



Acta de Correcciones al Proyecto de Grado Ingeniería Electrónica

Fecha: 21 abril 2022

Autores:

**Carlos Alberto Escobar Bergaño
Edwin Darío Teran Castro**

Nombre del Proyecto de Grado:

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE
DATOS PARA EL ANÁLISIS EN LÍNEA DE FALLAS EN EL ROTOR Y
RODAMIENTOS EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO.**

Director:

Como indica el artículo 2.27 de las Directrices de Trabajo de Grado, he verificado que los estudiantes indicados arriba han implementado todas las correcciones que los Jurados del Proyecto de Grado definieron que se efectuaran, como consta en el Acta de Calificación correspondiente.

Manuel V. Valencia

**Manuel Vicente Valencia Díaz
Profesor del Departamento de Electrónica y Ciencias de la Computación
Pontificia Universidad Javeriana - Cali**

Nota de Aceptación

Aprobado por el Comité de Trabajo de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana para optar el título de Ingeniero Electrónico.



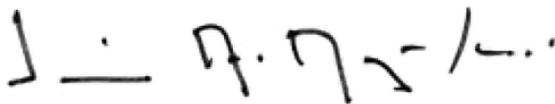
Dr. HERNAN CAMILO ROCHA
Decano de la Facultad de Ingeniería



ING. LUIS EDUARDO TOBON LLANO
Director Carrera Ingeniería Electronica.



ING. MANUEL VICENTE VALENCIA DÍAZ
Director(a) Trabajo



ING. JAIME AGUILAR ZAMBRANO
Jurado 1



ING. JUAN DAVID CONTRERAS
Jurado 2

Santiago de Cali, febrero 23 de 2022



Doctor

Luis Eduardo Tobón

Director de Carrera de Ingeniería Electrónica

Pontifica Universidad Javeriana Cali

Cordial saludo,

Por medio de la presente hago contar que he revisado el proyecto de grado **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL ANÁLISIS EN LÍNEA DE FALLAS EN EL ROTOR Y RODAMIENTOS DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO”**, de los estudiantes Edwin Darío Terán Castro y Carlos Alberto Escobar Bergaño, del cual soy director y lo considero apto para ser presentado y sometido a consideración del jurado.

Atentamente,

Manuel V. Valencia

Manuel Vicente Valencia Díaz

Profesor del Departamento de Electrónica y Ciencias de la Computación

Pontificia Universidad Javeriana - Cali

Santiago de Cali, febrero 23 de 2022

Doctor

Luis Eduardo Tobón

Director de Carrera de Ingeniería Electrónica

Pontificia Universidad Javeriana Cali



Cordial saludo,

Tenemos el placer de presentar ante usted el proyecto de grado titulado como: **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL ANÁLISIS EN LÍNEA DE FALLAS EN EL ROTOR Y RODAMIENTOS DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO”**, para ser sometido a consideración del jurado

Esperamos que este proyecto reúna los requisitos académicos necesarios para su aprobación.

Atentamente,

Edwin Darío Terán C

Edwin Darío Terán Castro

Estudiante Ingeniería Electrónica

Pontificia Universidad Javeriana - Cali

Carlos Escobar.

Carlos Alberto Escobar Bergaño

Estudiante Ingeniería Electrónica

Pontificia Universidad Javeriana - Cali

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS
PARA EL ANÁLISIS EN LÍNEA DE FALLAS EN EL ROTOR Y RODAMIENTOS EN
UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO.**

**CARLOS ALBERTO ESCOBAR BERGAÑO
EDWIN DARÍO TERÁN CASTRO**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2022**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS
PARA EL ANÁLISIS EN LÍNEA DE FALLAS EN EL ROTOR Y RODAMIENTOS EN
UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO.**

**CARLOS ALBERTO ESCOBAR BERGAÑO
EDWIN DARÍO TERÁN CASTRO**

Propuesta de trabajo de grado presentada como requisito para optar al título de Ingeniero
Electrónico

Director:

Msc. Manuel Vicente Valencia Díaz

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA CALI
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI

2022

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	9
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	9
1.2 OBJETIVO GENERAL.....	9
1.2.1 Objetivos específicos	10
1.3 ALCANCES	10
1.4 JUSTIFICACIÓN	11
1.5 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	12
2 MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	13
2.1.1 Parámetros de un motor de inducción	13
2.2 FALLAS EN MOTORES DE INDUCCIÓN	15
2.2.1 Fallas eléctricas.....	16
2.2.1.1 Barras rotas de rotor.....	16
2.2.2 Fallas mecánicas	17
2.2.2.1 Fallas en rodamientos	17
2.3 TÉCNICAS PARA ANÁLISIS DE FALLA DEL MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO.....	18
2.3.1 Extended park's vector approach – (EPVA)	18
2.3.2 Motor current signal analysis (MCSA)	19
2.3.3 Electric power spectral analysis – (ESA).....	20
2.4 PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES.	21
2.4.1 Transformada de Fourier.	21
2.4.2 Transformada rápida de Fourier	22
2.5 INDICADORES DE FALLAS PARA ANÁLISIS DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	22
2.5.1 Indicador de falla barras rotas en rotor.....	23
2.5.2 Indicador de falla rodamientos	23
2.6 FRECUENCIAS DE FALLA PARA INDICADORES.....	24
2.6.1 Falla de barras rotas de rotor técnica EPVA.....	24
2.6.2 Fallas en rodamientos técnica EPVA.....	25
2.6.3 Falla de barras rotas de rotor técnica MCSA.....	26
2.6.4 Fallas en rodamientos técnica MCSA	26
2.6.5 Falla de barras rotas de rotor técnica ESA	27
2.6.6 Fallas en rodamientos técnica ESA.....	28
3 MARCO METODOLÓGICO.....	29
3.1 ESPECIFICACIONES HARDWARE – SOFTWARE PARA INDICADORES DE FALLA.	29
3.1.1 Lecturas analógicas.....	29
3.1.2 Microcontrolador Teensy 4.1	30
3.2 SENSORES	31
3.2.1 Sensores voltaje ISO – 124P	32
3.2.2 Sensores corrientes SCT- 013.....	33

