

	GESTIÓN DE RECURSOS Y SERVICIOS BIBLIOTECARIOS	Código	FO-SB- 12/v0
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN	Página	1/1

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES):

NOMBRE(S): MIGUEL ÁNGEL APELLIDOS: CAICEDO JIMÉNEZ

NOMBRE(S): YAIR ALONSO APELLIDOS: DURAN ROZO

FACULTAD: INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

DIRECTOR:

NOMBRE(S): JOHNNY OMAR APELLIDOS: MEDINA DURAN

CODIRECTOR:

NOMBRE(S): _____ APELLIDOS: _____

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN MOTORES TRIFÁSICOS MEDIANTE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

RESUMEN

Este proyecto realizó un diseño e implementación de un banco para la detección de fallas en motores trifásicos mediante el uso de inteligencia artificial. Para ello, se realizó una investigación descriptiva y exploratoria, con un desarrollo cuantitativo. Para la recolección de información se utilizaron instrumentos de datos numéricos en la medición sistemática para su análisis e interpretación. La población y muestra no se aplicó para el desarrollo, en este caso fue universal y el objeto de estudio fue un motor de inducción trifásico. Se logró, implementar un banco para la detección de fallas en motores trifásicos mediante el uso de inteligencia artificial. Se ejecutó, la recopilación de información basada en la detección de fallas en los motores trifásicos. Seguidamente, se diseñó el sistema mecánico y electrónico basado en inteligencia artificial que le permita al estudiante realizar las prácticas para la detección de fallas en los motores trifásicos. Posteriormente, se implementó el montaje del banco didáctico comprobando el correcto funcionamiento de cada uno de sus sistemas. Finalmente, se socializaron los resultados a la comunidad académica.

PALABRAS CLAVE: motores trifásicos, banco de detección de fallas, comunidad académica

CARACTERÍSTICAS:

PÁGINAS: 122 PLANOS: _____ ILUSTRACIONES: _____ CD ROOM: 1

Elaboró		Revisó		Aprobó	
Equipo Operativo del Proceso		Comité de Calidad		Comité de Calidad	
Fecha	24/10/2014	Fecha	05/12/2014	Fecha	05/12/2014

COPIA NO CONTROLADA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN
MOTORES TRIFÁSICOS MEDIANTE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

MIGUEL ÁNGEL CAICEDO JIMÉNEZ

YAIR ALONSO DURAN ROZO

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2019

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN
MOTORES TRIFÁSICOS MEDIANTE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

MIGUEL ÁNGEL CAICEDO JIMÉNEZ

YAIR ALONSO DURAN ROZO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de

Ingeniero Electromecánico

Director:

PhD. JOHNNY OMAR MEDINA DURAN

Ingeniero Electrónico

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

SAN JOSÉ DE CÚCUTA

2019

ACTA DE SUSTENTACIÓN PROYECTO DE GRADO
MODALIDAD TRABAJO INVESTIGATIVO

FECHA: 10 de Diciembre de 2019

HORA: 04:00 P.M

LUGAR: SB 301

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TÍTULO DEL TRABAJO DIRIGIDO: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN MOTORES TRIFÁSICOS MEDIANTE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL.”.

JURADOS

Phd: JULIÁN FERREIRA JAIMES

Msc: NORBEY CHINCHILLA HERRERA

Esp: JUAN CARLOS RAMÍREZ BERMÚDEZ

DIRECTOR:

Phd. JOHNNY OMAR MEDINA DURAN

MERITORIA

NOMBRE DEL ESTUDIANTE:	CÓDIGO	CALIFICACION
MIGUEL ÁNGEL CAICEDO JIMÉNEZ	1090978	4.5
YAIR ALONSO DURAN ROZO	1090981	4.5

FIRMA DE LOS JURADOS:



VOBO. COORDINADOR COMITÉ CURRICULAR

Magdalena G.

Contenido

	pág.
Introducción	16
1. Problema	18
1.1 Título	18
1.2 Planteamiento del Problema	18
1.3 Formulación del Problema	19
1.4 Justificación	19
1.5 Objetivos	21
1.5.1 General	21
1.5.2 Específicos	21
2. Marco Referencial	22
2.1 Antecedentes	22
2.2 Marco Teórico	25
2.2.1 Maquinas eléctricas	25
2.2.1.1 Motores de inducción	26
2.2.1.2 Circuito equivalente del motor de inducción	27
2.2.2 Fallas en los motores de inducción	29
2.2.2.1 Fallas mecánicas	30
2.2.2.2 Fallas eléctricas	31
2.2.3 Inteligencia artificial	32
2.2.3.1 Lógica difusa	41
2.2.3.2 Algoritmos genéticos	41
2.2.3.3 Redes neuronales	42

2.2.4 Software.	44
2.3 Marco Conceptual	44
2.4 Marco Contextual	45
2.5 Marco Legal	46
3. Diseño Metodológico	49
3.1 Tipo de Investigación	49
3.2 Universo de la Investigación	50
4. Desarrollo del Proyecto	52
4.1 Recopilar Información Basada en la Detección de Fallas en los Motores Trifásicos	52
4.1.1 Fallas seleccionadas para desarrollar	52
4.1.2 Análisis y caracterización del motor trifásico	54
4.2 Diseño Mecánico y Electrónico para Realizar la Práctica de Detección de Fallas en Motores Trifásicos Basado en Inteligencia Artificial	63
4.2.1 Selección de la estrategia de inteligencia artificial	63
4.2.2 Selección de los componentes electrónicos	65
4.2.3 Diseño del montaje mecánico.	71
4.2.4 Diseño electrónico para la agrupación de los elementos seleccionados.	74
4.3 Implementar el Montaje del Banco Didáctico Comprobando el Correcto Funcionamiento de cada uno de sus Sistemas	79
4.3.1 Implementación de los diseños.	80
4.3.2 Adquisición, análisis y aprendizaje de datos.	86
4.3.3 Resultados obtenidos.	100
4.4 Socializar los Resultados a la Comunidad Académica	116
5. Conclusiones	118

6. Recomendaciones	120
Referencias Bibliográficas	121

Lista de Figuras

	pág.
Figura 1. Circuito equivalente exacto y aproximado del motor asíncrono	28
Figura 2. Circuito equivalente despreciando la R_{fe} del circuito equivalente exacto	29
Figura 3. Excentricidad en motores	31
Figura 4. Principales aplicaciones prácticas de la inteligencia artificial	35
Figura 5. Vista satelital de la ubicación de la Universidad Francisco de Paula Santander	46
Figura 6. Motor trifásico	50
Figura 7. Placa característica	51
Figura 8. Desmontaje del motor trifásico	55
Figura 9. Diámetro del rotor,	55
Figura 10. Longitud del rotor,	56
Figura 11. Velocidad del motor en vacío de 1790 rpm	57
Figura 12. Prueba de rotor bloqueado aplicada al motor en el laboratorio de máquinas eléctricas LE 102 de la Universidad Francisco de Paula Santander	59
Figura 13. Script de Matlab listo para ingresar los datos obtenidos en las pruebas realizadas al motor trifásico	62
Figura 14. Curva Torque vs Velocidad y Potencia vs Velocidad obtenidas de matlab	62
Figura 15. Diseño de la base metálica en SolidWorks, parte que soporta todo el peso del motor	71
Figura 16. Diseño mecánico en SolidWorks, resultado final y complemento de la figura anterior con las partes metálicas que aseguran el motor a la base	72
Figura 17. Diseño de la base para la caja que contendrá los componentes electrónicos, elaborada en SolidWorks	73

Figura 18. Imagen 3D del diseño en SolidWorks de la forma final de la caja	73
Figura 19. Vista superior de la caja con sus borneras para la conexión de las tres fases (R, S, T), neutro, tierra y alimentación DC para los sensores (Rojo +, negro -)	74
Figura 20. Conductor de alambre aislado	75
Figura 21. Conductor de cable flexible	75
Figura 22. Imagen del diseño de la PCB donde se aprecian las pistas de cobre en el software Proteus	78
Figura 23. Visualización de la PCB en 3D, en el cual se observan los pines de conexión	79
Figura 24. Implementación del diseño mecánico con el motor asegurado	80
Figura 25. Vista inferior de la PCB donde se observan las pistas de cobre	81
Figura 26. Vista superior de la PCB con el ensamblaje de arduino, su regulador de voltaje y pines de conexión de los sensores	81
Figura 27. Calibración del sensor de corriente	82
Figura 28. Acople del motor con el sistema electrónico para la calibración de los sensores de voltaje	82
Figura 29. Implementación de la caja protectora del sistema electrónico	83
Figura 30. Sensor piezoeléctrico	84
Figura 31. Vista lateral del motor pintado	84
Figura 32. Vista frontal del motor ya pintado	85
Figura 33. Montaje final del módulo	85
Figura 34. Parte de la programación en arduino de la adquisición de las lecturas obtenidas de los sensores	86
Figura 35. Programación en Matlab para graficar las variables en cada estado de funcionamiento del motor	88

Figura 36. Grafica de los valores en estado normal	88
Figura 37. Grafica de los valores en estado de vibración	89
Figura 38. Grafica de los valores en estado de desconexión de la fase 1	89
Figura 39. Grafica de los valores en estado de desconexión de la fase 2	90
Figura 40. Grafica de los valores en estado de desconexión de la fase 3	90
Figura 41. Grafica de los valores en estado de desbalance de la fase 1	91
Figura 42. Grafica de los valores en estado de desbalance de la fase 2	91
Figura 43. Grafica de los valores en estado de desbalance de la fase 3	92
Figura 44. Carga de los datos input y target necesarios para la red neuronal	94
Figura 45. Toolbox nntool donde se procede a cargar requeridos de la figura anterior para crear la red neuronal	94
Figura 46. Creación de la red neuronal	97
Figura 47. Conformación interna de la red neuronal y resultados de su aprendizaje	98
Figura 48. Evaluación y grafica del error medio cuadrático	98
Figura 49. Validación y grafica de la regresión lineal de la red neuronal	99
Figura 50. Esquema de la red neuronal en el cual se aprecian las capas que la conforman	100
Figura 51. Diagrama de bloques de la red neuronal implementada en simulink	100
Figura 52. Comprobación a través de la red neuronal del motor en estado normal	101
Figura 53. Comprobación a través de la red neuronal del motor en estado de falla por vibración	102
Figura 54. Comprobación a través de la red neuronal del motor en estado de falla por desconexión de fase 1	103
Figura 55. Comprobación a través de la red neuronal del motor en estado de falla por desconexión de fase 2	104

Figura 56. Comprobación a través de la red neuronal del motor en estado de falla por desconexión de fase 3	105
Figura 57. Conexión eléctrica del motor para generar la falla de desbalance de fase	106
Figura 58. Comprobación a través de la red neuronal del motor en estado de falla por desbalance de fase	106
Figura 59. Nuevo motor que se utilizó en el desarrollo del proyecto	107
Figura 60. Placa característica del nuevo motor	107
Figura 61. Comprobación a través de la red neuronal del nuevo motor en estado normal	108
Figura 62. Comprobación a través de la red neuronal del nuevo motor en estado de falla por desconexión de fase 1	109
Figura 63. Comprobación a través de la red neuronal del nuevo motor en estado de falla por desconexión de fase 2	110
Figura 64. Comprobación a través de la red neuronal del nuevo motor en estado de falla por desconexión de fase 3	110
Figura 65. Comprobación a través de la red neuronal del nuevo motor en estado de falla por desbalance de fase 1	111
Figura 66. Comprobación a través de la red neuronal del nuevo motor en estado de falla por desbalance de fase 2	112
Figura 67. Comprobación a través de la red neuronal del nuevo motor en estado de falla por desbalance de fase 3	112
Figura 68. Interfaz de usuario creada en Matlab 2018a para agrupar los valores de las variables y los resultados obtenidos de la red neuronal	113
Figura 69. Interfaz de usuario para el estado normal del nuevo motor	114
Figura 70. Interfaz de usuario para el estado de desbalance de la fase 3 del nuevo motor	114

Figura 71. Código QR para el acceso a los archivos	115
Figura 72. Socialización del artículo científico presentado en el SENA sede Cúcuta, Norte de Santander	116

Lista de Tablas

	pág.
Tabla 1. Compilación de las normas	47
Tabla 2. Resultados obtenidos de la prueba DC realizada al motor trifásico	57
Tabla 3. Tabla de resultados obtenidos en la prueba de corto circuito realizada al motor trifásico	61
Tabla 4. Cuadro comparativo de sensores de voltaje, corriente y vibración	65
Tabla 5. Matriz de pugh para la selección de los sensores	67
Tabla 6. Cuadro comparativo de las herramientas con las cuales se puede implementar la red neuronal	68
Tabla 7. Matriz de pugh para la selección de la herramienta para la implementación de la red neuronal	69
Tabla 8. Cuadro comparativo de dispositivos para la adquisición de datos	69
Tabla 9. Matriz de pugh para la selección del dispositivo de adquisición de datos	70
Tabla 10. Tabla para la selección del calibre del conductor según el amperaje que debe soportar	77
Tabla 11. Función de entrenamiento vs. Algoritmo	95

Resumen

Este proyecto realizó un diseño e implementación de un banco para la detección de fallas en motores trifásicos mediante el uso de inteligencia artificial. Para ello, se realizó una investigación descriptiva y exploratoria, con un desarrollo cuantitativo. Para la recolección de información se utilizaron instrumentos de datos numéricos en la medición sistemática para su análisis e interpretación. La población y muestra no se aplicó para el desarrollo, en este caso fue universal y el objeto de estudio fue un motor de inducción trifásico. Se logró, implementar un banco para la detección de fallas en motores trifásicos mediante el uso de inteligencia artificial. Se ejecutó, la recopilación de información basada en la detección de fallas en los motores trifásicos. Seguidamente, se diseñó el sistema mecánico y electrónico basado en inteligencia artificial que le permita al estudiante realizar las prácticas para la detección de fallas en los motores trifásicos. Posteriormente, se implementó el montaje del banco didáctico comprobando el correcto funcionamiento de cada uno de sus sistemas. Finalmente, se socializaron los resultados a la comunidad académica.

Abstract

This project carried out a design and implementation of a bank for the detection of failures in three-phase motors through the use of artificial intelligence. For this, a descriptive and exploratory investigation was carried out, with a quantitative development. For the collection of information, numerical data instruments were used in the systematic measurement for analysis and interpretation. The population and sample was not applied for development, in this case it was universal and the object of study was a three-phase induction motor. It was achieved, to implement a bank for the detection of failures in three-phase motors through the use of artificial intelligence. It was executed, the collection of information based on the detection of failures in three-phase motors. Next, the mechanical and electronic system based on artificial intelligence was designed that allows the student to perform the practices for the detection of failures in three-phase motors. Subsequently, the assembly of the didactic bank was implemented, verifying the correct functioning of each of its systems. Finally, the results were socialized to the academic community.

Introducción

Como es conocido los motores de inducción trifásica son uno de los principales músculos de la industria a nivel mundial que pueden variar desde poca potencia hasta motores de gran potencia, esto conlleva a ser uno de los principales consumidores de energía eléctrica; por esta razón las empresas tienen que tener un personal capacitado que tenga los conocimientos y habilidades para que puedan supervisar y mantener los procesos lo más eficiente y efectivos sin llegar a tener contratiempos o paradas innecesarias.

Los motores de inducción trifásica son utilizados por su gran adaptabilidad a los diversos procesos requeridos en la industria y a su vez por su sencillo mantenimiento, para mantener su correcto funcionamiento en condiciones normales debe contar con el personal capacitado que pueda detectar y reaccionar a tiempo ante eventuales fallas ya sea por un funcionamiento anormal o una falla por falta de mantenimiento.

Debido a estas razones es necesario que el personal cuando este en el espacio laboral tenga las habilidades y conocimientos para afrontar cualquier situación y así reducir los tiempos de mantenimiento o costos de mantenimiento logrados a detección temprana de eventualidades por parte del personal.

Por consiguiente se desea diseñar e implementar este trabajo de grado, en el cual los estudiantes podrán realizar prácticas de laboratorio observando su funcionamiento y las condiciones de operación de un motor de inducción trifásico cuando se ve expuesto a diversas fallas que se pueden presentar en el campo laboral de la industria, este banco didáctico le permitirá trabajar cada falla de una forma controlada y el cual contará con un análisis mediante el uso de uno de los métodos de inteligencia artificial la cual realizará un diagnóstico e

identificación de las fallas que se pueden presentar en el motor de inducción trifásico.

1. Problema

1.1 Título

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO PARA LA DETECCIÓN DE FALLAS EN MOTORES TRIFÁSICOS MEDIANTE EL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL.

1.2 Planteamiento del Problema

En la actualidad, la innovación tecnológica y el crecimiento poblacional elevado han generado gran demanda de producción de las empresas a nivel global. Por esta razón los procesos industriales se ven sometidos a un mayor esfuerzo y gasto energético para este fin. Por lo cual dichos procesos abarcan una gran diversidad de equipos que llevan esta labor a cabo, por consiguiente, acotando se toma como el objeto de estudio en este caso los motores de inducción trifásicos ya que estos son muy requeridos por su aplicación en una amplia gama de procesos, tales como, ventiladores, bombas, batidoras, sopladores, molinos, extrusoras, bandas transportadoras. Además, otros aspectos para tener en cuenta es que presentan robustez y bajo precio.

Seguidamente en relación con lo anterior, este trabajo se realizó en el entorno de la universidad Francisco de Paula Santander de la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander, ciudad fronteriza de Colombia y de gran afluente de extranjeros, la cual con la actual crisis que se vive ha aumentado el nivel de competitividad en los profesionales tanto a nivel regional como nacional, debido a los diferentes enfoques y competencias que han desarrollado.

Por esta razón de acuerdo con lo nombrado en los párrafos anteriores los motores trifásicos por ser equipos de constante uso sufren un desgaste eléctrico y mecánico, lo que puede acarrear

una falla la cual implicaría una parada no prevista en los procesos industriales generando pérdidas económicas y de productividad, para reducir estos hechos se realizan planes de mantenimiento preventivo y se debe contar con personal especializado para atender este tipo de fallas. Además, para el monitoreo, adquisición y análisis de datos, se aplicará una estrategia de inteligencia artificial, para tener un control sobre los problemas presentados en los motores y obtener una respuesta de cual a la falla que presenta el respectivo motor.

Por lo cual debido a la gran importancia que tiene el sector industrial en la manufactura fue necesario el indagar en el desarrollo de nuevas competencias en este campo, innovando con la adaptación de la inteligencia artificial para la obtención de una respuesta precisa ante una falla, para el mejor aprovechamiento de los conocimientos adquiridos y conformar un perfil profesional más competitivo ante la situación que se presenta en la actualidad, plasmando lo anterior en un módulo que permitió obtener dichos resultados.

1.3 Formulación del Problema

¿Cómo el uso de inteligencia artificial en un banco didáctico permitirá la detección e identificación de fallas en motores trifásicos eficientemente?

1.4 Justificación

El desarrollo de este proyecto es importante debido a que genera un ambiente de trabajo didáctico e investigativo, primero a través del medio físico existente se puede observar los cambios en el comportamiento del motor trifásico mediante estímulos no deseados tal como una caída de tensión en una de las fases, una desalineación del rotor, una bobina en corto, entre otros, permitiendo la adquisición de nuevas capacidades y habilidades al estudiante que le servirán en

su proceso de formación y posteriormente en el desarrollo en su campo laboral en la industria, y segundo, para impulsar el deseo de conocimiento del estudiante, impulsar a que se realice preguntas tales como, ¿cómo funciona la inteligencia artificial?, ¿cómo se analizan los datos?, ¿existen más tipos de fallas en los motores trifásicos?, entre otras y así generar un ambiente investigativo lo cual es una competencia de gran importancia no solo en el campo de la ingeniería electromecánica sino en el ámbito personal y profesional.

Por lo anteriormente dicho, los estudiantes son favorecidos con el desarrollo del proyecto ya que las adquisiciones de estos conocimientos le serán útiles en el desarrollo de su campo laboral, al igual que la universidad ya que la acogida de los nuevos profesionales en este caso ingenieros electromecánicos se verá reflejada en la retroalimentación de las empresas con respecto a la calidad competitiva de los mismos.

La contribución del proyecto se refleja en la universidad otorgando un enfoque a una rama importante de la carrera, dándole un mayor interés al conocimiento aplicado y la adaptación de las nuevas tecnologías como lo es la inteligencia artificial para la adquisición, análisis de datos y respuestas ante estímulos no favorables para la detección de fallas en motores trifásicos que se encuentran presentes en gran cantidad de procesos industriales.

Ahora en términos de viabilidad, el proyecto conlleva un bajo costo, se utilizó un motor trifásico propio, de la utilización del laboratorio de máquinas eléctricas de la universidad para la alimentación de dicho motor y se realizaron las pruebas pertinentes.

1.5 Objetivos

1.5.1 General. Implementar un banco para la detección de fallas en motores trifásicos mediante el uso de inteligencia artificial.

1.5.2 Específicos. Recopilar información basada en la detección de fallas en los motores trifásicos.

Diseñar el sistema mecánico y electrónico basado en inteligencia artificial que le permita al estudiante realizar las prácticas para la detección de fallas en los motores trifásicos.

Implementar el montaje del banco didáctico comprobando el correcto funcionamiento de cada uno de sus sistemas.

Socializar los resultados a la comunidad académica.

2. Marco Referencial

2.1 Antecedentes

Los siguientes antecedentes permitieron tener una idea y guía de las diversas metodologías que se aplicaron para el desarrollo de este proyecto de grado, de los cuales resaltan los diferentes métodos para la detección de fallas como también diferentes tipos de análisis que se pueden desarrollar permitiendo elegir la forma más adecuada.

El trabajo de grado denominado “Detección de fallas en motores asíncronos aplicando métodos de inteligencia artificial” del año 2017 realizado por Daniela Vargas en la Universidad Francisco de Paula Santander, tiene como objetivo la detección de fallas en motores asíncronos aplicando la inteligencia artificial, en este trabajo de grado se hace el análisis de los motores asíncronos y la detección de fallas aplicando el método de redes neuronales con el programa MATLAB, aplicado a la falla de caída por fase, como conclusión importante se resalta la utilización de las corrientes de estator para una detección de la falla más precisa y resalta la utilización del software de MATLAB para la red neuronal. Este trabajo permite conocer la funcionalidad de la herramienta MATLAB para el desarrollo de la estrategia de la inteligencia artificial y su análisis de las variables estudiadas, además de la adquisición de puntos de apoyo en la metodología a la hora de la realización del proyecto.

El artículo científico “Metodología de detección de fallas de un motor síncrono” del año 2015 realizado por Yesenia Restrepo de la Revista Colombiana de Tecnologías Avanzadas y la Universidad Francisco de Paula Santander, trata de la detección de fallas en procesos industriales, enfocando su aplicación hacia los motores síncronos en la identificación de fallas incipientes que afectan las principales ventajas de estos motores, utilizando diversos métodos

como la correlación y clasificación aplicando las redes neuronales. Como conclusión resalta las diversas formas de aplicar las redes neuronales para ajustar modelos y parámetros para simular el motor DL300190 y así clasificar e identificar adecuadamente las fallas. Este artículo científico permite conocer la metodología de estudio en los motores trifásicos, su comportamiento, modelo matemático y partiendo de esto su análisis por medio de la aplicación de inteligencia artificial.

Otro artículo científico que aporta al desarrollo del proyecto de investigación es el “Diseño de un sistema de análisis temporal y espectral para detectar fallas por vibración en motores eléctricos” realizado por Francisco Moreno y Armando Becerra en abril de 2015 de la Universidad Francisco de Paula Santander y publicado por la revista Facultad de Ingeniería. Este artículo se basa en el desarrollo experimental de un sistema de medición y análisis de vibraciones para brindar un estudio de las más relevantes variables utilizadas en el análisis espectral de motores eléctricos, con el fin de detectar posibles fallas. Dicho sistema de análisis fue implementado en un banco de pruebas elaborado por el Grupo de Investigación en Automatización y Control (GIAC), de la Universidad Francisco de Paula Santander. Como conclusión se resalta la importancia del análisis por vibraciones ya que es un sistema eficiente y de bajo costo en comparación con un análisis espectral que es muy eficiente pero muy costoso y no es de fácil adquisición en instituciones universitarias. Este artículo se convierte en una guía para la adquisición de datos para su posterior análisis.

El artículo denominado “Diagnóstico de Fallas en Motores de Inducción mediante la Aplicación de Redes Neuronales Artificiales” realizado por Fernando Villada y Diego Cadavid en la Universidad de Antioquia en el año de 2007. En este trabajo se presenta y desarrolla un algoritmo para diagnosticar fallas entre espiras del estator de motores de inducción mediante la aplicación de redes neuronales artificiales (RNA), los datos para este trabajo son obtenidos

partiendo de un modelado del motor que simula diferentes tipos de cargas y partiendo de dos motores trifásicos para fortalecer el estudio, la conclusión de este artículo es el método de análisis para diagnosticar fallas en el estator en los motores de inducción trifásica aplicando las RNA y la facilidad de aplicar el modelo en la industria para la detección de fallas de una forma confiable. Este artículo permite conocer uno de los posibles métodos de inteligencia artificial que se puede aplicar para el desarrollo del presente proyecto.

El siguiente trabajo de grado denominado “Detección de fallas en rodamientos de un motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla empleando análisis de vibraciones” realizado por María Martínez y Verónica Sánchez en febrero del año 2017 y desarrollado en la Pontificia Universidad Javeriana de Cali. El objetivo de este trabajo es contrastar las técnicas de transformada de Fourier y de Hilbert para el diagnóstico de fallas mediante un análisis por vibraciones. En este trabajo de grado se realizó la adquisición de datos con un sensor de aceleración el cual está en un banco de motores de esta Universidad, el sensor está conectado con un circuito de acople y adaptación de la señal el cual es realizado con el software Labview y después esta señal es enviada al software de Matlab para su análisis mediante espectro de frecuencia. Como conclusión se resalta el método de adquisición de datos mediante las herramientas tecnológicas de Labview y Matlab, de las técnicas aplicadas para la detección de fallas la más útil es la de Hilbert superando en alto porcentaje a la de Fourier. Este trabajo de grado permite establecer cada una de las etapas que se deben implementar para la detección de fallas en un motor trifásico.

Y por último el trabajo de grado llamado “Detección de fallas en motores eléctricos con base en índices de potencias y redes neuronales” realizado por Luis Murillo en marzo de 2018 en la Escuela de ingeniería Electromecánica de Costa Rica, presenta un método alternativo para

determinar condiciones de operación anómalas en un motor trifásico de inducción, basado en un conjunto de índices adimensionales, calculados a partir de sus pérdidas de potencia. La principal conclusión es la detección temprana y en tiempo real de las fallas aplicando una red neuronal la cual necesita pocos recursos de muestra para determinar la falla. Con este trabajo se puede observar las diversas formas que se pueden utilizar para determinar fallas o un funcionamiento anormal en los motores trifásicos y los resalta lo útil que es la aplicación de la inteligencia artificial para estos casos.

