo sensorial que permita extraer características de figuras que presenten una alta relación entre ellas, aunque esto conlleva a un aumento en la carga computacional.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Gilaberte Sanz M. Esther. Implementación de sensores de ultrasonidos en un sistema autónomo de tiempo real. 2003. [En línea]. Disponible en: http://tierra.aslab.upm.es/documents/PFC/PFC_EGilaberte.pdf.
- [2] Gonzáles Ayala Vicente A. Análisis y aplicación de técnicas ultrasónicas para ensayos no destructivos en materiales no homogéneos. 2011. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla Escuela Superior de Ingenieros. Departamento de Ingeniería Electrónica.
- [3] González Sarabia Esther. Técnicas avanzadas de identificación y reconstrucción de objetos mediante ultrasonidos. 2012. Tesis Doctoral (Doctor Ingeniero Industrial). Universidad de Cantabria, Escuela técnica superior de ingenieros industriales y de telecomunicación. Departamento de tecnología electrónica, Ingeniería de sistemas y Automática.
- [4] Hewitt Paul G. Física conceptual. 1999. Tercera edición. Editorial Pearson Educación. 708 páginas. ISBN: 968-444-280-7 Serie AWLI.
- [5] Jerry D. Wilson, Anthony J. Buffa, Bo Lou. Física. 2003. Quinta edición. Editorial PEARSON Educación. 920 páginas. ISBN: 970-26-0425-7.
- [6] Martinez-Graullera Oscar, Romero-Laorden David, Villazón-Terrazas Javier, Ibañez Alberto. Diseño e implementación de un sistema de imagen en 3D. Editor Sociedad Española de Acústica. 2013. [En línea]. Disponible en: http://digital.csic.es/bitstream/10261/134800/1/Dise%C3%B1o_sistema_imagen_ultrasonica_3D.pdf
- [7] Moson Oros Alejandro, Yúdico Padilla Aylim Paola. Principio básico de operación y etapas que constituyen un equipo de ultrasonido. 2010. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería.

- [8] Navarrete Rodrigo Hernández. Procesamiento digital de imágenes de ultrasonido. 2010. Trabajo de grado (Ingeniero en comunicaciones y electrónica). Instituto politécnico nacional escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica.
- [9] Proakis John G., Manolakis Dimitris G. Tratamiento digital de Señales. 2007. Cuarta Edición. Editorial PRENTICE HALL. PEARSON EDUCATION S.A. 996 páginas.
- [9] Rios G. Luis Hernando, Caldas M. Jaime Alfonso, Mejía J. Alejandro, Córdoba L. Juan Pablo. Diseño y construcción de un anillo de sensores ultrasónicos para el levantamiento de mapas de entorno y generación de trayectorias. 2004. Scientia et Technica Año X, No 24.
- [10] Restrepo Girón Andrés David, Loaiza Correa Humberto, Caicedo Bravo Eduardo Francisco. Revisión comparativa de técnicas de reconocimiento de formas 2D con ultrasonido en un ambiente estructurado. 2009. Universidad Nacional de Colombia.
- [11] Rincón Ruiz Juan Elías. Diseño y construcción de un dispositivo electrónico para la detección de obstáculos, como ayuda para personas con discapacidad visual. 2008. Trabajo de grado (Ingeniero de diseño y Automatización Electrónica). Universidad de la Salle. Facultad de Ingeniería de Diseño y Automatización Electrónica.
- [12] Rodríguez Alarcón Raúl. Diseño e implementación de un mapa auto organizado para la explotación del embalse del Guadalmellato. 2015. Tesis de grado (Ingeniero en Organización Industrial). Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas I.
- [13] Santos Llave David Javier. Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos ultrasónicos en un fpga. 2013. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Pontificia universidad católica del Perú.

[14] Transformada de Hilbert. [En línea] Tomado de:
<https://www.mathworks.com/help/signal/ug/hilbert-transform.html>

[15] Vargas Cabral Enrique Antenor. Caracterización de reflectores e irregularidades superficiales por ultrasonidos en aire. 1999. Tesis Doctoral (Doctor en Ciencias Físicas). Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Físicas. Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática.

[16] Zárate Josué Enríquez. Diseño y construcción de un “RANGEFINDER” aplicado a un robot móvil. 2010. Tesis doctoral (Doctor en Ingeniería Mecánica Aplicada). Universidad Nacional Autónoma de México. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería.