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

Neiva, 12 de Agosto de 2019

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Álvaro Andrés Álvarez Rodríguez, con C.C. No. 1117529658,

Raúl Esteban Acero Bolaños, con C.C. No. 1022384263,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado “Detección de minas antipersonal empleando sistemas inteligentes” 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:

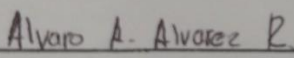
- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con 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.

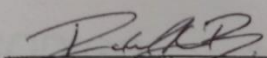
EL AUTOR/ESTUDIANTE:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:





Firma:



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 3

TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Detección de minas antipersonal empleando sistemas inteligentes.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Álvarez Rodríguez Acero Bolaños	Álvaro Andrés Raúl Esteban

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
ROBAYO BETANCOURT	FAIBER

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: 73

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas X Fotografías X Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general___ Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas___ Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas
o Cuadros X

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 3

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Lector PDF/Lector Documentos Word

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. Detector de metales	Metal Detector
2. Procesamiento de señales	Signal Processing
3. Embobinado	Winding
4. Lógica Difusa	Fuzzy Logic
5. Redes neuronales	Neuronal Network

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

Este proyecto presenta el diseño e implementación de un prototipo de detector de minas antipersonal empleando redes neuronales y lógica difusa, basado en el detector de metales Garrett ACE 250. El prototipo cuenta con una etapa en la cual se genera una señal, que es amplificada tanto en voltaje como en corriente e ingresada al embobinado primario del sensor. Posteriormente se realiza el procesamiento de las señales que se generan cuando dichas ondas chocan con un objeto metálico y retornan al sensor. Luego de este proceso y mediante una interfaz gráfica en MATLAB, se muestra al usuario en tiempo real las variables que corresponden al ángulo de desfase (con el cuál se determina el tipo de metal) y la distancia aproximada a la cual se encuentra el objeto detectado. Con esto se logra brindar más información con respecto a la proporcionada originalmente por el detector de metales Garrett ACE 250. Como resultado se obtienen un conjunto de códigos programados en MATLAB, los cuales fueron apropiados para el correcto funcionamiento del detector; adquiriendo, adecuando y procesando de la mejor manera las señales que maneja el sistema y logrando la discriminación esperada de los tipos de metal usados y la distancia a la que se encuentran.

	UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS						
	DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO						
CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	3 de 3

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

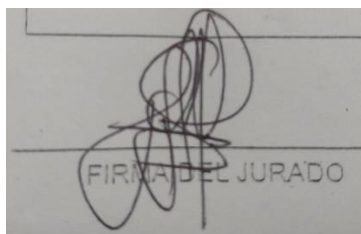
This project presents the design and implementation of a prototype antipersonnel mine detector using neural networks and fuzzy logic, based on the Garrett ACE 250 metal detector. The prototype has a stage in which a signal is generated, which is amplified in voltage as in current and entered into the primary coil of the sensor. Subsequently, the signals that are generated when these waves collide with a metallic object and return to the sensor are processed. After this process and through a graphical interface in MATLAB, the user is shown in real time the variables that correspond to the phase angle (with which the type of metal is determined) and the approximate distance at which the detected object is found. This is to provide more information with respect to that originally provided by the Garrett ACE 250 metal detector. As a result, a set of codes programmed in MATLAB are obtained, which were appropriate for the correct functioning of the detector; acquiring, adapting and processing in the best way the signals handled by the system and achieving the expected discrimination of the types of metal used and the distance they are.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: José de Jesús Salgado Patrón



Firma:

Nombre Jurado: Jesús David Quintero Polanco



Firma:

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.

**DETECCIÓN DE MINAS ANTIPERSONAL EMPLEANDO SISTEMAS
INTELIGENTES**

**ÁLVARO ANDRÉS ÁLVAREZ RODRÍGUEZ
CÓDIGO: 20111101882**

**RAUL ESTEBAN ACERO BOLAÑOS
CÓDIGO: 20111101833**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA
NEIVA
2019**

**DETECCIÓN DE MINAS ANTIPERSONAL EMPLEANDO SISTEMAS
INTELIGENTES**

**ÁLVARO ANDRÉS ÁLVAREZ RODRÍGUEZ
RAUL ESTEBAN ACERO BOLAÑOS**

**Trabajo de grado para optar al título de:
INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Director de la tesis
FAIBER ROBAYO BETANCOURT
Mag. Ingeniería de Control
Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRÓNICA
NEIVA
2019**

Nota de Aceptación

Firma director de Tesis

Firma del jurado

Firma del jurado

Neiva, 08 de marzo de 2019

DEDICATORIA

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme dado la paciencia, sabiduría y entendimiento necesarios para la culminación de este proyecto.

A mis padres Raúl y Elizabeth, por siempre estar a mi lado apoyándome en todo momento y nunca dejarme desfallecer a pesar de todos los obstáculos que se presentaron. A ambos gracias, por inculcarme valores y formar al hombre que soy hoy en día. A mis hermanas y a Santi, porque en medio de sus locuras siempre me brindaron lo mejor de ellos.

A mi tía Janneth por su ayuda incondicional en todo momento y su esmero por querer que todo saliera lo mejor posible.

Por último, al Capi Bolaños. Tío, amigo y compañero de miles de aventuras sobre la bici. Agradezco inmensamente su compañía durante este largo proceso, el cual terminé sin poder mostrarle los resultados, pero que sé que desde el cielo está orgulloso de este nuevo logro obtenido.

RAÚL ESTEBAN ACERO BOLAÑOS

A Dios por permitirme llegar hasta este punto y mantenerme con buena salud. A mi madre por apoyarme y brindarme su amor y cariño hasta el último momento de su vida, espero que esté sintiéndose orgullosa de mí y que esté feliz ya que este momento sería preciado para ella. A mi padre por apoyarme, brindándome su amor y paciencia necesaria para el transcurso y culminación de esta etapa de formación profesional. A mis hermanas por estar atentas y preocuparse por mí, siempre queriendo lo mejor para su hermano.

A mi compañero de tesis, Raúl por trabajar en conjunto sin darnos por vencidos y lograr la culminación de este proyecto de grado. A mi pareja por brindarme su amor y darme felicidad a lo largo de la culminación de este proyecto. A todos y cada uno de mis amigos que de alguna forma han aportado para mi crecimiento personal y profesional.

ÁLVARO ANDRES ALVAREZ RODRIGUEZ

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a:

Faiber Robayo Betancourt, director del proyecto y bastión fundamental para finalizar el mismo de la mejor manera posible. Gracias por toda la ayuda prestada.

A la Universidad Surcolombiana por acogernos desde un principio y formarnos como profesionales.

A los ingenieros que durante este largo camino pusieron todo de ellos para que pudiéramos adquirir el mayor conocimiento y de la mejor calidad.

A los señores encargados de los laboratorios, Carlos Álvarez y Eduardo Perdomo por su gran colaboración y confianza.

A nuestros amigos y compañeros de carrera que siempre estuvieron apoyándonos. En especial a ER7, “el crack,” por su motivación en la etapa final del proyecto.

A los ingenieros y personal encargado de los laboratorios de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede Bogotá, por prestarnos sus instalaciones y compartir de su conocimiento con nosotros.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS.....	15
1.1 OBJETIVO GENERAL	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	16
2.2 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ)	18
2.3 SENSOR GARRETT ACE 250	18
2.4 GENERADOR DE SEÑALES (XR2206)	20
2.5 AMPLIFICADOR DE POTENCIA (TDA2030)	21
2.6 AMPLIFICADOR OPERACIONAL COMO COMPARADOR	21
2.7 MATLAB.....	22
2.7.1 GUI (Graphical User Interface) de MATLAB	23
2.8 SISTEMAS DE RECONOCIMIENTO DE PATRONES	23
2.8.1 Redes neuronales artificiales	24
2.8.2 Lógica difusa.....	25
3. DESCRIPCION DEL SISTEMA	26
3.1 HARDWARE	26
3.1.1 Alimentación	27
3.1.2 Generador de señales	27
3.1.3 Amplificación.....	30
3.1.4 Adecuación de las señales	31
3.1.5 Comparación.....	33
3.1.6 Sensor.....	34
3.1.7 Diseño y Montaje	35
3.1.8 Costos.....	38
3.2 SOFTWARE.....	39
3.2.1 DAQ	39

3.2.2 Remuestreo	41
3.2.3 Cruce por cero y cálculo del ángulo de desfase	43
3.2.4 Osciloscopio (graficación)	44
3.2.5 Red Neuronal.....	45
3.2.6 Lógica Difusa (Fuzzy)	48
3.2.7 Interfaz Gráfica (GUI).....	50
4. PRUEBAS DEL PROTOTIPO.....	52
4.1 PRUEBAS DE LABORATORIO	52
4.1.2 Resultados de las redes neuronales	53
4.1.3 Resultados de la lógica difusa	56
4.1.4 Conclusiones de las pruebas de laboratorio	57
4.2 PRUEBAS DE CAMPO.....	58
5. CONCLUSIONES	61
6. RECOMENDACIONES.....	62
BIBLIOGRAFÍA	63
ANEXOS	65

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Detector de metales Garret ACE 250	19
Figura 2. Diagrama de bloques XR2206.....	21
Figura 3. Amplificador operacional como comparador	22
Figura 4. Diagrama de bloques de un sistema de reconocimiento de patrones	24
Figura 5. Diagrama de bloques del sistema.....	26
Figura 6. Señal generada por la caja de control del Garrett e ingresada al embobinado primario	27
Figura 7. Gráfica voltaje pico Vs R3.....	28
Figura 8. Esquema de un generador de señal sinusoidal con el XR2206.....	29
Figura 9. Señal generada por el XR2206.....	30
Figura 10. Amplificador operacional no inversor	31
Figura 11. Adecuación de pines del sensor mediante relés.....	32
Figura 12. Etapa de potencia para los relés	32
Figura 13. Señales obtenidas del sensor con la PCB	33
Figura 14. Multifrecuencímetro LCR HP 4274A, en propiedad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sede Bogotá.....	35
Figura 15. Diagrama PCB.....	36
Figura 16. PCB implementada	37
Figura 17. Apariencia final del hardware del proyecto	37
Figura 18. Código para habilitar los pines digitales y análogos de la myDAQ de manera simultánea	40
Figura 19. Señales obtenidas luego de ser debidamente adecuadas.....	41
Figura 20. Gráfica estilo osciloscopio de las señales adquiridas	45
Figura 21. Topología de una red neuronal.....	47
Figura 22. Interfaz gráfica del entrenamiento de las redes neuronales	48
Figura 23. Esquema de la lógica difusa implementada.....	49
Figura 24. Reglas implementadas para la lógica difusa.....	49
Figura 25. Interfaz gráfica diseñada para el proyecto	51
Figura 26. Soporte utilizado para realizar mediciones de las bases de datos	52
Figura 27. Estructura del <i>target</i>	54
Figura 28. Gráfica del rendimiento de la red neuronal	55
Figura 29. Funcionamiento de las reglas implementadas para la lógica difusa	57
Figura 30. Prototipos de minas antipersonal elaboradas para las pruebas de campo	58
Figura 31. Contenido de los prototipos de minas antipersonal	59
Figura 32. Prueba de campo del sistema	60

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Conexiones Internas del Sensor	31
Tabla 2. Características en AC de los embobinados del sensor	34
Tabla 3. Costos del proyecto	38
Tabla 4. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio	53
Tabla 5. Resultados obtenidos con MATLAB para la discriminación de la distancia	55
Tabla 6. Resultados de la lógica difusa	56

TABLA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Esquema circuital del hardware diseñado.....	65
Anexo 2. Tabla completa de mediciones para el aluminio	66
Anexo 3. Tabla completa de mediciones para el cobre	67
Anexo 4. Tabla completa de mediciones para el acero	68
Anexo 5. Función en MATLAB para adquirir datos con NI myDAQ	69
Anexo 6. Función en MATLAB para remuestrear señales	69
Anexo 7. Función en MATLAB para detectar los cruces por cero de las señales.....	70
Anexo 8. Función en MATLAB para graficar las señales estilo osciloscopio	71
Anexo 9. Función en MATLAB para calcular el ángulo de desfase de las señales procesadas.....	71
Anexo 10. Función en MATLAB para ejecutar y evaluar la lógica difusa	72
Anexo 11. Función en MATLAB para entrenar las redes neuronales	72
Anexo 12. Función para evaluar los resultados de las redes neuronales	73

GLOSARIO

FUZZY LOGIC DESIGNER: Toolbox de Matlab que permite diseñar y probar sistemas de lógica difusa para modelar los diferentes comportamientos de un sistema.

GARRET ACE 250: Detector de metales en el cuál se basó el diseño del prototipo propuesto.

GUI: Interfaz gráfica para el usuario que facilita la ejecución (compilación) de un código, evitando escribir comandos para desarrollar dicha función. Además, crea un entorno más amigable para la interacción máquina-humano.

NI myDAQ: Tarjeta de adquisición de datos. Elemento que se encarga de la digitalización de la señal física tomada para poder ser manipulada por sistemas de cómputo.

Nntraintool: Toolbox de Matlab empleado para el entrenamiento de una red neuronal artificial.

RNA: Red Neuronal Artificial. Es un modelo de computación cuya estructura de capas se asemeja a la estructura interconectada de las neuronas en el cerebro.

TDA 2030: Amplificador operacional de potencia empleado para amplificar las señales en voltaje y corriente para un funcionamiento adecuado del sensor.

XR 2206: Generador de señales de alta precisión, usado para generar la señal con la cual entra en trabajo el sensor del proyecto.

RESUMEN

Este proyecto presenta el diseño e implementación de un prototipo de detector de minas antipersonal empleando redes neuronales y lógica difusa, basado en el detector de metales Garrett ACE 250.

El prototipo cuenta con una etapa en la cual se genera la señal, que es amplificada tanto en voltaje como en corriente, para luego así ingresarla al embobinado primario del sensor y posteriormente realizar el debido procesamiento de las señales que se generan cuando dichas ondas chocan con un objeto metálico y retornan al sensor; todo esto extraído del detector de metales Garrett ACE 250. Luego de este proceso y mediante una interfaz gráfica en MATLAB, se muestra al usuario en tiempo real las variables que corresponden al ángulo de desfase (con el cuál se determina el tipo de metal) y la distancia aproximada a la cual se encuentra el objeto detectado. Con esto se logra brindar más información con respecto a la proporcionada originalmente por el detector de metales Garrett ACE 250.

Como resultado se obtienen un conjunto de códigos programados en MATLAB, los cuales fueron apropiados para el correcto funcionamiento del detector; adquiriendo, adecuando y procesando de la mejor manera las señales que maneja el sistema y logrando la discriminación esperada de los tipos de metal usados y la distancia a la que se encuentran.

Palabras claves: Detector de metales, procesamiento de señales, embobinado, lógica difusa, redes neuronales.

ABSTRACT

Intelligent systems are computer programs that can perceive information about their environment, store it, perform actions and learn from them. This project presents the design and implementation of a prototype antipersonnel mine detector using neural networks and fuzzy logic, based on the Garrett ACE 250 metal detector. Neural networks base their operation on the human nervous system, that is, they seek to imitate the way in which biological neural networks learn and act, so that they can predict a certain result. On the other hand, fuzzy logic seeks to model human reasoning through the use of rules that represent different premises, which are translated into code that allow decision making.

The prototype has a stage in which the signal is generated, which is amplified as much as the voltage as in the current, so that it is then inserted into the primary winding of the sensor and then the processing of the signals that are notified when said signal is collides with a metallic object. This is based on the operation of the metal detector mentioned above. After this process and through a graphical interface, the user is shown in real time the variables that correspond to the phase angle (with which the type of metal is determined) and the approximate distance at which the detected object is located. With this you can provide more detailed information about the Garrett ACE 250 metal detector.

As a result, a set of codes programmed in MATLAB were obtained, which were appropriate for the correct functioning of the detector; acquiring, adapting and processing in the best way the signals that the system manages and achieving the expected discrimination of the types of metal used and the distance to which they are.

Keywords: Metal Detector, Signal Procecing, Winding, Fuzzy Logic, Neuronal Network.

INTRODUCCIÓN

La importancia de contar con un buen sistema de detección de explosivos se ve justificado por la problemática vivida en el país, en la cual se han perdido vidas de inocentes sin pudor alguno con secuelas dejadas por una guerra inconclusa y sin sentido, resultados que no discriminan entre actores de esa guerra o civiles sin ningún papel en ella. Al 31 de enero del año en curso, se han registrado 11.699 víctimas por minas antipersonal y municiones sin explotar, siendo 2006 el año más crítico, pues se presentaron 1229 víctimas, el mayor número en toda la historia de Colombia. En la última década, la tendencia ha venido cayendo, con excepción del año 2012, hasta ubicarse en 2016 en niveles que no se presentaban desde el año 1999. En lo corrido de 2019, se han presentado 8 víctimas. Esta problemática ha dejado heridas al 80 % (9360) de las víctimas y el 20 % (2340) de las personas han fallecido a causa del accidente, es decir, 1 de cada 5 víctimas muere¹.

Debido a lo anterior, el presente proyecto plantea el desarrollo de un prototipo de detector de minas antipersonal empleando sistemas inteligentes, basado en el detector de metales Garrett ACE 250. Esto con el fin de otorgar mayor información a la persona que haga uso del dispositivo y no solo se guíe por un sonido emitido cada vez que el sensor detecta un objeto metálico.