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Maquinas eléctricas. El origen de las maquinas eléctricas se da gracias a la utilización de la ley de Faraday y de los principios del electromagnetismo. Estas máquinas convierten energía eléctrica o mecánica para el aprovechamiento de estas, esto se puede detallar clasificando el tipo de máquinas en tres grupos:

Generador: Esta máquina a través de la aplicación del estímulo de movimiento convierte la energía mecánica suministrada en eléctrica, generándose así una diferencia de potencial a la salida de los bornes que al conectarse a un circuito otorga una corriente que circula a través del mismo.

Motor: En este caso se podría decir que realiza la operación inversa del generador, es decir, por medio de la aplicación de tensión en los bornes convierte la energía eléctrica en mecánica, generando el movimiento del rotor.

Transformador: A diferencia de los otros dos tipos anteriormente nombrados, este es una maquina estática por lo tanto no involucra movimiento, este convierte la energía eléctrica a

través de un arreglo de bobinas con diferencia de espiras, en una energía de la misma naturaleza, pero con su magnitud de voltaje y corriente en diferente proporción. (Mora, 2003)

2.2.1.1 Motores de inducción. El principio de construcción de los motores básicamente es el mismo, ya que el estator no difiere, lo diferencia está a la hora de seleccionar el rotor ya que estos motores se clasifican en rotor de jaula de ardilla y rotor de devanados. (Chapman, 2012).

Al realizarse una comparación entre los dos tipos de motores según su rotor, se concluye que el motor de rotor jaula de ardilla es más viable, debido a que los motores de rotor de devanados, al tener una constante fricción sus anillos sufren un desgaste significativo al igual que sus escobillas.

A continuación, se presentarán algunos conceptos básicos para entender mejor su funcionamiento como lo es, el par inducido que para hablar de ello se debe recordar que en un motor trifásico al inyectar los voltajes y corrientes correspondientes se genera un campo magnético rotatorio llamado B_s que gira de izquierda a derecha, la ecuación que describe esta velocidad es:

$$n_s = \frac{120 \cdot f_1}{P} \quad (1)$$

Donde P , es el número de polos, f_1 es la frecuencia de operación en Hz.

La ecuación que describe el voltaje inducido es:

$$v_{ind} = (V \times B) \cdot L \quad (2)$$

Donde V es la velocidad de la barra relativa al campo magnético, B es el vector de densidad de flujo magnético y L es la longitud del conductor en dicho campo.

Para que el motor se mantenga en marcha la velocidad de operación no puede alcanzar la velocidad de sincronismo ya que si esto sucede el voltaje inducido sería cero, por lo tanto, no circularía corriente por el rotor ni existiría movimiento del rotor.

En consecuencia, a lo anterior, como la velocidad de trabajo es diferente a la velocidad de sincronismo aparece un deslizamiento, el cual está inmerso en la ecuación 3, donde se puede observar que es la relación entre la diferencia de la velocidad de sincronismo y la nominal o de trabajo respecto a la velocidad de sincronismo, y se expresa en porcentaje,

$$s = \frac{n_s - n_t}{n_s} * (100\%) \quad (3)$$

Observando la ecuación anterior, si el motor está parado, el deslizamiento será 1, mientras que si la velocidad de trabajo alcanza la velocidad de sincronismo este valor será 0, por lo tanto, se infiere que las diferentes velocidades que puede tomar un motor están dentro de este rango. (Chapman, 2012)

2.2.1.2 Circuito equivalente del motor de inducción. Al analizar el circuito equivalente de un motor asíncrono se toma como base el de un transformador el cual se puede apreciar en la figura 1, pero esto genera un error, ya que constructivamente y teóricamente la corriente de magnetización I_μ presente en el motor es considerablemente mayor a la del transformador, por lo tanto, esto afecta a el cálculo del par M . Por lo tanto, se indaga para la obtención de un menor error. (Pozueta, 2015)

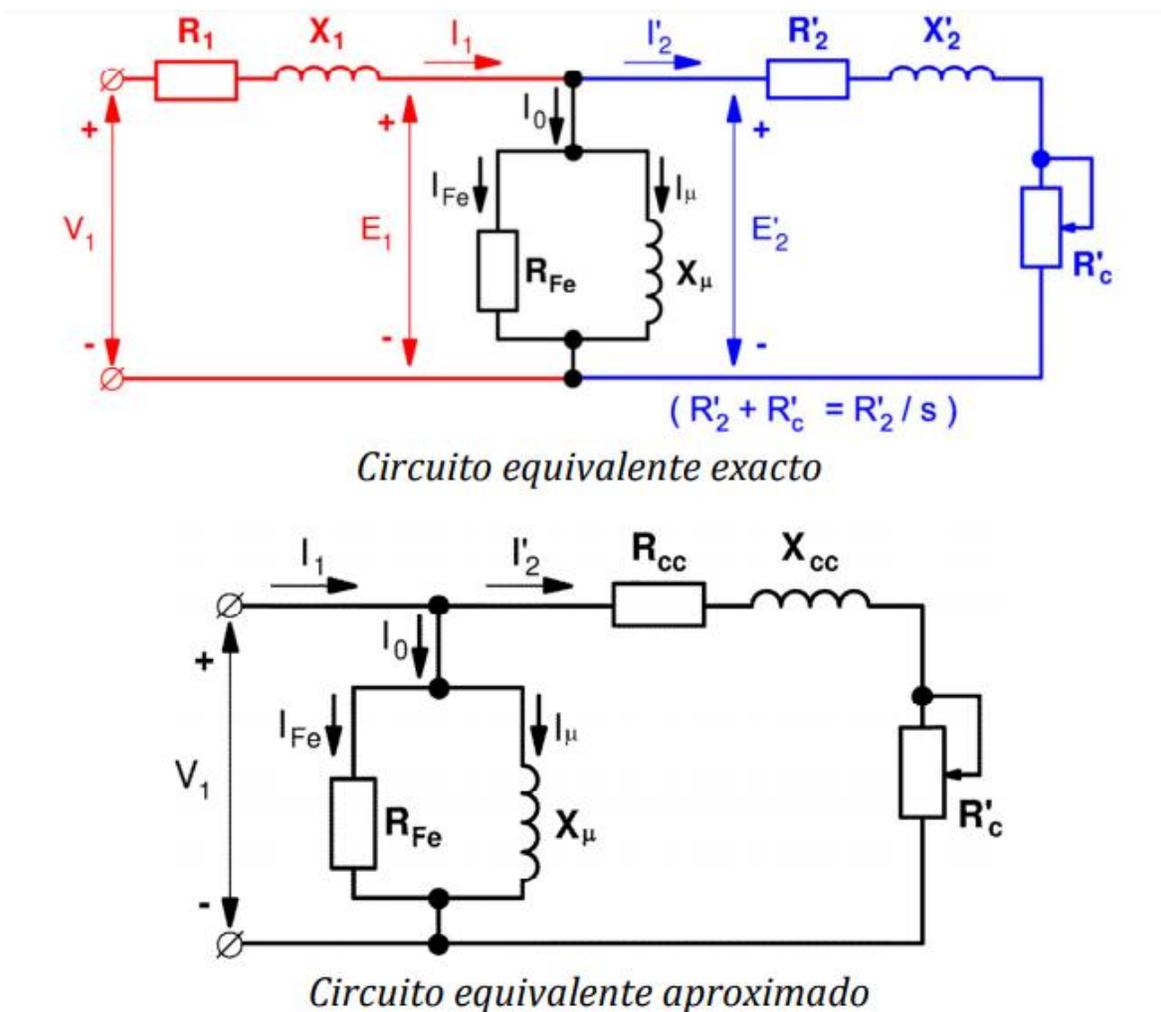


Figura 1. Circuito equivalente exacto y aproximado del motor asíncrono

Fuente: Rodríguez, 2015.

Para la simplificación del análisis, se sabe que en un motor asíncrono la $I_{\mu} \gg I_{Fe}$, por consiguiente se obtendrá una respuesta más acertada eliminando así la resistencia R_{Fe} y por lo tanto se obtendrá la siguiente variación en el circuito equivalente exacto mostrado en la figura 2. (Pozueta, 2015)

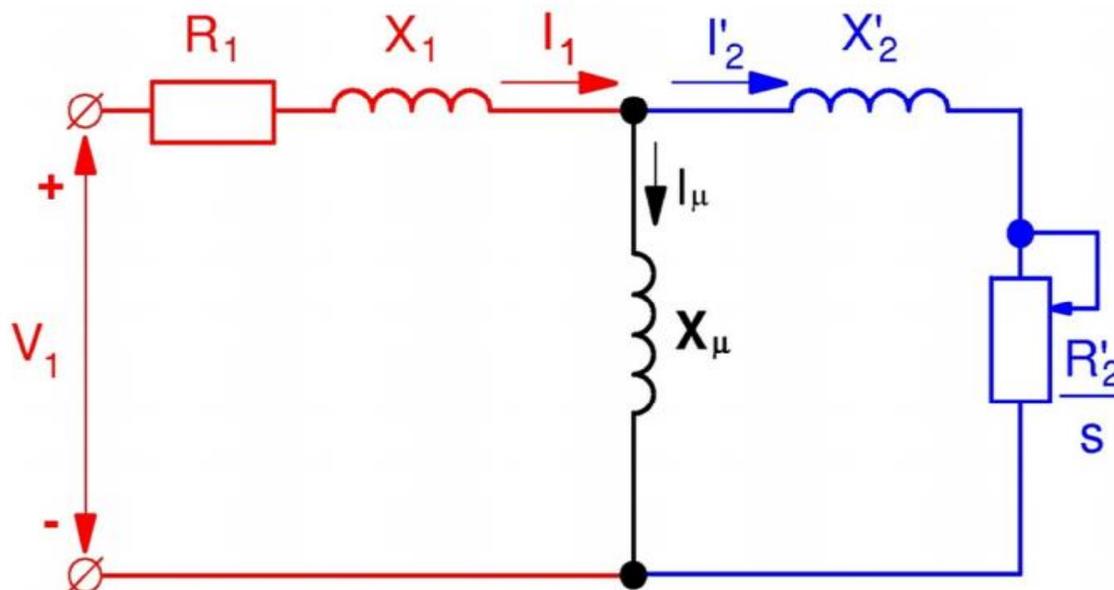


Figura 2. Circuito equivalente despreciando la R_{fe} del circuito equivalente exacto

Fuente: Rodríguez, 2015.

Como se puede observar en la figura 2, se han sumado las resistencias R'_2 y R'_c , por lo tanto:

$$R'_2 + R'_c = R'_2 + \frac{R'_2}{s} - R'_2 = \frac{R'_2}{s} \quad (4)$$

2.2.2 Fallas en los motores de inducción. Los motores al ser maquinas rotativas de trabajo constante se verán sometidos a un desgaste mecánico y eléctrico con el paso del tiempo, por lo cual se hace necesario sus respectivos planes de mantenimientos preventivos, pero con las nuevas generaciones de tecnología y análisis de datos se podría mejorar la eficiencia de los mismos, pero para ello se necesita saber cuáles son las causas más comunes que producen una falla como lo son:

Condiciones ambientales no deseadas; estas se ven reflejadas en parte en la duración de los aislamientos de los conductores eléctricos, ya que al aumentar la temperatura del ambiente su vida útil se ve acortada y en la placa característica de los motores el fabricante establece un rango de variabilidad para su correcto funcionamiento. Además, la presencia de elementos como polvo, contaminantes en exceso que pueden ser corrosivos y también que afecten las partes mecánicas de la máquina, la humedad que se puede ver reflejada si ocurre una condensación no deseada en el aislamiento ya sea por contacto con agua o por diferencia de temperaturas, por lo cual el aislamiento absorbe la humedad y va perdiendo su resistencia dieléctrica (Nuñez, 2009).

Otro aspecto importante son las averías mecánicas; se encuentran diversas fallas, como lo son fallas en rodamientos que son las más comunes y producen fricción incrementando la corriente por encima del valor nominal comprometiendo la vida útil del motor y en algunos casos quemándolos.

También se debe tener en cuenta las fallas eléctricas, las cuales al presentarse una variación en el voltaje ya sea que su valor sea menor al nominal, en este caso la corriente aumentara generando así una mayor temperatura en el motor, si por el contrario el voltaje aumenta se produciría un menor consumo de corriente, pero si este varia en un orden del 10% o más el material magnético puede llegar a su saturación y por lo tanto eleva la temperatura y corriente del motor considerablemente (Nuñez, 2009).

A continuación, se expandirá un poco las fallas eléctricas y mecánicas en los motores que son de gran relevancia para este proyecto.

2.2.2.1 Fallas mecánicas. Por otra parte, para ampliar lo que se dijo anteriormente, se agregará el concepto de excentricidad, el cual es la desviación del rotor de su posición correcta,

ya que este debe ir centrado con respecto a su capa exterior o estator, de no ser así los campos magnéticos se verán en una proporción desigual, esto lo podemos apreciar en la figura 3.

Por consiguiente, esto causa vibraciones en el motor y conlleva al desgaste de los rodamientos y aislamientos del motor. (Nuñez, 2009)

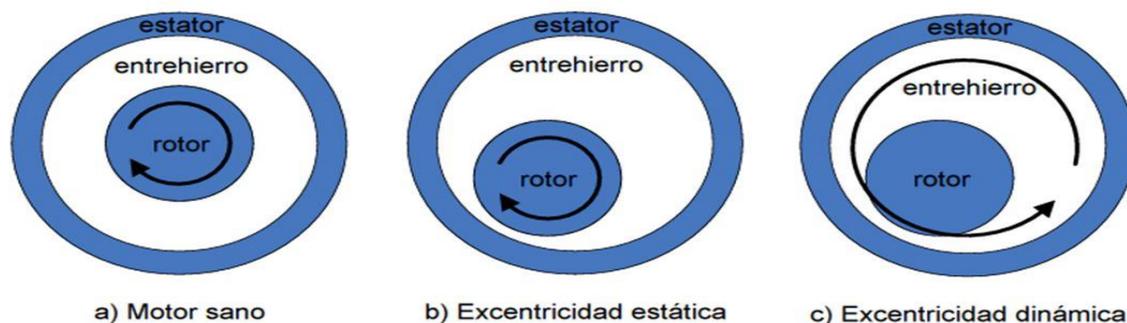


Figura 3. Excentricidad en motores

Fuente: Testmotors, 2017.

La excentricidad estática se da cuando la distancia entre el rotor y el estator no es uniforme, pero al estar puesto en marcha esta distancia no varía, y la excentricidad dinámica es aquella en la cual el rotor está desplazado del centro de rotación generándose así un movimiento repetitivo cuando el motor está girando (Nuñez, 2009)

2.2.2.2 Fallas eléctricas. Las fallas más comunes se clasifican en tres grupos como se puede observar a continuación:

Bobina de estator abierta. Esta falla se presenta cuando se interrumpe una de las fases que alimentan un motor eléctrico ya sea por la activación de su sistema de protección como un fusible quemado, mal ajuste en los bordes de conexión de los conductores eléctricos, esto

conlleva a una diferencia de proporcionalidad en las magnitudes de las corrientes aplicadas sobre el motor, generando más inconvenientes como la pérdida de velocidad, aumento de la temperatura y posible fallo en el arranque del motor (Quintero, 2017).

Variación de la red de alimentación. El correcto funcionamiento del motor va de la mano de acuerdo a los parámetros establecidos por el fabricante para su operación nominal, variaciones de los mismo podrían desencadenar que el motor este en marcha y comience a perder velocidad hasta volver al reposo, no pueda vencer la inercia y arrancar o que por otra parte su temperatura exceda los límites para los cuales está diseñado (Quintero, 2017).

Carencia de una fase de alimentación. Esta falla está relacionada con la primera nombrada en esta clasificación, ya que presenta cosas en común, si el motor se encuentra girando podría mantenerse en ese estado, pero con una menor velocidad y con la elevación de su temperatura hasta el sobrecalentamiento, y en otros casos el motor tal vez no pueda arrancar (Quintero, 2017).

2.2.3 Inteligencia artificial. Antes de entrar en materia sobre la inteligencia artificial se debe preguntar realmente que es la inteligencia, ya que muchos científicos y filósofos han planteado esta pregunta con diversas respuestas. El sentido de realizar esta pregunta es obtener una serie de patrones o características de la inteligencia humana para tener una guía y aplicarlo a la inteligencia artificial.

Se inicia por mencionar algunas características de la inteligencia humana tales como la habilidad de plantearse preguntas con diversas y múltiples respuestas, la habilidad para crear una consecución de acciones a seguir en un plan definido. Entre otras. Y uno de los rasgos más definidos de la inteligencia humana es que desde sus inicios ha sido capaz de crear lenguajes de

todo tipo por medio de símbolos o señales definidas. Y se analizó que la inteligencia artificial puede ser llamada un lenguaje. Un lenguaje creado por una serie de símbolos o patrones característicos del mundo real para la solución de problemas. (Cruz, 2010)

Al igual que la computación la inteligencia artificial también está conformada por diversos sistemas que actúan con patrones humanos que son referentes para el estudio de esta. Es la combinación de algoritmos planteados con el propósito de crear maquinas con capacidades similares a los seres humanos. Una maquina con inteligencia artificial imita funciones cognitivas de los seres humanos como son percibir, razonar, aprender, resolver problemas entre otros.

Según Stuart Russell y Peter Norvig la inteligencia artificial se califica en los siguientes tipos:

Sistemas que piensan como humanos: automatizan actividades como la toma de decisiones, la resolución de problemas y el aprendizaje. Un ejemplo son las redes neuronales artificiales.

Sistemas que actúan como humanos: se trata de computadoras que realizan tareas de forma similar a como lo hacen las personas. Es el caso de los robots.

Sistemas que piensan racionalmente: intentan emular el pensamiento lógico racional de los humanos, es decir, se investiga cómo lograr que las máquinas puedan percibir, razonar y actuar en consecuencia. Los sistemas expertos se engloban en este grupo.

Sistemas que actúan racionalmente: idealmente, son aquellos que tratan de imitar de manera racional el comportamiento humano, como los agentes inteligentes.

Aplicaciones prácticas de la inteligencia artificial:

La IA está presente en la detección facial de los móviles, en los asistentes virtuales de voz como Siri de Apple, Alexa de Amazon o Cortana de Microsoft y está integrada en nuestros dispositivos cotidianos a través de bots (abreviatura de robots) o aplicaciones para móvil, tales como: Lyli, un personal shopper en versión digital; Parla, concebida para ayudarnos con el aprendizaje de idiomas.

Los avances en IA ya están impulsando el uso del big data debido a su habilidad para procesar con grandes cantidades de datos y proporcionar ventajas comunicacionales, comerciales y empresariales que la han llevado a posicionarse como la tecnología esencial de las próximas décadas.



Figura 4. Principales aplicaciones prácticas de la inteligencia artificial

Fuente: Iberdrola, 2019.

En la figura 4 se observa algunas aplicaciones de la inteligencia artificial y para tener una mejor idea del alcance, la versatilidad y aplicación de la misma, se plantean las ventajas y desventajas a continuación:

Ventajas:

Error casi del 0%. Con la inteligencia artificial, el porcentaje de error disminuye al punto de tender a cero por lo tanto la precisión se incrementa en proporción inversa. Realizando una comparación con el cerebro humano, dicha inteligencia tiene su respectiva etapa de aprendizaje la cual se podría decir que siempre se ejecuta, ya que a medida que tiene más experiencia sigue aprendiendo y por ende el error va disminuyendo cada vez más (Cruz, 2010).

Exploración del espacio. La inteligencia artificial tiene aplicaciones en la exploración espacial. La utilización de robots inteligentes para la exploración se hace indispensable, ya que estos al ser maquinas tienen la capacidad de trabajar en un ambiente hostil como lo es el espacio.

Además de ello son adaptativos para poder maniobrar y que su estructura física no se vea afectada por la diversidad de atmosferas planetarias.

Realizar ciclos de trabajo. Las máquinas inteligentes pueden reemplazar a los seres humanos en muchas áreas de trabajo. Los robots pueden hacer ciertas tareas dificultosas. Las actividades minuciosas, que han sido llevadas a cabo por los seres humanos pueden ser asumidas por los robots.

Debido a la inteligencia programada en ellos, las máquinas pueden asumir mayores responsabilidades y pueden ser programadas para manejarse.

La vida diaria se facilita. La versátil aplicación de la inteligencia artificial se hace muy práctica y útil para todos los ámbitos de la vida de un ser humano, una de ellas es en los teléfonos inteligentes aplicándola en la predicción de las palabras que desea escribir y corregir errores ortográficos del usuario.

Además, aplicaciones tanto de uso laboral y cotidiano como Siri o Cortana que son asistentes personales, que desempeñan labores como GPS, aplicaciones de mapas que ofrecen la mejor ruta con menor congestión, aplicaciones de estimación del tráfico y estimación del tiempo requerido para llegar al destino, utilizan inteligencia artificial.

Las aplicaciones en teléfonos y computadoras basadas en inteligencia artificial tienen la capacidad de predecir las acciones y hacer recomendaciones a los usuarios que se adapten a su elección.

Detectar fraude. La detección de fraude en sistemas basados en tarjetas, es posible con el uso de IA. También es empleado por las instituciones financieras y los bancos para el archivo y gestión de los registros.

No existen emociones. El ser humano al poseer emociones pone en riesgo una toma de decisiones de carácter objetivo, a diferencia de ello la IA puede tomar decisiones acertadas y de manera lógica.

Al carecer de sentimientos, las máquinas con inteligencia artificial pueden ajustar sus parámetros, tales como su velocidad y tiempo, y no ser afectados por las emociones mejorando la eficiencia en la toma de decisiones.

Aplicación en la medicina. La IA tiene aplicaciones diversas y una de ellas es la medicina. Los algoritmos ayudan a los médicos a evaluar los riesgos de salud que afronta un paciente. Puede ayudarles a conocer los efectos secundarios que pueden tener varios medicamentos.

Los simuladores de la cirugía utilizan la inteligencia de la máquina en la formación de profesionales médicos. La IA puede utilizarse para simular el funcionamiento cerebral y ser de

utilidad en el diagnóstico y tratamiento de problemas neurológicos.

Como en el caso de cualquier otro campo, las tareas repetitivas o que consumen mucho tiempo pueden ser manejadas a través de la aplicación de la inteligencia artificial.

Rapidez. La toma de decisiones utilizando IA son mucho más rápidas. En un estimado sería mucho más rápido que un cerebro humano. Esto es apreciado en cámaras inteligentes, detectar rostros en tiempo real y saber los datos de una persona.

Mascotas. Las mascotas robóticas pueden ayudar a los pacientes con depresión y también mantenerlos activos. Cerca de 90 personas con Alzheimer se han beneficiado de las mascotas inteligentes para mejorar sus tratamientos. El efecto tranquilizador del ronroneo del gato lleva la atención del paciente al animal, evitando los constantes nervios.

24 horas al día. La mayor ventaja de la inteligencia artificial es que las máquinas no requieren dormir, y son capaces de funcionar sin parar. Pueden realizar continuamente la misma tarea sin aburrirse o cansarse. Cuando se emplean para llevar a cabo tareas peligrosas, se reduce el riesgo para la salud y la seguridad humanas.

Desventajas:

IA casi humano. Una preocupación importante con respecto a la aplicación de la inteligencia artificial es la ética y los valores morales. ¿Es éticamente correcto crear réplicas de seres humanos? ¿Nuestros valores morales nos permiten recrear la inteligencia? La inteligencia es un regalo de la naturaleza.

Costo elevado. La creación de inteligencia artificial requiere costos enormes, ya que son máquinas muy complejas. Su reparación y mantenimiento requieren enormes costos.

Tienen programas de software que necesitan graduaciones frecuentes para satisfacer las necesidades del entorno cambiante y la necesidad de que las máquinas sean más inteligentes cada día.

En el caso de averías graves, el procedimiento para recuperar los códigos perdidos y restablecer el sistema puede requerir mucho tiempo y costo.

No es igual al cerebro humano. Las máquinas pueden almacenar enormes cantidades de datos, pero el almacenamiento, acceso y recuperación no es tan efectivo como en el caso del cerebro humano. Pueden realizar tareas repetitivas durante mucho tiempo.

No son capaces de actuar de manera diferente a lo que están programados para hacer. Las máquinas pueden no ser tan eficientes como los humanos para alterar sus respuestas dependiendo de las situaciones cambiantes.

El toque humano. La idea de que las máquinas reemplacen a los seres humanos suena maravillosa. Al parecer sanara todo el dolor. ¿Pero es realmente emocionante? Ideas como trabajar sinceramente, con un sentido de pertenencia y con dedicación no tienen existencia en el mundo de la inteligencia artificial.

Imagine a los robots que trabajan en hospitales. ¿Se los imagina mostrando el cuidado y la preocupación que los seres humanos?

Conceptos como el cuidado, la comprensión y la unidad no pueden ser entendidos por las máquinas, por lo que, siempre que sean inteligentes, siempre carecerán del toque humano.

Falta creatividad. Imagine máquinas inteligentes empleadas en campos creativos. ¿Crees que los robots pueden sobresalir o incluso competir con la mente humana en el pensamiento creativo o la originalidad? Las máquinas de pensamiento carecen de una mente creativa.

Los seres humanos son intelectuales emocionales. Ellos piensan y sienten. Sus sentimientos guían sus pensamientos. Este no es el caso de las máquinas.

Las habilidades intuitivas que poseen los seres humanos, la forma en que los humanos pueden juzgar basándose en el conocimiento previo, las habilidades inherentes que tienen, no pueden ser replicadas por las máquinas. Además, las máquinas carecen de sentido común.

El desempleo. Si los robots comienzan a reemplazar a los humanos en todos los campos, eventualmente llevarán al desempleo. La gente se quedará sin nada que hacer. Tanto tiempo vacío puede resultar en su uso destructivo.

Las máquinas de pensamiento gobernarán todos los campos y poblarán las posiciones que ocupan los seres humanos, dejando a miles de personas desempleadas.

Son peligrosas. Si el control de las máquinas entra en las manos equivocadas, puede causar la destrucción. Las máquinas no pensarán antes de actuar. Por lo tanto, pueden ser programados para hacer las cosas mal, o para la destrucción masiva.

¿Quién manda?:

Aparte de todas estas desventajas de la IA, existe el temor de que los robots reemplacen a los humanos. Idealmente, los seres humanos deben seguir siendo los dueños de las máquinas.

Sin embargo, si las cosas giran al revés, el mundo se convertirá en caos. Las máquinas inteligentes pueden ser más inteligentes que nosotros, podrían esclavizarnos y comenzar a gobernar el mundo.