3.3	CIRCUITO NIVEL DC.....	36
3.4	FUENTES DE ALIMENTACIÓN DC – DC DUAL	38
3.5	TECLADO MATRICIAL 4x4	38
3.6	PANTALLA LCD 16x2	39
3.7	COMUNICACIÓN MEDIANTE PUERTO ETHERNET	40
3.7.1	Tarjeta para conexión ethernet arduino MEGA.....	42
3.7.2	Protocolo de comunicación I2C.....	43
3.8	DIAGRAMA GENERAL DEL SISTEMA	45
3.9	DIAGRAMA DE FLUJO	47
4	PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	48
4.1	MONTAJE DE SISTEMA COMPLETO.....	48
4.2	MONTAJE DE MOTORES.....	49
4.2.1	Motores de pruebas	49
4.2.2	Generador de carga	50
4.3	FALLAS INDUCIDAS DE BARRAS ROTAS EN ROTOR Y RODAMIENTOS.	51
4.3.1	Falla de barras rotas en rotor	51
4.3.2	Fallas en rodamientos.....	52
4.4	RESULTADO DE PRUEBAS.....	52
4.4.1	Resultado 0% carga a velocidad nominal.....	53
4.4.2	Resultado 75% carga a velocidad nominal.....	54
4.4.3	Resultado 100% carga a velocidad nominal.....	55
4.4.4	Visualización resultados de pruebas	56
4.5	ANÁLISIS DE PRUEBAS.....	58
4.5.1	Análisis barras rotas de rotor técnica MCSA	59
4.5.2	Análisis rodamientos técnica MCSA	61
4.5.3	Análisis barras rotas de rotor técnica ESA	63
4.5.4	Análisis rodamientos técnica ESA.....	65
4.5.5	Análisis barras rotas de rotor técnica EPVA	67
4.5.6	Análisis rodamientos técnica EPVA	69
	CONCLUSIONES	72
	TRABAJOS FUTUROS	73
	REFERENCIAS.....	74
	ANEXOS.....	80

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DESFASE SEÑAL TRIFÁSICA.....	13
FIGURA 2. FALLAS ELÉCTRICAS Y MECÁNICAS.	15
FIGURA 3. BARRA ROTA MOTOR TIPO JAULA DE ARDILLA	16
FIGURA 4. RODAMIENTO DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN	18
FIGURA 5. MICROCONTROLADOR TEENSY 4.1	30
FIGURA 6 SENSOR DE VOLTAJE ISO 124P.....	32
FIGURA 7 SEÑALES DE VOLTAJE ISO124P.....	33
FIGURA 8 . MODELOS SENSORES DE CORRIENTE SCT013.....	34
FIGURA 9. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS SENSOR DE CORRIENTE SCT013.....	35
FIGURA 10 CARACTERÍSTICAS INTERNAS SENSOR DE CORRIENTE SCT013.....	35
FIGURA 11 SEÑALES DE CORRIENTE SENSOR SCT013	36
FIGURA 12. CIRCUITO NIVEL DC.....	37
FIGURA 13. SIMULACIÓN DE CIRCUITO NIVEL DC	37
FIGURA 14. ESQUEMÁTICO FUENTE DUAL.....	38
FIGURA 15. TECLADO MATRICIAL 4x4.....	39
FIGURA 16. PANTALLA LCD 16x2.....	40
FIGURA 17. MODULO ETHERNET ENC28J60	41
FIGURA 18. MICROCONTROLADOR ARDUINO MEGA 2560.....	42
FIGURA 19. CONEXIÓN MAESTRO Y ESCLAVOS PROTOCOLO I2C	44
FIGURA 20. INTERFAZ GENERADA A TRAVÉS DE LA CONEXIÓN ETHERNET.....	45
FIGURA 21. DIAGRAMA GENERAL DE SISTEMA.....	45
FIGURA 22. DIAGRAMA DE FLUJO SISTEMA.....	47
FIGURA 23. MONTAJE COMPLETO DEL SISTEMA PARA PRUEBAS	48
FIGURA 24. MONTAJE BANCO DE PRUEBA.....	49
FIGURA 25. MOTOR SIEMENS DE 0.5 HP	50
FIGURA 26. MOTOR DC BALDOR CD3450	50
FIGURA 27. FALLA DE BARRAS ROTAS EN ROTOR.....	51
FIGURA 28. FALLAS EN RODAMIENTOS	52
FIGURA 29. VISUALIZACIÓN DISPLAY LCD BARRAS ROTAS.....	56
FIGURA 30. RESULTADO INTERFAZ WEB MOTOR CON BARRAS ROTAS EN ROTOR.....	56
FIGURA 31. RESULTADO INTERFAZ WEB MOTOR SANO	57
FIGURA 32. RESULTADO ANÁLISIS LCD MOTOR CON FALLO EN RODAMIENTOS.....	57
FIGURA 33. RESULTADO INTERFAZ WEB MOTOR CON FALLO EN RODAMIENTOS	58
FIGURA 34. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA MCSA FASE R MOTOR CON FALLA BARRAS Y SANO.....	60
FIGURA 35. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA MCSA FASE S MOTOR CON FALLA BARRAS Y SANO	60
FIGURA 36. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA MCSA FASE T MOTOR CON FALLA BARRAS Y SANO	60
FIGURA 37. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA MCSA FASE R MOTOR CON FALLA RODAMIENTOS Y SANO	62
FIGURA 38. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA MCSA FASE S MOTOR CON FALLA RODAMIENTOS Y SANO	62
FIGURA 39. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA MCSA FASE T MOTOR CON FALLA RODAMIENTOS Y SANO	62
FIGURA 40. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA ESA FASE R MOTOR CON FALLA BARRAS Y SANO	64
FIGURA 41. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA ESA FASE S MOTOR CON FALLA BARRAS Y SANO.....	64
FIGURA 42. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA ESA FASE T MOTOR CON FALLA BARRAS Y SANO	64