El prototipo se desarrolla luego de hacer un análisis detallado del funcionamiento del Garrett ACE 250. Basados en ello, se procede a implementar el hardware necesario para lograr un óptimo desempeño del sensor. Después de lograr adecuar las señales con el proceso anteriormente mencionado, se adquieren los datos mediante la tarjeta NI myDAQ. Posteriormente se hace el debido procesamiento de las señales y la visualización de los datos pertinentes con la ayuda de los Toolbox e interfaz del usuario que proporciona MATLAB. Por último, se hacen una serie de pruebas con las redes neuronales y la lógica difusa para determinar cuál de los métodos implementados es el más eficiente y así verificar que las respuestas obtenidas sean las adecuadas y correspondan con la medición que se está realizando.

El proyecto presenta una limitación respecto a portabilidad y eficiencia del sistema debido al tipo de sensor utilizado, pero ambas pueden ser mejoradas en proyectos futuros. A pesar de estas limitaciones se obtuvieron los resultados esperados con los elementos que se tuvieron como recursos, pues se logra discriminar el tipo de metal y la distancia a la cual se encuentra el objeto sin importar que se interpongan elementos de materiales no metálicos como lo es tierra, plástico, arcilla y tubo de PVC; estos resultados son producto de unas adecuadas pruebas de campo.

¹ Dirección para la acción integral contra minas antipersonal, Descontamina Colombia (2019), Víctimas de minas antipersonal y municiones sin explotar.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un sistema de detección de minas antipersonal empleando sistemas inteligentes.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Explorar acerca de las técnicas para detección de minas antipersonal, propuestas en la literatura, para seleccionar e implementar la más adecuada.
- Diseñar e implementar el hardware que permita capturar la información necesaria, que luego será utilizada en la clasificación.
- Evaluar el comportamiento del sistema de clasificación implementado mediante sistemas inteligentes.
- Establecer la efectividad del sistema implementado, mediante pruebas de campo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ESTADO DEL ARTE

Actualmente a nivel mundial se encuentran una gran variedad de dispositivos dispuestos para la erradicación de las minas antipersona, entre los cuales se encuentran sensores de radar de penetración de suelo (GPR), sensores láser y detectores de metales. Este último es el más utilizado actualmente en Colombia, pero brinda muy poca información al usuario que lo emplea en dicha práctica, lo cual exige una mejora en su funcionamiento para que se realice un mejor trabajo en el desminado.

Basados en el tipo de sensores mencionados anteriormente se han realizado estudios y proyectos de investigación a nivel nacional e internacional, los cuales se mencionan a continuación.

2.1.1 Ahmed El-Shenawy, “The Construction of Autonomous Electric Vehicle for Landmine Detection and Localization”.

Esta investigación pretendía realizar el hardware del sistema integrado de un vehículo eléctrico para la detección de minas. Se concentra en la detección y localización de minas terrestres en ambientes desérticos que consta de dos partes. La primera, un carro con la maniobrabilidad necesaria para este tipo de ambientes y la segunda, un brazo robótico con dos grados de libertad. Obtienen como resultado un vehículo funcional con tres funciones principales: Primero: Control de movimiento del vehículo y brazo, segundo: Evasión de colisiones y tercero: Localización y mapeo. Concluyen que las pruebas realizadas fueron positivas y confirman el aceptable rendimiento del sistema desarrollado².

2.1.2 Zainud-Deen, El-Hadad, Awadalla, “Landmines Detección Using Finite-Difference Time-Domain and Artificial Neural Networks”.

En este proyecto usan un sensor para la detección de minas que consiste en dos antenas, una transmisora y otra receptora. La red neuronal recibe la información y la procesa de forma que entrega la profundidad y radio de las minas terrestres. La detección con la red neuronal usada trabaja más rápido a comparación de otras técnicas, además que posee un gran nivel de precisión al momento de detectar las

² Ahmed El-Shenawy (2012) Arab Academy for Science, Technology and Maritim Transport, Egipto. “The Construction of Autonomous Electric Vehicule for Landmine Detection and Localization”.

minas antipersonales. Persigue fines similares a los de este proyecto y contempla varios puntos guía para el desarrollo del mismo³.

2.1.3 Pino, Yady, “Determinación de Técnicas de Detección de Explosivos Óptimas para el Departamento de Antioquia”.

Esta investigación contiene información de las técnicas existentes para la detección de minas antipersonal y los criterios que se deben tener en cuenta al momento de la elección óptima de alguna técnica. Este proyecto concluye que el detector de metales es válido para minas antiguas o minas que llevan tiempo enterradas, además que el detector de metales ofrece poca información y puede tener varios errores en ambientes húmedos. Con esta información se tiene un buen inicio para el presente proyecto ya que marca las posibles mejoras que se pueden implementar y las diferencias de un detector de metales convencional al implementado en este proyecto de grado⁴.

2.1.4 Guzmán, Roa, “Sistema de Discriminación de Metales”.

Este proyecto realiza un estudio de los detectores de metales, que acompañado de un hardware de control y un software de discriminación se logra un buen sistema de detección de minas antipersonal. Presenta etapas muy similares a lo que se pretende en este proyecto y es una buena guía para tomar como referencia. Este proyecto demostró que a partir de un detector FLV y el hardware se puede desarrollar un sistema confiable con mejoras considerables respecto a un detector de metales convencional ya que se demostró que cada metal induce una señal con desfase distinto y con dichas señales se logra la discriminación deseada. Además la discriminación a través del desfase tiene un mejor rendimiento con el uso de redes neuronales⁵.

2.1.5 Mosquera, Flórez, Pérez, “Diseño e Implementación de un Robot Detector de Minas Antipersonas Metálicas Remotamente Controlado”.

Este proyecto de tesis pretendía implementar un robot “oruga” para la detección de metales, pero sin ningún tipo de discriminación. Dicho robot se controlaba desde un pc de forma inalámbrica en el cual se da un aviso al momento que se detecte un metal. Los resultados obtenidos se consolidan en tres tablas importantes, primero

³ Zainud-Deen, El-Hadad, Awadalla (2014) Menoufia University, Egipto. “Landmines Detection Using Finite-Difference Time-Domain and Artificial Neural Networks”.

⁴ Pino, Yady (2009) Universidad Nacional de Colombia, Colombia. “Determinación de Técnicas de Detección de Explosivos Óptimas para el Departamento de Antioquia”.

⁵ Guzmán, Roa (2004) Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá - Colombia. “Sistema de Discriminación de Metales”.

en cuanto a la detección, detectaba metales hasta a 10 cm en las mejores condiciones (oro en el fango). En cuanto a distancia de transmisión, se obtuvo un alcance máximo de 84 metros debido a la transmisión inalámbrica y en cuanto al sistema de tracción, respondía a obstáculos entre los 5.4cm y 7.7cm dependiendo de la forma de estos. El presente proyecto podría convertirse en un complemento para éste ya que se obtendría más seguridad una vez se detecte un metal⁶.

2.2 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ)

La adquisición de datos es un proceso que busca medir fenómenos físicos como voltaje, temperatura, sonido, presión o corriente y para ello se hace uso de un dispositivo de adquisición de datos. Esto último es un hardware que actúa como puente entre el PC y las señales del mundo exterior, es decir, el dispositivo funciona como un conversor análogo-digital, digitalizando las señales analógicas (variables físicas) con el fin de permitir la interpretación de dichas señales por parte del PC.

NI MYDAQ es la tarjeta usada para la realización del proyecto. Es un dispositivo de adquisición de datos de bajo costo y con fines educativos, que brinda a los estudiantes la habilidad para medir y analizar señales en cualquier momento. Es compacto y portátil, de modo que puede usarse fuera del entorno de laboratorio usando herramientas y métodos estándares en la industria. La tarjeta Ni myDaq tiene ocho instrumentos de laboratorio plug-and-play basados en PC usados comúnmente y basados en LabVIEW, incluyendo un multímetro digital (DMM), osciloscopio y generador de funciones. Los estudiantes pueden tener acceso a todos los instrumentos de software listos para ejecutar para realizar experimentos y ejercicios con analizador de Bode, generador de forma de onda arbitraria, analizador de señal dinámica (transformada rápida de Fourier), entrada digital y salida digital. Estos dispositivos permiten realizar ingeniería real y cuando se combinan con software LabVIEW y NI Multisim, brindan a los estudiantes el poder de generar prototipos de sistemas y analizar circuitos fuera de las conferencias y laboratorios tradicionales⁷.

2.3 SENSOR GARRETT ACE 250

Para este proyecto se adquiere el detector de metales Garrett ACE 250, debido a las características que presenta y sobre todo por su precio asequible. Este dispositivo cuenta con una pantalla de visualización, en la cual se pueden observar los diferentes parámetros que pueden ser medidos, como lo son: profundidad, sensibilidad, modo de trabajo, guía de identificación de objetos (material del que

⁶ Mosquera, Flórez, Pérez (2007) *Universidad Surcolombiana, Neiva - Colombia. Diseño e Implementación de un Robot Detector de Minas Antipersonas Metálicas Remotamente Controlado.*

⁷NI my DAQ <https://www.ni.com/es-co/shop/select/mydaq-student-data-acquisition-device>

está hecho el elemento detectado), barra de identificación del objetivo (la cual se puede configurar por el usuario para discriminar los diferentes tipos de metales u objetos que se pueden encontrar), localización exacta de objetivos (PINPOINT), además de una barra que indica el estado de la batería. Sin embargo, para el proyecto solo se hace uso del plato (embobinados) del detector, el cual funciona como sensor de todo el sistema implementado.

Figura 1. Detector de metales Garret ACE 250



Fuente: Manual del Usuario, Garrett Metal Detectors.

2.3.1 MODALIDADES DE TRABAJO

- **COINS (MONEDAS):** Este es el modo de mayor discriminación del Garrett ACE 250. Elimina objetos de poca conductividad como pequeñas piezas ferrosas (por ejemplo, clavos) y muchos no ferrosos. Sin embargo, el detector de metales Garrett ACE 250 no rechaza, por ejemplo, algunos objetos hechos de aluminio. De esta manera puede ocurrir que en ocasiones se va a excavar en zonas en las que no se va a encontrar lo que espera.
- **RELICS (RELIQUIAS):** Diseñado para eliminar objetivos de basura que normalmente se asocian con búsqueda de reliquias, mientras se detectan objetivos buenos en el rango de baja conductividad, tales como plomo y bronce.
- **JEWELRY (JOYERÍA):** Esta modalidad está diseñada para encontrar joyería como anillos, brazaletes, relojes y collares e ignora la mayor parte de artículos de basura. En este modo, el detector rechaza objetos con muy poca conductividad, pero sigue detectando la mayor parte de piezas de joyería.
- **ALL METAL (TODOS LOS METALES):** En esta modalidad no se cuenta con algún tipo de discriminación, por lo cual se puede detectar todo tipo de metal. Se

debe usar cuando se desee encontrar todos los artículos de metal o cuando se desconocen los materiales del objetivo deseado.

- **CUSTOM (PERSONALIZADO):** Esta es la modalidad de discriminación que usted puede programar. El modo CUSTOM en su ajuste original de fábrica es el mismo que el modo COINS, y usando los botones DISCRIM y ELIM usted puede modificar los ajustes de discriminación con sus propias necesidades que serán guardados en el modo CUSTOM.

Respecto a la medición de profundidad a la que se encuentra el objeto deseado, el Garrett ACE 250 brinda un rango de alcance desde 2" hasta un poco más de 8" (de 5cm a aproximadamente 20cm). La efectividad de esta medición depende del tamaño del objeto, pues si el objeto es más pequeño que una moneda, la lectura será de una profundidad mayor a la real y viceversa. Cabe aclarar que cuando el terreno es altamente mineralizado, el detector puede generar mediciones erróneas⁸.

2.4 GENERADOR DE SEÑALES (XR2206)

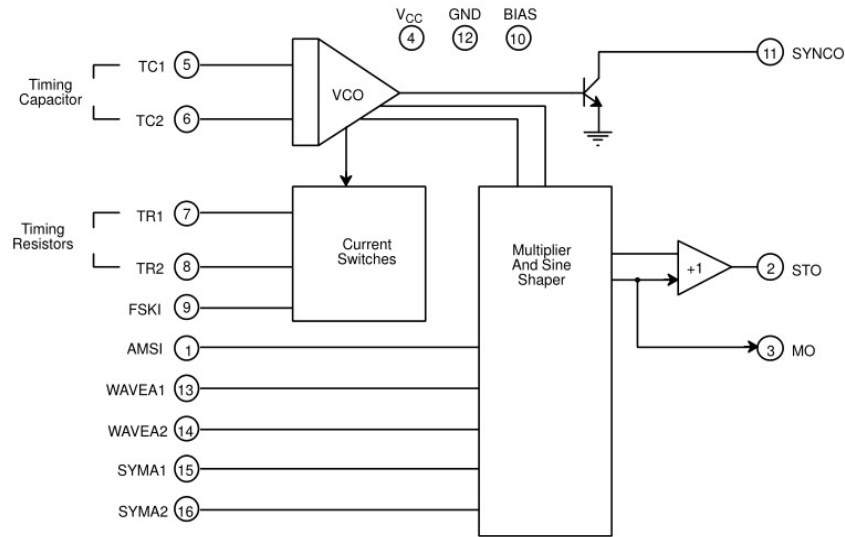
El XR2206 es un circuito integrado empleado para generar diferentes tipos de señales de alta calidad, ya sea senoidal, cuadrada, triangular, de rampa o de pulso. Las ondas de salida se pueden modular tanto en amplitud como en frecuencia dependiendo del uso de un voltaje externo. Este circuito tiene una frecuencia de operación que puede ser seleccionada en un rango de 0.01 Hz hasta más de 1MHz. Es ideal para el área de comunicaciones, instrumentación y aplicación de generador de funciones, generación AM, FM o FSK⁹.

Dependiendo de su configuración puede usarse para generar una señal senoidal continua (con ambos semiciclos positivos o negativos), o alterna (con semiciclo positivo y semiciclo negativo). Esta última configuración fue la usada en el proyecto. En la Figura 2 se puede observar el esquema de la configuración interna que tiene el circuito integrado.

⁸ Owner's Manual. (2007), Garrett Metal Detectors, ACE 150/250.

⁹ Hoja de datos XR-2206 https://www.sparkfun.com/datasheets/Kits/XR2206_104_020808.pdf

Figura 2. Diagrama de bloques XR2206



Fuente: Hoja de datos XR2206

2.5 AMPLIFICADOR DE POTENCIA (TDA2030)

Es un circuito integrado monolítico diseñado para ser usado como amplificador de baja frecuencia clase AB. Proporciona una alta corriente de salida y tiene muy baja distorsión armónica y cruzada. Además, el dispositivo incorpora un sistema de protección contra cortocircuitos de modo que limita la potencia disipada para mantener el punto de operación de los transistores de salida dentro de un rango seguro de operación. Igualmente, incorpora un sistema de protección térmica que limita el consumo de corriente y la potencia de salida cuando la temperatura del encapsulado aumenta, por ello, la selección de un buen disipador de calor es necesaria para el buen funcionamiento de este amplificador de potencia¹⁰.

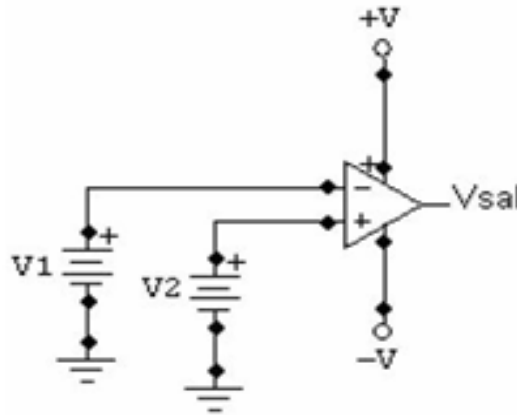
2.6 AMPLIFICADOR OPERACIONAL COMO COMPARADOR

Un amplificador operacional es un dispositivo electrónico de alta ganancia que tiene dos entradas y una salida. Tiene diferentes aplicaciones dependiendo de su configuración o conexiones que lo acompañan, una de estas configuraciones es el de comparador. El amplificador operacional como comparador permite determinar cuál de las dos señales de entrada es mayor. De este modo, basta con que una de las dos señales sea ligeramente superior a la otra para que provoque una salida máxima en el amplificador, ya sea positiva (+Vsat) o negativa (-Vsat)¹¹.

¹⁰ https://www.ecured.cu/Circuito_integrado_TDA2030

¹¹ <https://unicrom.com/comparador-con-amplificador-operacional/>

Figura 3. Amplificador operacional como comparador



Fuente: <http://grupo8lab2.blogspot.com/p/comparadores-analogicos.html>

Dicho de otra forma, si $V1$ es mayor que $V2$, la tensión de salida se saturará a la alimentación positiva $+V$ y si $V2$ es mayor que $V1$, la tensión de salida se saturará a la alimentación negativa $-V$.

2.7 MATLAB

Matlab es una herramienta de software matemático que combina un entorno de escritorio perfeccionado para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y arreglos directamente. Matlab posee una gran cantidad de toolboxes que se han desarrollado de forma profesional pasando por rigurosas pruebas y están debidamente documentados para su uso¹².

Estas son algunas aplicaciones:

- Análisis de datos.
- Comunicaciones inalámbricas.
- Deep learning.
- Procesamiento de señales.
- Visión artificial.
- Robótica.
- Sistemas de control.