En la inteligencia artificial podemos encontrar tres grandes ramas que la componen, las cuales son:

La lógica difusa

Redes neuronales artificiales

Algoritmos genéticos

2.2.3.1 Lógica difusa. La lógica difusa es un gran sistema capaz de simular el comportamiento humano que permite ampliar el marco de trabajo con información que contiene un cierto grado de inseguridad, muy diferente al sistema de computadores que tiene un lenguaje exacto de cadenas de unos (1) y ceros (0). Los seres humanos cuentan con un sentido común que permite razonar sobre el mundo y esto es lo que busca aplicar la lógica difusa. (Cruz, 2010)

2.2.3.2 Algoritmos genéticos. Un algoritmo genético se puede decir que es una técnica que busca la repetición de principios de selección natural que se basa en la investigación de cómo se generan las poblaciones de individuos por medio de la reproducción de sus padres y su evolución biológica. Esta muestra como solo aquellos individuos que mejor se acoplen a sus condiciones

logran subsistir y evolucionar, una función de los Algoritmos genéticos es hallar estos niveles máximos o mínimos usando los principios de selección natural. (Cruz, 2010)

2.2.3.3 Redes neuronales. Este tipo de redes maneja una técnica de clasificación con la cual se busca construir un sistema que permita resolver problemas con base a la recopilación de información sobre la toma de decisiones.

En 1943 fueron planteados por los investigadores Warren McCulloch y Walter Pitts los primeros proyectos sobre el modelo simple de la neurona. Para las siguientes dos décadas fueron B. Widrow y M. E. Hoof quienes tomaron el liderazgo y crearon una maquina conocida con el nombre de Adaline (Adaptive Linear Element).

Las redes neuronales artificiales se clasifican según su tipo de entrada, solo existen dos tipos los cuales son: Entrada binaria (0,1) y la entrada con valores diversos o infinitos.

Las redes neuronales con entradas binarias se clasifican en supervisadas y no supervisadas. En las supervisadas podemos encontrar la Red Hopfield y la Red de Hamming. (Cruz, 2010).

Red Hopfield:

Esta red se basa en la teoría de control geométrico. El primer modelo básico se realizó como un circuito eléctrico de amplificadores, es una red que se retroalimenta de las señales de salida. (Cruz, 2010).

Red de Hamming:

Esta red está basada en un aprendizaje competitivo, consta de dos capas, una es una red instar que se encarga de la correlación entre el vector de entrada y los de prototipo. La segunda se

encarga de ejecutar la competición con el fin de saber cuál de los vectores de prototipo está más cerca al vector de entrada. (Cruz, 2010).

En las no supervisadas podemos encontrar el clasificador de Grossberg y Carpenter llamado ART (Adaptive Resonance Theory)

Por otro lado, las redes con valores diversos o infinitos también se clasifican en supervisadas y no supervisadas.

En las supervisadas podemos encontrar la red Perceptrón y las Redes de retropropagación (backpropagation) (Cruz, 2010).

Red Perceptrón:

Creada por el psicólogo Frank Rosenblatt en el año 1957 que contaba con una matriz con 400 fotoceldas que se conectaban de diversas maneras a 512 unidades tipo neurona las cuales enviaban una señal cuando se presentaba algún patrón y eran almacenadas en un banco de neuronas que los clasificaba por categorías. Esta es la base de la gran mayoría de redes neuronales artificiales que se interconectan entre sí. (Cruz, 2010)

Redes de retropropagación (backpropagation):

Es un algoritmo para redes multicapa de mínimos cuadrados, trabaja mediante el error medio cuadrático para la actualización de pesos y ganancias, esta se trabaja de forma supervisada así que necesita con una serie de patrones que le describan cada salida y el valor esperado de salida.

En las redes no supervisadas podemos encontrar la red kohonen, la cual se presenta a continuación. (Cruz, 2010)

Red de Coñeen:

En esta red se presenta la teoría de que en el cerebro humano se organizan cierta cantidad de neuronas en zonas específicas que se pueden presentar en mapas bidimensionales. De manera que estas redes se basan en la formación de mapas topológicos que establecen la similitud en la información de los vectores de entrada. Este modelo presenta dos variantes que son LVQ y SOM. Si miramos de cerca en el LVQ los mapas son basados en una dimensión, mientras que en SOM los mapas pueden llegar a ser bidimensionales y hasta tridimensionales. (Cruz, 2010).

2.2.4 Software. Para el análisis de los datos del comportamiento del motor, se debe contar con un software para el enlace con la red neuronal, este debe ser capaz de tomar los datos entregados y Matlab es el software adecuado para esta tarea, pues se está familiarizado y se tiene conocimiento de su capacidad para dar solución a problemas matemáticos y analíticos, ya que se han desarrolla actividades, laboratorios y proyectos de diferentes asignaturas en el transcurso de la carrera, además es usado a nivel mundial por muchos profesionales, técnicos, ingenieros, científicos debido a su versatilidad, al estar basado en matrices permite un desarrollo fácil de ideas matemáticas computacionales. El entorno grafico llamativo e intuitivo promueve indagar, explorar y descubrir más sobre este software.

A demás cuenta con una variedad de herramientas en las que se pueden encontrar aplicaciones de la inteligencia artificial para análisis de datos.

2.3 Marco Conceptual

Conceptualizando un motor es una máquina que a partir de una energía suministrada puede transformarla en otro tipo de energía o generar un movimiento para la realización de un trabajo,

estos pueden ser eléctricos, los cuales a su vez vienen clasificados por su voltaje nominal como lo son monofásicos, bifásicos y trifásicos, los últimos mencionados poseen tres líneas de alimentación de la misma magnitud, pero desfasadas entre si 120° eléctricos, normalmente los motores pueden realizar trabajos continuos sin embargo debido a factores ambientales, de desgaste mecánico o eléctrico, se presenta un estado de falla o parada inesperada el cual debe ser diagnosticado para su reparación y para ello las nuevas tendencias tecnológicas han tomado fuerza como lo es la inteligencia artificial, la cual por medio de datos adquiridos a través de sensores y microcontroladores, aprende y se adapta al medio que la rodea generando una respuesta acertada con el menor índice de error.

2.4 Marco Contextual

Laboratorio de máquinas eléctricas LE 102 ubicado en el edificio de laboratorios electrónica de la universidad Francisco de Paula Santander de Cúcuta, norte de Santander, de Colombia como se observa en la figura 5. El cual permitió interactuar con los diversos estudiantes y docentes que tienen acceso al laboratorio para sus prácticas o clases, y así puedan adquirir las nuevas habilidades y conocimientos.

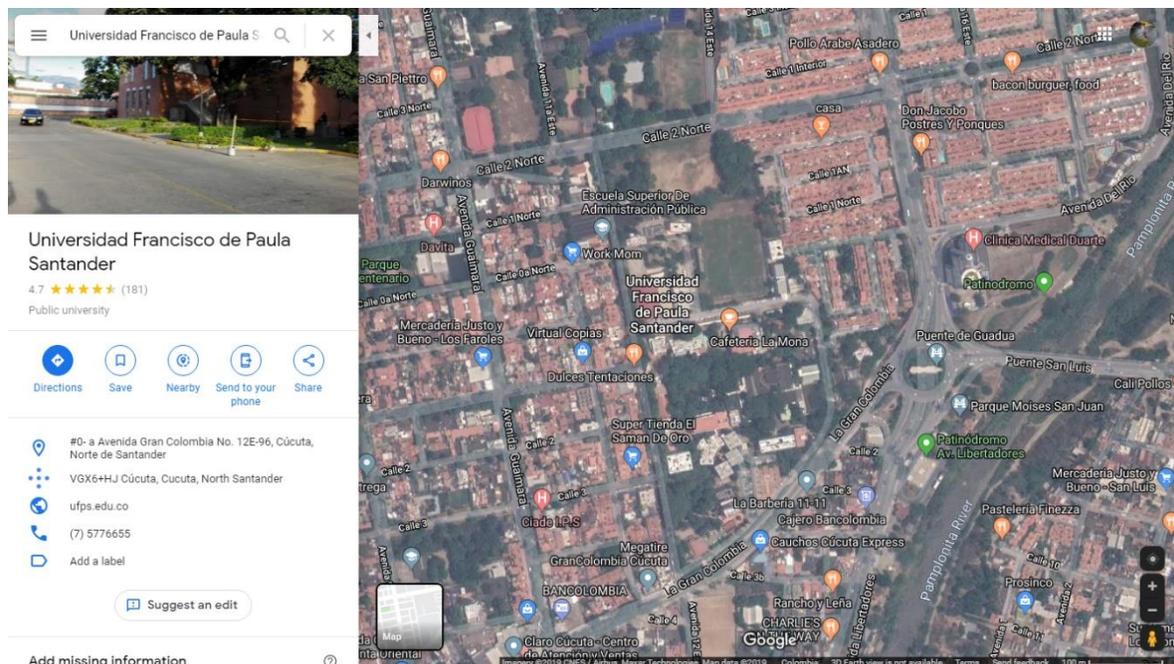


Figura 5. Vista satelital de la ubicación de la Universidad Francisco de Paula Santander

Fuente: Google Maps, 2019.

Este laboratorio cuenta con todos los equipos y herramientas necesarias para llevar a cabo todas las situaciones que se pueden trabajar en un laboratorio de máquinas eléctricas, contando con equipos como fuentes variables DC y AC trifásica, equipos de medida de voltajes, corrientes y potencias eléctricas, cuenta con máquinas rotatorias como son los motores eléctricos o frenos electromagnéticos y bananas (cables) para su conexión.

2.5 Marco Legal

En el siguiente cuadro se muestran la normativa que se deben cumplir para el desarrollo del proyecto. Se tienen en cuenta normas relacionadas con motores, conexión, manejo eléctrico y de seguridad.

Tabla 1. Compilación de las normas

ISO	2372/2373	1974	Vibración mecánica de máquinas con velocidades de operación entre 100 y 200 rev/s. Se aplica a motores de corriente alterna trifásica y a motores de corriente continua con alturas de eje entre 80 y 400 mm.
ISO	3945	1985	Medida y evaluación de la severidad de vibración en grandes máquinas rotativas, in situ con velocidades de operación entre 10 y 200 rev/s.
API	670	1993	Monitorización en tiempo real y la protección de maquinaria crítica.
ISO	10816	1995	Vibración mecánica. Evaluación de la vibración en una maquina mediante medidas en partes no rotativas. Reemplaza la ISO 2373 y 3945.
ISO	7919	1996	Vibración mecánica de máquinas no alternativas – Medidas en ejes rotativos y evaluación
NTC	2050	1998	Instalaciones de conductores y equipos conectados a la red eléctrica para disponer de las consideraciones de seguridad.
ANSI	2526	2003	Vibración mecánica. Evaluación de la vibración en una máquina mediante medidas en partes no rotativas. Este estándar es idéntico y ha sido reproducido a partir de la ISO 10816-1.
ISO	9001:2000	2003	Gestión de calidad en los laboratorios de física eléctrica, eléctricos, instrumentación, electrónica analógica y digital.
NTC	2805	2005	Máquinas eléctricas rotatorias. Especificaciones nominales y características de funcionamiento.
NTC	5105	2014	Máquinas eléctricas rotatorias. Clases de eficiencia de motores de inducción trifásicos, de una sola velocidad (código-IE).
IEC	60034-8	2014	Designación de conexiones y sentido de giro para máquinas eléctricas rotativas.
NTC	3477	2016	Maquinas eléctricas rotatorias. Métodos para la determinación de las pérdidas y de la eficiencia a partir de ensayos.
ISO	45001	2016	Sistema de gestión de seguridad y salud.
acuerdo	090	2016	El cual se adopta la Política de Seguridad y Salud en el Trabajo de la Universidad Francisco de Paula Santander.

De acuerdo a la tabla anterior, se aplicó la norma ISO 10816 de 1995 para el análisis de la vibración presente en las partes no rotativas del motor, también la norma NTC 2805 de 2005 para la determinación del funcionamiento nominal del motor, la norma NTC 2050 para determinar el calibre y tipo de conductor utilizado para alimentar el motor, y la norma ISO 9001:2000 de 2003 y el acuerdo 090 de 2016 para la correcta y segura practica de las pruebas y análisis realizados al motor.

3. Diseño Metodológico

3.1 Tipo de Investigación

Para la realización de este proyecto de grado se aplicó dos tipos de investigación las cuales son descriptiva y exploratoria, con un desarrollo cuantitativo.

Según Tamayo (xxxx), en su libro Proceso de Investigación Científica, la investigación descriptiva “comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, y la composición o proceso de los fenómenos. El enfoque se hace sobre conclusiones dominantes o sobre grupo de personas, grupo o cosas, se conduce o funciona en presente”.

Partiendo de la definición anterior se hizo un registro y análisis de los datos recolectados del motor de inducción trifásico para su interpretación y posterior descripción de su funcionamiento en estado normal y anormal.

Según Ander (1977), en su libro técnicas de investigación social, la investigación exploratoria:

Presenta una visión general del tema de estudio, sin llegar a desarrollar más que conceptos básicos o caracterizar una situación o problemática determinada. Dos son las características generales de este tipo de investigaciones. 1) El poco estudio del tema elegido, lo cual limita la formulación de hipótesis precisas o elaborar una descripción detallada; y, 2) La escasa contribución de la teoría existente a la comprensión del fenómeno o conjunto de fenómenos estudiados. (p.35)

Partiendo de la definición anterior se realizó un estudio en el campo de la inteligencia artificial para poder definir la estrategia más adecuada para el análisis e interpretación de los datos y así se obtuvo la descripción de un estado normal o falla en el motor trifásico.

La metodología que se desarrolló fue un modelo cuantitativo en el cual se utilizan instrumentos para la recolección de datos numéricos y en la medición sistemática para su análisis e interpretación, el análisis se desarrolló aplicando modelos matemáticos computacionales en el cual la interpretación adecuada según su estrategia de inteligencia artificial entrega un resultado general y específico de su compartimiento.

3.2 Universo de la Investigación

La población y muestra no se aplicará para el desarrollo, en este caso será universal y el objeto de estudio es un motor de inducción trifásico.

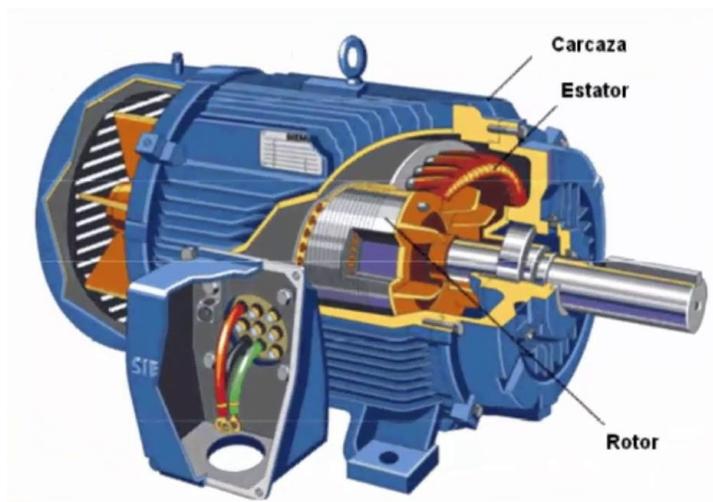


Figura 6. Motor trifásico

Fuente: Prada, s.f.

MOTOR							CE
TYPE: TM 132S2-2 T3A		132S2-2	(H)	S1-100%	2014	IEC60034	
SN		ThCl. F	IP55	IMB3	N.W.: 52 KGS		
V Δ / Y	Hz	min ⁻¹	kW	A	cosφ	IE3-90.1(100%)	
400/690	50	2930	7.5	13.4/7.7	0.9	90.2(75%)	
460/795	60	3520	9	13.4/7.7	0.9	89.1(50%)	
						BEARING DE-NDE: 6308-6208	

Figura 7. Placa característica

Fuente: Farina, 2018.

Las imágenes anteriores son un ejemplo para contextualizar el universo de la investigación.

Los elementos que componen el motor trifásico son: caja de conexiones, carcasa, platillos, ventilador.

4. Desarrollo del Proyecto

4.1 Recopilar Información Basada en la Detección de Fallas en los Motores Trifásicos

En el desarrollo de este objetivo se plantean las fallas a trabajar y como se presentan en el motor trifásico, como se realiza la prueba de vacío, corto circuito y prueba DC para su posterior aplicación y así obtener los datos que permitieron la caracterización del motor ya que no se cuenta con la placa característica del mismo.

El desarrollo metodológico que se aplico es de tipo descriptivo, ya que se toman bases de otros proyectos, artículos y libros, en los cuales se describe el funcionamiento de un motor de inducción trifásico, en funcionamiento nominal y en presencia de fallas mecánicas o eléctricas, eligiendo las fallas mencionadas a trabajar.

De manera sistemática se presenta a continuación por medio de ítems el desarrollo del objetivo para tener una mejor percepción y presentación más ordenada de lo que se llevó a cabo en el mismo.

4.1.1 Fallas seleccionadas para desarrollar. Después del análisis de los tipos de fallas que se pueden presentar en el motor de inducción trifásico plasmadas en el marco teórico, se seleccionaron basándose en que sean realizables y que su costo de realización no sea muy elevado para el desarrollo de este proyecto, las cuales serán nombradas y descritas a continuación:

Vibración:

Las fallas por vibración en los motores de inducción trifásica se pueden presentar por una variedad de causas, como son las de origen mecánico y las de origen eléctrico.

Origen mecánico:

Un desbalance y/o desalineación del rotor.

Falla en los rodamientos.

Aflojamiento mecánico (tornillos, carcasa, etc.).

Origen eléctrico:

Desbalance en una de las fases de alimentación.

Devanados abiertos o en corto-circuito.

Desconexión de una de las fases de alimentación.

Como efecto de este tipo de falla se observa una vibración anormal en el funcionamiento del motor, ruido electromagnético y fuerzas radiales y axiales no deseadas.

Por lo tanto, se seleccionó para su análisis la falla por vibración de partes no rotativas del motor trifásico.

Desconexión y Desbalance de fases eléctrica:

Esto se presenta cuando una de las tres fases de alimentación del motor trifásico se desconecta o presenta una caída de una fase haciendo la tensión igual a cero.

El efecto de este tipo de falla en el motor se presenta como una vibración anormal en su funcionamiento como una disminución de velocidad o si está en estado de reposo no arrancara, en las redes de alimentación se observará la caída de tensión y el aumento de corriente en las otras fases que estén conectadas, esto será efecto para conservar la potencia del sistema.

En resumen, se analizaron las fallas de vibración de partes no rotativas del motor, desconexión de fase y desbalance de fase.

4.1.2 Análisis y caracterización del motor trifásico. Antes de comenzar con el diseño del sistema electrónico y la selección de los elementos utilizados para la adquisición de datos, se realizaron las pruebas de vacío, corto circuito y prueba DC como se muestra a continuación, para obtener los parámetros umbrales de voltaje y corriente a los cuales dichos elementos se verán sometidos además de la potencia del motor, su velocidad y las características internas del circuito magnético.

Potencia útil del motor. Se observó que la conexión interna del motor está en estrella, al no conocer el valor de la potencia del motor, se aplica la siguiente fórmula de potencia útil (Vargas J. A., 2012):

$$P_u = 1.82 * D_r^2 * L_r * n$$

Donde:

D_r es el diámetro del rotor en metros; L_r es la longitud del rotor en metros; n es la velocidad en rpm.

En la placa característica del motor el único valor legible y que se pudo rescatar fue su velocidad $n = 1700 \text{ rpm}$, para conocer los valores de D_r y L_r se realizó el desmontaje del motor y se tomaron las medidas como se evidencia en las imágenes a continuación:



Figura 8. Desmontaje del motor trifásico



Figura 9. Diámetro del rotor, $D_r = 70\text{mm} = 0.07\text{m}$

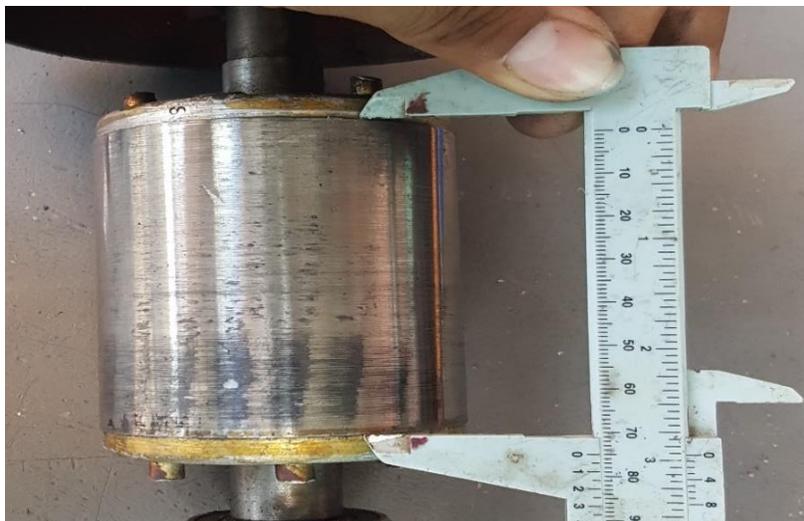


Figura 10. Longitud del rotor, $L_r = 75\text{mm} = 0.075\text{m}$

Con los datos ya adquiridos de n , L_r y D_r , se aplicó la fórmula de potencia útil y se obtuvo:

$$P_u = 1.82 * (0.07\text{ m})^2 * (0.075\text{ m}) * (1700\text{ rpm})$$

$$P_u = 1.137\text{ HP} = 847.86\text{ W}$$

Con el valor de la potencia útil del motor trifásico que se obtuvo, se procedió a realizar las pruebas que permitieron la caracterización del motor.

Pruebas para la caracterización del motor.

Prueba DC.

Se realizó esta prueba para determinar el valor de la resistencia de estator R1, para ello se aplicó un voltaje continuo a los devanados y se midió la corriente que circula por ellos, con los datos obtenidos se aplica la ley de Ohm para hallar la resistencia, con un voltaje aplicado de

0.5VDC.

Como el motor se encuentra conectado en Estrella, para determinar la resistencia por fase se divide en 2 la resistencia que se obtiene entre los dos devanados.

$$R = \frac{R_{devanados}}{2}$$

Tabla 2. Resultados obtenidos de la prueba DC realizada al motor trifásico

Devanados	Corriente (mA)	Resistencia devanado(Ω)	Resistencia por fase(Ω)	Resistencia medida con el multímetro entre devanados (Ω)
L1-L2	100	5	2.25	5.6
L1-L3	90	5.55	2.775	5.2
L2-L3	100	5	2.5	5

Prueba rotor libre o vacío. Se realizó la prueba en vacío del motor en la cual se obtienen los datos de Potencia, voltaje, corriente y velocidad en vacío como se muestra a continuación:

P_o=190 W; **V_o**=220 V; **I_o**=2.48 A; **n**=1790 rpm



Figura 11. Velocidad del motor en vacío de 1790 rpm

Puesto que las pérdidas en el devanado primario son muy pequeñas frente a las pérdidas en el hierro (núcleo) se tiene que la potencia medida en la prueba que corresponde a las pérdidas en vacío son aproximadamente iguales a las pérdidas en el hierro. (Chaustre, 2019)

$$P_o \cong P_{fe}$$

Se aplican las siguientes fórmulas para determinar los valores de resistencia del núcleo y reactancia magnetizante:

$$\cos \varphi_o = \frac{P_{fe}}{V_o * I_o} \quad (1)$$

$$I_{fe} = I_o * \cos \varphi \quad (2)$$

$$I_m = I_o * \sin \varphi \quad (3)$$

$$R_{fe} = \frac{V_o}{I_{fe}} \quad (4)$$

$$X_m = \frac{V_o}{I_m} \quad (5)$$

Donde:

(1) Factor de potencia del circuito en vacío, (2) Corriente del núcleo, (3) Corriente magnetizante, (4) Resistencia del núcleo, (5) Reactancia de magnetización.

Aplicando las ecuaciones anteriores se obtuvo como resultado:

$\varphi_o = 69.63^\circ$ Angulo del factor de potencia en vacío.

$I_{fe} = 0.863 \text{ A}$

$I_m = 2.32 \text{ A}$

$R_{fe} = 254.92 \ \Omega$ Resistencia del núcleo.

$X_m = 94.82$ Reactancia de magnetización.

Prueba de corto circuito o rotor bloqueado.

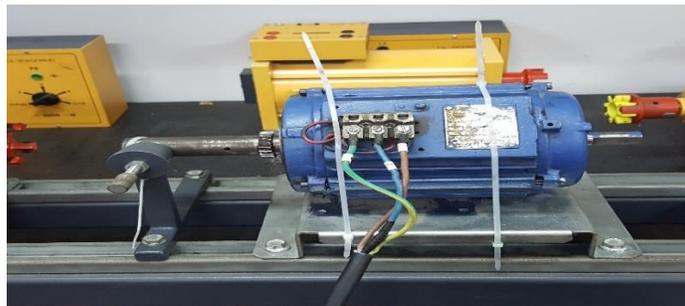


Figura 12. Prueba de rotor bloqueado aplicada al motor en el laboratorio de máquinas eléctricas LE 102 de la Universidad Francisco de Paula Santander

Los datos que se obtuvieron por medio de esta prueba son potencia, voltaje y corriente en corto circuito como se muestra a continuación:

$P_{cc}=68 \text{ W}$; $V_{cc}=48 \text{ V}$; $I_{cc}=2.18 \text{ A}$

Con el análisis de los datos obtenidos en esta prueba se obtuvieron los valores de las pérdidas en el cobre del motor, ya que las pérdidas R_c son despreciables frente a R_1 y R_2 . La prueba se realizó en el laboratorio de máquinas eléctricas LE 102, la cual se llevó a cabo bajo una temperatura adecuada, razón por la cual no es necesario hacer el ajuste por temperatura; con esta consideración, se procede a utilizar las siguientes ecuaciones para el cálculo de los parámetros del motor:

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 * V_{cc} * I_{cc}} \quad (6)$$

$$Z = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} * \angle\varphi \quad (7)$$

$$Z = R_{cc} + jX_{cc} \quad (8)$$

$$R_{cc} = R_1 + R_2' \quad (9)$$

$$X_{cc} = X_1 + X_2' \quad (10)$$

Donde:

(6) Factor de potencia del motor en corto circuito, (7) y (8) es la impedancia del motor, (9) es la resistencia del motor y (10) la reactancia del motor.

Aplicando las formulas se obtiene;

$$\varphi = 77.52^\circ$$

$$Z = 22.01 \angle 77.52 = 4.75 + j21.49$$

$$R_{cc} = 4.75\Omega$$

Con el valor conocido de $R_{cc} = 4.75\Omega$ y el valor de $R_1=2.5\Omega$ de la prueba DC, se obtiene;

$$R_2' = R_{cc} + R_1 = 2.25\Omega$$

Tomando la ecuación (10) y asumiendo que $X_1 = X_2'$, se tiene;

$$X_1 = X_2' = \frac{X_{cc}}{2} = 10.745$$

A manera de organizar los resultados obtenidos en la prueba de rotor bloqueado se plasman en la siguiente tabla.