FIGURA 43. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA ESA FASE S MOTOR CON FALLA RODAMIENTOS Y SANO ...	66
FIGURA 44. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA ESA FASE T MOTOR CON FALLA RODAMIENTOS Y SANO ...	66
FIGURA 45. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA ESA FASE R MOTOR CON FALLA RODAMIENTOS Y SANO ...	66
FIGURA 46. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA EPVA ID MOTOR CON FALLA BARRAS Y SANO	68
FIGURA 47. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA EPVA IQ MOTOR CON FALLA BARRAS Y SANO	68
FIGURA 48. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA EPVA IQ MOTOR CON FALLA RODAMIENTOS Y SANO	70
FIGURA 49. ESPECTRO FRECUENCIA TÉCNICA EPVA ID MOTOR CON FALLA RODAMIENTOS Y SANO	70

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. DESCRIPCIÓN DE TÉCNICAS PARA ANÁLISIS DE FALLAS	21
TABLA 2. INDICADOR PARA BARRAS ROTAS DE ROTOR.	23
TABLA 3. INDICADOR PARA FALLA EN RODAMIENTOS.....	24
TABLA 4. RESULTADO MOTOR CON FALLAS 0% CARGA A VELOCIDAD NOMINAL	53
TABLA 5. RESULTADO MOTOR SANO 0% CARGA A VELOCIDAD NOMINAL	53
TABLA 6. RESULTADO MOTOR CON FALLA BARRA ROTAS 0% CARGA A VELOCIDAD NOMINAL.....	53
TABLA 7. RESULTADO MOTOR CON FALLA RODAMIENTOS 0% CARGA A VELOCIDAD NOMINAL.....	53
TABLA 8. RESULTADO MOTOR CON FALLAS 75% CARGA A VELOCIDAD NOMINAL.....	54
TABLA 9. RESULTADO MOTOR SANO 75% CARGA A VELOCIDAD NOMINAL	54
TABLA 10. RESULTADO MOTOR CON FALLA BARRA ROTAS 75% CARGA A VELOCIDAD NOMINAL.....	54
TABLA 11. RESULTADO MOTOR CON FALLA RODAMIENTOS 75% CARGA A VELOCIDAD NOMINAL.....	54
TABLA 12. RESULTADO MOTOR CON FALLAS 100% CARGA A VELOCIDAD NOMINAL.....	55
TABLA 13. RESULTADO MOTOR SANO 100% CARGA A VELOCIDAD NOMINAL	55
TABLA 14. RESULTADO MOTOR CON FALLA BARRA ROTAS 100% CARGA A VELOCIDAD NOMINAL.....	55
TABLA 15. RESULTADO MOTOR CON FALLA RODAMIENTOS 100% CARGA A VELOCIDAD NOMINAL.....	55
TABLA 16. FRECUENCIAS BARRAS ROTAS TÉCNICA MCSA.....	59
TABLA 17. FRECUENCIAS FALLA EN RODAMIENTOS TÉCNICA MCSA.....	61
TABLA 18.FRECUENCIAS BARRAS ROTAS TÉCNICA ESA	63
TABLA 19. FRECUENCIAS FALLA EN RODAMIENTOS TECNICA ESA	65
TABLA 20.FRECUENCIAS BARRAS ROTAS TÉCNICA EPVA	67
TABLA 21. FRECUENCIAS FALLA EN RODAMIENTOS TÉCNICA EPVA.....	69
TABLA 22. RESULTADOS DE OPERACIÓN DE ANÁLISIS DE FALLA DE TÉCNICAS MCSA, ESA Y EPVA.	71

RESUMEN

Industrial processes within companies are a fundamental part of carrying out operations in a continuous and orderly manner. It is necessary to constantly monitor each machine through reliable techniques through H/ W (Hardware-Software) devices, which can anticipate possible inconveniences within them for the development of operations. There are several monitoring techniques for induction machines. Among the most used techniques for the process are: MCSA (Motor Current Signature Analysis), EPVA (Extended Park's Vector Approach) and ESA (Electric Power Spectral Analysis). These analyze through the consumption of current and voltage in frequency domain, giving the behavior of the state of the machine at work.

In the present final project, 3 of the monitoring techniques mentioned above are used to detect failures on broken bars in the squirrel cage type rotor and bearings, through the frequency analysis of the behavior of the motor, for this reason two mathematical tools are used, Park and fast Fourier transformation to obtain the necessary analyzes in the analyzed motor classification state

Finally, the design, construction, and implementation of a data acquisition card capable of detecting these failures was carried out, showing analysis and test results implemented with the motors available in the electronics laboratory of the Guayacanes building of the Pontificia Universidad Javeriana Cali, resulting in a functional prototype capable of performing an online analysis to detect failures of the broken bars in the squirrel cage type rotor and bearings.

As a final product, a prototype that takes the information from the monitoring of the electrical variables of the machine, processes and displays the results of the status of the rotor bars and bearings on the LCD screen of the data acquisition card and by means of a communication protocol through the Ethernet port is delivered. The visualization of the results of the indicators of broken rotor bars and bearings is achieved on the developed website, obtaining an average of system effectiveness of 95% for the detection of broken rotor bars and 60% for bearings.