¹² <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>

Toolbox y funciones usadas:

- **Fuzzy Logic Toolbox:** Provee funciones y aplicaciones para el análisis, diseño y simulación de sistemas basados en lógica difusa. Este toolbox permite modelar sistemas usando simples reglas lógicas e implementándolas para en un sistema de inferencia difuso¹³.
- **Neural Network Start:** Abre una ventana con botones para ajuste de redes neuronales, reconocimiento de patrones, clustering y series de tiempo. También proporciona la documentación necesaria para comenzar a desarrollar redes neuronales¹⁴.

2.7.1 GUI (Graphical User Interface) de MATLAB

GUI es un entorno de desarrollo de interfaz gráfica que proporciona herramientas para diseñar interfaces de usuario para aplicaciones personalizadas. GUI genera de manera automática el código MATLAB para construir la interfaz deseada, el cual se puede modificar para programar el comportamiento de la aplicación. Las aplicaciones de Matlab son programas autónomos con un frontal gráfico de usuario GUI que automatizan una tarea o cálculo. Pueden incluir diferentes controles usados a disposición del programador¹⁵.

2.8 SISTEMAS DE RECONOCIMIENTO DE PATRONES

Un sistema de reconocimiento de patrones es un sistema que se compone de métodos y algoritmos que busca resolver problemas a los que los seres humanos darían solución, pero con el uso de computadoras. En otras palabras, el reconocimiento de patrones es una disciplina científica que busca clasificar objetos en un número específico de categorías. Dependiendo de la aplicación pueden ser imágenes, sonidos, colores, en general señales producto de mediciones que deben ser clasificadas. Debido a la automatización de la industria, el reconocimiento de patrones ha tomado gran importancia en el campo de la ingeniería como parte integral de sistemas inteligentes¹⁶.

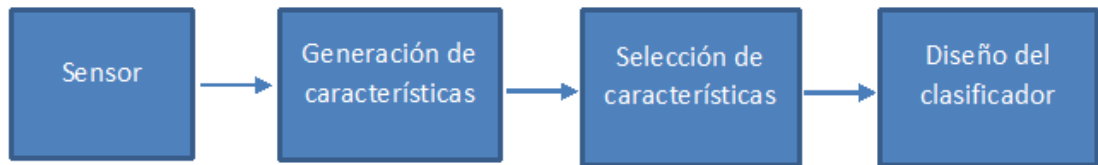
¹³ <https://la.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html>

¹⁴ <https://la.mathworks.com/help/deeplearning/ref/nnstart.html>

¹⁵ <https://la.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>

¹⁶ http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2009000100005

Figura 4. Diagrama de bloques de un sistema de reconocimiento de patrones



Fuente: Autores.

2.8.1 Redes neuronales artificiales

Las redes neuronales son un campo muy importante dentro de la inteligencia artificial. Se basa en el comportamiento conocido del cerebro humano con el fin de crear modelos artificiales que solucionen problemas difíciles de resolver con algoritmos convencionales.

Las redes neuronales artificiales son redes interconectadas masivamente en paralelo de elementos simples y con organización jerárquica, los cuales intentan interactuar con los objetos (señales analógicas) del mundo real del mismo modo como lo hace el sistema biológico¹⁷.

2.8.1.1 Clasificación supervisada

Este mecanismo de aprendizaje se caracteriza porque el entrenamiento de la red neuronal se controla con un agente externo (supervisor) o en el caso de Matlab, se usa un *Target*. Este *Target* determina la respuesta que debería tener la red neuronal dependiendo de una entrada determinada. De esta forma el supervisor controla la salida de la red, modificando las conexiones para obtener la salida deseada.

2.8.1.2 Clasificación no supervisada

Este tipo de aprendizaje no requiere supervisión externa, de esta forma las redes neuronales deben encontrar características, correlaciones o categorías que se puedan establecer entre los datos que se presenten en su entrada. Este aprendizaje es el más acercado al comportamiento de un cerebro ya que es el mismo quien organiza, corrige errores y procesa la nueva información.

¹⁷ https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/orientadora1/monograias/matich-redesneuronales.pdf

2.8.2 Lógica difusa

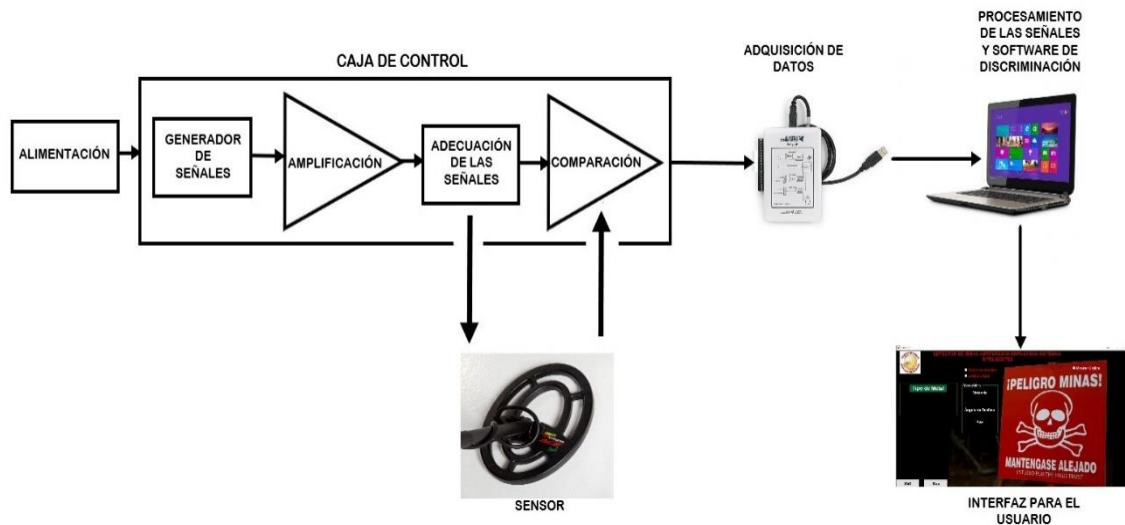
La Lógica Difusa proporciona un mecanismo de inferencia que permite simular los procedimientos de razonamiento humano en sistemas basados en el conocimiento. La teoría de la lógica difusa proporciona un marco matemático que permite modelar la incertidumbre de los procesos cognitivos humanos de forma que pueda ser tratable por un computador. Se basa en reglas heurísticas de la forma If-Else, es decir, para cada situación debe hacer alguna acción. Traducido en la implementación con Matlab, se reduce a un conjunto de reglas que determinan que acción o salida es necesaria para una entrada determinada¹⁸.

¹⁸ http://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf

3. DESCRIPCION DEL SISTEMA

El sistema desarrollado para este proyecto está compuesto de una parte física (hardware) y una lógica programada (software), cada una desempeñando un papel de gran importancia. Con el hardware se realiza la adquisición y acoplamiento de las señales, mientras que con el software se realiza el procesamiento de las mismas, lo cual permite una adecuada discriminación y la correcta detección de los diferentes metales utilizados durante este proceso. En la Figura 5 se muestra el diagrama de bloques del sistema implementado, el cual es descrito a continuación.

Figura 5. Diagrama de bloques del sistema

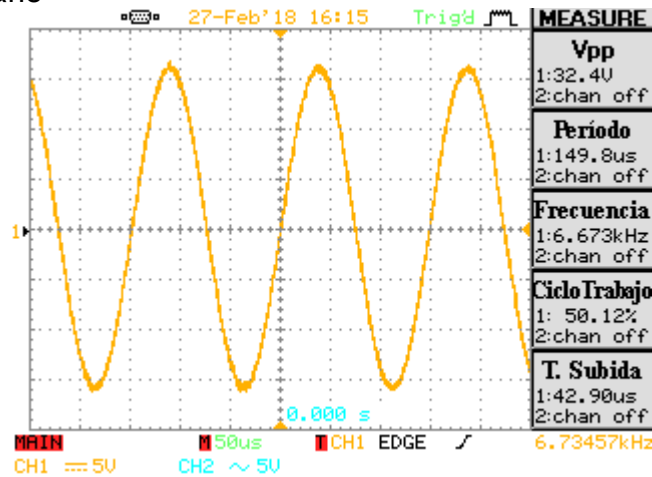


Fuente: Autores.

3.1 HARDWARE

Basados en el funcionamiento del detector de metales Garrett ACE 250 se diseña una serie de etapas para emular el funcionamiento de este dispositivo, el cual mediante su caja de control envía una señal sinusoidal de 32.4 Vpp y 6.7 kHz (ver Figura 6) al embobinado primario del sensor y posteriormente recibe por el embobinado secundario una señal desfasada cada vez que se detecta un objeto metálico y que posteriormente es procesada por el software implementado. Es importante resaltar que solamente el plato (sensor) del Garrett ACE 250 se usó para el desarrollo del proyecto.

Figura 6. Señal generada por la caja de control del Garrett e ingresada al embobinado primario



Fuente: Autores

Después de un exhaustivo análisis acerca del funcionamiento del Garrett se procede a implementar la parte física del sistema de la siguiente manera:

3.1.1 Alimentación

En esta etapa se implementa una fuente dual fija que proporciona 12 voltios DC tanto positivos como negativos, usados para polarizar los circuitos integrados de la placa (PCB) como lo son el generador de señales y los amplificadores operacionales, para garantizar su correcto funcionamiento. Esta fuente se implementa de forma sencilla con un puente de diodos, capacitores y reguladores que proporcionaran la tensión requerida para la alimentación de los integrados usados.

3.1.2 Generador de señales

Para esta etapa se emplea el generador de señales XR2206, el cual entrega tres (3) tipos de señales en sus diferentes salidas: triangular, cuadrada y sinusoidal, de las cuales se usa la señal sinusoidal para ser aplicada al sensor. Para ello se implementa el esquema de la Figura 8, al cual se le realizaron unos cambios debido a que con esta configuración se obtiene una señal unipolar (continua) positiva a la salida del generador y para el correcto funcionamiento del sensor es necesario una señal bipolar (alterna) como la generada por la caja de control del Garrett y que se observó anteriormente en la Figura 6.

El cambio consiste en conectar a $-V_{cc}$ todos los elementos que están conectados a tierra. En el caso de los elementos del pin 3 se suprime el divisor de tensión y el capacitor, conectando así directamente la resistencia R_3 a $-V_{cc}$, la cual es la encargada definir la amplitud de la señal de salida y tiene un valor de $47k\Omega$. Este valor se selecciona basados en la gráfica de la Figura 7, en la cual se observa que con ese valor de R_3 (comercial) se obtiene una señal de aproximadamente 3 Vp.

Figura 7. Gráfica voltaje pico Vs R_3

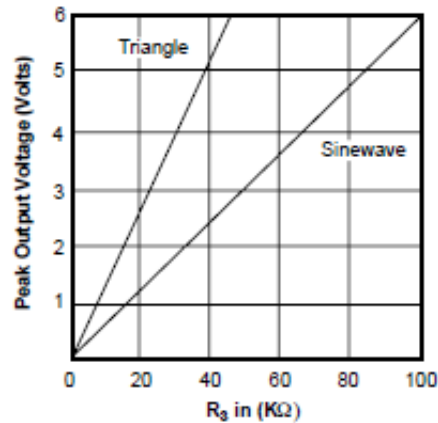
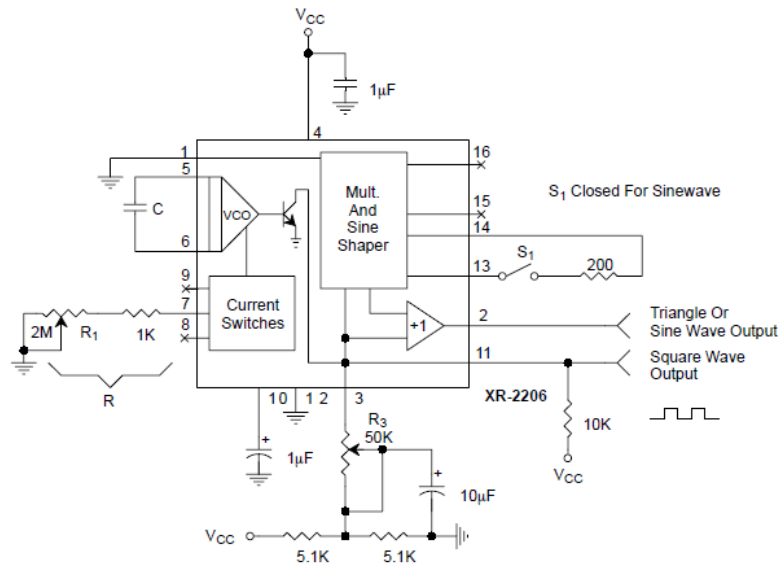


Figure 3. Output Amplitude as a Function of the Resistor, R_3 , at Pin 3

Fuente: Hoja de datos XR2206

Además, entre los pines 13 y 14 se conecta de manera directa la resistencia de 200Ω para de esta manera generar una señal sinusoidal a la salida del pin 2, puesto que si se deja como se muestra en la Figura 8 (un interruptor abierto en el pin 13), se obtendría una señal triangular.

Figura 8. Esquema de un generador de señal sinusoidal con el XR2206



Fuente: Hoja de Datos XR2206.

Por último, para efectos del cálculo de la frecuencia se hizo uso de la siguiente ecuación que se encuentra en la hoja de datos del XR2206:

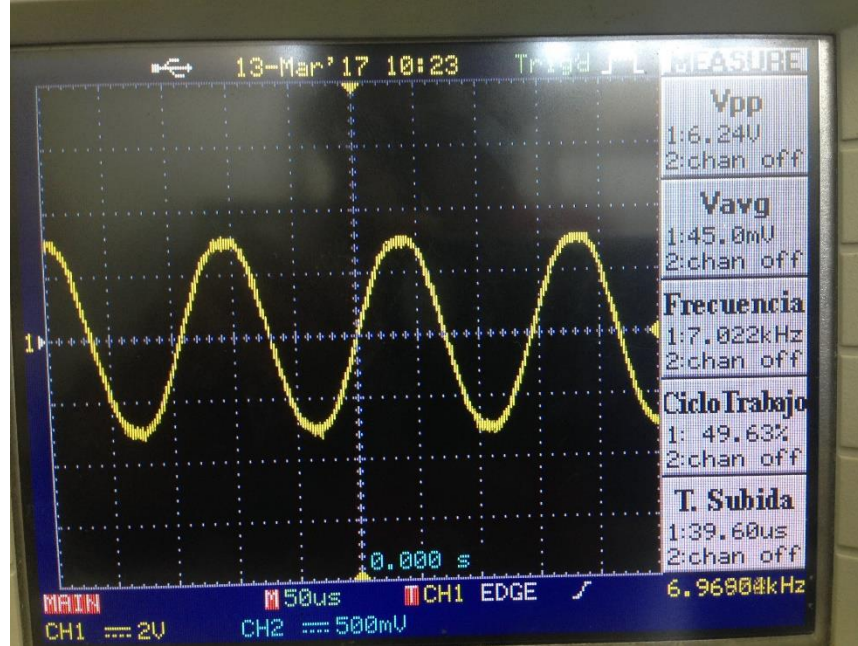
$$f = \frac{1}{RC}$$

Donde f es la frecuencia que tendrá la señal de salida, que para este caso es de 6.8 kHz (frecuencia a la que trabaja el Garrett ACE 250) y C se asume de 100 nF, teniendo como resultado:

$$R = \frac{1}{fC} = \frac{1}{6.8 \times 10^3 * 100 \times 10^{-9}} = 1.47 \text{ k}\Omega$$

Para alcanzar este valor exacto se usaron 2 resistencias de valor comercial, una de 1k Ω y otra de 470 Ω . Obteniendo así una señal sinusoidal de aproximadamente 6.8kHz, la cual se puede observar en la Figura 9.

Figura 9. Señal generada por el XR2206



Fuente: Autores.

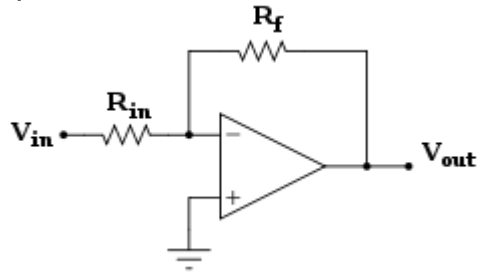
3.1.3 Amplificación

Una vez obtenida la señal sinusoidal deseada en lo que respecta a frecuencia, se implementa un amplificador de potencia con un TDA 2030, el cual se va a usar para amplificar la señal que se le ingresa al embobinado primario tanto en voltaje, como en corriente. Esto debido a que la corriente suministrada por el generador de señales es muy pequeña y en las pruebas de laboratorio se logra observar que el sensor trabaja de manera correcta con una corriente mínima que oscila entre los 600mA y 700mA, valor que logra alcanzarse gracias al tipo de salida que posee este integrado (Clase AB) y también a la corriente que genera el transformador utilizado en el proyecto (1A). Para amplificar el voltaje de la señal se utiliza el TDA2030 como amplificador no inversor (ver Figura 10), cuya ganancia está definida por la siguiente ecuación:

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_{in}}$$

En esta ocasión, tanto R_f como R_{in} son del mismo valor (5.1k Ω), lo que genera una ganancia de 2 al amplificador, y con lo cual la amplitud de la señal luego de este proceso, será de aproximadamente 12 Vpp, valor que se decide establecer luego de observar que la señal se empieza a saturar cuando su amplitud excede dicho valor.