Tabla 3. Tabla de resultados obtenidos en la prueba de corto circuito realizada al motor trifásico

Resistencia de estator R_1	2.5 Ω
Resistencia de estator R_2'	2.25 Ω
Reactancia de estator X_1	10.745
Reactancia de rotor X_2'	10.745
Resistencia del núcleo	254.92 Ω
Reactancia de magnetización	92.82
Velocidad del motor (n) en rpm	1700

Con la adquisición de los datos a través de las pruebas que se realizaron al motor trifásico, por medio de un script de Matlab elaborado por (Vargas J. A., 2012) nos entrega las curvas características del motor concernientes a torque vs velocidad y potencia vs velocidad como se muestra a continuación:

```

Editor - E:\TESIS\pruebas\caracterizacion_motor.m
caracterizacion_motor.m
4 %
5 clc; clear all % Borrar pantalla y variables del sistema
6 %
7 P = input('Ingrese la potencia del motor en HP. P = ');
8 f = input('Ingrese la frecuencia de la red en Hz. f = ');
9 VL = input('Ingrese el voltaje de línea en voltios VL = ');
10 Rs = input('Ingrese la resistencia por fase del estator en ohm. Rs = ');
11 Rr = input('Ingrese la resistencia por fase del rotor en ohm. Rr = ');
12 Xs = input('Ingrese la reactancia por fase del estator en ohm. Xs = ');
13 Xr = input('Ingrese la reactancia por fase del rotor en ohm. Xr = ');
14 Xm = input('Ingrese la reactancia por fase de magnetización en ohm. Xm = ');
15 Rc = input('Ingrese la resistencia por fase del núcleo en ohm. Rfe = ');
16 p = input('Ingrese el número de polos del motor. 2p = ');
17 Co = input('Ingrese el tipo de conexión del motor: "Y" estrella ó "D" delta = ');
18 disp('Los valores del circuito del rotor deben referirse al estator')
19 pause(3)
20 switch Co

```

Figura 13. Script de Matlab listo para ingresar los datos obtenidos en las pruebas realizadas al motor trifásico

Fuente: Vargas, 2012.

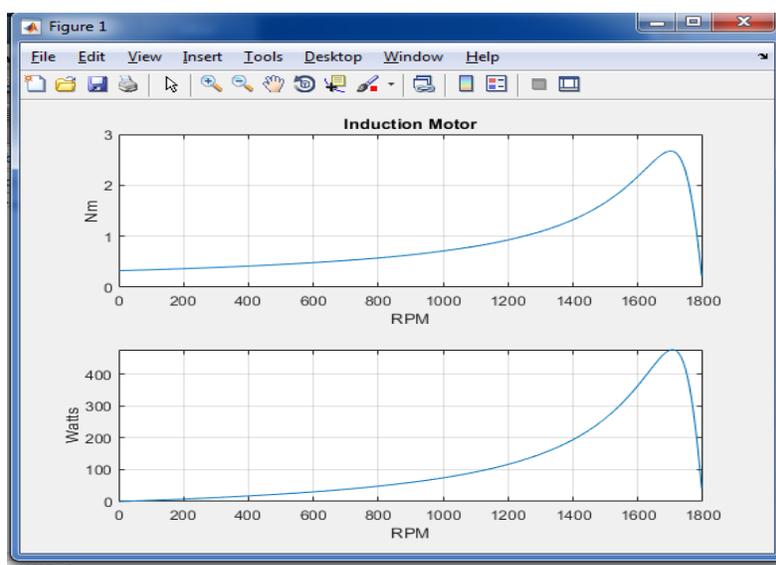


Figura 14. Curva Torque vs Velocidad y Potencia vs Velocidad obtenidas de matlab

En conclusión, con las pruebas, análisis y posterior caracterización del motor trifásico, se obtuvo la potencia y parámetros del circuito magnético que fueron útiles para graficar las curvas que se aprecian en la figura 13 y 14, debido a esto se avanzó a la siguiente etapa del proyecto, la cual consiste el diseño electrónico y mecánico, en la cual también se realizó la selección de la

estrategia de inteligencia artificial y los elementos a usar.

4.2 Diseño Mecánico y Electrónico para Realizar la Práctica de Detección de Fallas en Motores Trifásicos Basado en Inteligencia Artificial

Para el desarrollo de este objetivo, se realizó el diseño estructural y electrónico del proyecto en el cual se incluye la selección de la estrategia de inteligencia artificial a aplicar para el aprendizaje por medio de los datos obtenidos al poner en marcha el motor en su estado de trabajo nominal y en estado de falla, además de la selección de los elementos electrónicos con los cuales se llevará a cabo la lectura de las variables como lo son sensores de voltaje, corriente y vibración, la selección de un microcontrolador para la adquisición de los valores obtenidos de los sensores y la selección de la herramienta que se usó para implementar la estrategia de inteligencia artificial.

Se aplicó un desarrollo metodológico de tipo explicativo, ya que se tomaron como fundamentos para la selección todos los datos que se obtuvieron en el objetivo anterior, realizando un análisis de lo que se eligió de acuerdo a las características que debe poseer para cumplir los requerimientos que permitió el correcto tratamiento de los datos obtenidos del motor de inducción trifásico.

Al igual que en el objetivo anterior se plantea sistemáticamente el desenlace y la justificación de la selección de los componentes a través de organizadores de información y herramientas cuantitativas.

4.2.1 Selección de la estrategia de inteligencia artificial. Antes de empezar el proceso de diseño mecánico y electrónico, se realizó la selección del tipo de inteligencia artificial a trabajar,

para ello se tuvieron en cuenta diversos métodos. Estos métodos se desarrollan a través de la experiencia y no se cuenta con modelos matemáticos definidos. Se puede decir, que la inteligencia artificial incluye características humanas como el aprendizaje, la adaptación, el razonamiento, la autocorrección y el mejoramiento implícito.

Lo anteriormente mencionado se puede ver evidenciado en las ventajas que proporcionan dichos métodos, las cuales se muestran a continuación:

No requiere de modelos matemáticos para su implementación.

Son muy útiles para detectar y diagnosticar fallas, siempre y cuando el sistema experto contenga el conocimiento requerido del mismo.

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea ahora las características que debe poseer la estrategia de inteligencia artificial que se escogió para desarrollo de este proyecto, las cuales son:

Tolerante al ruido.

Robusta.

Adaptable a los distintos rangos de operación.

Los modelos matemáticos no son necesarios para su implantación.

Gran capacidad de procesamiento.

Se analizó estas características y la estrategia escogida que mejor se adapta y teniendo en cuenta los antecedentes de este proyecto es el método de redes neuronales.

Con la estrategia a aplicar ya seleccionada se procedió a la selección de los componentes electrónicos que se utilizaron, ya que estos fueron necesarios a la hora del diseño mecánico y eléctrico por lo cual se debió tener en cuenta las dimensiones que ocupan y de sus respectivos pines de conexión.

4.2.2 Selección de los componentes electrónicos. Para la selección de los componentes como lo son sensores, microcontrolador y herramienta para la implementación de la red neural ya definida anteriormente, se hizo necesario la realización de tablas comparativas para su posterior análisis por medio de una matriz de pugh para realizar la mejor selección.

A continuación, se presenta la comparación de los diferentes sensores que se exponen como candidatos para ser seleccionados:

Tabla 4. Cuadro comparativo de sensores de voltaje, corriente y vibración

N°	Nombre dispositivo	Características	precio
1	Sensor de voltaje Zmpt101b	Sensor de voltaje 250V-AC con salida análoga adecuada para arduino o microcontroladores. Cuenta con un transformador de voltaje para mayor aislamiento entre el voltaje de entrada y etapa de medida. No requiere circuito adicional para el voltaje de entrada. Dimensiones 50*19mm.	\$24000 
2	Sensor de voltaje Fz0430	Sensor de 0-25V DC con salida análoga adecuada para arduino o microcontroladores. Sistema con divisor de tensión resistiva. Necesita un sistema para adecuar la señal AC de 120V a 25V DC para su funcionamiento.	\$6000 
3	Sensor de corriente ACS712-05a	Sensor de corriente AC o DC. Sensor de funcionamiento con efecto hall de bajo offset. Funcionamiento de 0-5A, alimentado de 5V y salida análoga adecuada para uso con arduino o	*8500

N°	Nombre dispositivo	Características	precio
		<p>microcontroladores. Soporta sobre picos de hasta 5 veces la corriente nominal. Dimensiones de 31*14mm.</p>	
4	Sensor de corriente ACS712-30a	<p>Sensor de corriente AC o DC. Sensor de funcionamiento con efecto hall de bajo offset. Funcionamiento de 0-30A, alimentado de 5V y salida analógica adecuada para uso con arduino o microcontroladores. Soporta sobre picos de hasta 5 veces la corriente nominal. Dimensiones de 31*14mm.</p>	<p>\$9500</p> 
5	Sensor de corriente AC-5 A Ta12-100	<p>sensor de corriente no invasivo de alta precisión. Funcionamiento entre 0-5 A, voltaje de alimentación de 5V DC con salida analógica adecuada para arduino o microcontroladores. Dimensiones 48*32*22mm.</p>	<p>\$25000</p> 
6	Sensor de vibración SW420	<p>Alimentación entre 2-12V DC, salida analógica adecuada para arduino o microcontroladores. Transforma la energía mecánica (vibración) en pulsos que son la frecuencia de la vibración más no la magnitud. Permite calibración con potenciómetro.</p>	<p>\$4200</p> 
7	Sensor de vibración SW-200D	<p>Alimentación entre 2-12V DC, salida analógica adecuada para arduino o microcontroladores. Transforma la energía mecánica (vibración) en pulsos que son la frecuencia de la vibración más no la magnitud. Permite calibración con potenciómetro.</p>	<p>\$5000</p> 
8	Sensor de vibración SW-18010P	<p>Alimentación 5C DC, salida analógica adecuada para arduino o microcontroladores. Transforma la energía mecánica (vibración) en pulsos que son la frecuencia de la vibración más no la magnitud. Permite incrustarse en el dispositivo o lugar a medir. Permite calibración con potenciómetro.</p>	<p>\$5100</p> 

Con los datos plasmados en el cuadro comparativo anterior, se procedió a hacer su respectiva matriz de pugh en la cual se evalúan los criterios de precio, calidad, adaptabilidad y rango de operación dando como resultado los sensores más adecuados aquellos que tienen mayor número en la suma.

Tabla 5. Matriz de pugh para la selección de los sensores

CRITERIO	PESO	SENSOR							
		1	2	3	4	5	6	7	8
precio(\$)	1	0	1	1	1	0	1	1	1
Calidad	2	1	1	1	1	1	1	1	1
Adaptabilidad	2	1	-1	1	0	1	0	0	1
rango de operación	1	1	-1	1	0	1	1	1	1
suma(ponderada)		5	0	6	3	5	4	4	6

Por lo tanto, los sensores que se utilizaron son el Sensor de voltaje Zmpt101b, Sensor de corriente ACS712-05 y Sensor de vibración SW-18010P.

Al igual que con la selección de los sensores, se realizó un cuadro comparativo de las herramientas con las cuales se puede implementar la red neuronal.

Tabla 6. Cuadro comparativo de las herramientas con las cuales se puede implementar la red neuronal

Herramienta	Ventajas	desventajas
PC(Matlab)	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil entrenamiento gracias al Toolbox que incorpora el software. • Gran capacidad de procesamiento de datos para una rápida respuesta de la red neuronal • No requiere dispositivos extras para la visualización de los resultados. • Fácil entendimiento de la RNA gracias a su GUI de Matlab y agradable a la vista para su entendimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita de un PC para poder funcionar. • Los datos deben ser adquiridos y enviados al programa para su funcionamiento.
Arduino	<ul style="list-style-type: none"> • Puede trabajar una red neuronal ya entrenada con buena capacidad de respuesta. • No necesita un programa especializado ya que arduino es de software libre. • Bajo costo para su implementación ya que requiere una tarjeta arduino básica. 	<ul style="list-style-type: none"> • No tiene gran capacidad de procesamiento para entrenar una red. • Para la implementación de una red neuronal se hace bastante extensa en su programación. • Necesita de dispositivos extras para la visualización de los resultados. • Difícil entendimiento para la persona que va a trabajar con ella. • Complejidad media para su comprensión para las personas a trabajar por sus diversas líneas de código.
FPGA	<ul style="list-style-type: none"> • Puede trabajar una red neuronal ya entrenada con buena capacidad de respuesta. • Gran capacidad para el procesamiento de datos para una respuesta de la red neuronal. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necesita tiempo para entrenar la red neuronal y su correcto funcionamiento. • Necesita de dispositivos extras para la visualización de los resultados. • Necesita un software y lenguaje especial para su programación. • Difícil comprensión para las personas a trabajar por sus diversas líneas de código.

De igual manera se realizó el análisis por pesos con la matriz de pugh en la cual se exponen los criterios de capacidad de entrenamiento, velocidad de procesamiento, facilidad de implementación y accesibilidad como se observa a continuación:

Tabla 7. Matriz de pugh para la selección de la herramienta para la implementación de la red neuronal

CRITERIO	PESO	HERRAMIENTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA RED NEURONAL		
		Matlab	arduino	FPGA
Capacidad de entrenamiento	2	1	-1	1
Velocidad de procesamiento	2	1	-1	1
Facilidad de implementación	2	1	0	-1
Accesibilidad	1	1	1	0
Suma(ponderada)		7	-1	2

Por lo tanto, para la implementación de la red neuronal se utilizó la herramienta Matlab 2018.

Para finalizar la etapa de selección, se realizó un Cuadro comparativo de dispositivos para adquisición de datos, en este caso se analizó los tipos de Arduino ya que esta línea de microcontroladores son prácticos, útiles y de un lenguaje de programación con el cual ya se está familiarizado, todo esto se en el siguiente cuadro:

Tabla 8. Cuadro comparativo de dispositivos para la adquisición de datos

N°	Dispositivo	Características	Precio
1	Arduino Uno	Voltaje de funcionamiento 5V, voltaje de alimentación 7-20V. Entradas análogas 6. E/S digitales 14 de las cuales 6 son PWM. Memoria flash de 32Kb, memoria EEPROM 1Kb. Velocidad del reloj 16MHz. Permite comunicación serial, SPI y TWI. Conexión USB-serie.	\$18.000 
2	Arduino Nano	Voltaje de funcionamiento 5V, voltaje de alimentación 7-12V. Entradas análogas 8. E/S digitales 14 de las cuales 6 son PWM. Memoria flash de 16Kb, memoria EEPROM 512Kb. Velocidad del reloj 16MHz.	\$16.000 

N°	Dispositivo	Características	Precio
		Permite comunicación serial y SPI, conexión ICSP. Conexión USB-microUSB.	
3	Arduino Mega	Voltaje de funcionamiento 5V, voltaje de alimentación 7-15V. Entradas análogas 16. E/S digitales 54 de las cuales 15 son PWM. Memoria flas de 256Kb, memoria EEPROM 4Kb. Velocidad del reloj 12-16 MHz. Permite comunicación serial y SPI, conexión ICSP. Conexión USB-serie.	\$35.000



Se realizó su respectiva matriz de pugh en el cual se propusieron los criterios de funcionalidad, comunicación y precio a continuación mostrados:

Tabla 9. Matriz de pugh para la selección del dispositivo de adquisición de datos

CRITERIO	PESO	ARDUINO		
		Uno	Nano	Mega
Funcionalidad	2	-1	1	1
Comunicación	2	1	1	1
Precio	1	1	1	0
Suma(ponderada)		1	5	4

Por lo tanto, el arduino que obtuvo la mayor puntuación en peso y se utilizo es el nano.

Con la selección de los dispositivos electrónicos que se utilizaron y la anterior selección de la red neural como estrategia de inteligencia artificial que se aplicó, se avanza ahora a el diseño de la estructura que soportará al motor y protegerá el sistema electrónico, también el diseño electrónico para la agrupación de los dispositivos de lectura de datos como la alimentación del motor y del sistema anteriormente nombrado.

4.2.3 Diseño del montaje mecánico. Para la elaboración del montaje mecánico, se tuvo en cuenta las características estructurales y de uso que se le darán al motor trifásico, como las condiciones de seguridad que se le deben garantizar al sistema electrónico ante el ruido y a las personas que lo manipulen, aislándolo del medio y haciendo seguro para su empleo en la práctica.

Diseño mecánico de la base para soportar el motor. Se observó en la imagen referida a la prueba de rotor bloqueado, el motor trifásico carecía de una base o soporte que se pudiera acoplar en el laboratorio de máquinas LE 102 ya que este es su lugar de destino, por lo tanto, se diseñó una pieza metálica de iguales dimensiones a las que actualmente se encuentran acoplados los motores de los módulos didácticos del fabricante DE LORENZO presentes en el laboratorio, el cual se puede observar a continuación:

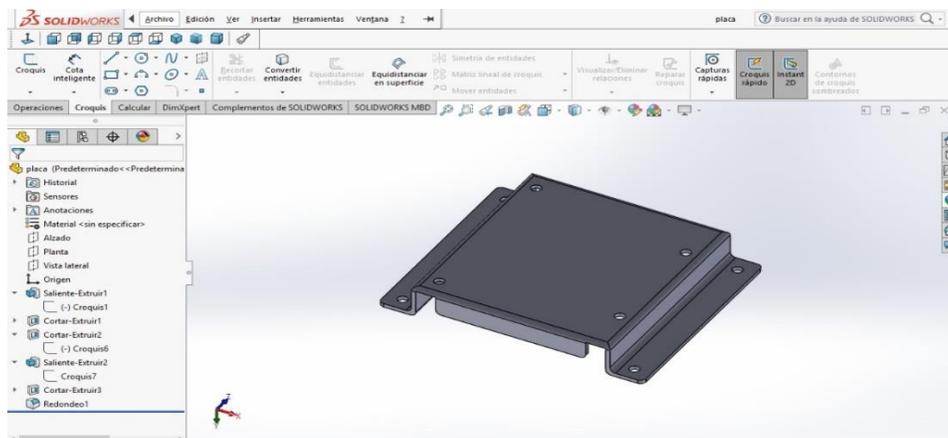


Figura 15. Diseño de la base metálica en SolidWorks, parte que soporta todo el peso del motor

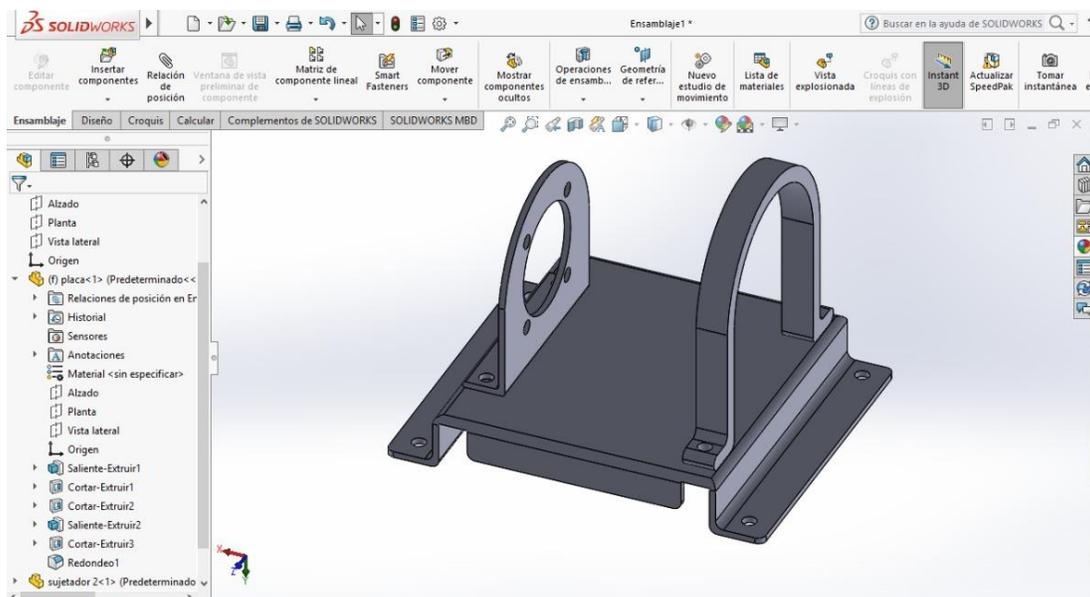


Figura 16. Diseño mecánico en SolidWorks, resultado final y complemento de la figura anterior con las partes metálicas que aseguran el motor a la base

Diseño de la estructura para el soporte y aislamiento del sistema electrónico. Al analizar un sistema electrónico se debe tener en cuenta que en el medio se encuentran ruidos y perturbaciones que pueden afectar las lecturas obtenidas, además se debe salvaguardar la seguridad de las personas que lo vayan a manipular como también la integridad de los dispositivos electrónicos, por lo tanto, se realizó el diseño de una caja protectora la cual dispone de las borneras de conexión para la alimentación trifásica, de dos borneras extra para la conexión de neutro y tierra para dejar como posibilidad el trabajo sobre motores monofásicos realizando arreglos en la configuración de las conexiones de los sensores, también se añadió dos borneras para la conexión de positivo y negativo de una fuente DC para la alimentación de los sensores y Arduino, el proceso de diseño se aprecia a continuación en las figuras 17, 18 y 19.

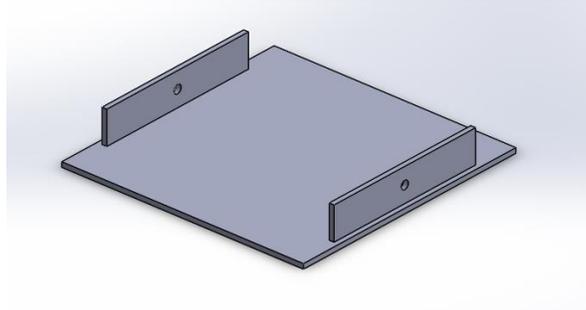


Figura 17. Diseño de la base para la caja que contendrá los componentes electrónicos, elaborada en SolidWorks

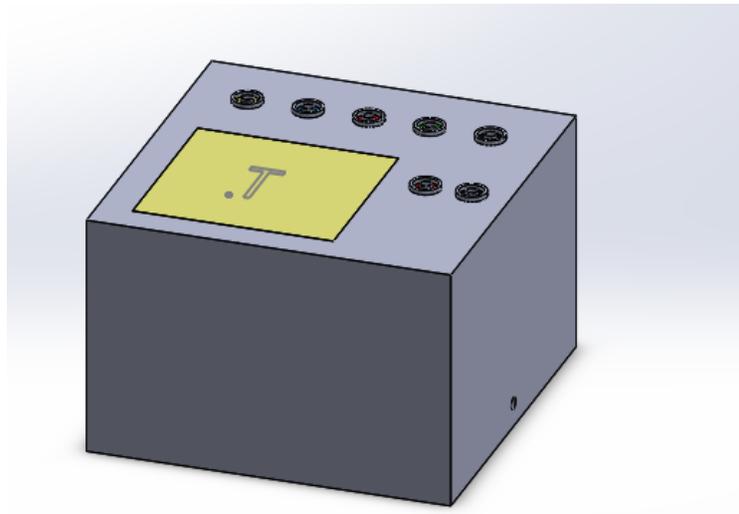


Figura 18. Imagen 3D del diseño en SolidWorks de la forma final de la caja

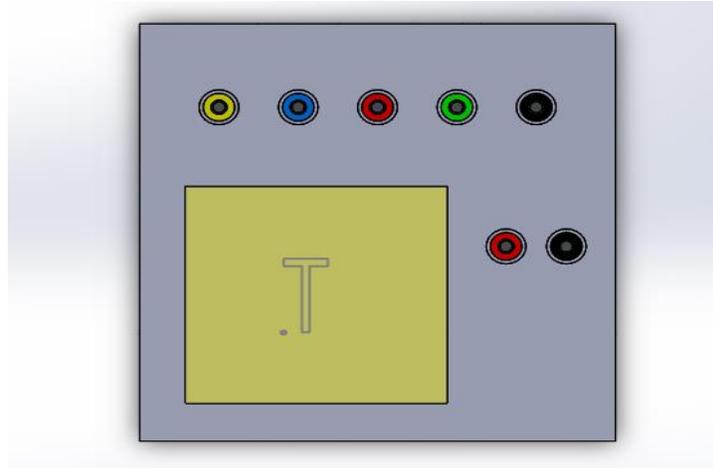


Figura 19. Vista superior de la caja con sus borneras para la conexión de las tres fases (R, S, T), neutro, tierra y alimentación DC para los sensores (Rojo +, negro -)

Establecido el diseño mecánico del proyecto se continua con el diseño electrónico para la agrupación de los dispositivos ya seleccionados y sus conexiones eléctricas.

4.2.4 Diseño electrónico para la agrupación de los elementos seleccionados. Continuando con el proceso que se llevó a cabo para el diseño del proyecto, se realiza la selección de un factor importante a la hora de realizar las conexiones eléctricas como lo es el calibre y tipo de conductor más adecuado a utilizar, por lo tanto, se presenta la información recolectada y su posterior selección.

Selección del cableado para las conexiones de los sensores y alimentación trifásica del motor. Para la selección del cableado de potencia (voltaje y corriente) se hizo un estudio basado en la norma técnica colombiana 2050 o NTC 2050, código eléctrico colombiano.

Los parámetros que debe soportar este conductor son un voltaje de trabajo de 220 V y una corriente de 12 A la cual se da en el arranque del motor que se da en régimen transitorio, después en régimen permanente su corriente se estabiliza en un rango de 2.5 A-2.8 A. Con estos

parámetros se procedió al análisis de los tipos de cable, su tipo de aislamiento y la capacidad de corriente que pueden soportar.

Se comienza por el tipo de conductor, en esta clasificación se encontró de dos maneras, la primera es conductor de alambre aislado, este es igual al conductor de alambre desnudo contando con solo una diferencia, la cual es que cuenta un recubrimiento de material plástico que funciona como capa aislante evitando así que entre en contacto con otro elemento como lo son otros conductores, personas u objetos metálicos. El alambre aislado se utiliza mucho en viviendas y oficinas.

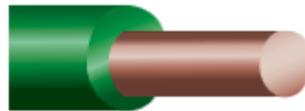


Figura 20. Conductor de alambre aislado

Fuente: Masvoltaje, 2019.

Por otra parte, el cable eléctrico flexible es el más comercializado y el más utilizado, está compuesto por múltiples alambres finos de cobre, recubiertos por materia plástica. Son tan flexibles porque al ser muchos alambres finos a diferencia de un alambre conductor grueso se consigue que se puedan doblar con facilidad ya que son muy maleables.

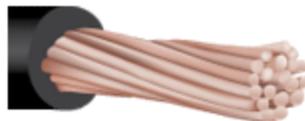


Figura 21. Conductor de cable flexible

Fuente: Masvoltaje, 2019.

Analizando los tipos de conductores se tomó la decisión de trabajar con un cableado de tipo flexible para que al momento de realizar las conexiones no se volviera tedioso debido a la rigidez del conductor.