Keywords: Fourier transform, motor, failures, bearings, broken bars, squirrel cage rotor, techniques, current, voltage, monitoring.

1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema.

Los motores de inducción tipo jaula de ardilla son máquinas utilizadas en la industria, por la capacidad de transformar energía eléctrica en energía mecánica. Estos motores son alimentados por corriente alterna AC para su funcionamiento. Además, son empleados de forma masiva en aplicaciones como bombas, maquinaria industrial, herramientas eléctricas, entre otras. Es de vital importancia mantener las máquinas en forma óptima para su correcto funcionamiento y garantizar su operación, reduciendo los tiempos de mantenimiento, retrasos en la productividad y gastos en la inactividad de la máquina por reparación de motores. [1], [2], [3], [6].

Si un motor presenta una falla en la jaula de ardilla, de ahí en adelante se ocasionan daños en otras barras, el estator o sus rodamientos. Esto obliga a la empresa a tener un presupuesto aproximado del 30% del valor del motor para la reparación, en consecuencia se hace necesario un sistema de monitoreo capaz de detectar oportunamente las fallas. [6].

Por otro lado, los motores de inducción representan el 90% en todos los procesos de producción [4], pueden tener varias fallas asociadas, tanto a barras rotas como en los rodamientos, esto se hace más evidente, según la operación en la cual se utilice la máquina, dado que por el tipo de operación es más propenso a fallar en un determinado lugar. Además existen diferentes variables externas que influyen en las diferentes fallas que se pueden obtener como son: la humedad, el calor, la contaminación, los errores de montajes, los sistemas de control y maniobra, entre otras [5].

1.2 Objetivo general

Diseñar e implementar una tarjeta de adquisición de datos para realizar el análisis en línea de las fallas en el rotor y rodamientos en un motor de inducción trifásico.

1.2.1 Objetivos específicos

- Establecer el conjunto de indicadores de falla que se utilizarán para realizar el análisis en el motor de inducción trifásico.
- Evaluar las especificaciones hardware-software para obtener los indicadores de falla establecidos para el análisis.
- Implementar técnicas apropiadas para el tratamiento de señales del motor y poder realizar análisis de las corrientes y voltajes del motor de inducción trifásico para su posterior procesamiento.
- Obtener mediante el procesamiento digital de señales los indicadores de falla seleccionados para el motor de inducción trifásico.
- Implementar un protocolo de comunicación mediante un puerto Ethernet para el envío de los datos de los indicadores de falla del motor de inducción trifásico.
- Diseñar e implementar un prototipo funcional para el análisis en línea del motor de inducción trifásico.
- Realizar el diagnóstico del funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos mediante ensayos con los motores disponibles en el laboratorio de ingeniería electrónica para cada indicador de falla.

1.3 Alcances

Con este proyecto se desea desarrollar un prototipo funcional capaz de realizar un análisis en línea para detectar posibles fallas de barras rotas en rotor y rodamientos de un motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla, utilizando como parámetros el voltaje y la corriente que permite establecer el estado del motor, con las 3 técnicas de monitoreo: MCSA, EPVA y ESA, para los indicadores de barras rotas de rotor y rodamientos.

1.4 Justificación

El diseño y la implementación de un dispositivo capaz de ejecutar análisis en tiempo real, sirve para escanear de forma no invasiva el motor en operación y conocer el estado del mismo junto, es decir buscar una falla, con el fin de conocer el lugar para corregirla oportunamente, reduciendo el tiempo de inactividad de la máquina. En la actualidad los motores de inducción hacen parte en gran porcentaje de la maquinaria a nivel industrial, de modo que los motores necesitan un constante monitoreo por su alta carga de trabajo. [2]

De ahí, la importancia que genera la implementación de éste proyecto para el análisis en línea de los motores de inducción, es significativo contar con una herramienta de tipo no invasiva que permita efectuar el diagnóstico de fallas incipientes y predecirlas [2]. Además, aporta a la disminución de pérdidas en cada uno de los procesos industriales en los cuales se trabaja, por tanto, al invertir en dispositivos de monitoreo se puede generar un ahorro que puede contribuir en una rentabilidad para la empresa [6].

Por consiguiente, al realizar el análisis en línea de los dispositivos de inducción, se debe tener en cuenta las numerosas técnicas para obtener los indicadores de fallo, con el fin de conseguir la información requerida para determinar el comportamiento de la máquina. Luego, aplicar las transformadas seleccionadas para obtener la respuesta en frecuencia de los parámetros analizados del motor y verificar los armónicos correctos para el análisis de la falla. Además, en caso de ser necesario desarrollar técnicas de filtrado de ruido para tener una mejor visualización de la señal al realizar el procesamiento. De esta forma, se pretende realizar un sistema que pueda ser utilizado en cualquier lugar que se requiera. Empleando nuevas tecnologías para realizar este dispositivo. Utilizar dispositivos de análisis en línea en motores de inducción, permite realizar diferentes tareas del motor sin ser interrumpida, lo que permite que sea funcional para empresas pequeñas, medianas o grandes, logrando beneficios económicos, optimización de tiempo y ejecución de sus tareas. Además, puede ser utilizado por cualquier persona que se dedique al mantenimiento de motores, debido a que el dispositivo brinda información del lugar específico de la falla.

Expuestos los puntos anteriores, se concluye que la implementación de un prototipo funcional que es capaz de analizar de manera constante un motor de inducción, es un aporte para el sector industrial debido a que puede detectar 2 diferentes fallas con un solo equipo, y en el mercado actual para el análisis de variables eléctricas de motores se utiliza dispositivos como: Baker EXP4000, All-Test Pro AT31, PowerPad de Allan-Bradley, Dranetz de Xplorer-Plus, Fluke 190-204, Fluke-438II.