Figura 10. Amplificador operacional no inversor



Fuente: <http://www.esacademic.com/dic.nsf/eswiki/77231>

3.1.4 Adecuación de las señales

Al experimentar con el funcionamiento sensor, se encuentra que al intercambiar los pines 1 y 4 del embobinado primario (ver Figura 11) se observa una mejor discriminación en cuanto a la distancia. Por este motivo, se decide implementar una etapa con relés para hacer este proceso de manera remota y controlar esas conexiones con un pin digital de la tarjeta DAQ. La distribución de los pines del sensor se muestra en la Figura 11, en donde tienen las siguientes conexiones:

Tabla 1. Conexiones Internas del Sensor

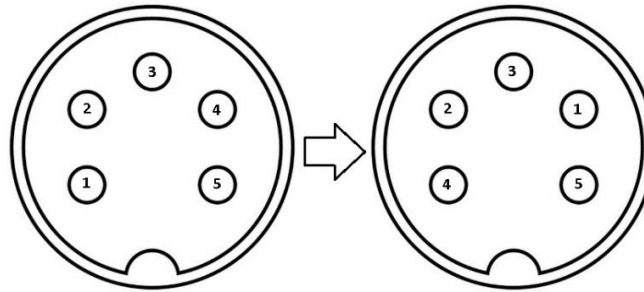
# del pin	Función
1	Apantallamiento del embobinado primario
2	Apantallamiento del embobinado secundario
3	Embobinado secundario
4	Embobinado primario
5	Tierra común

Fuente: Autores.

Para ello se diseña un esquema en el cual se hace uso de 3 relés para lograr hacer el cambio de la conexión entre los pines. El primero de ellos va a funcionar como controlador, ya que es el que define si la señal del embobinado primario se ingresa al pin 1 o al pin 4 del sensor. Esto se logra con una etapa de potencia (ver Figura 12) para el manejo de los relés, ya que la corriente que suministra los pines de la tarjeta DAQ no es lo suficientemente grande para activarlos. Para esta etapa se utiliza un transistor NPN y se configura para que trabaje en corte y saturación (switch); de esta manera cuando el voltaje en la base sea bajo (0 v), el transistor va a estar en corte y no habrá corriente entre colector y emisor, por lo que los relés no se van a activar, manteniendo así la posición original de los pines (1-4). En cambio,

cuando el transistor tenga en la base un voltaje alto (5 v) este va a estar en saturación debido a que la tensión en la base supera el umbral de 0.6 v y con ello el transistor entra en estado de conducción (entre colector y emisor), activando así los relés e intercambiando así la posición de los pines (4-1), este cambio se puede observar en la Figura 11.

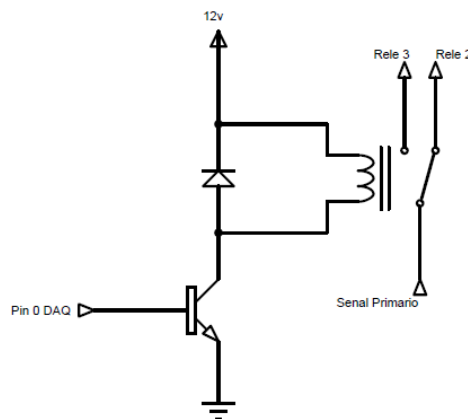
Figura 11. Adecuación de pines del sensor mediante relés



Fuente: Autores.

Para finalizar, para protección se conecta un diodo rectificador polarizado de manera inversa y en paralelo con la bobina del relé para que al momento en el que el transistor entre en corte y el relé se desactive, la corriente que se induce en ella (extra corriente de apertura) debido el campo magnético no dañe el transistor¹⁹. Esta etapa de potencia se puede observar a continuación:

Figura 12. Etapa de potencia para los relés



Fuente: Autores, realizado con Proteus.

¹⁹ <https://www.inventable.eu/controlar-rele-con-transistor/>

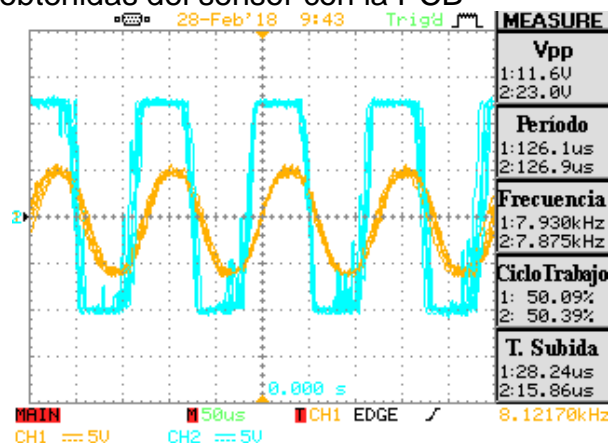
3.1.5 Comparación

Esta etapa es necesaria para poder medir de la señal que se recibe por el embobinado secundario de manera indirecta. La explicación se debe a que los embobinados del sensor trabajan como una especie de transformador (el cual tiene al vacío como núcleo) y los apantallamientos (tierra) de los mismos no pueden ir conectados a un mismo punto de referencia, ya que esto crea un conflicto entre las tierras, generando así un corto e impidiendo de esta manera una medición directa de la señal. Para ello se utiliza un integrado TL084 que contiene internamente 4 amplificadores operacionales, los cuales se dispusieron como comparadores para que en cualquiera de ellos se pueda tomar la medición de la señal del embobinado secundario y así, si alguno de los 4 se daña no sea necesario cambiar por completo el integrado.

Teniendo como referencia la medición indirecta de esta señal, se procede a hacer las respectivas pruebas en el laboratorio en donde se evidencia que, al detectar los diferentes tipos de metales, la señal obtenida en el comparador se desfasa dependiendo del material y si es o no ferroso, pues los metales no ferrosos como el aluminio y el cobre generan señales en atraso respecto a la generada para el embobinado primario y los metales ferrosos como el acero, generan señales en adelanto.

De igual manera se observa que a medida que la distancia aumenta, el voltaje pico a pico de la señal va disminuyendo, lo cual permite concluir que a mayor distancia menor será este voltaje. Dependiendo del tipo de material del metal se pueden observar cambios muy bruscos a medida que aumenta la distancia. Esto se debe a la conductividad eléctrica de los metales, ya que entre mayor sea esta característica el metal se podrá detectar a mayores distancias.

Figura 13. Señales obtenidas del sensor con la PCB



Fuente: Autores.

3.1.6 Sensor

El sensor utilizado fue el plato de bobinas del Garrett ACE 250. Estas bobinas tienen una serie de parámetros con los cuales fueron construidas y se muestran a continuación:

Tabla 2. Características en AC de los embobinados del sensor

Frecuencia de Trabajo		4 kHz	10 kHz
Embobinado Primario (1-4)	L	2.474 mH	2.503 mH
	Z	$62.34 \Omega < 85.97$	$157.21 \Omega < 88.15$
	R	4.68Ω	5.41Ω
	Q	14.2	28.7
Embobinado Secundario (2-3)	L	1.617 mH	1.624 mH
	Z	$51.32 \Omega < 52.36$	$106.98 \Omega < 72.61$
	R	31.35Ω	31.94Ω
	Q	1.3	3.2

Fuente: Autores.

Para la toma de estos datos es muy importante resaltar el apoyo de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas sede Bogotá, por prestar sus instalaciones y elementos de laboratorio. Gracias al multifrecuencímetro LCR se adquieren los valores adjuntados en la Tabla 2. Este dispositivo realiza las mediciones a determinadas frecuencias con las que posteriormente se alimenta al sensor que para este caso fueron de 4kHz y 10 kHz (ver Figura 14), ya que entre ese rango se encuentra la frecuencia a la cual se va a trabajar (6.8 kHz aproximadamente).

Con estas mediciones se hizo un comparativo de las variables que son de interés, como lo es la impedancia, resistencia e inductancia de los embobinados; valores que se van a tener a la hora de implementar las etapas anteriormente mencionadas.

Figura 14. Multifrecuencímetro LCR HP 4274A, en propiedad de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sede Bogotá.



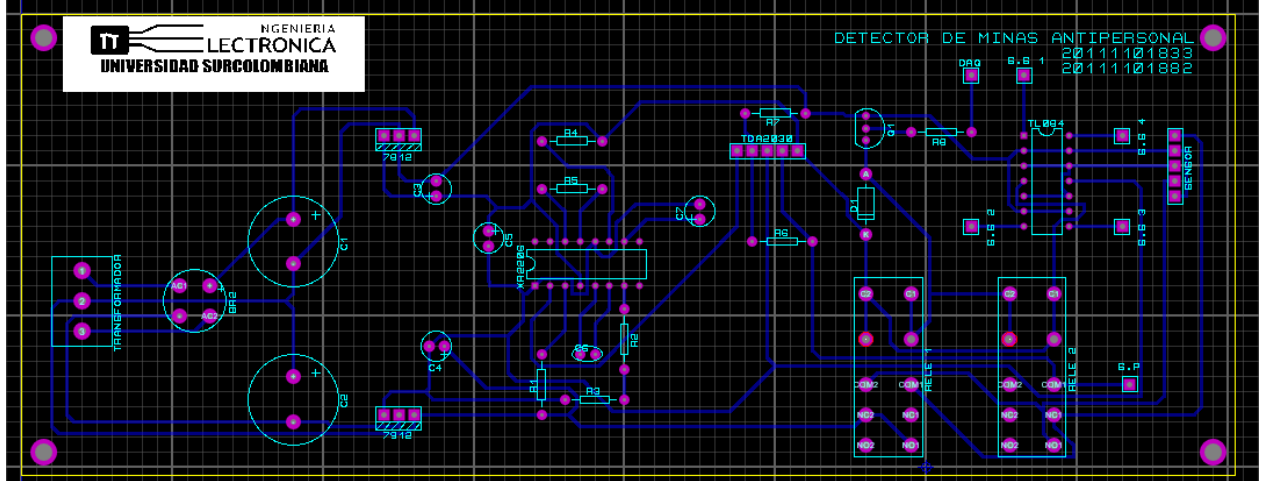
Fuente: Autores.

Luego de implementar todas las etapas del hardware se puede observar un buen funcionamiento del dispositivo (ver Figura 13), con el que se pueden observar y diferenciar para cada uno de los metales los cambios en las variables utilizadas para la discriminación.

3.1.7 Diseño y Montaje

Después de realizar el montaje en un protoboard, hacer las pruebas de laboratorio pertinentes y teniendo en cuenta todas las consideraciones de las etapas por las que está compuesto el hardware, se procede a hacer la simulación en ISIS de Proteus (ver **Anexo 1**) para luego con ella realizar las pistas de la PCB (placa de circuito impreso) en ARES (también de Proteus), en donde queda de la siguiente manera:

Figura 15. Diagrama PCB

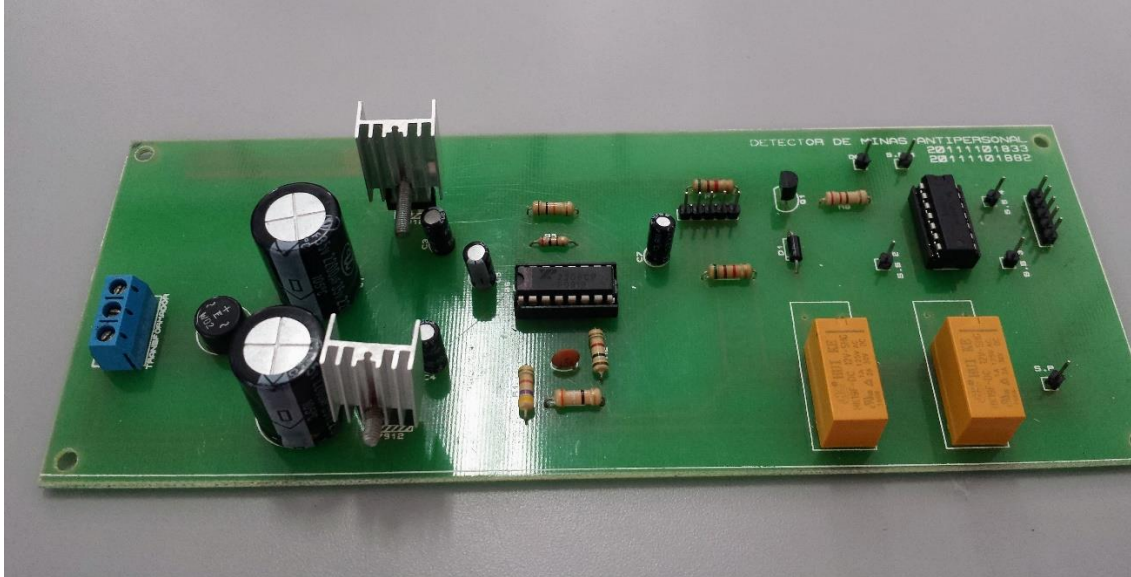


Fuente: Autores, realizado con Proteus

Luego de verificar y realizar unos pequeños cambios a las conexiones generadas por defecto por ARES, se procede a imprimir las pistas en una placa en fibra de vidrio, a una sola capa y con la película anti-soldadura para que al momento de fijar los elementos el estaño no se adhiera a las pistas, y así evitar daños en las mismas si se desea cambiar algún elemento. El TDA2030 se decidió implementar de manera aislada, es decir, en una placa diferente a la principal y hacer el empalme mediante conectores, debido a que su disipación de calor es muy alta y la temperatura afecta el funcionamiento de otros elementos como el XR2206

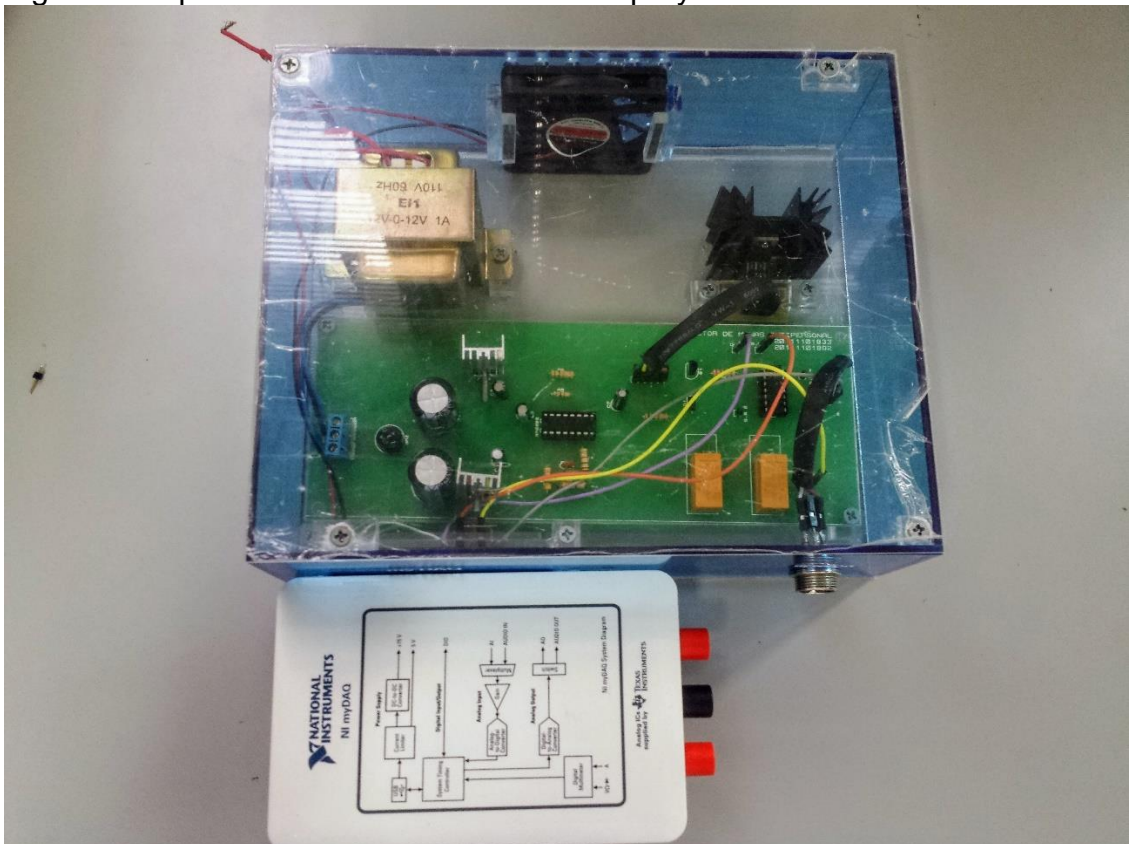
Finalmente se hace el montaje completo de los elementos que componen la placa y se verifica que todas las conexiones se encuentren bien hechas midiendo continuidad en los diferentes puntos. El resultado este proceso se puede observar a continuación:

Figura 16. PCB implementada



Fuente: Autores.

Figura 17. Apariencia final del hardware del proyecto



Fuente: Autores.

3.1.8 Costos

Se realiza una tabla en la cual se muestra el valor de cada elemento utilizado para el desarrollo de la caja de control (hardware) del proyecto, cuyos precios pueden variar dependiendo del lugar en el que se compren.

Tabla 3. Costos del proyecto

ELEMENTO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (PESOS)	TOTAL (PESOS)
Resistencias	8	50	400
Capacitores de 1 μ F y 100nF	5	100	500
Capacitores de 2.200 μ F	2	1.500	3.000
Puente de Diodos W06M	1	1.500	1.500
LM7812	1	1.200	1.200
LM7912	1	1.500	1.500
XR2206	1	10.000	10.000
TL084	1	2.000	2.000
TDA2030	1	3.000	3.000
Regleta Macho-Macho	1	1.000	1.000
Diodo 1n4007	1	100	100
Transistor 2n3904	1	200	200
Relé 12v a 1A	2	4.500	9.000
Bornera de 3 Terminales	1	600	600
Transformador 12-0-12 a 1A	1	20.000	20.000
Ventilador	1	4.500	4.500
Conector Metálico de 5 pines	1	3.000	3.000
Conector Macho-Hembra para arduino	8	200	1.600
Conector Hembra-Hembra para arduino	5	200	1.000
Disipador de Calor	3	2.300	6.900
Cable de Poder	1	8.000	8.000
PCB	1	35.000	35.000
Elaboración de la Caja	1	35.000	35.000
Detector de Metales Garrett ACE 250	1	1'000.000	1'000.000
TOTAL			1'149.000

Fuente: Autores.