Se continúa con el tipo de aislamiento adecuado que debe poseer el conductor, esta clasificación se encuentra inscrita la cubierta plástica del conductor como abreviaciones en inglés. Los cables que se utilizan para instalaciones en viviendas y oficinas son: THN, THW, THHW y THWN. El significado de estas abreviaturas es el siguiente:

1 - T (Thermoplastic): Aislamiento termoplástico (está presente en todos los cables).

2 - H (Heat resistant): Resistente al calor hasta 75° centígrados (167° F).

3 - HH (Heat resistant): Resistente al calor hasta 90° centígrados (194° F).

4 - W (Water resistant): Resistente al agua y a la humedad.

5 - LS (Low smoke): Este cable tiene baja emisión de humos y bajo contenido de gases contaminantes.

6 - SPT (Service parallel thermoplastic): Esta nomenclatura se usa para identificar un cordón que se compone de dos cables flexibles y paralelos con aislamiento de plástico y que están unidos entre sí. También se denomina cordón dúplex.

Por lo tanto, con esta información se seleccionó el tipo de aislamiento, el cual se eligió de acuerdo a las condiciones ambientales en las que trabaja el motor, como las practicas se realizan en los laboratorios LG 109 y LE 102 de la universidad Francisco de Paula Santander las condiciones de temperatura en promedio se mantienen a 25°C y asegurando resistencia del

conductor a la humedad, el aislamiento más adecuado es el tipo THW.

Teniendo en cuenta que ya se conoce el tipo de conductor de cobre y su recubrimiento, se procedió a buscar de acuerdo a el parámetro del amperaje que debe soportar dicho conductor el calibre adecuado, el cual podemos obtener de la tabla 10.

Tabla 10. Tabla para la selección del calibre del conductor según el amperaje que debe soportar

Amperaje que soportan los cables de cobre							
Nivel de temperatura:	60°C	75°C	90°C	60°C			
Tipo de aislante:	TW	RHW, THW, THWN	THHN, XHHW-2, THWN-2	SPT			
Medida / calibre del cable	Amperaje soportado			Medida / calibre del cable	Amperaje soportado		
14 AWG	15 A	15 A	15 A	20 AWG	2 A		
12 AWG	20 A	20 A	20 A				
10 AWG	30 A	30 A	30 A				
8 AWG	40 A	50 A	55 A				
6 AWG	55 A	65 A	75 A				
4 AWG	70 A	85 A	95 A				
3 AWG	85 A	100 A	115 A				
2 AWG	95 A	115 A	130 A				
1 AWG	110 A	130 A	145 A				
1/0 AWG	125 A	150 A	170 A				
2/0 AWG	145 A	175 A	195 A				
3/0 AWG	165 A	200 A	225 A				
4/0 AWG	195 A	230 A	260 A			18 AWG	10 A
						16 AWG	13 A
				14 AWG	18 A		
				12 AWG	25 A		

Fuente: Masvoltaje, 2019.

Como se nombró anteriormente se debe asegurar que el conductor soporte un valor pico de corriente en el arranque de 12 A, por lo tanto, se eligió el calibre del conductor para el valor de corriente por encima más cercano, en este caso 15 A, el cual es 14 AWG con aislamiento THW y de tipo flexible.

Con el conductor ya determinado, se procedió a realizar el diseño electrónico en donde se agruparán todos los elementos seleccionados a usar buscando ocupar el menor espacio posible y

tenerlos de manera más ordenada.

Diseño electrónico. Para el diseño electrónico se desarrolla una PCB en la cual se agrupe el arduino seleccionado con los sensores y su alimentación de voltaje DC a través del software Proteus, los sensores por distribución de sus pines y aprovechamiento de espacio quedan ubicados en un borde de la PCB, por lo tanto, se hizo necesario la utilización de jumper para interconectar el terminar negativo común de los sensores con el punto de referencia negativo de la fuente DC, como se muestra en la figura 22 y 23.

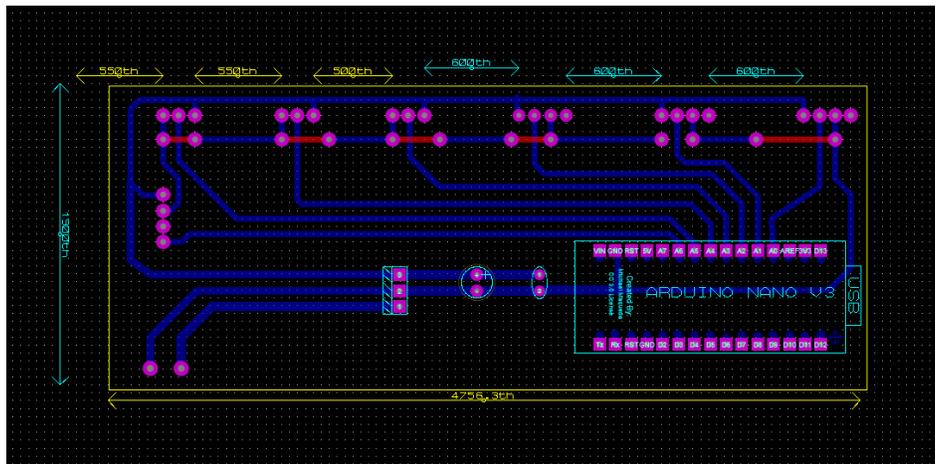


Figura 22. Imagen del diseño de la PCB donde se aprecian las pistas de cobre en el software Proteus

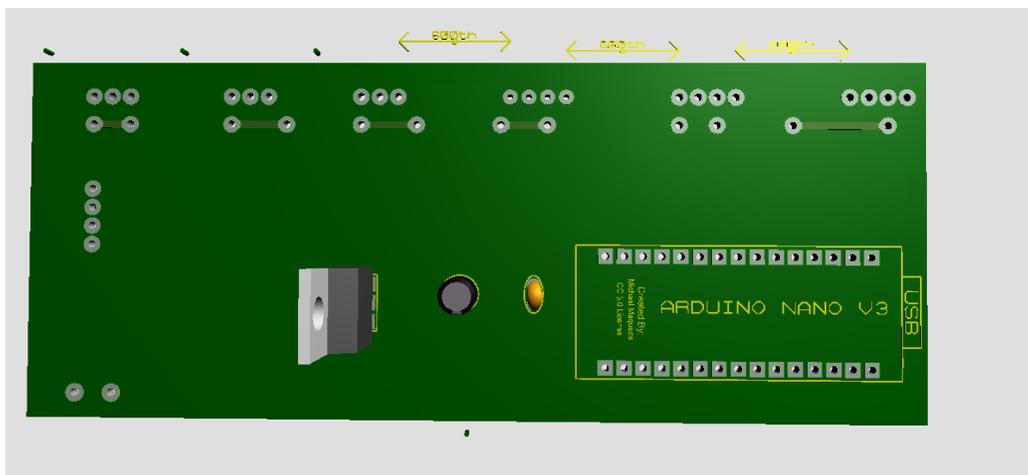


Figura 23. Visualización de la PCB en 3D, en el cual se observan los pines de conexión

En conclusión, con el desarrollo del diseño y selección de los componentes que hacen parte del proyecto, se procedió a la implementación de todo lo anterior plasmado en este objetivo, realizando el análisis de los resultados obtenidos de la red neuronal en su fase de entrenamiento y comprobación de resultados.

4.3 Implementar el Montaje del Banco Didáctico Comprobando el Correcto

Funcionamiento de cada uno de sus Sistemas

Basándose en los cálculos, diseños, selección de todos los componentes y métodos que se aplicaron concernientes a este proyecto que se realizó en el objetivo anterior, se procedió a la fabricación de las partes mecánicas y electrónicas, como a su vez el análisis de la red neuronal por medio del software Matlab, la aplicación del tipo de cable conductor para la realización de las conexiones y posterior toma de datos. Cabe añadir que a medida que se iba materializando el proyecto se procedió a realizar pruebas para observar el comportamiento el sistema.

Se aplicó una metodología descriptiva en la cual se observó cómo paso a paso el proyecto fue adquiriendo su forma final deseada, especificando como se desarrolló y su comportamiento final como un sistema conjunto tal cual como se observa.

El desarrollo de este objetivo se presenta en manera sucesiva en torno a cómo ocurren los hechos de materialización de todos los diseños y la implementación, los resultados obtenidos y los inconvenientes presentados, como se mostrará a continuación.

4.3.1 Implementación de los diseños. Para comenzar se aplicó el diseño que se realizó en el software SolidWorks 2018 de la base metálica para soportar el motor, la cual se hizo en lámina metálica negra de 3mm de grosor, tomando como referencia la base ya existente en el laboratorio de máquinas eléctricas LE 102, como observo el motor no poseía en este punto una manera de fijarse a la base, por lo tanto, se hizo necesario la creación de las partes que dan ajuste al motor en la misma lámina metálica y el resultado se muestra en la siguiente figura.



Figura 24. Implementación del diseño mecánico con el motor asegurado

Una vez asegurado el motor, se prosiguió a la realización de la parte electrónica, con el desarrollo de la PCB para agrupar todos los componentes electrónicos, como se muestra a continuación:

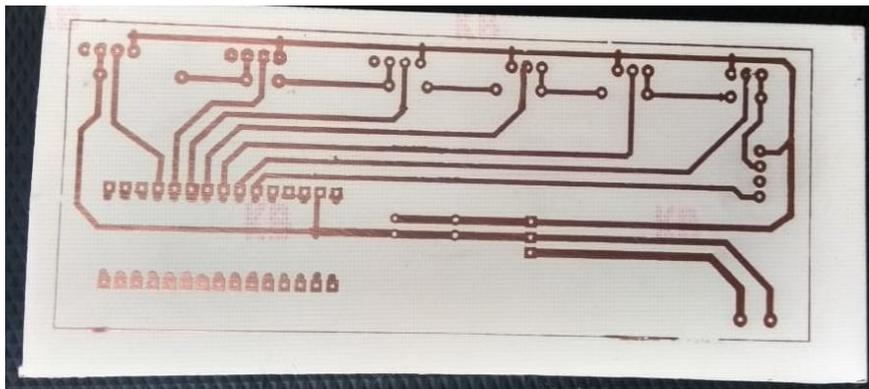


Figura 25. Vista inferior de la PCB donde se observan las pistas de cobre

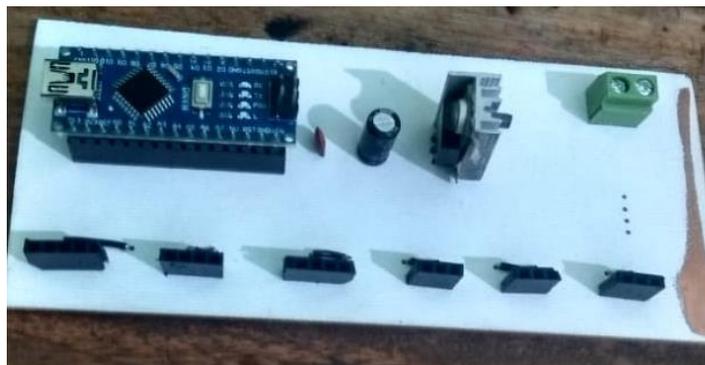


Figura 26. Vista superior de la PCB con el ensamblaje de arduino, su regulador de voltaje y pines de conexión de los sensores

Para obtener las lecturas de las variables deseadas, se calibraron los sensores, primeramente, se utiliza una Protoboard para poner el sensor de corriente, se utilizaron dos instrumentos de medida para obtener una medida más precisa, una pinza voltiamperimetrica VC3267A y un multímetro que se encuentra disponible en el laboratorio de la marca TEST BENCH para sensar

el valor de la corriente y ajustar el sensor a dicho valor como se muestra en la figura 27, para la calibración de los sensores de voltaje se utilizaron la PCB como se muestra e la figura 26 y se acoplo al motor en la figura 24 y por medio del mismo multímetro realizar su calibración como se muestra en la figura 28.



Figura 27. Calibración del sensor de corriente

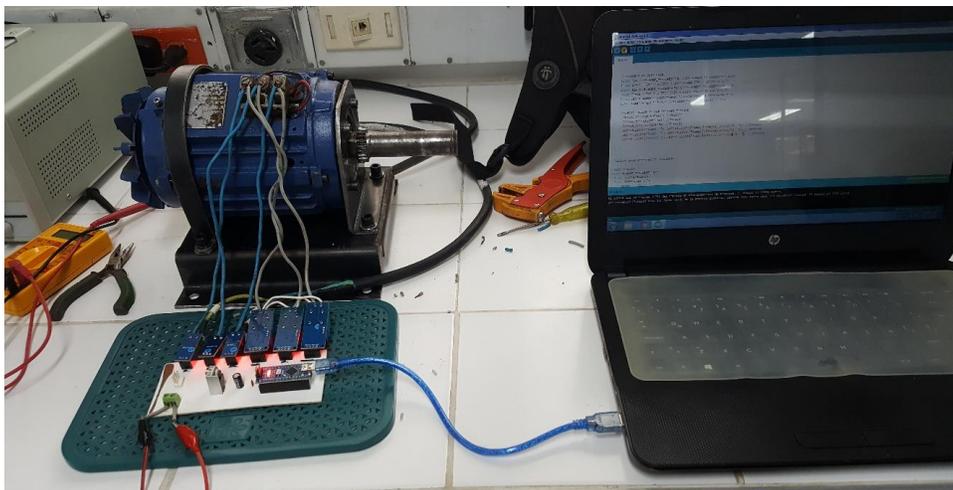


Figura 28. Acople del motor con el sistema electrónico para la calibración de los sensores de voltaje

Posteriormente, se realizó la implementación de la parte mecánica la cual contiene y protege el sistema electrónico, para ello se analizó la posibilidad que en un caso remoto y no deseado un cable de alimentación quede descubierto y propenso a generar una descarga eléctrica en alguna persona, por lo tanto, se tomó la decisión de realizar en acrílico transparente el cual ofrece un aislamiento y protección, y de color transparente para que se pueda apreciar las conexiones internas realizadas.

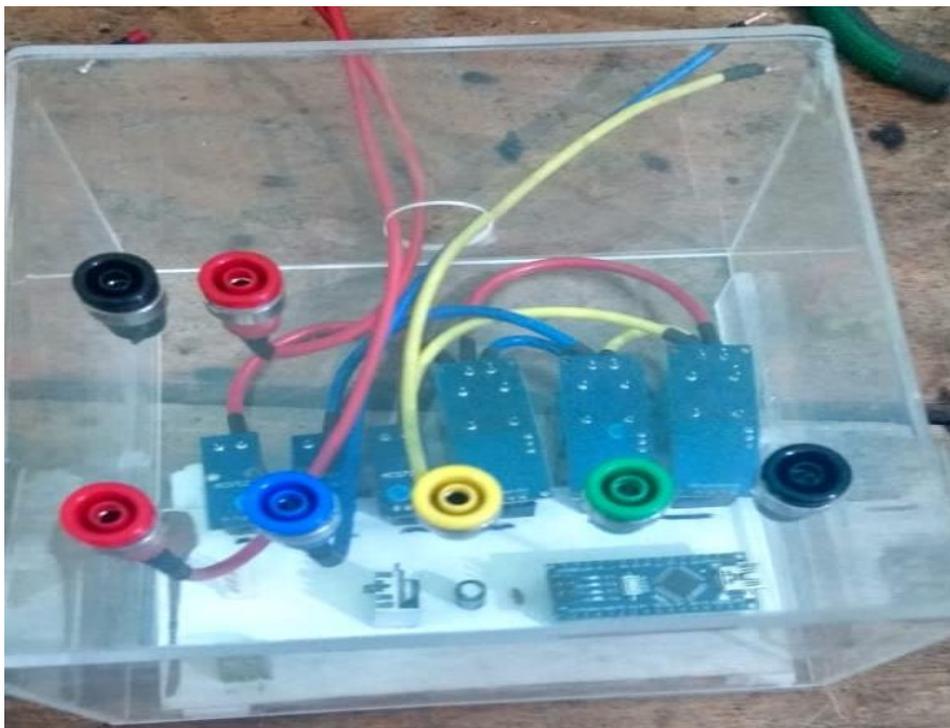


Figura 29. Implementación de la caja protectora del sistema electrónico

Con todo desarrollado se procedió a el ensamble para realizar pruebas de toma de datos, los sensores de voltaje y corriente funcionaron de manera correcta, pero el sensor de vibración presento cierto inconveniente, ya que su mecanismo interno es activado por un resorte que al sufrir movimientos genera una señal analógica o digital, no se pudo adaptar al motor para obtener una lectura la cual nos permitiera detectar esta falla ya que dicha vibración no la

alcanzaba a detectar este sensor, por lo cual se buscó una alternativa para solucionar este problema, así que se utilizó un dispositivo piezoeléctrico para obtener las lecturas el cual entrega una señal analógica de 0 a 5 V interpretada en arduino de 0 a 1023.

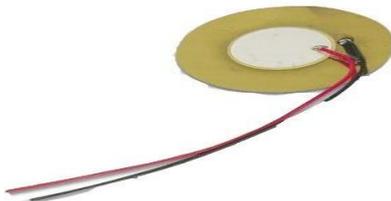


Figura 30. Sensor piezoeléctrico

Fuente: Google Imágenes, s.f.

Como se mencionó anteriormente el lugar final donde se encontrará el motor es el laboratorio de máquinas eléctricas LE 102, por lo tanto, estéticamente se optó por pintar el motor de los colores amarillo y negro como se encuentran en los otros motores de los módulos didácticos del fabricante DE LORENZO y el resultado se presenta a continuación.



Figura 31. Vista lateral del motor pintado



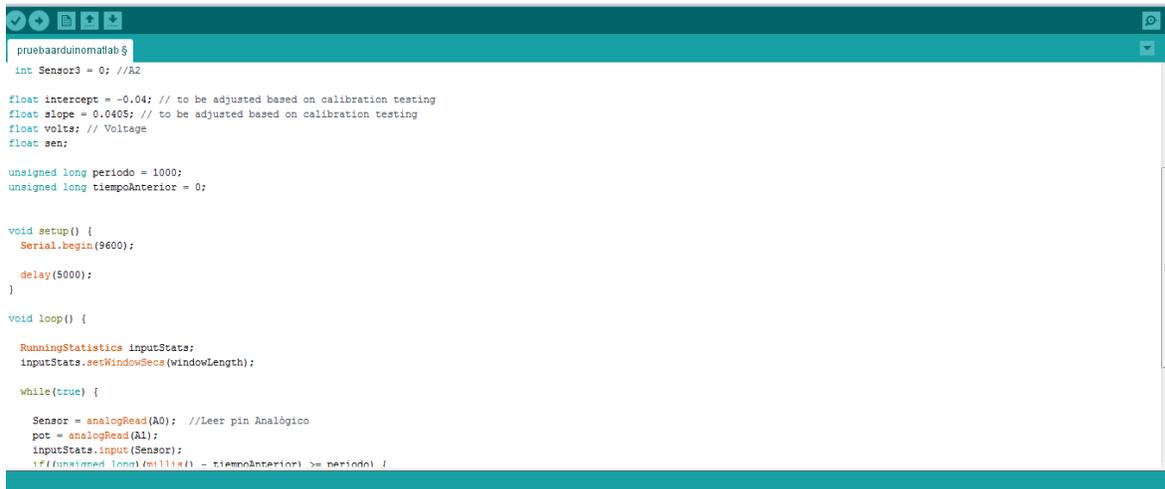
Figura 32. Vista frontal del motor ya pintado

Con todo listo, se acoplaron el motor con el sistema electrónico como se muestra en la figura 33, para dar inicio a las lecturas, adquisición, análisis y aprendizaje de datos obtenidos a través de las pruebas en estado normal y en presencia de una falla seleccionada.



Figura 33. Montaje final del módulo

4.3.2 Adquisición, análisis y aprendizaje de datos. El proceso de adquisición de datos se realizó con un arduino nano, tomando las lecturas recolectadas por medio de los sensores de voltaje alterno, sensores de corriente y el sensor de vibración, todos ellos seleccionados en el objetivo anterior de este proyecto, esto se evidencia en la figura a continuación.



```

pruebaarduinomatlabs
int Sensor3 = 0; //A2

float intercept = -0.04; // to be adjusted based on calibration testing
float slope = 0.0405; // to be adjusted based on calibration testing
float volts; // Voltage
float sen;

unsigned long periodo = 1000;
unsigned long tiempoAnterior = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  delay(5000);
}

void loop() {
  RunningStatistics inputStats;
  inputStats.setWindowSecs(windowLength);

  while(true) {

    Sensor = analogRead(A0); //Leer pin Analógico
    pot = analogRead(A1);
    inputStats.input(Sensor);
    if((unsigned long)(millis() - tiempoAnterior) > periodo) {

```

Figura 34. Parte de la programación en arduino de la adquisición de las lecturas obtenidas de los sensores

Como precedente se tomó la decisión de trabajar la red neuronal con el software Matlab específicamente con Simulink el cual es un entorno de programación visual en forma de bloques que permite realizar simulaciones y generar código a partir de ellos, para lo cual se requiere la comunicación entre la tarjeta que adquiere los datos (Arduino) y el Toolbox del programa Matlab que procesara los datos (Simulink).

A la hora de realizar la comunicación se presentaron diversos inconvenientes, uno de ellos fue por la compatibilidad de librerías y puertos de comunicación, por esta razón la solución fue realizar una escala en la comunicación de la siguiente manera, Arduino-Matlab y Matlab-Simulink de las que se indicará su proceso de desarrollo.

Para la comunicación de Arduino-Matlab primeramente se realizó la programación en el entorno de Arduino (IDE arduino), esta programación se llevó a cabo teniendo en cuenta el manejo de las librerías necesarias para cada sensor, la velocidad de transmisión de datos de los programas y del puerto de comunicación del PC, para este proyecto se utilizó una velocidad de 9600 Baudios. Seguidamente en Matlab se digito las líneas de código correspondientes para que el programa se comunicara con el puerto serial y recibir los datos enviados desde el arduino, en la programación de Matlab se ingresa la cantidad de muestras y de actualizaciones que se quieren recibir, de lo cual se obtuvo una matriz de datos en Excel, los cuales son muy extensos por lo tanto haciendo uso de Matlab como se muestra en la figura 35, al momento de la puesta en marcha del motor para la obtención de los datos se realizó un arranque directo en estrella ya que el pico de corriente no es tan alto, con lo que se graficaron sus correspondientes voltajes, corrientes y vibración en cada uno de los estados(normal, en presencia de vibración, desbalance de cada una de las fases, desconexión de cada una de las fases), para ello se definió la fase 1, 2 y 3 las cuales corresponden a la línea de alimentación conectada en la bornera de color amarillo, azul y rojo respectivamente, como se observa en las figuras 36 a la 44, para tener una mejor interpretación de los datos obtenidos.

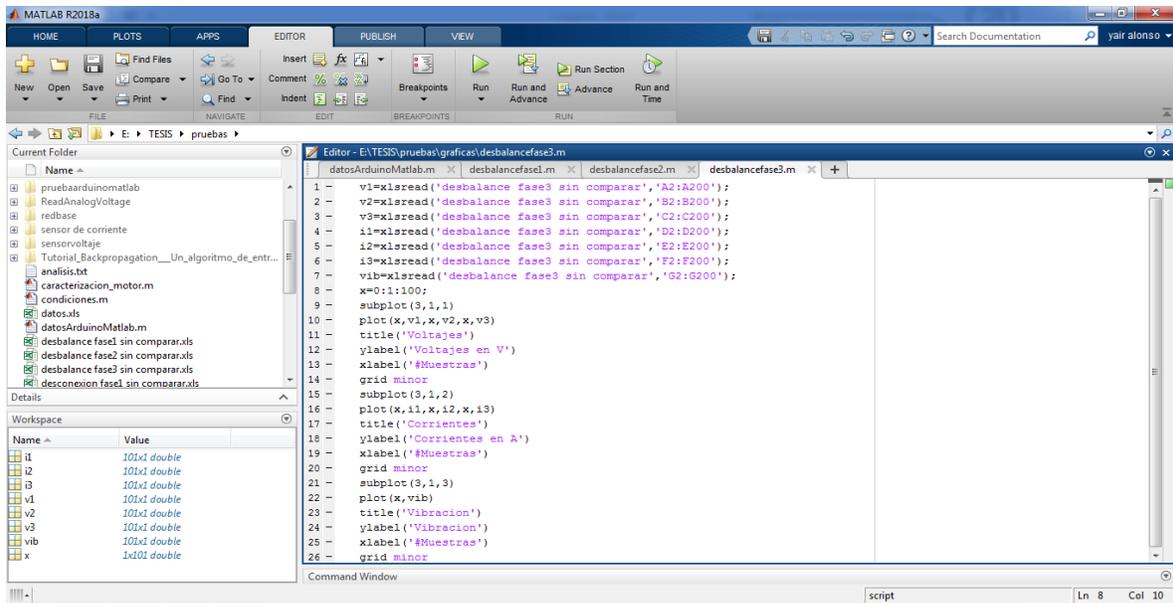


Figura 35. Programación en Matlab para graficar las variables en cada estado de funcionamiento del motor