1.5 Organización del documento

- Capítulo 1: contiene la descripción del planteamiento del problema, los objetivos propuestos, alcance y justificación.
- Capítulo 2: incluye el marco teórico en el cual explica el funcionamiento de motor de inducción con sus parámetros, posteriormente se detallan tipos de fallas eléctricas y mecánicas, adicionalmente se explica las 3 técnicas utilizadas para obtener los indicadores de fallas para barras rotas y rodamientos, luego se encuentra la definición para el procesamiento digital de señales y finalmente las frecuencias de falla para las 3 técnicas utilizadas en los indicadores en el desarrollo del proyecto.
- Capítulo 3: marco metodológico donde se detalla: especificaciones de diseño hardware y software para el dispositivo, sensores, módulos y partes utilizadas, además se muestra el diagrama general de funcionamiento y comunicación por medio del cable Ethernet del dispositivo.
- Capítulo 4: resultados: se muestran las pruebas realizadas y resultados obtenidos para la detección de fallas en barras rotas y rodamientos del motor tipo jaula de ardilla.
- Conclusiones.

2 MARCO TEÓRICO

En el siguiente capítulo se realiza la descripción del funcionamiento del motor de inducción tipo jaula de ardilla junto con las fallas seleccionadas para el análisis de la investigación, adicionalmente se explica las técnicas de detección de fallas implementadas para el análisis en línea del motor de inducción y finalmente se detalla la transformación matemática utilizada para la búsqueda en el dominio de la frecuencia de los armónicos de fallas y las fórmulas para el cálculo de los mismos.

2.1 Funcionamiento del motor de inducción.

Teniendo en cuenta el funcionamiento, en cuanto a los motores de inducción se tiene la acción de un campo magnético sobre un cilindro metálico, con el cual se realiza la operación de giro. Para ellos se cuenta con una alimentación de 3 fases desfasadas 120 grados, alimentando los 3 devanados alojados en las ranuras del núcleo del estator [27], donde el flujo giratorio producido corta con los conductores que se encuentran en el rotor y así forman las fuerzas electromotrices inducidas [26].

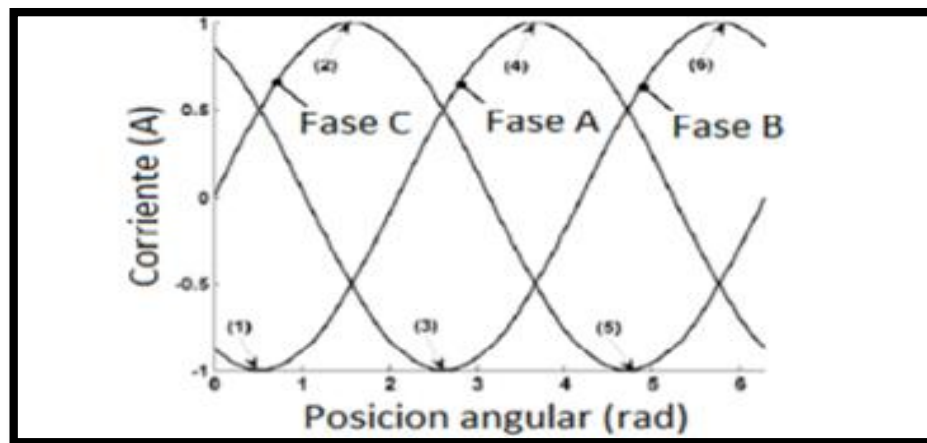


Figura 1. Desfase señal trifásica

Fuente: A. da Silva., "INDUCTION MOTOR FAULT DIAGNOSTIC AND MONITORING METHODS", Master of Electrical and Computer Engineering, Marquette University, 2006

2.1.1 Parámetros de un motor de inducción

Donde cada forma de onda para el motor de inducción está definida por las siguientes expresiones: [24] [27]

$$I_a = I_m \cos(\omega t - \phi)$$

$$I_b = I_m \cos(\omega t - \phi - \frac{2\pi}{3})$$

$$I_c = I_m \cos(\omega t - \phi + \frac{2\pi}{3})$$

Para este caso al ser simétricas las 3 fases se tiene lo siguiente:

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

En el caso de los voltajes se tiene la misma condición en el desfase de cada onda de la siguiente manera:

$$V_a = V_m \cos(\omega t)$$

$$V_b = V_m \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$

$$V_c = V_m \cos(\omega t + \frac{4\pi}{3})$$

La representación de los voltajes en coordenadas polares se expresa de la siguiente manera:

$$\check{V}_a = V_m \angle 0^\circ$$

$$\check{V}_b = V_m \angle -120^\circ$$

$$\check{V}_c = V_m \angle -240^\circ$$

Para la rotación del eje en los motores de inducción se tiene el siguiente parámetro que describe el comportamiento:

$$W_s = \frac{60 * f(Hz)}{P} \quad (rpm)$$

Donde W_s es la velocidad sincrónica de la rotación de la maquina en rpm a verificar, f es la frecuencia de la red de trabajo en Hertz y P son los pares de polos con los cuales trabaja la máquina [24] [26].

Para el factor de deslizamiento S de un motor de inducción trifásico se tiene la siguiente ecuación que permite describir el comportamiento. [27]

$$S = \frac{W_s - W_r}{W_s} * 100\%$$

W_s es la velocidad de sincronismo en radianes por segundo y W_r es la parte equivalente a la velocidad angular del rotor en radianes por segundo. [27]

2.2 Fallas en motores de inducción

En los motores de inducción se encuentran dos tipos de fallas, mecánicas y eléctricas, clasificadas de la siguiente forma:



Figura 2. Fallas eléctricas y mecánicas.