3.2 SOFTWARE

Para esta parte del proyecto se decide trabajar con la tarjeta de adquisición de datos NI myDAQ de National Instruments, debido a que después de realizar pruebas de tomas de datos con otros elementos (como arduino), se observa que la frecuencia de muestreo no es lo suficientemente alta para adquirir las señales generadas con el hardware de manera óptima. Una vez elegida la tarjeta de adquisición de datos, se selecciona el software con el que se desarrolla la respectiva programación. De esta forma, se opta por MATLAB ya que es un software muy completo y permite el manejo de los sistemas inteligentes empleados en el proyecto. Debido a lo anterior, es necesario descargar NI-DAQmx, el cual es un controlador básico para la adquisición de datos basada en PC y que ofrece la facilidad de enlazar la tarjeta NI myDAQ con MATLAB y programar de manera independiente los pines de la tarjeta, ya sea como análogos o digitales, entradas o salidas según sean necesarios.

Teniendo enlazada la tarjeta a MATLAB y observando un buen comportamiento para la realización adecuada de este apartado, se procede a programar los diferentes códigos que culminarían con óptimos resultados respecto a la discriminación tanto en distancia, como en tipo de metal (ángulo de desfase) y que son descritos detalladamente a continuación.

3.2.1 DAQ

Esta función es la encargada de adquirir las señales de ambos embobinados del sensor y para ello es necesario crear dos sesiones que inicializan los puertos a utilizar en la myDAQ. La primera sesión (s1) sirve para habilitar los pines digitales, en la cual se configuró un pin como salida (pin 0) que va a enviar un pulso que activará o desactivará los relés para la adecuación de las señales.

En la segunda sesión (s) se configuran como pines analógicos los dos canales de entrada que tiene la tarjeta. De esta manera van a ser usados para adquirir y procesar las dos señales que proporciona el sensor, una que se emite por el embobinado primario y la otra que recibe el embobinado secundario. Ambas configuraciones se pueden observar en la Figura 18, a continuación.

Figura 18. Código para habilitar los pines digitales y análogos de la myDAQ de manera simultánea

```
%Se crea esta sesión para habilitar los pines digitales de la tarjeta
sl = daq.createSession('ni');
addDigitalChannel(sl,DAQname, 'port0/line0', 'OutputOnly');
outputSingleScan(sl,mode);

%Se crea esta sesión para habilitar los pines análogos de la tarjeta
s = daq.createSession('ni');
addAnalogInputChannel(s,DAQname, 0, 'Voltage');
addAnalogInputChannel(s,DAQname, 1, 'Voltage');
```

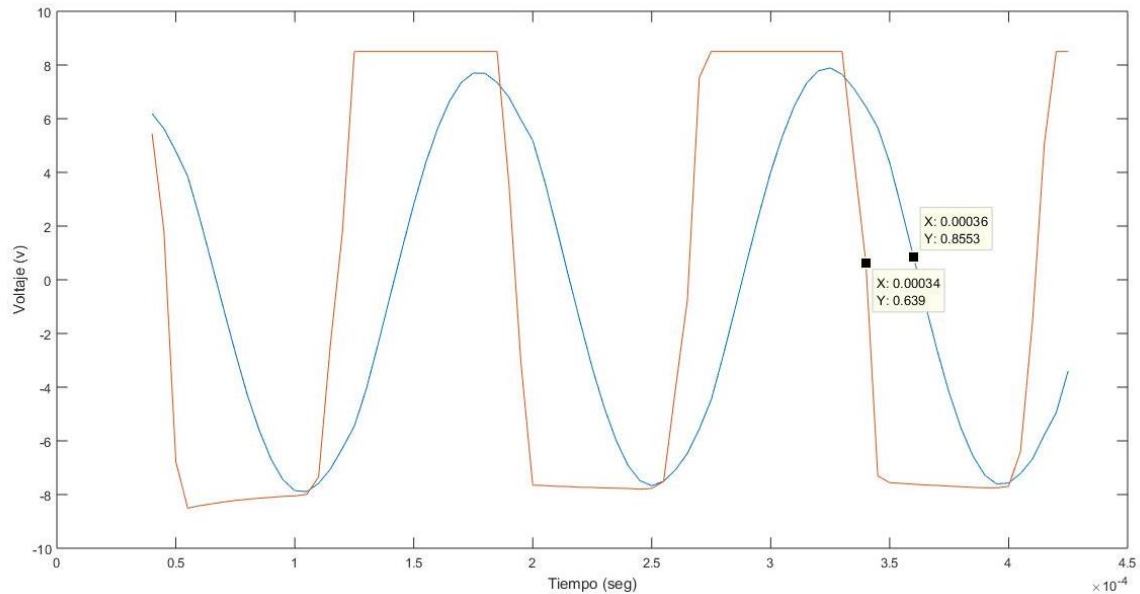
Fuente: Autores, realizado con MATLAB.

Cabe aclarar que ambas sesiones se hacen por separado debido a que al momento de crear una, ya sea análoga o digital, se van a desactivar los pines opuestos a los usados en esa sesión. Es decir, si se crea una sesión digital, la función inhabilita los pines análogos de la tarjeta impidiendo la toma de las señales del sensor y viceversa.

Para un buen procesamiento de las señales adquiridas se realiza una adecuación de las mismas para lograr mejores resultados, pues, al adquirirlas con la DAQ se presentan dos casos a corregir antes de proseguir. El primero hace referencia a cierta cantidad de datos que no son determinantes para una buena discriminación, por lo cual se procede a eliminar el 10% inicial de los datos adquiridos por ambos embobinados, y trabajar con el 90% restante. Estos datos iniciales hacen referencia a los que, en el momento de tomar la captura con la myDAQ, la señal generada con el oscilador (XR2206) no se encuentra estabilizada.

El segundo caso corresponde a la simetría de las señales tanto en los semiciclos positivos, como negativos. Para garantizar que en ambos casos sean simétricos, se obtienen los valores máximos y mínimos de las señales para luego centrarlas lo mejor posible sobre el eje x (tiempo) y así hacer una correcta detección de cruce por cero para calcular de manera más precisa el ángulo de desfase que hay entre ambas señales, que luego determinará el tipo de metal que se está detectando. En la Figura 19 se puede observar el resultado de los procedimientos anteriormente mencionados.

Figura 19. Señales obtenidas luego de ser debidamente adecuadas



Fuente: Autores, realizado con MATLAB.

3.2.2 Remuestreo

El cálculo del número de muestras obtenidas por la DAQ está dado por la siguiente ecuación:

$$\# \text{ muestras } DAQ = s.Rate * s.DurationInSeconds$$

Por defecto, las sesiones creadas en el paso anterior tienen una tasa de muestreo de 1.000 escaneadas o muestras por segundo, pero la myDAQ ofrece un máximo de 200.000 escaneadas/segundo. Este valor fue el usado para obtener la mayor cantidad de muestras posibles y es el almacenado en la variable **s.Rate** (ver **Anexo 6**).

Por otra parte, la variable **s.DurationInSeconds** (ver **Anexo 6**) determina el tiempo que dura la captura tomada por la DAQ durante la sesión mientras se adquieren las señales. Para este caso se determina calculando el periodo de la señal que se le está ingresando al emboinado primario y multiplicándolo por 10 para que a la hora de graficar se observen la misma cantidad de ciclos de dicha señal. Con estos dos valores, se obtiene que:

$$\# \text{ muestras } DAQ = 200.000 \frac{\text{muestras}}{\text{segundo}} * 1.447ms \cong 290 \text{ muestras}$$

De las cuales se tomaron 261, equivalentes al 90% con el que se va a trabajar. Debido a que el número de muestras obtenidas en este proceso es muy pequeño, la separación entre ellas es muy grande y para el efecto del detector de cruce por cero no se encuentran muestras cercanas a este valor (0). Es por esta razón que se realiza el procedimiento de remuestrear las señales adquiridas con la myDAQ. Por consiguiente, se tiene la siguiente ecuación para calcular el número de muestras de las señales remuestreadas:

$$\# \text{ *muestras resample* } = \# \text{ *muestras DAQ* } * \left(\frac{p}{q} \right)$$

Para llevar a cabo este proceso se hace uso del comando ***resample*** de MATLAB. En primer lugar, se define una variable con la frecuencia de muestreo de la myDAQ ($f_o = 200 \text{ kHz}$) y otra variable con la frecuencia a la cual se quiere remuestrear la señal (f_d), que para este caso y luego de una serie de pruebas, se obtiene que 10 MHz es una frecuencia adecuada para obtener un considerable número de muestras. Luego de tener estos dos valores se procede a obtener los de p y q con la ayuda del comando ***rat*** de MATLAB el cual, con los valores de f_o y f_d retorna estos factores de la siguiente manera:

$$[p, q] = \text{rat} \left(\frac{f_d}{f_o} \right)$$

Obteniendo así que $p=50$ y $q=1$. De esta manera y reemplazando estos valores se tiene:

$$\# \text{ *muestras resample* } = 261 * \left(\frac{50}{1} \right) = 13.050 \text{ *muestras* }$$

El remuestreo funciona sin problema para la señal seno, pero cuando la señal se torna cuadrada (comparador) en los cambios de transición se crean una serie de oscilaciones que distorsionan la forma original de la onda. Esto se puede corregir gracias a que el comando ***resample*** trabaja con un filtro anti-aliasing que puede ser modificado a partir de una ventana Kaiser que añade dos variables más a la función, n y β .

$$\text{remuestreo2} = \text{resample}(\text{grafica2}, p, q, n, \beta)$$

Estas variables permiten corregir dichas oscilaciones ya que n controla la longitud relativa del filtro y β la cantidad de suavizado que se quiere realizar²⁰. Para efecto del remuestreo de la señal del emboinado secundario se obtuvo mediante pruebas

²⁰ <https://la.mathworks.com/help/signal/examples/resampling-uniformly-sampled-signals.html>

de laboratorio que $n=5$ y $\beta=20$, pues con estos valores la señal mejora considerablemente su forma en dichos segmentos (ver Figura 20).

Luego de remuestrear ambas señales y haber corregido las oscilaciones de la señal del embobinado secundario (ver **Anexo 6**) se encuentra una gran cantidad de muestras cercanas a cero (0) y con ello el proceso para calcular el ángulo de desfase entre ellas se hace más sencillo.

3.2.3 Cruce por cero y cálculo del ángulo de desfase

Para el cálculo del desfase es necesario determinar la diferencia entre dos puntos de las señales en el que su amplitud sea la misma, es decir, un punto que en amplitud de la señal del embobinado primario se encuentre relacionado con un punto de la señal del embobinado secundario. Para ello se elige realizar un detector de cruce por cero mediante programación ya que con esto se logra determinar los puntos necesarios para el cálculo del desfase y se ahorra la utilización de un circuito externo que cumpla la misma función.

Como su nombre lo indica, el detector de cruce por cero determina los tiempos en el que la señal sinusoidal toma valores de cero voltios y se parte de las señales análogas que son adquiridas por la tarjeta DAQ. Seguido, se realiza un remuestreo para que la diferencia entre los tiempos de adquisición no sea tan grande a causa de la frecuencia usada. Hecho esto, se encuentra que no hay amplitudes exactas de cero voltios, es decir, sólo se tienen valores aproximados a cero $\pm 0.08V$ para el embobinado primario y $\pm 0.35V$ para el embobinado secundario. Se hace uso del comando **find** para evaluar la siguiente condición:

$$\begin{aligned} \text{cerosp} &= \text{find}(-0.08 \leq \text{canal1} \ \& \ \text{canal1} \leq 0.08); \\ \text{cerosp} &= \text{find}(-0.35 \leq \text{canal2} \ \& \ \text{canal2} \leq 0.35); \end{aligned}$$

Observado esto, se procede a evaluar las señales remuestreadas y guardar en un vector los valores que cumplen la condición de encontrarse en estos rangos mencionados anteriormente.

$$\begin{aligned} \text{voltajes} &= \text{canal1}(\text{cerosp}); \\ \text{voltajes} &= \text{canal2}(\text{cerosp}); \end{aligned}$$

Como se puede observar se reutiliza la misma variable para aligerar el código (canal1 y canal2 son las señales remuestreadas).

Posteriormente, se separan estos valores por cada flanco, ya sea de subida o bajada dependiendo del tiempo que existe entre un punto y otro de las señales remuestreadas. Esto se realiza evaluando una condición simple:

if restd1 <= 0.0000008;

En donde el valor “0.0000008” el tiempo que existe entre punto y punto de la señal remuestreada y “*restd1*” el vector con los valores de tiempo de los puntos que cumplen los requerimientos.

Debido a que el número de puntos que cumplen con estos requerimientos en cada flanco no es igual, se elimina una columna de la matriz, teniendo como resultado una matriz en donde cada fila hace referencia a un flanco (subida o bajada) y cada columna es un punto donde su valor en voltaje se encuentra entre los rangos definidos. Esto se evalúa con la siguiente condición:

if matrizcerost(j,i)~ = 0

Es decir, todos los valores diferentes de cero van a hacer parte de una nueva matriz creada.

Finalmente, con esta clasificación se eligen los valores más cercanos a cero en el flanco de subida o de bajada de cada señal. Una vez seleccionados, se busca el valor de estos puntos en el vector tiempo ya que para el cálculo desfase es necesario tener estos valores (*t1* y *t2*) en dicha unidad de medición.

$$desfase = \left(\frac{|t1 - t2|}{T} * 360 \right)$$

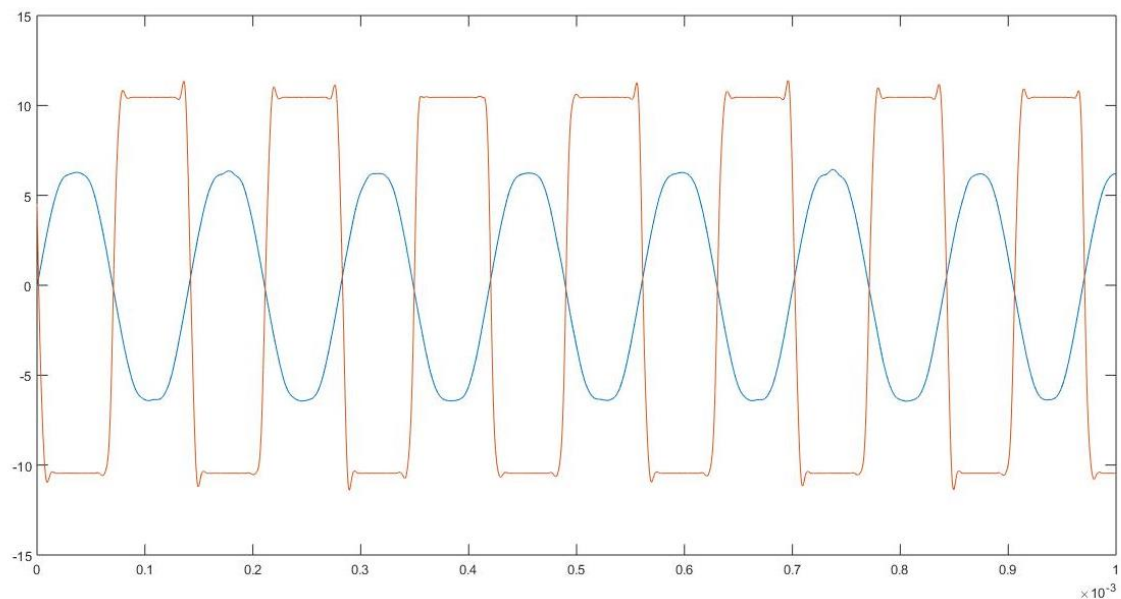
3.2.4 Osciloscopio (graficación)

Esta función se realiza con el fin de tener una visualización similar a la de los osciloscopios con los que se trabaja en la universidad. Esto debido a que la toma de datos con la myDAQ no se hace de manera secuencial, sino que la tarjeta toma capturas de las señales durante un tiempo determinado y por ende, debido a la frecuencia de las señales, la gráfica no empieza en el mismo punto todo el tiempo (ver Figura 19). Gracias a la función anterior se toma como referencia el valor más cercano a cero del primer flanco de subida de la señal del embobinado primario (señal seno) en cada una de las capturas, para que desde ese punto siempre se grafiquen las señales adquiridas, ahora en un periodo de tiempo de 1 ms. Valor que se asigna a una variable (tiempo) que se crea teniendo en cuenta la cantidad de muestras obtenidas después de remuestrear las señales.

Luego de haber creado el vector tiempo, este se traspone para que quede dispuesto en un vector columna, ya que los datos de las señales son almacenados de la misma manera; este proceso se hace para evitar conflictos entre los vectores a la hora de graficarlos. Realizado el paso anterior, se procede a ubicar la posición en la que se

encuentra el valor más cercano a cero del primer flanco de subida de la señal seno dentro del vector de las muestras tomadas (remuestreo1). Desde este punto y durante 1ms se graficarán tanto la señal del embobinado primario como la del secundario, garantizando de esta manera que la visualización de las señales y sus cambios en amplitud y desfase se observen de forma continua y no como si fueran imágenes superpuestas, de esta forma se ofrece una mejor experiencia al usuario en cuanto a la visualización de las señales. Después de hacer este proceso la cantidad de muestras almacenada en cada captura y para cada señal va a ser de 10.001.