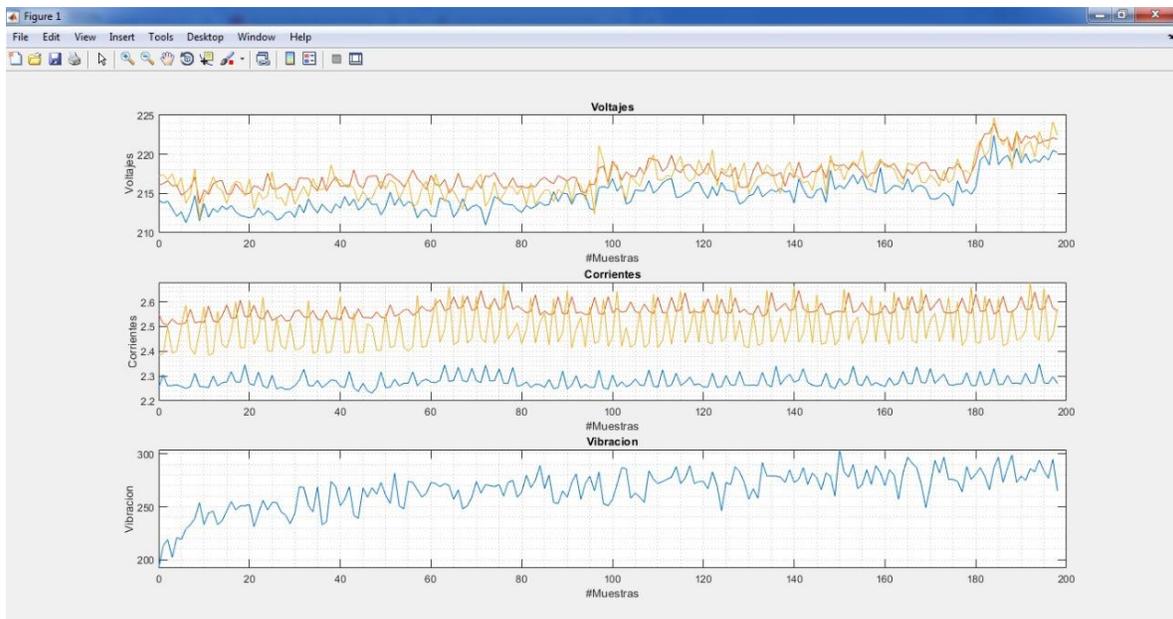


Figura 36. Grafica de los valores en estado normal

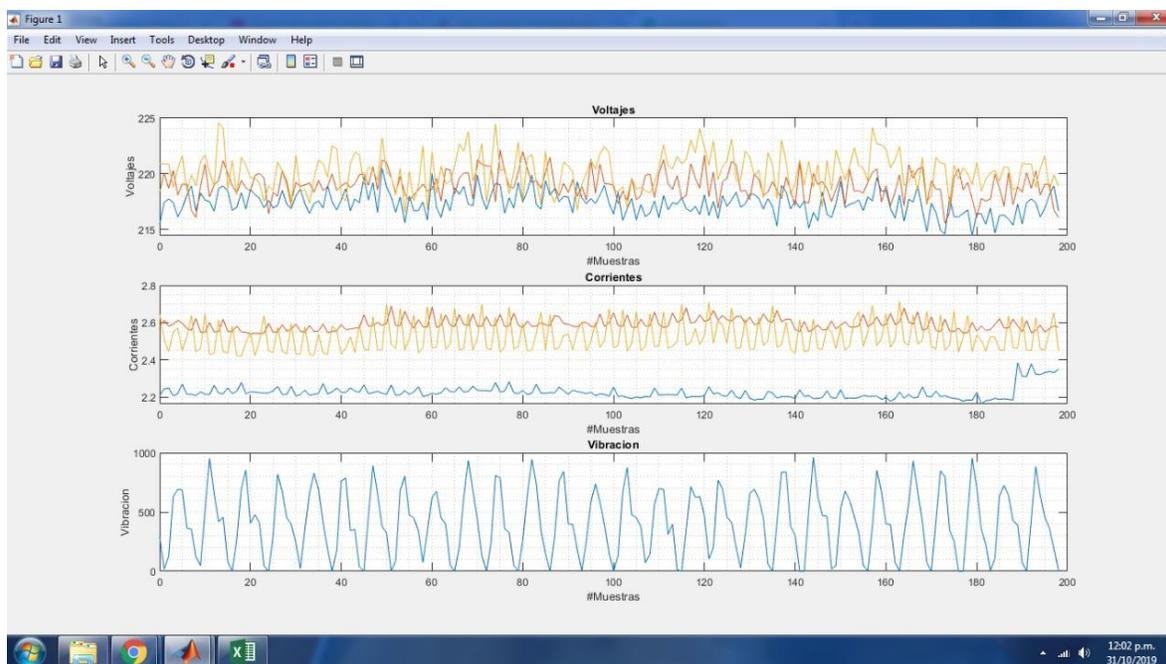


Figura 37. Grafica de los valores en estado de vibración

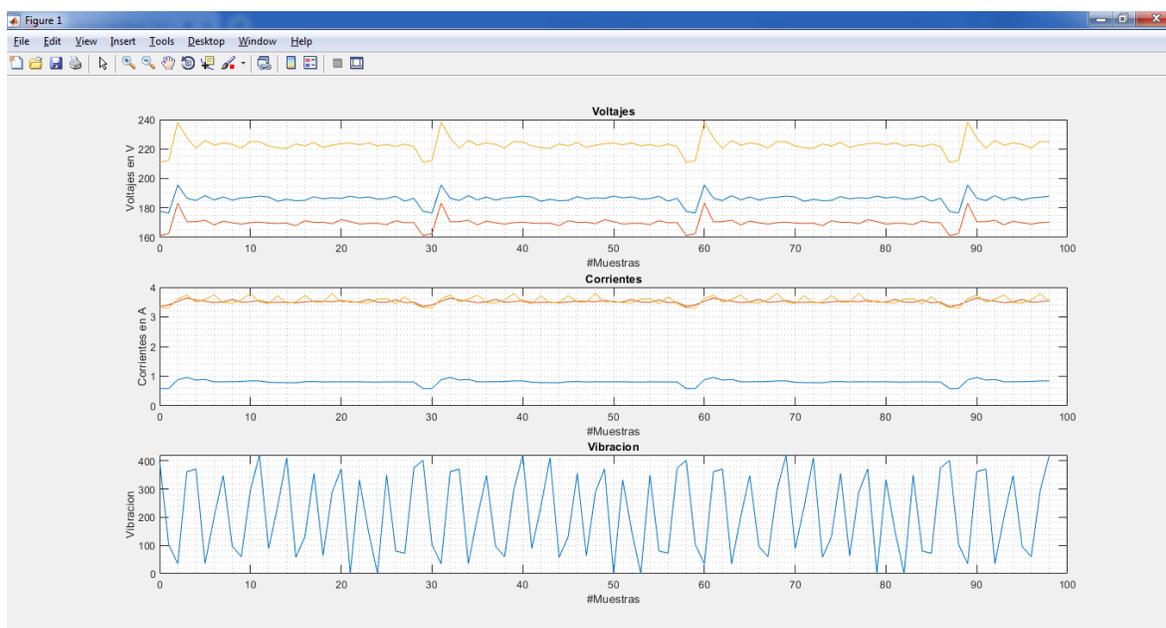


Figura 38. Grafica de los valores en estado de desconexión de la fase 1

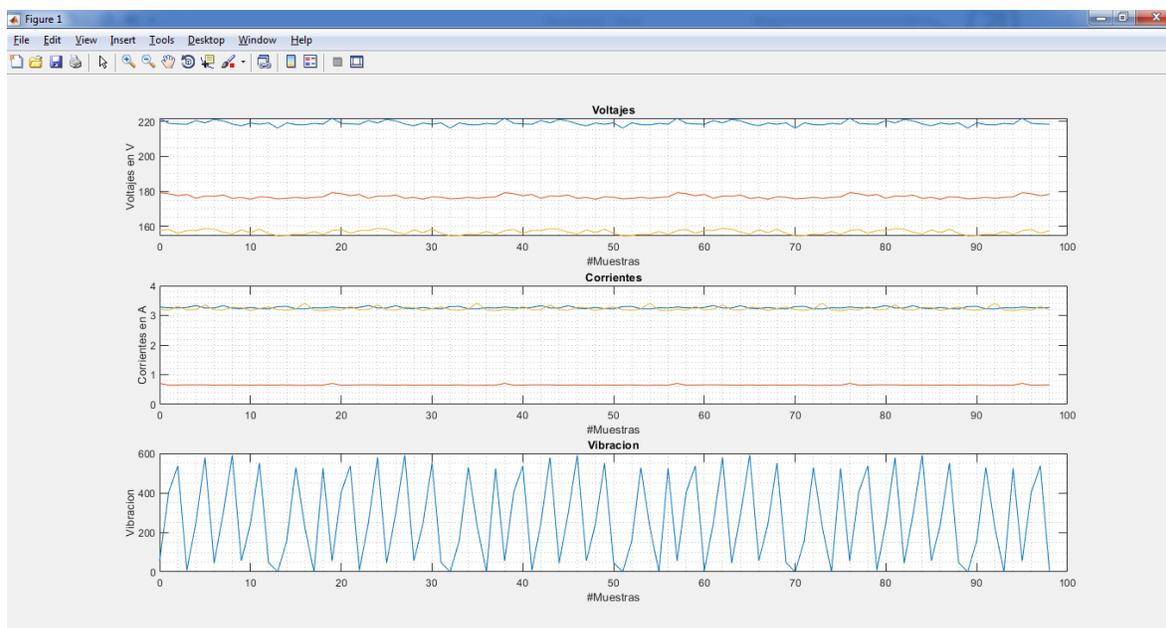


Figura 39. Grafica de los valores en estado de desconexión de la fase 2

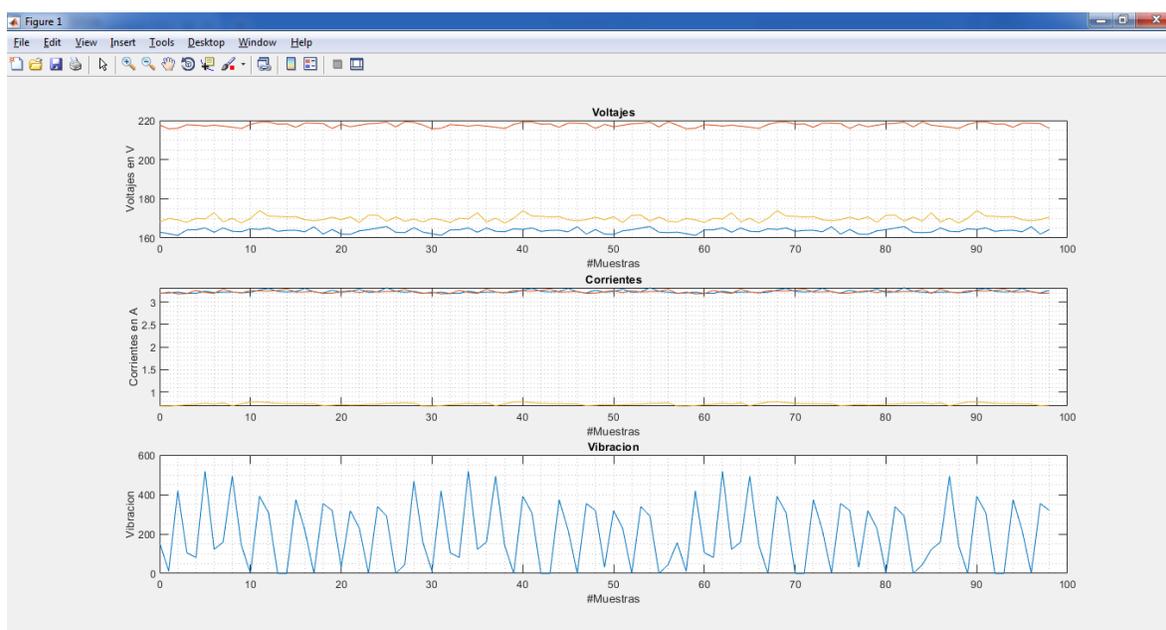


Figura 40. Grafica de los valores en estado de desconexión de la fase 3

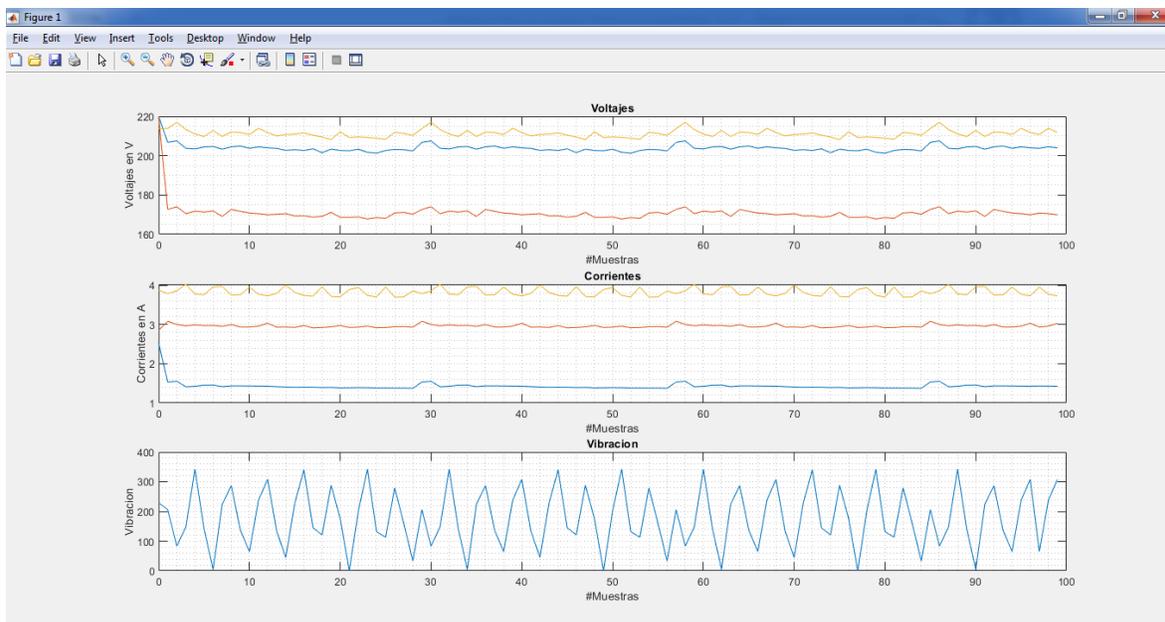


Figura 41. Grafica de los valores en estado de desbalance de la fase 1

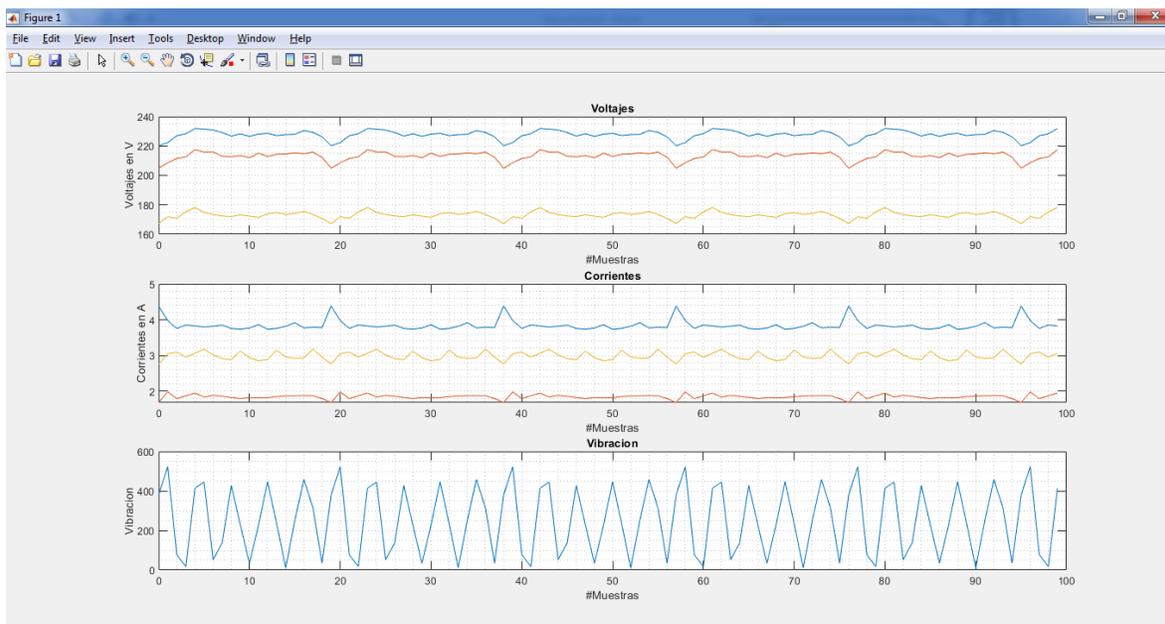


Figura 42. Grafica de los valores en estado de desbalance de la fase 2

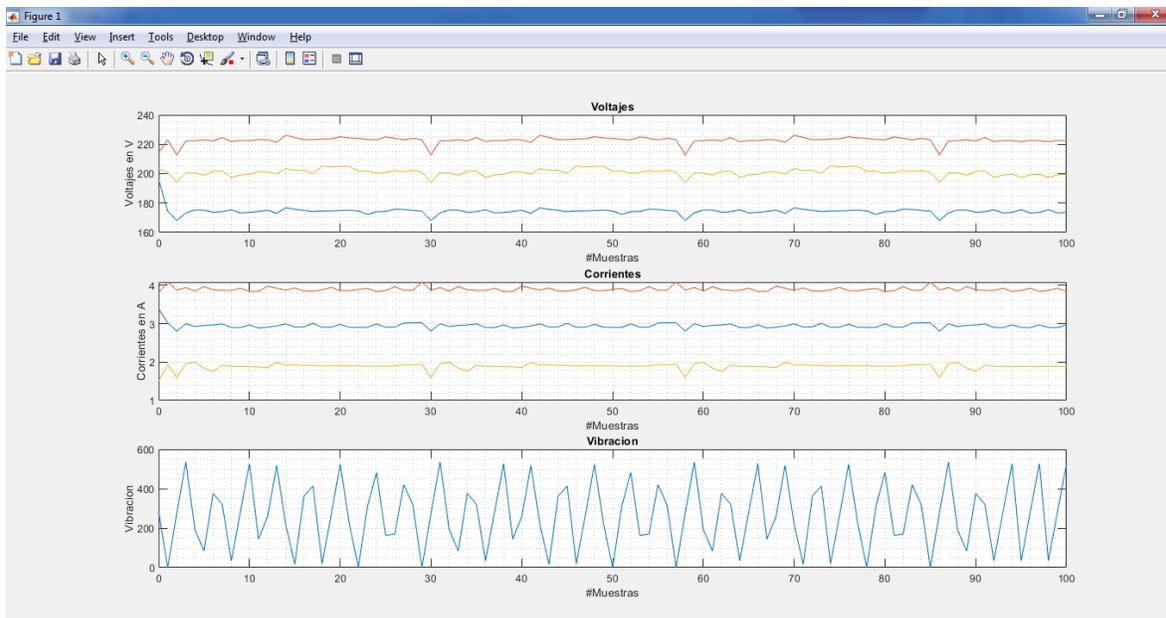


Figura 43. Grafica de los valores en estado de desbalance de la fase 3

Si siguiendo con el proceso, en la comunicación serial los datos llegan en forma de una sola variable tipo vector, para el desarrollo de la red neural se necesitó descomponer este paquete de datos en variables individuales de cada dato recibido, realizándolo por medio de ciclos anidados y la asignación a nuevas variables teniendo en cuenta la posición para hacerlo con mayor facilidad.

Después de descomponer los datos en variables individuales se realizó la comunicación Matlab-Simulink en la cual por medio de la herramienta de Workspace de Simulink se adquirió los datos que se encuentran en el entorno de Matlab, teniendo en cuenta que esta herramienta lee los datos en forma de matriz destacando que la variable independiente es el número de muestras y es la misma para todos los datos recibidos y la variable independiente es la magnitud individual de cada lectura tomada con los sensores.

Para la implementación de la red neuronal se utilizó el Toolbox de Matlab nntool el cual es una herramienta muy útil para crear y entrenar redes neuronales, en donde se crea las capas de entrada, salida y oculta si es necesario con un número de neuronas en cada capa para la realización del procesamiento y análisis de los datos de entrada correctamente. Para dicho Toolbox se cargan los datos de entrada (input) y los resultados que queremos obtener a la salida de la red neuronal (Targets) cuando se ingresen dichos datos, esto se realizó importando los datos ya sea del área de trabajo de Matlab o de hojas de datos en Excel como se muestra en la figura 44 y 45.

Se aplicó un entrenamiento supervisado para la red en la cual se usó un total de 8032 datos que fueron obtenidos de cada una de las pruebas en el laboratorio. Se le asignó un código a cada tipo de falla que se puede presentar.

Normal=10, Vibración=50, Desbalance de fase 1=100, Desbalance de fase 2=200,
Desbalance de fase 3=300, Desconexión de fase 1=600, Desconexión de fase 2=700,
Desconexión de fase 3=800.

Los valores asignados para cada falla específica, fueron elegidos a criterio propio de diseño.

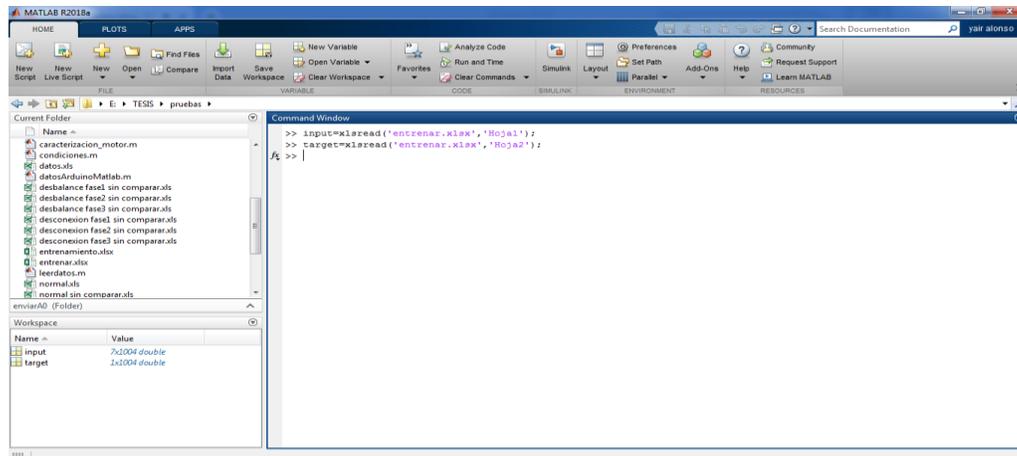


Figura 44. Carga de los datos input y target necesarios para la red neuronal

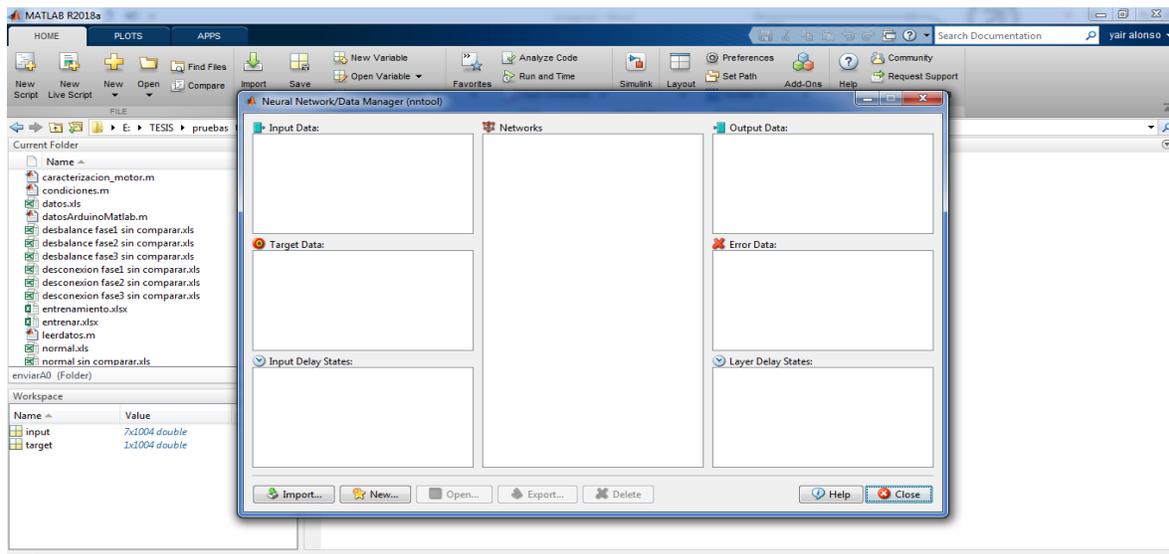


Figura 45. Toolbox nntool donde se procede a cargar requeridos de la figura anterior para crear la red neuronal

Para la creación de la red neuronal, se debe elegir una regla de aprendizaje o algoritmo, por lo tanto, cabe mencionar algunos de estos algoritmos a continuación para realizar su posterior elección.

Levenberg. Este algoritmo normalmente requiere más memoria, pero menos tiempo. La capacitación se detiene automáticamente cuando la generalización deja de mejorar, como lo indica un aumento en el error cuadrático medio de las muestras de validación.

Bayesian regularization. Este algoritmo generalmente requiere más tiempo, pero puede resultar en una buena generalización para conjuntos de datos difíciles, pequeños o ruidosos. El entrenamiento se detiene de acuerdo con la minimización del peso adaptativo (regularización).

Scaled conjugate gradient. Este algoritmo requiere menos memoria. La capacitación se detiene automáticamente cuando la generalización deja de mejorar, como lo indica un aumento en el error cuadrático medio de las muestras de validación.

Para complementar la información anterior se agregó la siguiente tabla en la que se describen los algoritmos con sus respectivas funciones de entrenamiento.

Tabla 11. Función de entrenamiento vs. Algoritmo

Función de entrenamiento	Algoritmo
'trainlm'	Levenberg-Marquardt
'trainbr'	Regularización Bayesiana
'trainbfg'	BFGS Quasi-Newton
'trainrp'	Backpropagation resistente
'trainscg'	Gradiente de conjugado escalado
'traincgb'	Gradiente conjugado con reinicios de Powell / Beale
'traincgf'	Fletcher-Powell Conjugate Gradient
'traincgp'	Gradiente conjugado Polak-Ribière
'trainoss'	Secante de un paso
'traingdx'	Tasa de aprendizaje variable Pendiente de descenso
'traingd'	Descenso de gradiente

Fuente: MathWorks, 2019.

Se escogió como regla de aprendizaje la función TRAINBR que es la regularización Bayesiana, ya que debido a sus características es la que más se adaptó al sistema en presencia de ruido.

El aprendizaje supervisado es un tipo de algoritmo de Machine Learning que emplea un conjunto de datos conocidos (el denominado conjunto de datos de entrenamiento) para realizar predicciones. El conjunto de datos de entrenamiento incluye datos de entrada y valores de respuesta. A partir de él, el algoritmo de aprendizaje supervisado busca crear un modelo que pueda realizar predicciones acerca de los valores de respuesta para un nuevo conjunto de datos. Con frecuencia se utiliza un conjunto de datos de prueba para validar el modelo. Si se utilizan conjuntos de datos de entrenamiento de mayor tamaño, a menudo se generan modelos cuya capacidad predictiva es mayor y que se pueden aplicar con buenos resultados sobre nuevos conjuntos de datos. (MathWorks, 2019, p.1)

Se usó un aprendizaje supervisado de tipo Feed-forward backprop en el cual la salida de una neurona va a la siguiente capa de neuronas, esto quiere decir que no hay retroalimentación de ellas.” El patrón de entrada se propaga por la red hasta generar la salida, después se calcula el error; éstas salidas de error se propagan hacia las neuronas de la capa anterior. Cada neurona solo tiene una contribución del error total.” (Eugenio, 2006).

La selección de la regla de aprendizaje y el tipo de aprendizaje supervisado se hace evidente en la imagen 47 mostrada a continuación.