Fuente: D.A. Sotomayor, S.D. Castellanos, “Diseño y Construcción de un Banco de Pruebas para la Detección de Fallas en Motores de Inducción Trifásicos” Trabajo de Maestría, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2016.

En el presente trabajo de grado se analiza las fallas de barras rotas de rotor y rodamientos, debido a que son las de mayor incidencia en la operación de los motores de inducción. Para el caso de fallas en los rodamientos es aproximadamente el 41% del total de fallas registradas, estas se relacionan con una carga excesiva, lubricación inadecuada o ajuste incorrecto del motor de inducción. Adicionalmente se registra para el caso de barras rotas, un porcentaje alrededor del 10% del total de fallas, donde se producen por estrés térmico, arranques forzados y ciclos de trabajo pesado [29], debido a que estas dos fallas son las de mayor registro de ocurrencia en la operación

de los motores de inducción. Estas se seleccionaron con el fin de realizar un análisis sobre técnicas de predicción de fallas e implementar un dispositivo funcional de bajo costo para la detectarlas.

2.2.1 Fallas eléctricas

Las fallas eléctricas en los motores eléctricos se dan por diferentes causas: la variación de las resistencias en el estator y rotor, los flujos de corriente y cambio en el valor de sus inductancias. Este tipo de fallas eléctricas se pueden producir por: Alta temperatura en el estator, pérdida de aislante en los devanados, humedad, polvo, cortocircuito o arranque forzado y descargas eléctricas. [19].

2.2.1.1 Barras rotas de rotor

Una barra puede romperse parcial o completamente, por defectos de fabricación, arranques frecuentes a voltaje nominal, tensiones térmicas y/o tensiones mecánicas causadas por fallas de los rodamientos y fatiga del metal [24]. La falla de una o varias barras del motor de inducción está dada por: estrés térmico por sobrecargas y desbalances, puntos calientes, los cuales son inconvenientes asociados a errores de fabricación del motor de inducción, adicionalmente estrés magnético, desbalanceadas y corrosión del material debido a químicos o humedad, entre otros [24] [29]. Con el fin de tener más claridad sobre dicha falla, a continuación se muestra la imagen de una barra rota en un motor de inducción.

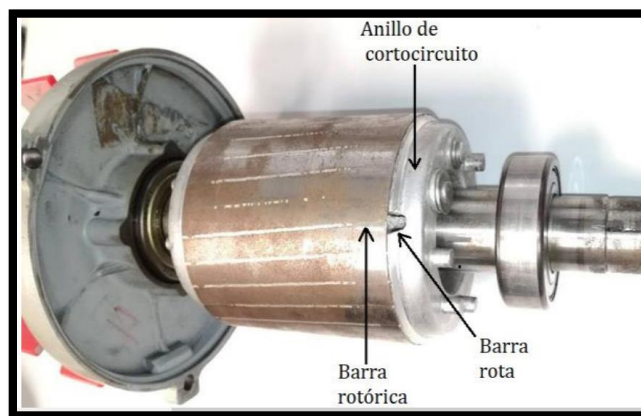


Figura 3. Barra rota motor tipo jaula de ardilla

Fuente: J.G. Herrera, “Análisis de la Eficiencia de los Motores de Inducción que Operan bajo Diferentes Condiciones de Fallos” Trabajo de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Valencia, 2018.

La detección de este tipo de fallas ocasiona que el motor se comporte como un circuito trifásico desbalanceado manifestándose con un campo magnético que gira en sentido contrario a la rotación del rotor [20].

Dado que existen más fallas eléctricas para un motor de inducción trifásico, solo se da explicación de barras rotas en rotor, debido a que las demás fallas no son el objetivo de la investigación.

2.2.2 Fallas mecánicas

Estas fallas se dan en los rodamientos del motor, generando desequilibrio y desalineaciones afectando el funcionamiento del motor [23]. Las averías mecánicas se presentan en elementos deficientes de los motores, donde la principal causa es el defecto de fabricación. El motor que presente estos inconvenientes adicionalmente presenta: voltajes y corrientes desbalanceadas, disminución del torque, reducción de eficiencia y calentamiento excesivo [19].

2.2.2.1 Fallas en rodamientos

Los motores de inducción usan rodamientos para reducir la fricción entre el eje y las piezas en el momento de la transferencia de fuerza. Los rodamientos son un elemento mecánico que reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a este, que le sirven de apoyo y facilitan su desplazamiento. Las fallas en la parte interior, exterior y elementos rodantes, producirá componentes de frecuencia de vibración únicas en las mediciones de la máquina [20].

En la siguiente imagen se puede apreciar las partes que conforman un rodamiento para un motor de inducción trifásico.

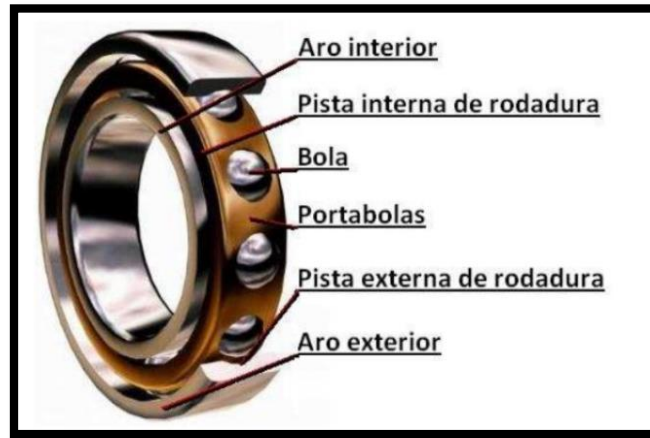


Figura 4. Rodamiento de un Motor de inducción

Fuente: A. Rico, M. Trisancho, “Detección de Fallas en un Motor de inducción usando MCSA (Motor Current Signature Analysis)”, Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander, 2011.