Figura 20. Gráfica estilo osciloscopio de las señales adquiridas



Fuente: Autores, realizado con MATLAB.

3.2.5 Red Neuronal

Esta función es la encargada de entrenar cada red neuronal que es utilizada en el proyecto; cada una se entrena basada en el modelo de perceptrón multicapa. Para realizar este proceso se crean unas bases de datos a partir de las muestras tomadas por cada captura de la myDAQ (mostradas en la anterior función) de la señal del embobinado secundario y cada una se guarda en un cuadro de Excel para luego ser ordenadas por grupos dependiendo de la distancia a la cual está ubicado el metal y el tipo de material; cada tipo de metal posee su propia base de datos en donde cada una está compuesta por grupos de cinco mediciones para cada distancia tomada. Después de tener las bases de datos para las mediciones, se procede a crear las bases de datos de los *target* que son los patrones de salida en

valores binarios con los que se controla la red y que también se debe aprender durante el entrenamiento, este tipo de entrenamiento se conoce como entrenamiento supervisado.

Uno de los parámetros necesario para un buen entrenamiento de la red es la capa oculta, la cual ayuda a que el resultado que genere la red sea un poco más preciso. Esta capa contiene un número determinado de neuronas, el cual se calcula de manera aproximada siguiendo la regla de la pirámide geométrica.

$$h = \sqrt{m * n}$$

Donde h = # inicial de neuronas en la capa oculta.

m = # de neuronas de salida.

n = # de neuronas de entrada.

El número de neuronas de entrada está determinado por la cantidad de muestras de la señal en cada captura, luego de ser remuestreadas y pasar por la función **osciloscopio**; como se menciona anteriormente, este valor es de 10.001 muestras. El número de neuronas de salida está dado por la cantidad de “bits” que se le asignaron a los target (9).

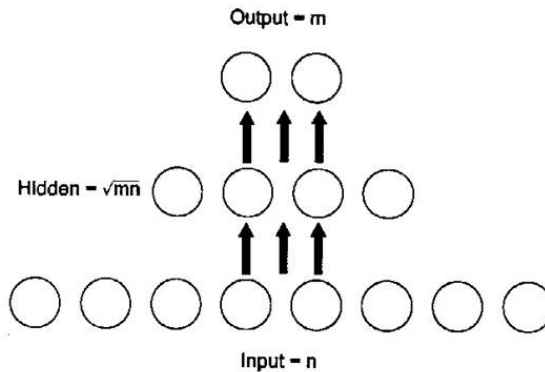
Con estos datos obtenidos se tiene:

$$h = \sqrt{9 * 10.001} \cong 300 \text{ neuronas para la capa oculta}$$

Este cálculo no determina que el valor obtenido sea con el que mejor trabaje la red a la hora de ser entrenada, pues hay que tener en cuenta que un número excesivo de neuronas en la capa oculta puede ser causante de *overfitting* (la red particulariza, no generaliza); por el contrario, un número demasiado pequeño de neuronas puede ser causante de *underfitting* (la red podría no resolver el problema)²¹.

²¹ <https://es.slideshare.net/mentelibre/diseo-de-redes-neuronales-multicapa-y-entrenamiento>

Figura 21. Topología de una red neuronal

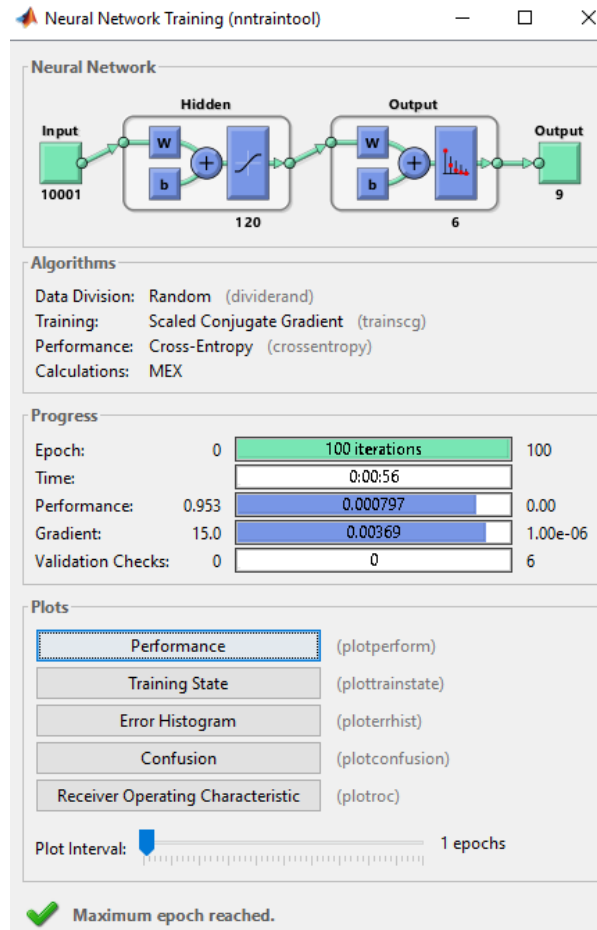


Fuente: <http://aci710.blogspot.com/2013/06/>

Luego de obtener estos 3 datos (h , n y m) se procede a hacer uso de la función *nntraintool* (Neuronal Network Training Tool) para realizar el entrenamiento de la red. Esta herramienta es una GUI que permite observar de manera didáctica el entrenamiento y permite hacer seguimiento al rendimiento con el que la red va a funcionar (ver Figura 22). Para este proceso se debe tener en cuenta que los vectores de la base de datos de entrada (señal del embobinado secundario) y de salida (*target*) deben tener la misma cantidad de columnas (mediciones); esto quiere decir que, si una base de datos contiene 15 mediciones, la otra debe tener el mismo valor.

Es importante tener en cuenta que las redes neuronales artificiales deben ser entrenadas tantas veces como sea necesario para obtener un buen resultado al momento de implementarlas, ya que con pocos entrenamientos se observa que el rendimiento de la red no alcanza un valor considerable y debido a esto la respuesta genera una serie de inconsistencias cuando en la entrada se hacen pruebas con datos que son similares. Para este proyecto se entrenaron redes neuronales independientes para cada tipo de metal con su respectivo *target*, realizando varias series de entrenamientos hasta conseguir un buen rendimiento, el cual posteriormente se comprueba con las pertinentes pruebas de laboratorio.

Figura 22. Interfaz gráfica del entrenamiento de las redes neuronales

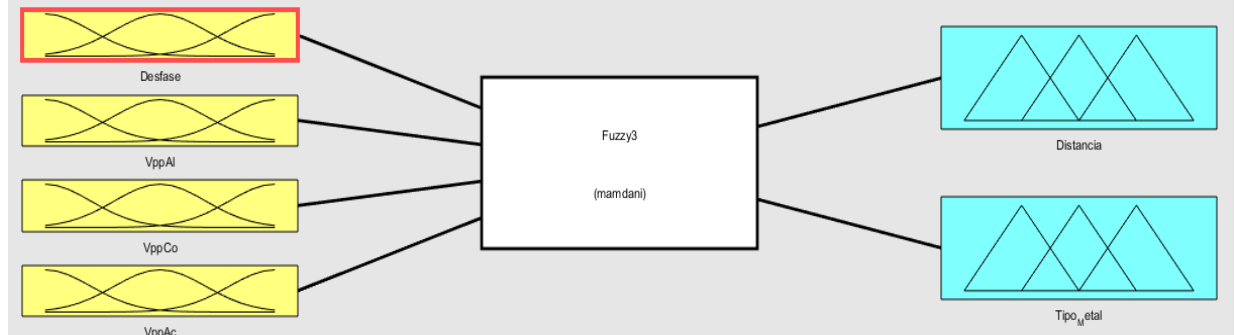


Fuente: Autores, realizado con nntraintool de MATLAB.

3.2.6 Lógica Difusa (Fuzzy)

La configuración de la lógica difusa cuenta con cuatro (4) funciones de membresía de entrada y dos (2) de salida (ver Figura 23). Una de las funciones de entrada es *Desfase* que está compuesta por los diferentes rangos de ángulo de desfase; las otras 3 corresponden a los *Vpp* que tiene la señal dependiendo del tipo de material y la distancia a la cual se encuentra el objeto. Las funciones de salida están dadas por la distancia y el tipo de metal. Cada una de estas funciones de membresía está compuesta por determinadas variables que va a manejar de manera interna y las cuales se hicieron en base a los datos de la Tabla 4; posteriormente con estos valores se procede a hacer las reglas con las que va a funcionar la lógica.

Figura 23. Esquema de la lógica difusa implementada



Fuente: Autores, realizado con Fuzzy Logic Designer de MATLAB.

Las reglas funcionan como condicionales *if* que necesitan de dos variables de entrada (ángulo de desfase y Vpp) y dependiendo de ellas la lógica va a dar respuesta al tipo de metal y distancia a la que se encuentra (ver Figura 24) al momento de ser detectado.

Figura 24. Reglas implementadas para la lógica difusa

1. If (Desfase is dAl) and (VppAl is dAl25) then (Distancia is distancia_25)(Tipo_Metal is Al) (1)
2. If (Desfase is dAl) and (VppAl is dAl0) then (Distancia is Distancia_0)(Tipo_Metal is Al) (1)
3. If (Desfase is dAl) and (VppAl is dAl4) then (Distancia is distancia_4)(Tipo_Metal is Al) (1)
4. If (Desfase is dAl) and (VppAl is dAl5) then (Distancia is distancia_5)(Tipo_Metal is Al) (1)
5. If (Desfase is dAl) and (VppAl is dAl6) then (Distancia is distancia_6)(Tipo_Metal is Al) (1)
6. If (Desfase is dAl) and (VppAl is dAl7) then (Distancia is distancia_7)(Tipo_Metal is Al) (1)
7. If (Desfase is dAl) and (VppAl is dAl8) then (Distancia is distancia_8)(Tipo_Metal is Al) (1)
8. If (Desfase is dAl) and (VppAl is dAl9) then (Distancia is distancia_9)(Tipo_Metal is Al) (1)
9. If (Desfase is dCo) and (VppCo is dCo25) then (Distancia is distancia_25)(Tipo_Metal is Co) (1)
10. If (Desfase is dCo) and (VppCo is dCo4) then (Distancia is distancia_4)(Tipo_Metal is Co) (1)
11. If (Desfase is dCo) and (VppCo is dCo5) then (Distancia is distancia_5)(Tipo_Metal is Co) (1)
12. If (Desfase is dCo) and (VppCo is dCo6) then (Distancia is distancia_6)(Tipo_Metal is Co) (1)
13. If (Desfase is dCo) and (VppCo is dCo7) then (Distancia is distancia_7)(Tipo_Metal is Co) (1)
14. If (Desfase is dCo) and (VppCo is dCo8) then (Distancia is distancia_8)(Tipo_Metal is Co) (1)
15. If (Desfase is dAc) and (VppAc is dAc0) then (Distancia is Distancia_0)(Tipo_Metal is Ac) (1)
16. If (Desfase is dAc) and (VppAc is dAc25) then (Distancia is distancia_25)(Tipo_Metal is Ac) (1)
17. If (Desfase is dAc) and (VppAc is dAc4) then (Distancia is distancia_4)(Tipo_Metal is Ac) (1)

Fuente: Autores, realizado con Fuzzy Logic Designer de MATLAB.

Para efecto de las reglas no se usan las cuatro funciones de membresía de manera simultánea para las entradas, pues las 3 que contienen los valores de Vpp para cada tipo de metal (VppAl, VppCo y VppAc) en algunos casos tienen rangos similares para la misma distancia; es por ello que en el inicio de la función *fuzzy* de MATLAB (ver **Anexo 10**) se inicializan estas 3 variables en cero (0). Luego se procede a darle un manejo pertinente a dichas variables para que mediante una serie de condicionales anidados, la variable *vpp* (que contiene el voltaje pico a pico de la señal del embobinado secundario) reemplace la variable del metal

correspondiente, mientras que las dos variables de los otros metales se mantienen en 0. De esta forma se evita que en el momento del funcionamiento de la lógica se haga uso de dos de esas funciones de membresía y arrojen resultados erróneos con los cuales no se va a poder lograr una adecuada discriminación.

3.2.7 Interfaz Gráfica (GUI)

Por último, todos los códigos de los ítems del apartado de software mencionados anteriormente se guardaron como funciones, las cuales son llamadas en un sólo código que unifica todos los demás (interfaz). Este código es el que se compila cuando se ejecuta la interfaz gráfica que se realiza con GUI de MATLAB, de manera secuencial y en el orden mencionado con anterioridad.

Al ejecutar la interfaz no se observa ningún tipo de información suministrada al usuario a pesar de que todo el sistema se encuentra en funcionamiento. Esto debido a que se debe seleccionar uno de los dos métodos trabajados en el proyecto (redes neuronales o lógica difusa). Al hacerlo inmediatamente se mostrará al usuario la siguiente información (ver Figura 25):

- A. Tipo de metal detectado.
- B. Imagen del tipo de material detectado.
- C. Distancia a la cual se encuentra el objeto.
- D. Ángulo de desfase y voltaje pico a pico de las señales.
- E. Gráfica de las señales detectadas.

Estos datos se muestran en tiempo real, lo cual garantiza al usuario ver los cambios que se presentan cuando se detectan diferentes tipos de metal a determinadas distancias. Para ello, las funciones se ejecutan una y otra vez dentro un ciclo *while* hasta que el usuario decida detener el proceso con el botón *stop*. Este “rompe” el ciclo, se dejan de adquirir datos con la myDAQ y se oculta toda la información que se muestra en la interfaz. Por otro lado, debido a que las personas que a menudo usan los detectores de metales no están acostumbradas a ver tanta información mientras lo usan en campo, se decide utilizar un *check box* con el cual el usuario puede decidir si quiere o no ver la gráfica de las señales. Esto debido a que ellos se van a enfocar más en el resto de la información que se suministra y no va a ser relevante observar la dinámica de la gráfica, lo que para efectos del proyecto no resulta de igual manera, pues del comportamiento de las señales es que nace todo el proceso en el que se basa el diseño y funcionamiento del prototipo.

Figura 25. Interfaz gráfica diseñada para el proyecto



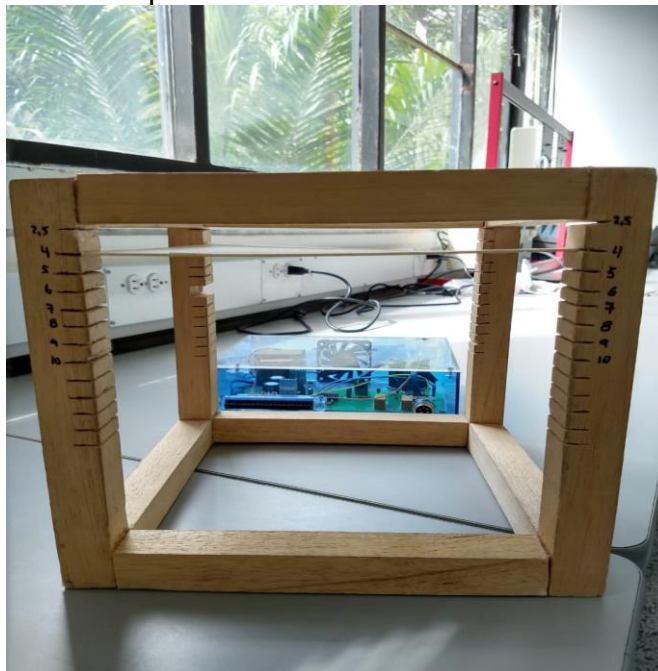
Fuente: Autores, realizado con GUI de MATLAB.

4. PRUEBAS DEL PROTOTIPO

4.1 PRUEBAS DE LABORATORIO

Inicialmente se realizan pruebas del prototipo en el laboratorio de control de la universidad y con ayuda de un soporte construido para hacer las mediciones a una distancia determinada (ver Figura 26). Este soporte fue diseñado teniendo en cuenta las dimensiones del sensor y para que este pudiera ser apoyado sobre la estructura ya que cuenta con una serie de ranuras hechas por separaciones de aproximadamente 1 cm y en las cuales encaja una bandeja plástica sobre la cual se colocan las láminas de los metales utilizados para la discriminación, evitando así realizar mediciones con el sensor en el aire y garantizando que todas las muestras se tomen a la misma distancia. Hay que tener en cuenta que todas las pruebas realizadas se hacen en base al comportamiento de la señal que se recibe del embobinado secundario del sensor.

Figura 26. Soporte utilizado para realizar mediciones de las bases de datos



Fuente: Autores.

Teniendo en consideración lo anterior, se proceden a realizar una cantidad considerable de mediciones con las que posteriormente se van a alimentar las bases de datos para cada tipo de metal y las cuales fueron mencionadas en el apartado de *Redes neuronales (3.2.5)*. Cada metal arroja una serie de resultados

que dependen de las características intrínsecas que posee y de la distancia a la que se encuentra. Estos valores obtenidos se encuentran asignados en la Tabla 4 la cual se hace a partir de una serie de mediciones con láminas de metal de igual tamaño para lograr así una comparativa y en la que se puede observar que no todos los metales lograron ser detectados a la misma distancia; con lo que se ratifica que entre mayor sea la conductividad eléctrica del metal, mayor es la distancia a la que se puede detectar.