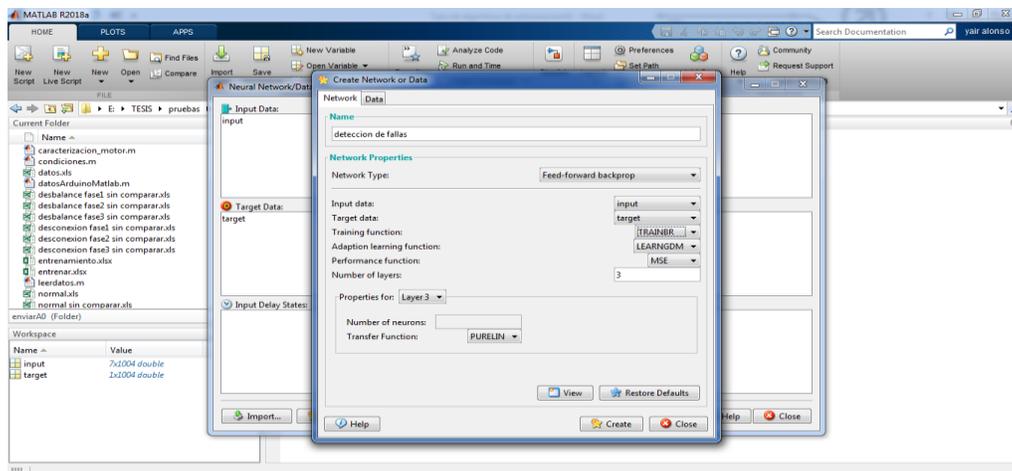


Figura 46. Creación de la red neuronal

Para la red neuronal se selecciona en la primera capa o capa de entrada conformada por 14 neuronas y con función de activación Tansig, una capa oculta o intermedia de 7 neuronas con función de activación Tansig y una capa de salida conformada por 1 neurona con función de activación purelin, esta conformación es apreciable en la figura 47.

Realizando una breve definición en donde la función Tansig permite valores negativos o positivos, infinitos, y la función de purelin puede tomar cualquier valor, si se usa funciones sigmoideas puede tomar a la salida valores muy pequeños.

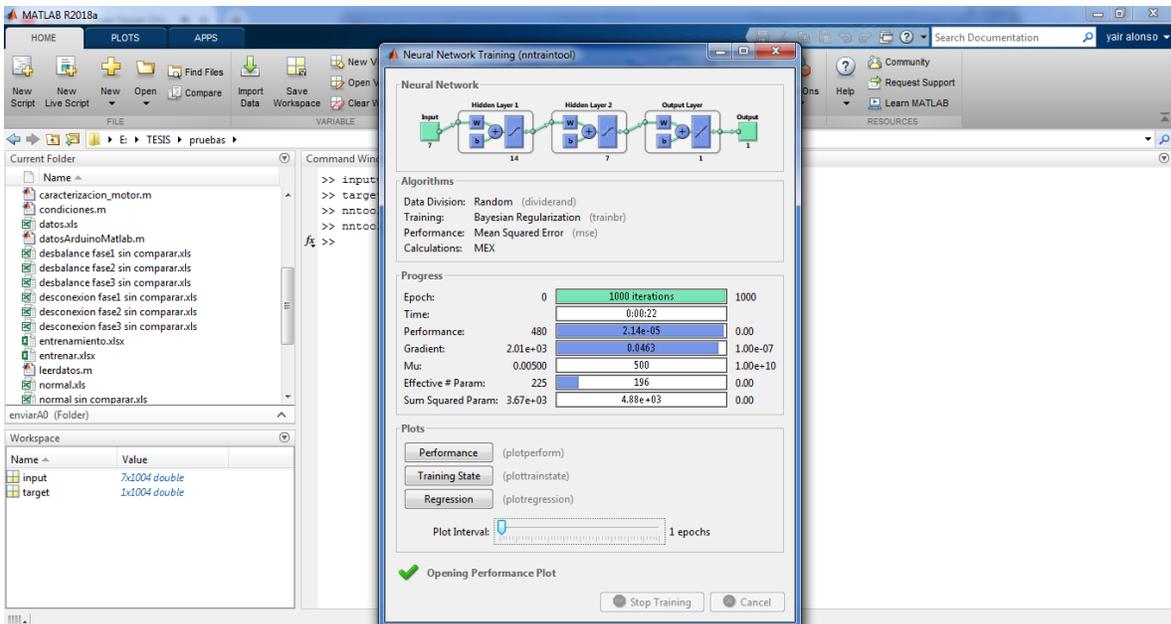


Figura 47. Conformación interna de la red neuronal y resultados de su aprendizaje

La red neuronal cuenta con botones que proporcionan las gráficas de la evaluación del error medio cuadrático y la regresión lineal para evaluar la validación de la misma, esto se puede observar en la figura 48 y 49 respectivamente.

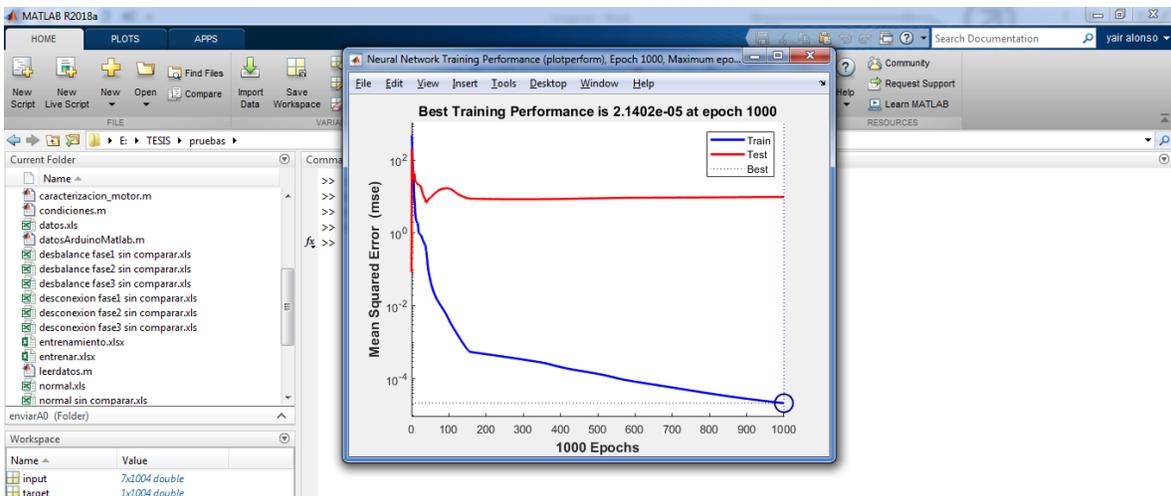


Figura 48. Evaluación y grafica del error medio cuadrático

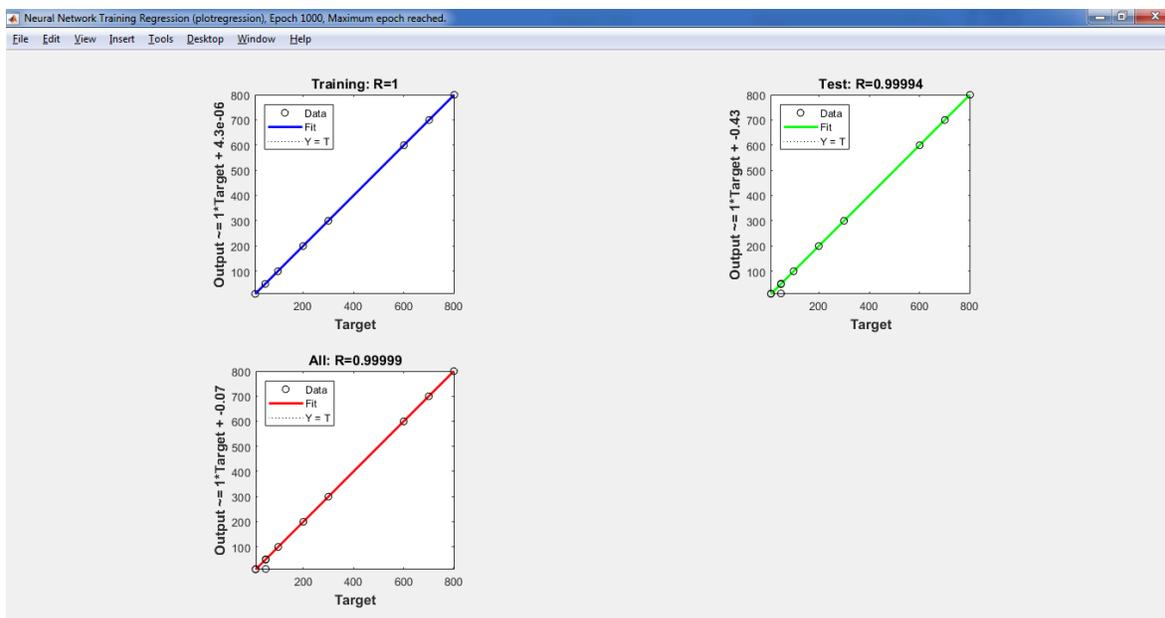


Figura 49. Validación y grafica de la regresión lineal de la red neuronal

Antes de analizar las gráficas es importante tener en cuenta el valor del error cuadrático medio, el cual es la diferencia cuadrada promedio entre salidas y objetivos. Los valores más bajos son mejores. Cero significa que no hay error, y los valores de regresión R miden la correlación entre salidas y objetivos. Un valor R de 1 significa una relación cercana, 0 una relación aleatoria.

Con la aclaración anterior y como se observa en la figura 48 el resultado del error cuadrático medio es de $2.1402e-5$ siendo un valor cercano a 0, siendo un entrenamiento satisfactorio y analizando la figura 49 evaluando la regresión lineal se observó que los valores son muy cercanos a cero siendo una validación más que satisfactoria, dando como resultado el esquema de la red neuronal mostrado en la figura que acontece.

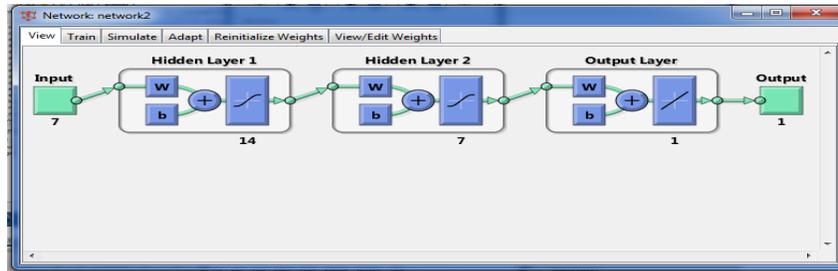


Figura 50. Esquema de la red neuronal en el cual se aprecian las capas que la conforman

El diagrama de bloques que se implementó en simulink y contiene la red neuronal mostrada en la figura 49, se puede observar a continuación.

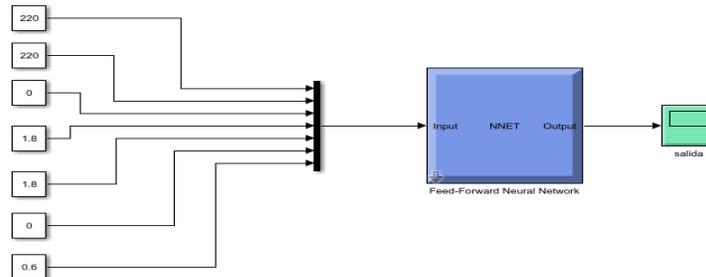


Figura 51. Diagrama de bloques de la red neuronal implementada en simulink

4.3.3 Resultados obtenidos. Con el desarrollo de la red neuronal anteriormente mostrada y sus satisfactorios resultados, se procede a realizar un análisis del comportamiento y su veracidad en los estados de funcionamiento normal y fallas en el motor trifásico.

Iniciando con la puesta en marcha del motor en su funcionamiento normal para ser analizado con la red neuronal se obtuvo la gráfica mostrada a continuación.

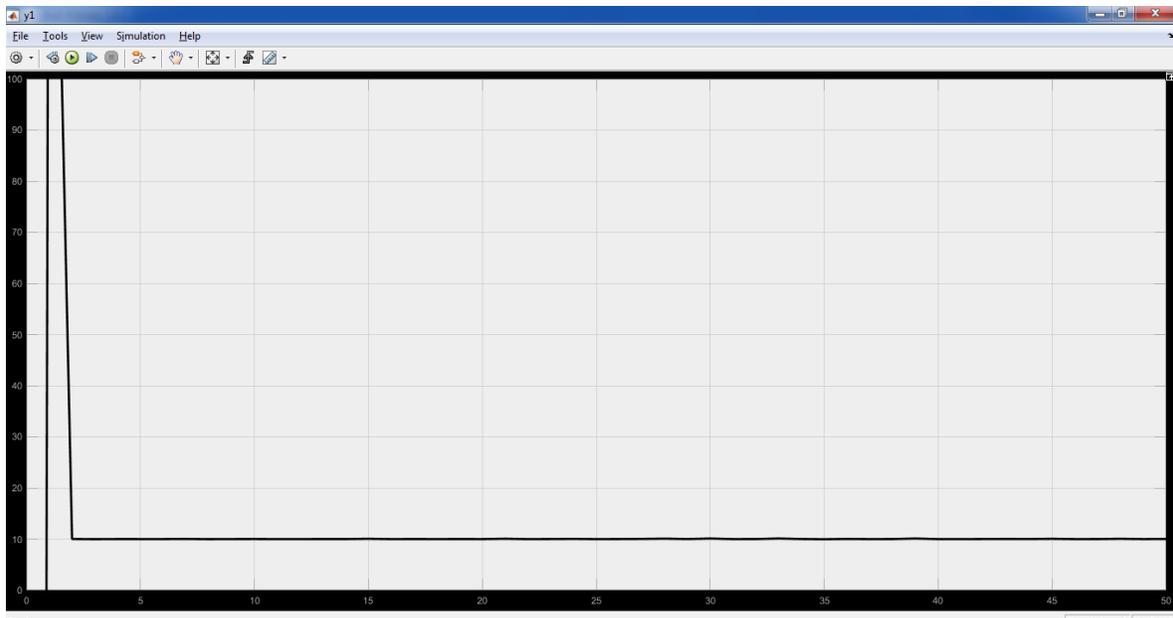


Figura 52. Comprobación a través de la red neuronal del motor en estado normal

Analizando la figura 52, se observó que se muestra un pico que es el arranque del motor y luego su estabilización en el valor 10 del eje “y” de la gráfica, el cual corresponde al motor en estado normal y se mantiene constante obteniendo así un buen resultado del entrenamiento de la red.

Continuando con la comprobación se indujeron los estados de falla, en la figura 53 se evidencia el resultado obtenido del análisis que realiza la red en estado de vibración de partes no rotativas del motor.



Figura 53. Comprobación a través de la red neuronal del motor en estado de falla por vibración

Como se puede observar en la figura 53, el motor inicia en funcionamiento normal para posteriormente inducirle el estado de falla por vibración lo cual se ve en el momento en que pasa del valor 10 al valor 50 respectivamente.

Se aplicó el siguiente conjunto de fallas, que son los desbalances de fase los cuales como se nombró en el momento de la adquisición de datos, se dividieron en fase 1, 2 y 3 correspondientes a la bornera amarilla, azul y roja.

Para la realización de las pruebas en las cuales se obtuvo los datos para el entrenamiento de la red neuronal y para la comprobación de resultados, se utilizó un breaker eléctrico o disyuntor para poder abrir la línea que se seleccionaba llevando a cabo así la obtención de los datos deseados, los resultados de la comprobación de aprecian en las figuras 54, 55 y 56.

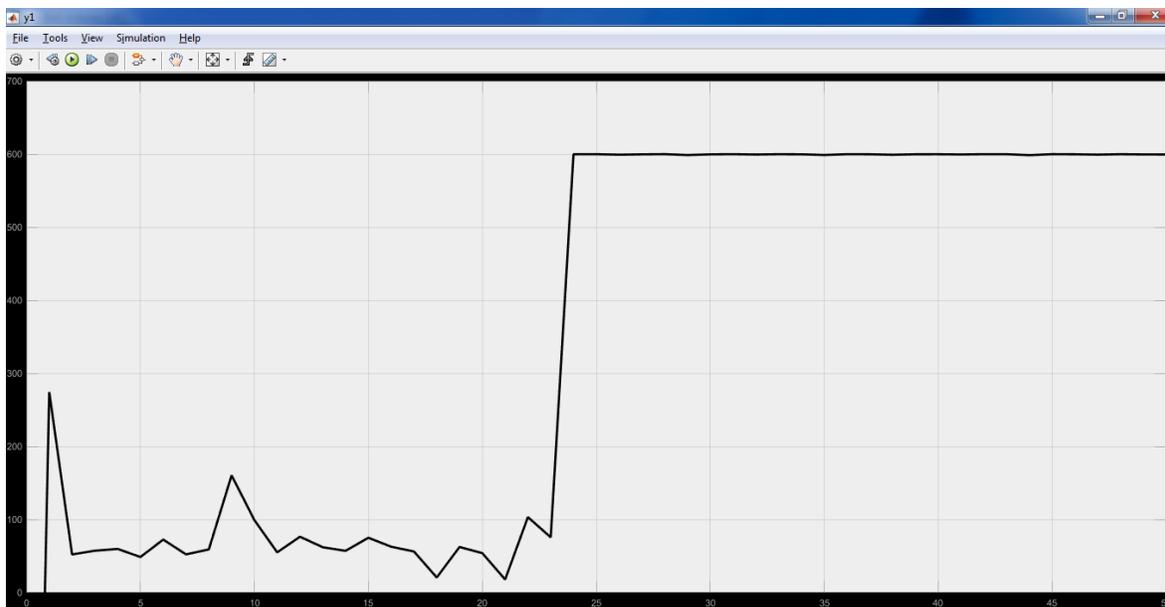


Figura 54. Comprobación a través de la red neuronal del motor en estado de falla por desconexión de fase 1

Como se observó en la figura 54, la red neuronal analizó el estado del motor en funcionamiento normal para el primer periodo de tiempo, pero el sensor de vibración al ser muy sensible induce datos al azar elevados cada cierto tiempo, lo que provoca que se vean esas oscilaciones en la gráfica, por lo tanto, se hace hincapié en que se debe hacer un análisis del comportamiento de la gráfica teniendo en cuenta lo anteriormente dicho, y también se observó la variación y estabilización al momento de abrir la fase por medio del breaker en el valor de 600 correspondiente a desconexión de la fase 1.

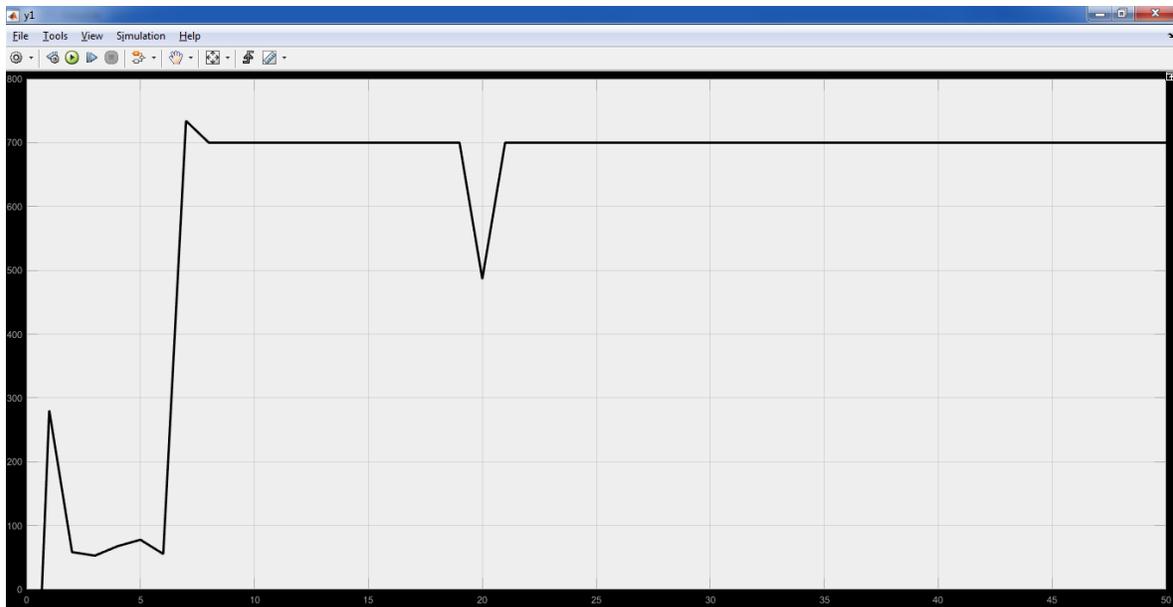


Figura 55. Comprobación a través de la red neuronal del motor en estado de falla por desconexión de fase 2

De manera similar a lo referido a la figura 55, en la figura 56 ocurre el mismo proceso con solo algunas diferencias, se observó que la red al realizarse la desconexión de la fase subió a su valor correspondiente que es 700, pero en un instante tuvo un pico hacia abajo, se analizó desde el punto de vista de la adquisición de los datos y al trabajar con magnitudes alternas de ondas periódicas los valores no son estables todo el tiempo por lo tanto cabe la posibilidad que se presente este caso, en conclusión al analizar las gráficas obtenidas en el momento de la comprobación prima el valor más dominante que se encuentre en ella.

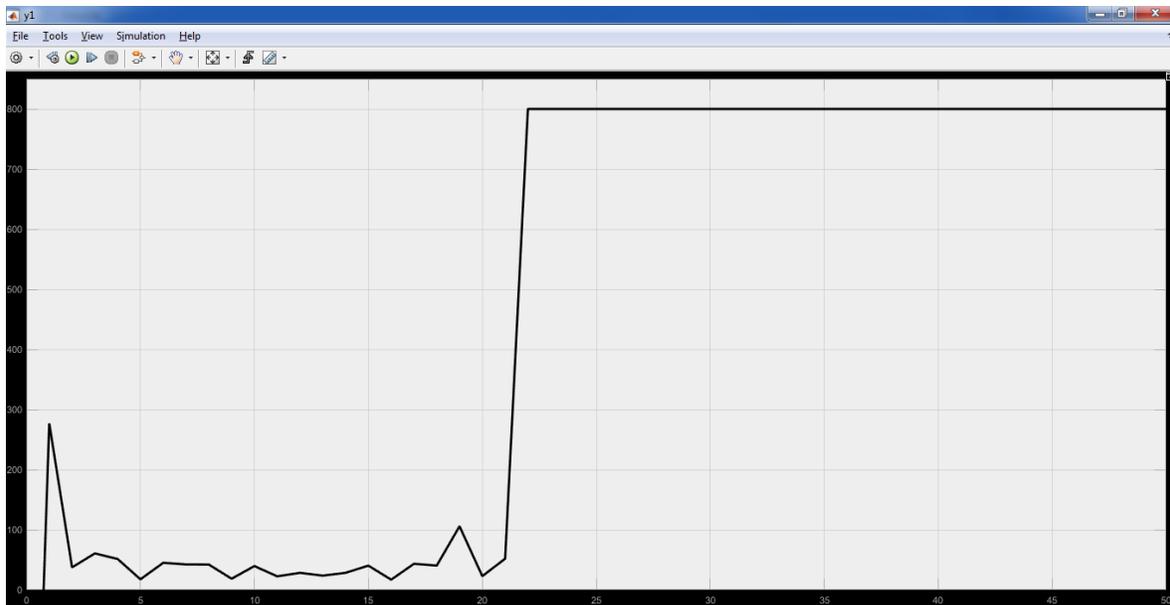


Figura 56. Comprobación a través de la red neuronal del motor en estado de falla por desconexión de fase 3

De igual manera a lo que sucedió en la figura 56, se presenta la falla de desconexión de la fase 3 con su valor correspondiente que es 800.

Para las pruebas de la falla de desbalance de fase, al igual que con la falla de desconexión de fase, se hizo necesario la utilización de un breaker eléctrico que interrumpiera la línea y a su vez en paralelo se acoplo una resistencia de potencia en su valor más mínimo el cual era de 54Ω , generándose así la falla nombrada al principio del párrafo. Esto se observa en la figura 57 donde se ve el breaker eléctrico y la resistencia conectadas al motor y el resultado que arrojó la red neuronal es apreciable en la figura 58.

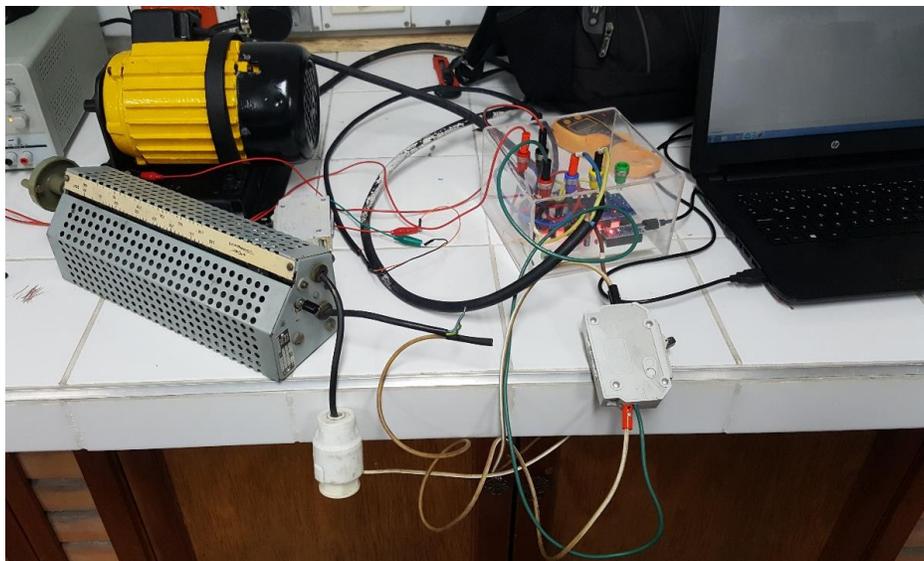


Figura 57. Conexión eléctrica del motor para generar la falla de desbalance de fase

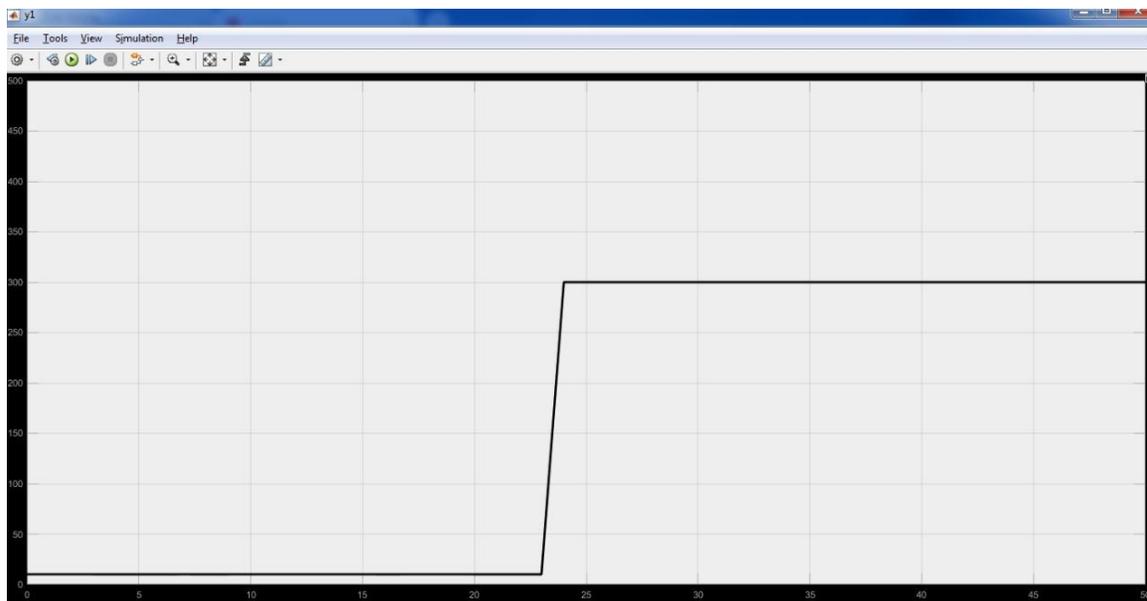


Figura 58. Comprobación a través de la red neuronal del motor en estado de falla por desbalance de fase

Durante la realización de la comprobación de la red neuronal, el motor sufrió un daño interno del circuito magnético en el cual se presentaba un desbalance de una de las fases sin simularle

ninguna falla, para la solución de este problema se debía volver a embobinar el motor, pero por término del costo se tomó la decisión de adquirir un nuevo motor de ½ HP el cual se puede observar en la figura 59 y su placa característica en la figura 60.