Las principales causas de este tipo de fallas son: una carga excesiva, falta de alineamiento, desgaste, corrosión, defectos de asientos del eje, montaje defectuoso, ajuste incorrecto, lubricación inadecuada y sellado deficiente [16] [23].

Dado que existen más fallas mecánicas para un motor de inducción trifásico, solo se da explicación de los rodamientos debido a que las otras fallas no son el objetivo de la investigación.

2.3 Técnicas para análisis de falla del motor de inducción trifásico.

A continuación se describen las tres técnicas utilizadas en la implementación del dispositivo de adquisición de datos para realizar el análisis en línea de un motor de inducción trifásico, con el fin de entender el comportamiento y el análisis matemático previo que se debe de implementar antes de ejecutar la búsqueda de fallas en el dominio de la frecuencia para cada técnica.

2.3.1 Extended park's vector approach – (EPVA)

El Extended Park's Vector Approach (EPVA) realiza una transformada de un sistema fasorial de componentes desfasadas 120° entre ellas a un sistema representado en el plano de coordenadas

[25]. La conocida transformación de Park permite referir las variables de una máquina trifásica a un sistema de dos ejes en cuadratura. Los componentes de la corriente del estator en los ejes directo y en cuadratura (D y Q) fijos al estator, se obtienen por medio de las siguientes relaciones:

$$i_D = \sqrt{\frac{2}{3}} i_A - \sqrt{\frac{1}{6}} i_B - \sqrt{\frac{1}{6}} i_C$$

$$i_Q = \sqrt{\frac{1}{2}} i_B - \sqrt{\frac{1}{2}} i_C$$

Donde i_A , i_B e i_C son las corrientes de las fases A, B y C del estator [4] [30] [31] [34].

Para diagnosticar el estado de un motor de inducción con esta técnica, primero se realiza su transformación en las corrientes ID e IQ, para luego utilizar el análisis en frecuencia aplicando la transformada rápida de Fourier, donde aparecerán los armónicos de las corrientes para realizar la búsqueda de fallas en motores de inducción [25].

2.3.2 Motor current signal analysis (MCSA)

MCSA es una técnica para diagnóstico de motores de inducción, que permite conocer el estado eléctrico y mecánico de estos, por medio de consumo de corrientes y voltajes. Esta información se procesa utilizando algoritmos de procesamiento de señales y técnicas matemáticas como: Transformada Rápida de Fourier (FFT). La metodología de la técnica MCSA consiste en revisar detalladamente la corriente de estator en dominio de la frecuencia analizando la amplitud de armónicos en frecuencias específicas en motores de inducción, detectando así fallas que presentan los mismos, dichos armónicos dependiendo del punto de frecuencia y amplitud representa la falla y severidad en los motores de inducción. [49] [50]

El análisis espectral de corrientes mediante la técnica MCSA, es uno de los métodos usados para el diagnósticos en línea con el fin de identificar las fallas en motores de inducción, con el análisis

de las corrientes eléctricas es posible observar el comportamiento de armónicos anormales en la corriente de estator [27] [36] [37].

2.3.3 Electric power spectral analysis – (ESA)

La técnica ESA se utiliza para análisis en dominio de la frecuencia, busca principalmente los espectros de la potencia trifásica instantánea, para obtener las fallas que un motor de inducción presente. Alguna variación en la técnica ESA usa el factor de potencia instantáneo o ángulo instantáneo del factor de potencia para obtener los indicadores de falla. La principal ventaja del análisis del espectro de potencia activa y reactiva trifásica es que analizando cada una se encuentran más fallas en los motores de inducción. [51]

Es una técnica que tiene en cuenta las señales de potencia, por tal razón para su análisis en frecuencia se encuentra al doble de la frecuencia fundamental $f = 2f$. Para esta técnica la ecuación de la señal de potencia se calcula de la siguiente manera.

$$p(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t)$$

Donde a,b,c son las fases de alimentación del motor de inducción [4] [27] [37] [38] [39].

A continuación se describe las 3 técnicas de falla seleccionadas para la detección de fallas en barras rotas de rotor y rodamientos para los motores de inducción.

Técnicas de Análisis				
Método de Diagnostico	Utiliza	Indicador de Falla	Tipo de falla	
			Barras Rotas	Falla Rodamientos
MCSA	Corrientes de Estator	Bandas Laterales en FFT	✓	
		Armónicos de Magnitud alta en FFT		✓
ESA	Corrientes y Voltajes de Estator	Bandas Laterales en FFT	✓	
		Armónicos de Magnitud alta en FFT		✓
EPVA	Corrientes de Estator	Bandas Laterales en FFT	✓	
		Armónicos de Magnitud alta en FFT		✓

Tabla 1. Descripción de técnicas para análisis de fallas

2.4 Procesamiento digital de señales.

El análisis de la información para las variables eléctricas medidas, se le realiza una transformación matemática para su correcta interpretación, por lo cual se detalla la base fundamental para los análisis utilizados en la tarjeta de adquisición de datos implementada.

2.4.1 Transformada de Fourier.

Es una transformada que se emplea para transformar señales en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, en donde la transformada de Fourier contiene el espectro de frecuencias de una función o de un conjunto de datos durante el tiempo que la función existe, la transformada de Fourier está definida como [12]:

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt$$

Para el caso de que se tengan datos discretos para analizar en el dominio de la frecuencia se utiliza La Transformada Discreta de Fourier (DFT), La Transformada discreta de Fourier de una señal $x[n]$ definida en el rango $0 \leq n \leq N-1$ se define como:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{k \cdot n}$$

Donde $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ y los valores espectrales $X[k]$ se evalúan en $0 \leq k \leq N-1$ [12].