Para el cálculo del voltaje pico a pico se suma el valor máximo y mínimo de la señal (canal2), los cuales se obtienen de la siguiente manera:

$$vpp = \max(\text{canal2}) + \text{abs}(\min(\text{canal2}))$$

Después de obtener estos valores se procede a hacer las pruebas pertinentes para cada uno de los métodos utilizados y así comprobar su correcto funcionamiento.

Tabla 4. Resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio

DISTANCIA (cm)	ALUMINIO		COBRE		ACERO	
	ÁNGULO DE DESFASE (°)	Vpp (v)	ÁNGULO DE DESFASE (°)	Vpp (v)	ÁNGULO DE DESFASE (°)	Vpp (v)
0	173 – 180	23.5 – 24	-149.5 – (-157)	22.6 – 23	-143.5 – (-156)	21.3 – 21.5
2.5	145 – 152	21.9 – 22.2	162 – 164.5	21 – 21.2	-121.2 – (-124.5)	7.9 – 8.1
4	125 – 129	21.4 – 22	157 – 161.2	12.5 – 12.8	-121.1 – (-124.8)	3.9 – 4.1
5	112 – 113.5	16.5 – 17	160 – 164	7.3 – 7.5	-112.9 – (-118.9)	2.3 – 2.6
6	104.5 – 114.1	9.5 – 10	164.5 – 169.5	4.4 – 4.6	-80 – (-93)	1.3 – 1.5
7	113.3 – 117.3	6 – 6.4	173 – 180	2.7 – 2.9	Sin Detectar	Sin Detectar
8	116.4 – 122.5	3.5 – 3.7	196.5 – 222	1.5 – 1.7	Sin Detectar	Sin Detectar
9	122 – 127.1	1.9 – 2.1	Sin Detectar	Sin Detectar	Sin Detectar	Sin Detectar
10	129.5 – 160	1 – 1.3	Sin Detectar	Sin Detectar	Sin Detectar	Sin Detectar

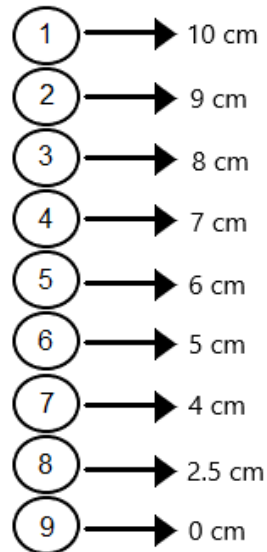
Fuente: Autores.

4.1.2 Resultados de las redes neuronales

Las redes neuronales se entrenaron siguiendo el modelo de reconocimiento de patrones y de manera supervisada, como se explicó con anterioridad. Para ello se hace uso de un *target* (vector creado para que dependiendo de un patrón de entrada se dé su correspondiente salida); con ello se mejora la capacidad de respuesta de la red. El *target* está compuesto por 9 bits que en conjunto van a determinar la distancia a la que se encuentra el metal detectado (ver Figura 27), en donde el bit de menor peso (1) determina la distancia más lejana a la que se el metal detectado, mientras que el bit de mayor peso (9) determina la distancia más cercana. De esta

manera cada vez que en la red se cargue una entrada, la salida va a entregar un valor en binario que debe corresponder al *target* que se le ha asignado.

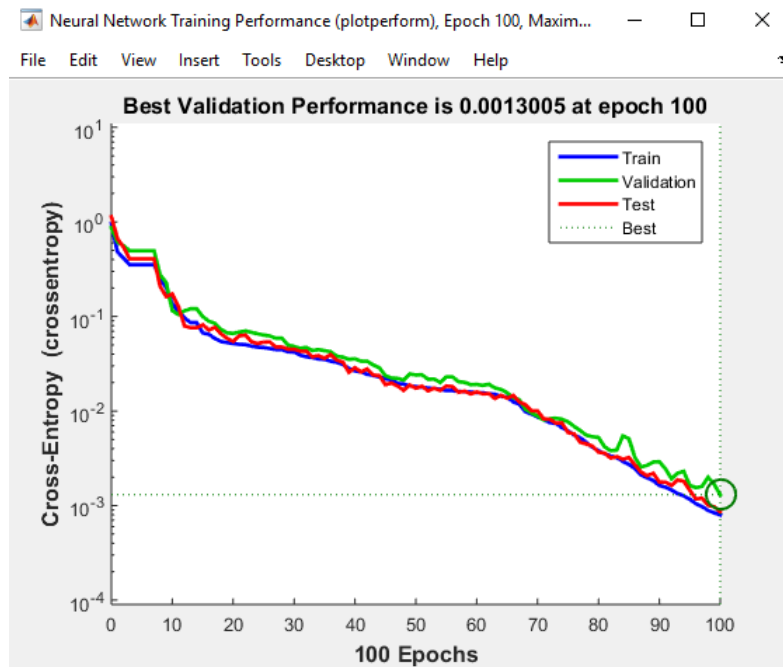
Figura 27. Estructura del *target*



Fuente: Autores.

Estos valores en las salidas dependen del rendimiento (performance) con el cual haya quedado entrenada la red (ver Figura 28). Debido a que en la mayoría de pruebas los valores no son exactos, se decide redondear el resultado obtenido en todos los casos para que de esta manera el proceso de la discriminación sea más sencillo. Seguidamente, para validar los resultados se decide convertir cada número binario que se obtenga a la salida, en su respectivo número decimal; para ello es necesario trasponer el vector del *target* ya que tanto las entradas, como las salidas están dispuestas en vectores columna y de esta manera MATLAB no hace la conversión de los sistemas de numeración. De esta manera se facilita aún más el procesamiento de la información, obteniendo la siguiente información:

Figura 28. Gráfica del rendimiento de la red neuronal



Fuente: Autores, realizado con nntraintool de MATLAB.

Tabla 5. Resultados obtenidos con MATLAB para la discriminación de la distancia

Salidas Red Neuronal		
# Binario	# Decimal	Distancia (cm)
100000000	1	10
010000000	2	9
001000000	4	8
000100000	8	7
000010000	16	6
000001000	32	5
000000100	64	4
000000010	128	2.5
000000001	256	0

Fuente: Autores.

Con estos valores se procede mediante ciclos a mostrar en la interfaz gráfica la distancia a la cual se encuentra el metal dependiendo del valor obtenido luego de hacer su respectiva conversión.

La razón por la cual solo se implementa el *target* para discriminar la distancia y no el tipo de metal es porque, después de una cantidad prudente de pruebas se observa que la red da respuestas erróneas al encontrar similitudes entre varias señales almacenadas en las bases de datos. Originalmente el *target* era un vector

compuesto por 12 neuronas (bits), en donde 3 de ellas determinaban el tipo de metal del objeto detectado, pero al ver los resultados obtenidos se decide suprimirlas y mediante unos condicionales ayudar un poco a la red para generar con un poco más de precisión este resultado. Los condicionales se hacen basados en la información de la Tabla 4 y en cada uno de ellos, al cumplirse las condiciones, se carga la respectiva red que contiene la información del metal detectado y con la cual se logra hacer una buena discriminación en cuanto a distancia.

4.1.3 Resultados de la lógica difusa

El funcionamiento de la lógica difusa depende de unos condicionales a los cuales se hace referencia en el apartado 3.2.6. Dependiendo de ellos y gracias a las reglas programadas basadas en los resultados obtenidos, se encuentra que las salidas generan la siguiente información:

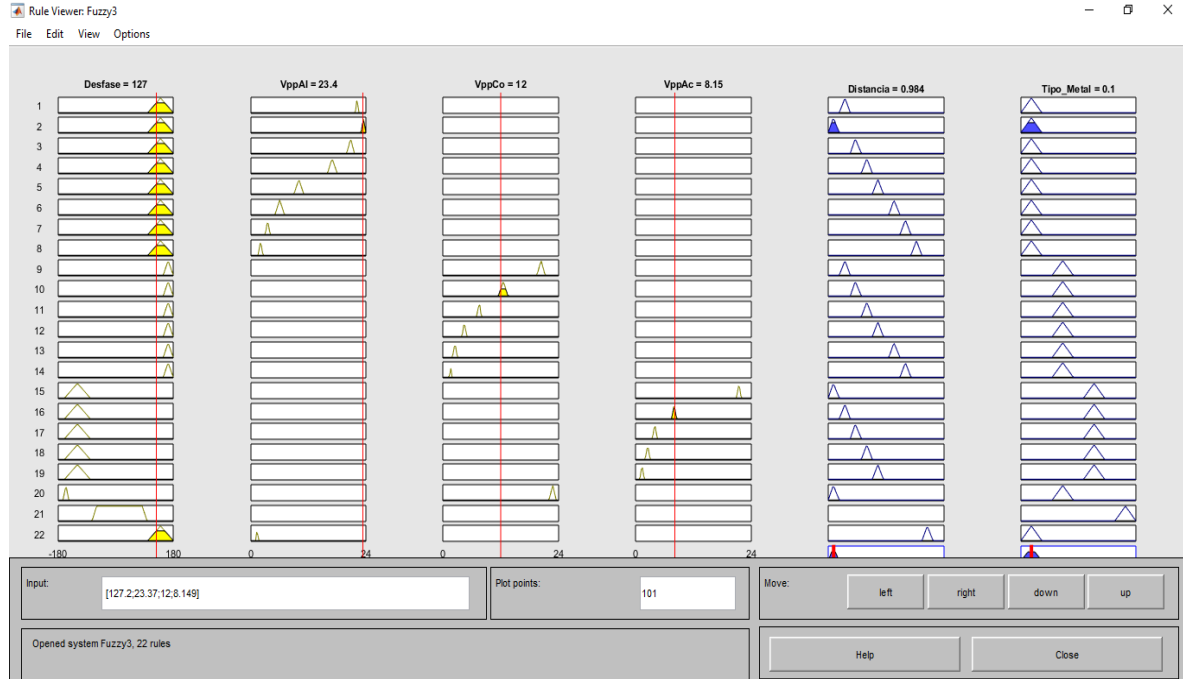
Tabla 6. Resultados de la lógica difusa

Salidas			
Distancia		Tipo de Metal	
Rango	Equivalencia (cm)	Rango	Equivalencia (tipo de material)
0-2	0	0 - 0.2	Aluminio
2-4	2.3	0.3 – 0.5	Cobre
4-6	4	0.55	Sin Detectar
6-8	5	0.6 – 0.8	Acero
8-10	6	0.9 – 1.1	Otros metales
10.5	Sin Detectar	Sin Uso	Sin Uso
11-13	7	Sin Uso	Sin Uso
13-15	8	Sin Uso	Sin Uso
15-17	9	Sin Uso	Sin Uso
17-19	10	Sin Uso	Sin Uso

Fuente: Autores.

Con base en estos datos y la ayuda de *Fuzzy Logic Designer* se simula el funcionamiento de las reglas implementadas (ver Figura 29). Se realizan varias simulaciones para cada una de las reglas (22) para ver el comportamiento de las salidas y comprobar que el resultado que entregan es el indicado; con esto se procede a guardar el esquema diseñado para luego ser cargarlo en la función indicada (Fuzzy).

Figura 29. Funcionamiento de las reglas implementadas para la lógica difusa



Fuente: Autores, realizado con Fuzzy Logic Designer de MATLAB.

Posteriormente se procede a hacer pruebas en MATLAB con las muestras almacenadas en las bases de datos de cada metal. Se cargan aleatoriamente diferentes tipos de señales y se observa que el comportamiento en general de la lógica difusa es óptimo en cuando al resultado que entrega para las dos variables (distancia y tipo de metal).

4.1.4 Conclusiones de las pruebas de laboratorio

Al probar por separado la eficiencia de los dos métodos implementados para el proyecto se observa que la lógica difusa tiene un mejor rendimiento respecto a las redes neuronales, a pesar de que su configuración es un poco más sencilla. Las redes neuronales son muy variables en sus resultados ya que las señales obtenidas en varios casos son muy parecidas, generando una incertidumbre considerable a pesar de haber quedado entrenadas con un buen rendimiento general (performance). Por el contrario, la lógica difusa se basa en dos variables puntuales con valores fijos (vpp y desfase) las cuales toma para el procesamiento y dependiendo de ellas genera las respuestas que en todos los casos fueron asertivas, puesto que se logra una discriminación deseada y por lo cual se decidió tomar como el método a trabajar con este sistema implementado.

4.2 PRUEBAS DE CAMPO

Para las pruebas de campo se simula un pequeño terreno que contiene el metal enterrado en él, para ello se elaboran diferentes modelos de minas antipersonal. Para los 4 prototipos se emplean materiales plásticos para no interferir en las mediciones del sensor y así comprobar que el sistema funciona de manera óptima (ver Figura 30). Cada prototipo contiene las placas de metal con las cuales se hicieron las pruebas de laboratorio, pero en este caso hay tierra tanto encima como debajo de ellas predisuestas de manera tal que cada una genere una respuesta diferente tanto para el tipo de metal como para la distancia a la que se encuentran. Además de la tierra, se hacen pruebas tapando las placas con arcilla húmeda e icopor y dando como resultado una buena discriminación en cada medición realizada.

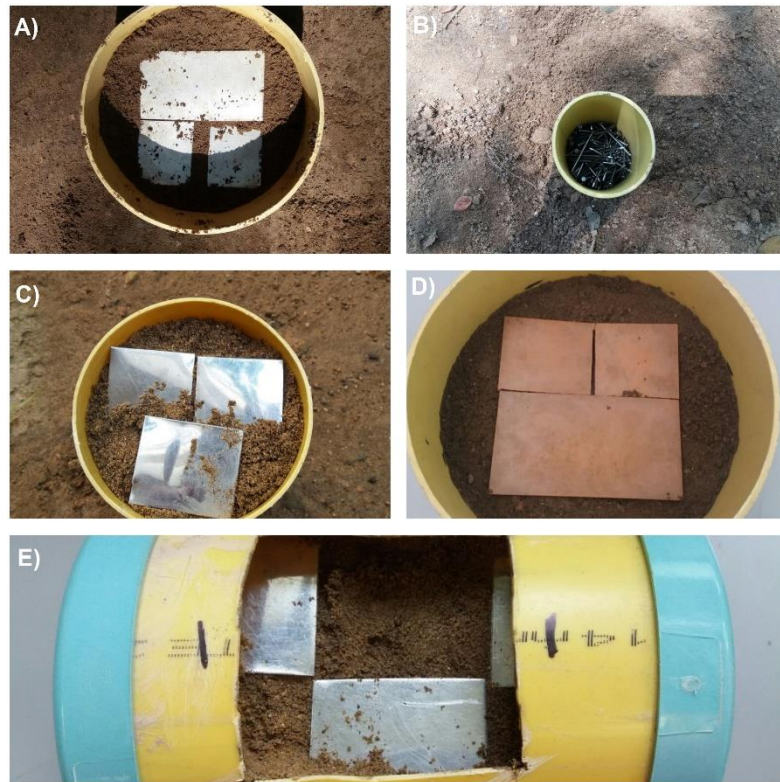
Figura 30. Prototipos de minas antipersonal elaboradas para las pruebas de campo



Fuente: Autores.

A pesar de los obstáculos interpuestos entre el sensor y las placas metálicas, el sistema diseñado e implementado tuvo un buen comportamiento arrojando los resultados esperados tanto para las redes neuronales como para la lógica difusa como para las redes neuronales. Las mediciones hechas en campo varían muy poco respecto a las hechas en laboratorio y con ello se concluye que el prototipo de minas antipersonal empleando sistemas inteligentes tiene una buena eficiencia para realizar más proyectos de investigación basados en este.

Figura 31. Contenido de los prototipos de minas antipersonal



Fuente: Autores.

En la Figura 31 se pueden observar los prototipos de minas diseñados, los cuales contienen:

- A. Aluminio.
- B. Punteras (metralla).
- C. Acero.
- D. Cobre.
- E. Acero.

El terrero en el cual toman lugar las pruebas de campo es en los territorios de la Universidad Surcolombiana, el cual se trata de un ambiente seco con un nivel de vegetación media. Se dispone a cavar un hueco de unos aproximados 15 cm de diámetro con el fin de ubicar en este, el prototipo de mina elaborado. Una vez colocada la mina se procede a instalar el sistema de detección de minas implementado y a realizar las mediciones mediante un barrido con el sensor.

Figura 32. Prueba de campo del sistema



Fuente: Autores

5. CONCLUSIONES

- Se realizó una investigación exhaustiva sobre las técnicas de detección de minas antipersonal las cuales indicaron que la tecnología VLF es una buena opción para tratar esta problemática. Adicional a la implementación de un sistema inteligente, se obtiene una potente herramienta que logra discriminar entre los diferentes metales comunes en las minas antipersonal.
- Se logró implementar el hardware para el funcionamiento del sistema, el cual permite capturar las distintas señales obtenidas mediante el detector de metales. Esto gracias a la generación de señales de alimentación del sensor con la potencia y frecuencia necesaria para su operación ya que a partir de esta se obtiene la información que sirve como insumo al sistema para su desarrollo.
- Se pudo observar en las pruebas de campo, en las cuales se enterraron los diferentes tipos de materiales, que el sensor tiene un rango de detección óptimo independiente del elemento que se interpone entre el objeto y él, que para este caso fue tierra y plástico. Los valores que se obtienen con los prototipos de minas difieren muy poco de los almacenados en la base de datos.
- Luego de realizar las pruebas de campo mencionadas anteriormente, se observó que el método que mejores resultados mostró fue el de la **lógica difusa**, ya que en la mayoría de los casos brinda la información correcta sobre el tipo de metal que se está detectando y a la distancia que se encuentra.
- Con las redes neuronales artificiales no se obtuvo el resultado esperado debido al método de entrenamiento utilizado (supervisado). Esto se debe a que se basa en el reconocimiento de patrones y en las bases de datos hay señales muy similares almacenadas, lo cual genera una incertidumbre para la red y por ello se obtienen resultados erróneos.
- Para efectos de las mediciones en el laboratorio se pudo observar que el sensor es muy susceptible a los cambios del tamaño del área y de la posición en la que se encuentre el objeto. Debido de esto, los voltajes pico a pico y los ángulos de desfase varían considerablemente estando el objeto a una misma distancia y siendo del mismo tipo de material.