Figura 59. Nuevo motor que se utilizó en el desarrollo del proyecto



Figura 60. Placa característica del nuevo motor

Por lo tanto, se procedió a realizar la adquisición de los datos de este nuevo motor para su entrenamiento, en el cual se aplicó el mismo procedimiento que al motor anterior conservando los mismos valores definidos para cada estado utilizados para analizar la gráfica obtenida a través de la red neuronal, a continuación, se muestran los resultados de la red ya entrenada para cada estado de funcionamiento del motor.

Se adquirieron en total 840 datos para este nuevo motor, de los cuales $2/3$ se utilizaron para el entrenamiento de la red neuronal y $1/3$ para realizar la comprobación de la misma, posteriormente se verifico simulándole nuevamente al motor estados de falla.

Para el motor en funcionamiento normal al igual que con el motor original, se observa el pico de corriente en el arranque y como se estabiliza y llega a su valor correspondiente que es 10 como se puede observar en la figura a continuación.



Figura 61. Comprobación a través de la red neuronal del nuevo motor en estado normal

A diferencia del motor que se poseía antes, este tiene una estructura de soporte que viene adherida a su estator, por lo tanto, en el momento que se realizó la prueba de vibración de partes no rotativas no se obtuvieron resultados concluyentes ya que no se pudo adquirir los datos donde se apreciará dicha falla, partiendo de este hecho se dio paso a el análisis de las demás pruebas correspondientes a los estados de funcionamiento del motor.

En estado de falla de desconexión de fase se realizó la prueba para cada una de ellas, teniendo igualmente desconexión de fase 1, fase 2 y fase 3 con los respectivos colores de borneras para cada fase amarilla, azul y roja.

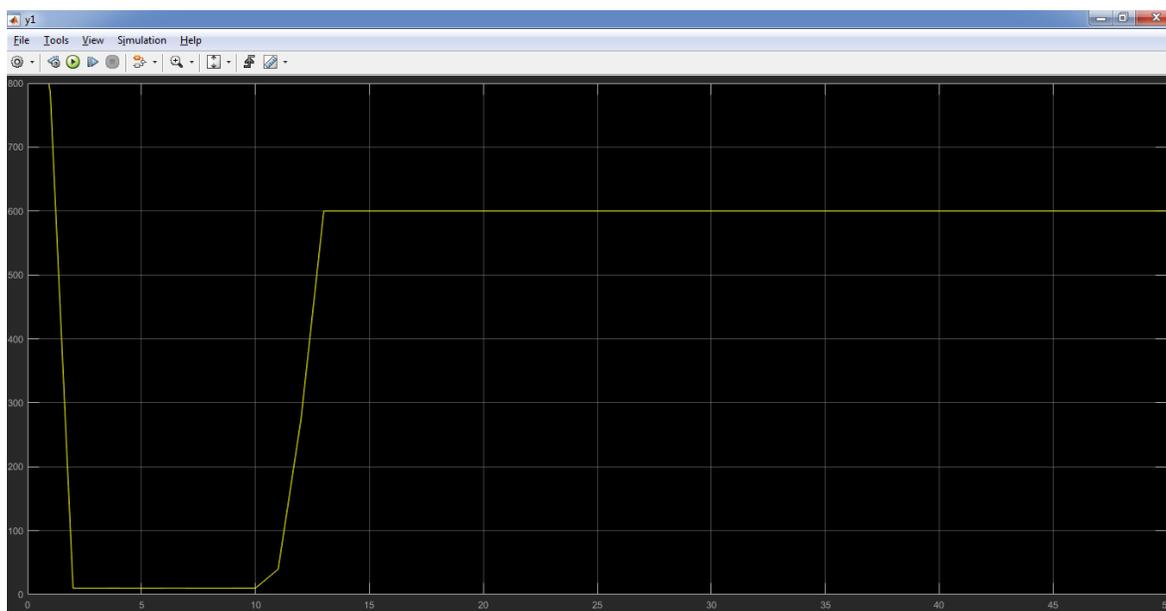


Figura 62. Comprobación a través de la red neuronal del nuevo motor en estado de falla por desconexión de fase 1

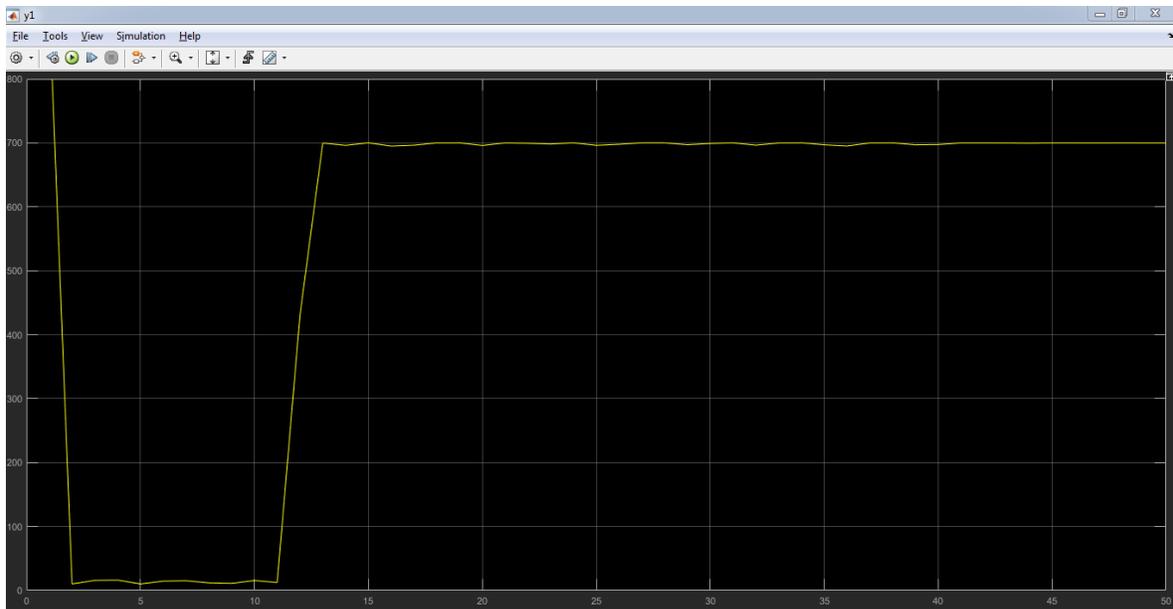


Figura 63. Comprobación a través de la red neuronal del nuevo motor en estado de falla por desconexión de fase 2

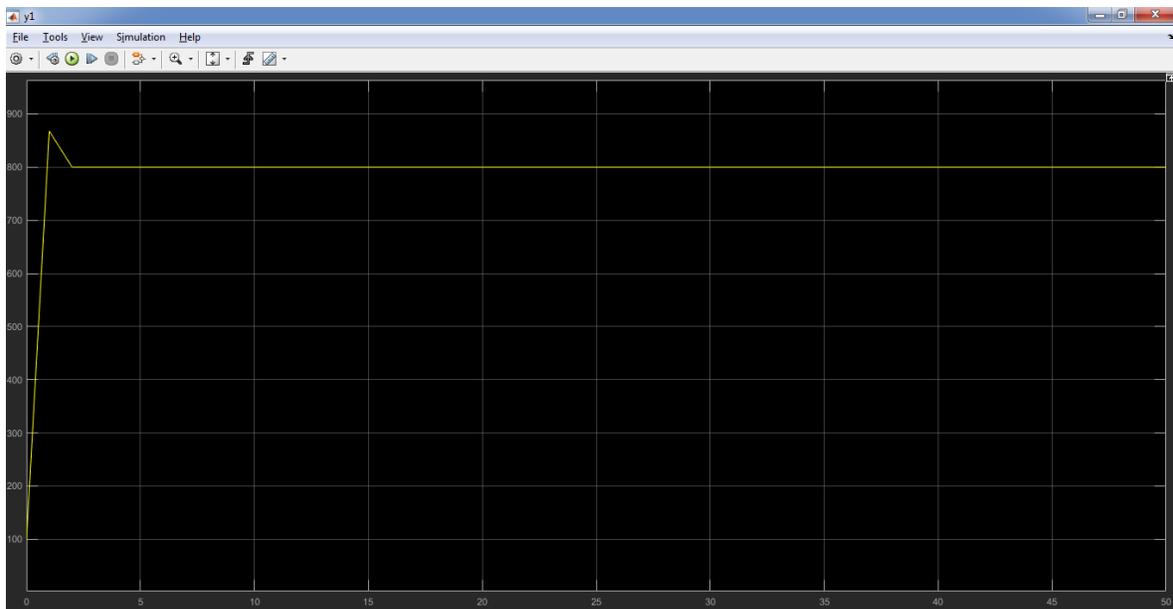


Figura 64. Comprobación a través de la red neuronal del nuevo motor en estado de falla por desconexión de fase 3

Como se puede observar, en la figura 63 y 64 el nuevo motor luego de su arranque se estabiliza en funcionamiento normal y al igual que con el anterior se utilizó un breaker eléctrico para la desconexión de cada una de las fases obteniendo así los valores de 600 y 700 respectivamente, en la figura 65 se le aplica la falla después de su arranque sin dejar que descienda a estado normal llevándolo en la gráfica a el valor correspondiente a 800.

Al igual que con las pruebas de desconexión de fase, se realizó el desbalance de cada una de las fases tomando la misma referencia del color de las borneras, haciendo uso del breaker eléctrico y la resistencia de potencia, las cuales se presentan en la figura 66,67 y 68.



Figura 65. Comprobación a través de la red neuronal del nuevo motor en estado de falla por desbalance de fase 1

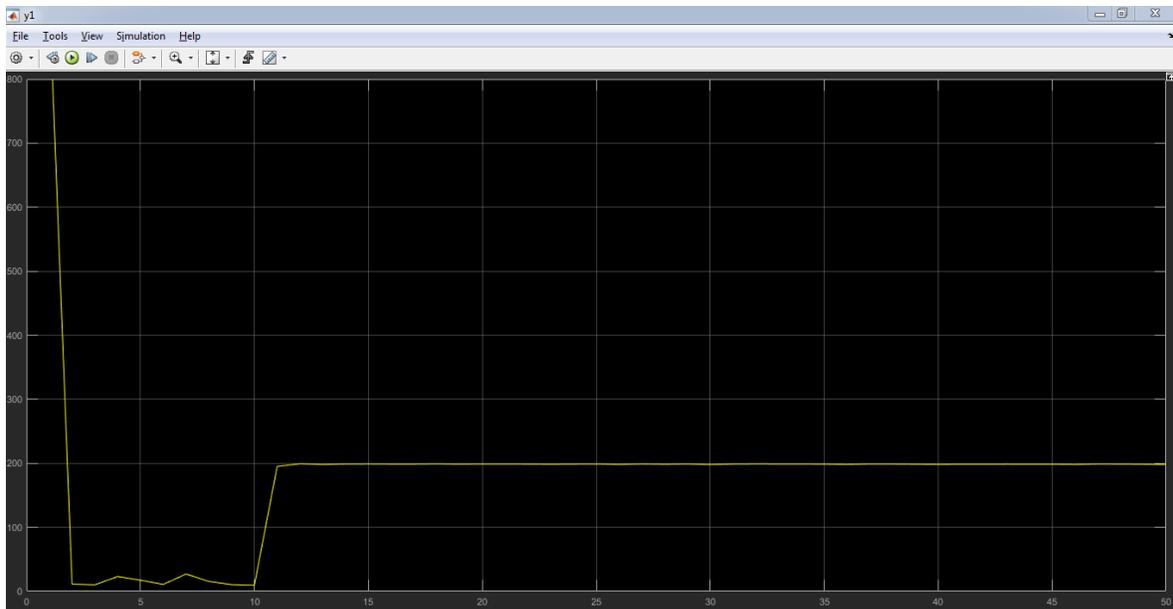


Figura 66. Comprobación a través de la red neuronal del nuevo motor en estado de falla por desbalance de fase 2



Figura 67. Comprobación a través de la red neuronal del nuevo motor en estado de falla por desbalance de fase 3

De las gráficas anteriores se observó que se obtuvieron los valores correspondientes a 100, 200 y 300 para el desbalance de la fase 1, fase 2, y fase 3 respectivamente.

Luego de la verificación de la red neuronal, se desarrolló un GUI para agrupar los procesos que se llevan a cabo en Matlab y su Toolbox Simulink, ofreciendo cuatro botones en la parte superior como lo es el de iniciar que corresponde a ejecutar la función en Matlab para introducir el número de actualizaciones y la cantidad de muestras que desea adquirir almacenándolas en la hoja de cálculo de Excel, el botón de graficar el cual muestra las gráficas de los voltajes y corrientes de las tres fases en la parte izquierda, el botón analizar ejecuta la red neuronal creada en simulink que lee los datos que se guardaron al momento de pulsar el botón iniciar generando la gráfica del análisis de la red neuronal en la parte derecha, y el botón detener suspende el procesamiento de la red neuronal, todo esto plasmado en la figura 68.



Figura 68. Interfaz de usuario creada en Matlab 2018a para agrupar los valores de las variables y los resultados obtenidos de la red neuronal

A continuación, se presentan ejemplos del funcionamiento de la interfaz de usuario, en la figura 69 se observa el motor en estado normal y en la figura 70 el desbalance de la fase 3

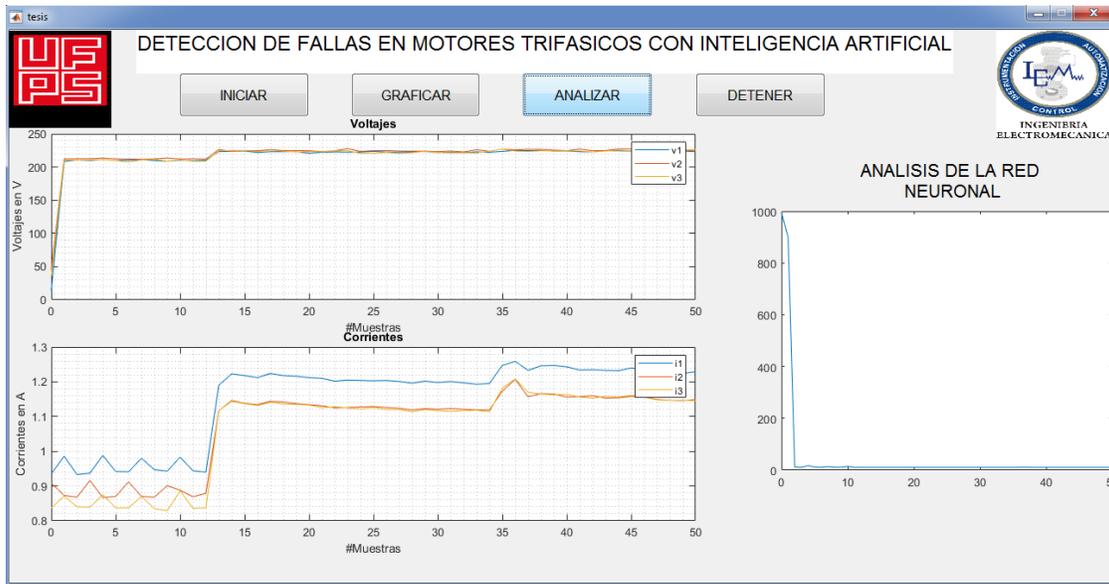


Figura 69. Interfaz de usuario para el estado normal del nuevo motor

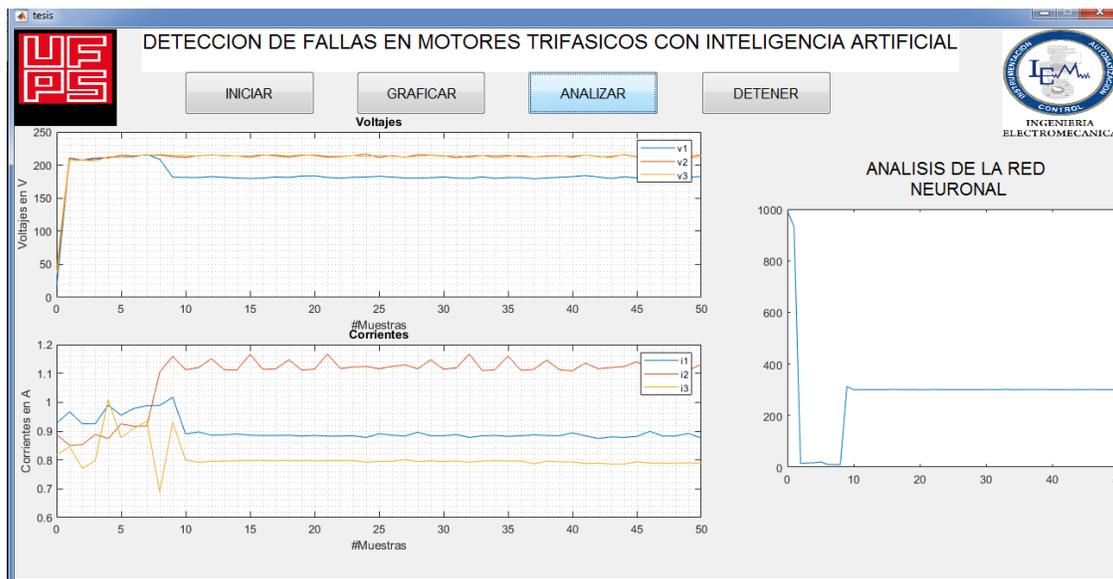


Figura 70. Interfaz de usuario para el estado de desbalance de la fase 3 del nuevo motor

Para el acceso a los archivos correspondientes a él manual de uso, programación en arduino, los archivos de la extensión .m de Matlab y la interfaz de usuario con sus figuras, se creó una carpeta en una nube para contener estos archivos a los cuales se puede acceder mediante el escaneo del código QR de la figura 72, o directamente mediante el siguiente link https://mega.nz/#F!BF9Cga6Q!WJlu_rztBAeBjT8RUiM4HA .



Figura 71. Código QR para el acceso a los archivos

En conclusión, mediante el desarrollo de este objetivo se observó cómo paso a paso la red neuronal adquirió los datos, como se realizó su aprendizaje buscando el menor valor del error medio cuadrático y su regresión lineal para obtener así la mayor precisión utilizando la regla de aprendizaje regulación bayesiana, comprobando como al simular de nuevo una falla los datos recibidos fueron reconocidos y entrego unos valores correspondientes a los asignados en el entrenamiento para cada una de ellas, dando paso a un análisis de las gráficas ya que en algunas por instantes de tiempo al azar no continuos oscilaba debido a la sensibilidad y variación de algunos datos obtenidos de los sensores, finalmente agrupando todo de una manera más didáctica se realizó un GUI permitiendo observar las gráficas de las magnitudes obtenidas como lo son voltajes y corrientes y el resultado del análisis de la red neuronal.

4.4 Socializar los Resultados a la Comunidad Académica

Se desarrolló en este objetivo la socialización de los resultados obtenidos del proyecto, exponiendo todo el proceso de trabajo y destacando lo realizado con la red neuronal, para ello se realizó una ponencia con un artículo científico ante la sede del SENA ubicada en Cúcuta, Norte de Santander, como se muestra en la figura 72.

El desarrollo metodológico que se aplicó es de tipo descriptivo, ya que se exponen los resultados obtenidos, los inconvenientes, las conclusiones y recomendaciones que deja este proyecto.



Figura 72. Socialización del artículo científico presentado en el SENA sede Cúcuta, Norte de Santander

Con la realización de la ponencia se obtuvo una retroalimentación la cual ayudo a reforzar algunos puntos del proyecto y a mejorar detalles que se deben presentar en el mismo desde el punto de vista de jurados expertos en el tema.

5. Conclusiones

Se concluyó que, al momento de trabajar con un motor trifásico o cualquier motor sin placa característica o número de serie, es importante realizar la caracterización para obtener sus parámetros los cuales se utilizan al momento de realizar una selección de componentes que se deben añadir para obtener la lectura de una magnitud, como las precauciones que se deben tener al momento de realizar su arranque y el calibre que debe poseer el cableado conductor.

Mediante la realización de la investigación de este proyecto, se expandió el conocimiento sobre el tema de las redes neuronales del cual a través del proceso académico se poseían conceptos, estos fueron complementados y se generó una visión más amplia de las múltiples aplicaciones y versatilidad que poseen las mismas en el ámbito académico, industrial, laboral y cotidiano.

Se observó la capacidad que posee el software Matlab que va desde resolver simples ecuaciones a permitir trabajar estrategias de inteligencia artificial como lo son las redes neuronales, con sus Toolbox para múltiples aplicaciones como lo es el Nntool para crear, modificar y exportar una red neuronal, permitiendo así cambiar el tipo de regla de aprendizaje, la cantidad de capas y el número de neuronas que se deseen de acuerdo a el análisis realizado para una aplicación específica.

Al momento del procesamiento de los datos para el análisis que realiza la red neuronal, se observó un conflicto al ejecutar simultáneamente el software Matlab y su Toolbox Simulink, por lo tanto, se ejecutó primeramente un script de Matlab en el cual se ingresan las actualizaciones y el número de muestras para almacenarlos en forma de matriz de datos en un documento Excel, para luego ser llamado por la red neuronal creada en Simulink dando solución a este conflicto.

Matlab al ser una herramienta tan versátil posee también un entorno de programación visual para crear una interfaz de usuario, el cual permitió agrupar los procesos que se ejecutan en Matlab y Simulink ofreciendo una interfaz más interactiva como se muestra en la figura 69, se programó en un script de Matlab en el cual se ingresan la programación de la adquisición de datos como la función creada para la red neuronal las cuales se ejecutan de acuerdo a la función de sus botones, también se observan las gráficas de las variables sensadas y el resultado del análisis de la red neuronal.

6. Recomendaciones

Debido a los inconvenientes presentados con el sensor de vibración inicial se utilizó un piezoeléctrico para reemplazarlo, sin embargo, se recomienda indagar sobre un sensor para medir la vibración de las partes no rotativas del motor el cual sea lo suficientemente sensible para adquirir los valores pero que tienda a ser estable.

Se debe recordar que antes de realizar la comunicación entre los softwares utilizados en el desarrollo del proyecto, se debe definir una velocidad de transmisión de datos igual para estos programas, así como definir en qué puerto COM del computador se encuentra conectado el microcontrolador arduino.

La caja de protección del sistema electrónico posee dos borneras libres de color negro y verde, las cuales pueden ser utilizadas para referenciar neutro y tierra para trabajar sobre motores monofásicos con el mismo modulo si así se desea.

Es indispensable en el proceso de adquisición de datos al abrir la programación en el software arduino (IDE) la verificación y calibración de los sensores para obtener una medida más cercana a la real, ya que debido a la presencia de ruido estos tienden a descalibrarse.

Se recomienda el diseño y aplicación de un filtro a la red neuronal para mejorar las oscilaciones que se producen por la sensibilidad de los sensores, obteniendo así un resultado más preciso y fácil de analizar.

Referencias Bibliográficas

- Armando, F. (2014). *Diseño de un sistema de análisis temporal y espectral*. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta.
- Cadavid, F. (2007). *Diagnóstico de Fallas en Motores de*. medellin.
- Chapman, S. (2012). *Maquinas electricas*. Mexico: Mcgraw-hill/Interamericana Editores,S.A. DE C.V.
- Chaustre, Y. (2019). *Guia de laboratorio de maquinas de electricas I*. Cúcuta.
- Cruz, P. (2010). *Inteligencia artificial con aplicaciones a la ingenieria*. mexico: Alfaomega Grupo editor.
- Eugenio, J. (2006). Neural Network Toolbox de Matlab. *7° Encuentro internacional de ciencias de la computacion 2006*, (págs. 30-31). Veracruz.
- Farina, A. (2018). *Motores eléctricos trifásicos: usos, componentes y funcionamiento*. Obtenido de https://www.editores-srl.com.ar/revistas/ie/330/farina_motores_electricos
- Iberdrola, S. (2019). *Iberdrola*. Recuperado de: <https://www.iberdrola.com/innovacion/que-es-inteligencia-artificial>
- Luis Murillo, C. C. (2017). *Detección de faltas en motores*. Costa Rica.
- Maria Martinez, V. S. (2017). *deteccion de fallas en rodamientos de un motor de induccion trifasico tipo jaula de ardilla empleando analisis de vibraciones*. cali.

- MathWorks. (2019). *Aprendizaje supervisado* . Recuperado de:<https://la.mathworks.com/discovery/supervised-learning.html>
- Mora, J. F. (2003). *Maquinaas electricas 5ta edicion*.
- Núñez, G. S. (2009). Diagnostico de fallas en motores de induccion. Huancayo, Peru, Peru.
- Pozueta, M. (2015). *Maquina asincrona: circuitos equivalentes simplificados*. Obtenido de <https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/M%C3%A1quinas%20as%C3%ADncronas.%20Otros%20circuitos%20eq.%20y%20pares.pdf>
- Prada, M. (s.f.). *Monografias.com*. Recuperado de: <https://www.monografias.com/trabajos91/motor-electrico-trifasico/motor-electrico-trifasico.shtml>
- Quintero, R. (2017). *Detección de fallas en motores asíncronos aplicando métodos de inteligencia artificial*. Cúcuta.
- Restrepo, Y. (2015). Metodología de detección de fallas de un motor síncrono. *Revista Colombiana de Tecnología de Avanzada*.
- Vargas, D. (2018). *Detección de fallas en motores asíncronos aplicando métodos de inteligencia artificial*. Universidad Francisco de Puala Santander.Cúcuta.
- Vargas, J. (2012). *Guia practica parael diseño y analisis de transformadores monofasicos y motores de inducción*. Cúcuta: En edición.