6. RECOMENDACIONES

- Para mejorar la funcionalidad del dispositivo elaborado es oportuno implementar un sistema de posicionamiento global (GPS) ya que con esto se complementaría la información dada por el software. Es decir, se tendría la posición exacta del tipo de metal encontrado y con esto se podría realizar un mapeo de los metales encontrados en alguna zona específica.
- Una vez se complemente la información obtenida se puede hacer compactar para hacer un back up y guardar dicha información. Con esto se tendrá acceso a la información suministrada por las detecciones realizadas en un periodo definido de tiempo y realizar el análisis que se desee implementar en cualquier momento.
- Debido a la importancia y la aplicabilidad del Internet de las cosas (IoT), se puede mejorar el sistema implementado mediante el acceso remoto desde otro dispositivo, lo cual evitaría la necesidad de estar en el momento en el que realice las distintas mediciones o detecciones ya que se estaría haciendo el seguimiento desde el dispositivo conectado al sistema.
- Se sugiere para proyectos futuros mejorar la portabilidad del dispositivo. Esto se puede lograr sustituyendo la etapa de alimentación de la placa por unas tarjetas que generen el mismo voltaje y amperaje, pero que son más compactas y además su precio no es muy elevado. Adicional a esto, el circuito de la placa de puede reorganizar y realizar con pistas a doble capa, reduciendo así su tamaño original.
- Realizar mediciones con una variedad más amplia de metales para almacenar nuevas bases de datos y así lograr que el sistema discrimine otros tipos de materiales.
- Buscar información para la implementar el sistema con otro tipo de sensor basado en tecnologías más modernas, como es el caso de los sensores láser y GPR (Ground Penetration Radar), los cuales brindan una mayor cantidad de información para realizar un mapeo del terreno con el objeto detectado. Esto debido a que el detector de metales carece de esta característica por lo que su funcionamiento sólo se remite a la discriminación del metal del cual está compuesta la mina.

BIBLIOGRAFÍA

Dirección para la acción integral contra minas antipersonal, Descontamina Colombia (2019), Víctimas de minas antipersonal y municiones sin explotar.

Ahmed El-Shenawy (2012) Arab Academy for Science, Technology and Maritim Transport, Egipto. "The Construction of Autonomous Electric Vehicle for Landmine Detection and Localization".

Zainud-Deen, El-Hadad, Awadalla (2014) Menoufia University, Egipto. "Landmines Detection Using Finite-Difference Time-Domain and Artificial Neural Networks".

Pino, Yady (2009) Universidad Nacional de Colombia, Colombia. "Determinación de Técnicas de Detección de Explosivos Óptimas para el Departamento de Antioquia".

Guzmán, Roa (2004) Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá - Colombia. "Sistema de Discriminación de Metales".

Mosquera, Flórez, Pérez (2007) Universidad Surcolombiana, Neiva - Colombia. "Diseño e Implementación de un Robot Detector de Minas Antipersonas Metálicas Remotamente Controlado".

Garrett Metal Detectors. Owner's Manual ACE 150/250. (2007)

Exar corporation. Hoja de datos XR-2206. Disponible en internet:
https://www.sparkfun.com/datasheets/Kits/XR2206_104_020808.pdf

Ecured. Circuito integrado TDA 2030. Disponible en internet:
https://www.ecured.cu/Circuito_integrado_TDA2030

Electrónica Unicrom. Comparador con amplificador operacional. Disponible en internet: <https://unicrom.com/comparador-con-amplificador-operacional/>

Mathworks. Matlab. Disponible en: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>

Mathworks. Fuzzy logic toolbox. Disponible en:
<https://la.mathworks.com/products/fuzzy-logic.html>

Mathworks. Deep learning toolbox. Disponible en:
<https://la.mathworks.com/help/deeplearning/ref/nnstart.html>

Mathworks. GUI de Matlab. Disponible es:
<https://la.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>

René Reynaga, William Mayta. Introducción al reconocimiento de patrones. Disponible en: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2009000100005

Carlos Alberto Ruiz, Martha Susana Basualdo. Redes neuronales: conceptos básicos y aplicaciones. Disponible en:
https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/quimica/5_anio/orientadora1/monografas/matich-redesneuronales.pdf

Carlos Gonzales Morcillo. Logica difusa: una introducción práctica. Disponible es:
http://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf

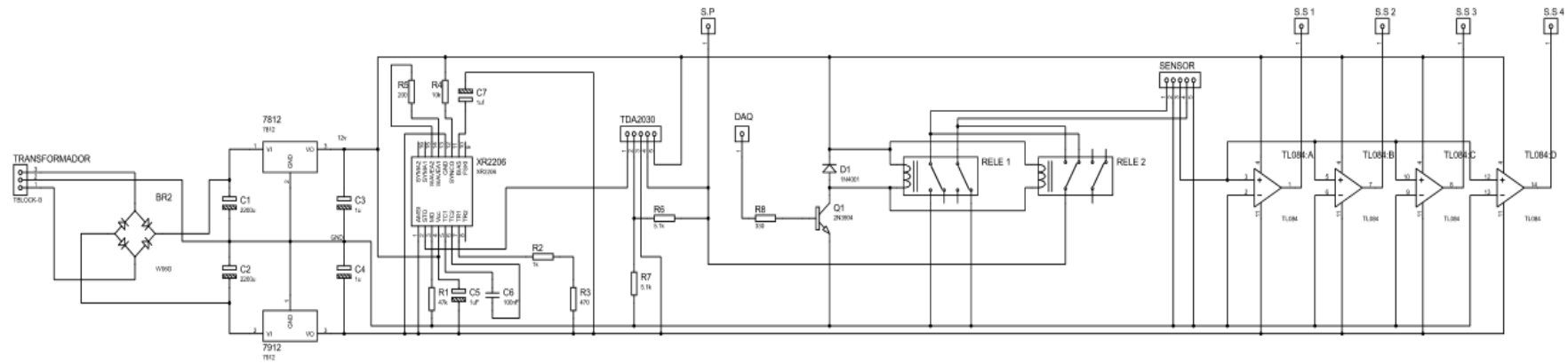
Inventable. Como controlar un relé con un transistor. Disponible es:
<https://www.inventable.eu/controlar-rele-con-transistor/>

Mathworks. Remuestreo de señales de muestreo uniforme. Disponible es:
<https://la.mathworks.com/help/signal/examples/resampling-uniformly-sampled-signals.html>

Escom. Diseño de redes neuronales multicapa y entrenamiento. Disponible en:
<https://es.slideshare.net/mentelibre/diseo-de-redes-neuronales-multicapa-y-entrenamiento>

ANEXOS

Anexo 1. Esquema circuital del hardware diseñado



Anexo 2. Tabla completa de mediciones para el aluminio

Aluminio		
Distancia (cm)	Desfase (°)	Vpp (v)
0	174.526	23.679
	178.525	23.578
	175.071	23.811
	174.226	23.941
	178.144	23.853
2.5	147.479	21.949
	151.216	22.079
	148.187	22.119
	146.636	22.063
	148.403	22.104
4	125.833	21.446
	126.784	21.513
	128.661	21.507
	125.103	21.480
	128.961	21.903
5	112.526	16.830
	112.610	16.810
	113.093	16.805
	113.430	16.883
	112.173	16.824
6	114.081	9.925
	109.604	9.629
	111.241	9.826
	104.962	9.811
	111.631	9.948
7	117.210	6.315
	113.406	6.104
	115.288	6.219
	113.924	6.185
	114.987	6.279
8	121.928	3.621
	122.056	3.570
	116.417	3.559
	122.478	3.517
	120.147	3.639
9	127.058	1.924
	122.079	2.015
	119.702	1.959
	122.373	2.027

	122.818	2.017
10	129.725	1.090
	135.498	1.027
	158.364	1.074
	149.450	1.122
	145.741	1.106

Anexo 3. Tabla completa de mediciones para el cobre

Cobre		
Distancia (cm)	Desfase (°)	Vpp (v)
0	-153.021	22.774
	-149.685	22.966
	-156.875	22.959
	-154.231	22.983
	-155.076	22.606
2.5	162.593	21.155
	162.162	21.181
	162.528	21.160
	162.041	21.170
	164.239	21.175
4	161.041	12.600
	160.466	12.671
	157.021	12.660
	159.709	12.653
	158.989	12.734
5	160.200	7.496
	163.835	7.393
	162.352	7.564
	161.652	7.436
	162.216	7.466
6	168.472	4.489
	164.647	4.425
	169.411	4.466
	165.982	4.458
	168.708	4.501
7	180	2.772
	179.411	2.726
	177.552	2.786
	173.068	2.735
	175.609	2.828
	196.646	1.585

8	202.361	1.635
	198.747	1.517
	201.940	1.537
	221.813	1.552

Anexo 4. Tabla completa de mediciones para el acero

Acero		
Distancia (cm)	Desfase (°)	Vpp (v)
0	-151.760	21.384
	-149.574	21.371
	-148.754	21.360
	-155.761	21.344
	-143.518	21.484
2.5	-124.470	8.010
	-124.340	8.027
	-122.517	8.013
	-122.256	7.994
	-121.263	8.023
4	-122.757	4.089
	-124.700	3.962
	-123.365	4.068
	-121.166	3.98
	-123.453	4.009
5	-116.911	2.407
	-118.826	2.536
	-112.915	2.398
	-114.466	2.336
	-114.585	2.386
6	-90.335	1.447
	-92.674	1.388
	-86.865	1.397
	-73.777	1.375
	-91.668	1.401

Anexo 5. Función en MATLAB para adquirir datos con NI myDAQ

```
function [grafica1, grafica2]=DAQ(DAQname, mode)
%devices = daq.getDevices %%Permite observar el listado de dispositivos
%(tarjetas DAQ) conectadas a los puertos USB del computador

%Se crea esta sesión para habilitar los pines digitales de la tarjeta
s1 = daq.createSession('ni');
addDigitalChannel(s1, DAQname, 'port0/line0', 'OutputOnly');
outputSingleScan(s1, mode);

%Se crea esta sesión para habilitar los pines análogos de la tarjeta
s = daq.createSession('ni');
addAnalogInputChannel(s, DAQname, 0, 'Voltage');
addAnalogInputChannel(s, DAQname, 1, 'Voltage');

s.Rate = 200000;

%% Acquire a Single Scan
data = s.inputSingleScan;
s.DurationInSeconds = 0.00147;
% Continúa...
%Para información completa del código, contactar a los autores.
```

Anexo 6. Función en MATLAB para remuestrear señales

```
function [remuestreo1, remuestreo2, tdl]= Resample(grafica1, grafica2)

fo=200000; %%Frec. de muestreo de la DAQ
fd=10000000; %%Frec. a la cual se quiere remuestrear la señal

[p,q]=rat(fd/fo);
remuestreo1=resample(grafica1,p,q); %Señal remuestreada del emboninado
primario
remuestreo2=resample(grafica2,p,q,5,20); %Señal remuestreada del
embobinado secundario
% Continúa...
%Para información completa del código, contactar a los autores.
```

Anexo 7. Función en MATLAB para detectar los cruces por cero de las señales

```
function [cruces, ceros, voltajes, asd]=Cruces_Cero(tdl, remuestreo1)

[longitudmc c]=size(tdl); %%Se obtiene el tamaño del vector tiempo
matrizcerosv=zeros(longitudmc,1); %%Vector de ceros del mismo tamaño del
vector tiempo
%%Ciclo para analizar los datos del embobinado primario
for i=1:longitudmc %%Se recorre toda la columna que contiene los datos de
la señal obtenida del embobinado primario
    k=remuestreo1(i,1);
    if k>=-0.08 && k<=0.08
        matrizcerosv(i)=1;
    end
end
posicionesceros=find(matrizcerosv==1); %%Se obtienen las posiciones en
las cuales se obtuvo un valor de 1
tiemposceros=tdl(posicionesceros);
longitudtc=length(tiemposceros);
%%Se obtienen los valores del vector tiempo correspondientes a las
posiciones halladas anteriormente
matrizcerost=zeros(1,longitudtc);
primervalort=tiemposceros(1);
numerofila=1;numerocolumna=1;
for m=1:longitudtc; %%Se recorre toda la columna que contiene los datos
de la señal obtenida del embobinado primario
    restdl=tiemposceros(m)-primervalort;
    if restdl<=0.0000008
        matrizcerost(numerofila,m)=tiemposceros(m);
        numerocolumna=numerocolumna+1;
    else
        numerofila=numerofila+1;
        matrizcerost(numerofila,m)=tiemposceros(m);
        numerocolumna=1;
    end
    primervalort=tiemposceros(m);
end
% Continúa...
%Para información completa del código, contactar a los autores.
```

Anexo 8. Función en MATLAB para graficar las señales estilo osciloscopio

```
function [tiempo, canal1, canal2, punto]=Osciloscopio(ceros, remuestreo1,
remuestreo2)

tiempo=0:0.0000001:0.001;
tiempo=tiempo';
f=length(tiempo);
b=length(ceros);
if abs(ceros(1,2))>0.1
    ceros=ceros(2:b,:);
end
if ceros(1,1)<ceros(1,2)
    punto=ceros(1,1);
else
    punto=ceros(2,1);
end
% Continúa...
%Para información completa del código, contactar a los autores.
```

Anexo 9. Función en MATLAB para calcular el ángulo de desfase de las señales procesadas

```
function [t1, t2, v1, v2, desfase]=Desfase(canal1, canal2, tiempo, punto)

%%Cruces por cero del primario
f=length(tiempo);
c=1;
%tiempo=0:0.0000001:0.001;
cerosp=find(-0.08<=canal1 & canal1<=0.08);
voltajes=canal1(cerosp);
tiempos=tiempo(cerosp);
longitudtc=length(tiempos);
%Se obtienen los valores del vector tiempo correspondientes a las
posiciones halladas anteriormente
matrizcerost=zeros(1,longitudtc);
primervalort=tiempos(1);
numerofila=1;
numerocolumna=1;
for m=1:longitudtc; %%Se recorre toda la columna que contiene los datos
de la señal obtenida del embobinado primario
    restd1=tiempos(m)-primervalort;
    if restd1<=0.0000008
        matrizcerost(numerofila,m)=tiempos(m);
        numerocolumna=numerocolumna+1;
    else
        numerofila=numerofila+1;
        matrizcerost(numerofila,m)=tiempos(m);
        numerocolumna=1;
    end
end
% Continúa...
%Para información completa del código, contactar a los autores.
```

Anexo 10. Función en MATLAB para ejecutar y evaluar la lógica difusa

```
function [metal, cm, foto, y]=Fuzzy(canal2, desfase)

vpp=max(canal2)+abs(min(canal2)); %Calculamos el voltaje pico a pico de
la señal del embobinado secundario

%Se inicializan las variables en 0
VppAl=0;
VppCo=0;
VppAc=0;

%Condicionales para garantizar el funcionamiento de la lógica
if desfase>=145 && desfase<=180
    if vpp>=21.8 && vpp<=24.2
        VppAl=vpp;
    elseif vpp>=1.5 && vpp<=21.2
        VppCo=vpp;
    end
end
if desfase>=102 && desfase<=140
    if vpp>=1 && vpp<=21.7
        VppAl=vpp;
    end
end
% Continúa...
%Para información completa del código, contactar a los autores.
```

Anexo 11. Función en MATLAB para entrenar las redes neuronales

```
function [SalidaDesfase, vpp, C]=Red_Neuronal(canal2)
vpp=max(canal2)+abs(min(canal2));

BaseDatosDesfase=xlsread('Acero');%Se cargan las bases de datos de los
metales a diferentes distancias
TargetDesfase=xlsread('TargetAc');%Se cargan las bases de datos de los
target respectivos para cada metal
red=patternnet([326], 'trainscg'); %Se define la cantidad de capas ocultas
de la red
red.trainParam.epochs = 1500; %Número de épocas para el entrenamiento de
la red
[red,entrenamiento]=train(red,BaseDatosDesfase,TargetDesfase);%Entrenamie
nto de la Red

end
```

Anexo 12. Función para evaluar los resultados de las redes neuronales

```
function [cm, C, foto]=Red_Prueba2(canal2, desfase)
vpp=max(canal2)+abs(min(canal2));

%Condicionales para garantizar el correcto funcionamiento de las Redes
%Neuronales
if desfase>=105 && desfase<=190
    if vpp>=21.3 && vpp<=24.3
        load('Red_Aluminio.mat');
        C='ALUMINIO';
        foto=imread('Aluminio.jpg');

        elseif vpp>=1 && vpp<=20
            load('Cobre_1.mat');
            C='COBRE';
            foto=imread('Cobre.jpg');
        end
    end

if desfase>=90 && desfase<=117
    if vpp>=3 && vpp<=21.2
        load('Red_Aluminio.mat');
        C='ALUMINIO';
        foto=imread('Aluminio.jpg');
    end
end
% Continúa...
%Para información completa del código, contactar a los autores.
```