Otro método para calcular la DFT es la Transformada Rápida de Fourier (FFT) que son algoritmos que permite realizar el cálculo de una manera eficiente y rápida, en lo que corresponde a tiempo de procesamiento. Este algoritmo calcula $X(k)$ a partir de la secuencia $x(n)$, y las propiedades del factor de giro W_N las cuales son de periodicidad definido por $W_N^{k+N/2} = -W_N^k$ y de simetría definida por $W_N^{k+N} = W_N^k$.

2.4.2 Transformada rápida de Fourier

La transformada rápida de Fourier - FFT (abreviatura del inglés Fast Fourier Transform), es un algoritmo que permite calcular la transformada discreta de Fourier (DFT) de una manera óptima. Con la FFT se obtiene la representación en el dominio de las frecuencias señales representadas en el dominio del tiempo. Esto permite un análisis de las señales y el procesamiento de señales en general, el algoritmo funciona, tomando muestras con un número igual a una potencia de dos. La FFT utiliza menos operaciones complejas ya que en la DFT se requieren N^2 operaciones aritméticas complejas, en cambio con la FFT solo se realizan $N \log_2 N$ operaciones, para esto existen diferentes algoritmos que realizan la FFT como son: algoritmo Cooley- Tukey, diezmado en el tiempo y algoritmo de base rápida. [52] [53],

2.5 Indicadores de fallas para análisis del motor de inducción

A continuación se especifican los dos indicadores de falla seleccionados para el análisis del motor de inducción, en falla de barras rotas de rotor y rodamientos, donde se detallan los valores mínimos

requeridos para definir una falla, dichos valores son producto de la investigación y el análisis del comportamiento de los motores de inducción con los que se realizaron las pruebas de funcionamiento.

2.5.1 Indicador de falla barras rotas en rotor

La falla de barras rotas de rotor hace que se generen en análisis en frecuencia, dos armónicos laterales alrededor de la frecuencia fundamental de alimentación, que en el caso de Colombia es 60Hz, estos armónicos se diagnostican en magnitud de decibles (dB) para determinar el estado de las barras de rotor. En la siguiente tabla se muestra el nivel de dB que se debe tener para diagnosticar el estado de las barras de rotor de un motor de inducción trifásico para las 3 técnicas utilizadas (MCSA, ESA y EPVA).

Grado de Falla	Nivel en [dB]
Varias Barras Rotas	0 a -35
Una Barra Rota	-35 a -39
Muchos puntos de alta resistencia o una barra rota	-39 a -44
Varios puntos de alta resistencia	-44 a -46
Puntos de alta resistencia	-46 a -60
Motor sano	-60 hacia abajo

Tabla 2. Indicador para barras rotas de rotor.

Fuente: Fernández A. “Diagnóstico de barras rotas en un motor de inducción de jaula de ardilla-Aproximación con wavelet”. Universidad del valle. Colombia, 2009.

2.5.2 Indicador de falla rodamientos

Las fallas de los rodamientos en los motores de inducción trifásicos, se pueden dar en diferentes partes del rodamiento, la pista interna o externa, en elementos rodantes o la jaula, en el análisis en frecuencia se presentan armónicos asociados a la falla, las cuales se pueden encontrar con las ecuaciones que se definen para cada una de las técnicas. Al realizar la comparación de los armónicos de un motor con rodamientos sano y otro con fallas inducidas, se determinó el valor

mínimo necesario para asociar una posible falla en rodamientos, la siguiente tabla muestra los valores de cada técnica para definir el estado de posible falla en rodamientos.

Posible Falla Rodamiento	Nivel Magnitud Mínima
Técnica MCSA.	Mayor igual a 420
Técnica ESA.	Mayor igual a 600000
Técnica EPVA.	Mayor igual a 610
Rodamiento Sano	Debajo de nivel magnitud mínimo

Tabla 3. Indicador para falla en rodamientos.

Fuente: Autores.

Los anteriores valores se obtienen por análisis de magnitud de la FFT para las variables eléctricas medidas del motor de inducción, donde para cada técnica se realiza la búsqueda del armónico de falla correspondiente, dicha búsqueda se realiza en las partes del rodamiento mencionadas (elementos rodantes, jaula, pista interna y externa). Los datos de la tabla 2 son los niveles mínimos requeridos para definir como posible falla para cada parte del rodamiento y en el caso de un rodamiento sano la magnitud debe estar por debajo del nivel mínimo de cada técnica.

2.6 Frecuencias de falla para indicadores

A continuación se detalla las fórmulas para calcular las frecuencias de las fallas de barras rotas y rodamientos en el motor de inducción, para las tres técnicas seleccionadas en los indicadores de falla para el análisis de estado en el motor de inducción.

2.6.1 Falla de barras rotas de rotor técnica EPVA

Para la búsqueda de falla en el rotor de barras rotas, utilizando la técnica del vector de Park, se realiza un análisis espectral con la FFT de la transformación de las variables de Park, buscando la aparición de armónicos en las frecuencias específicas asociadas a barras rotas. Para este caso se tiene que el valor de la magnitud de los armónicos aumenta directamente proporcional al número de barras rotas y se encuentra con la siguiente ecuación. [4] [32] [33] [34]:

$$f_{\text{rotor}} = (1 \pm 2s)f_s$$

f_s Y s son la frecuencia de suministro eléctrico y el deslizamiento del motor respectivamente.

2.6.2 Fallas en rodamientos técnica EPVA

Para las fallas en rodamientos se analiza cada parte del rodamiento, pista externa, pista interna, elementos rodantes y Jaula, el método EPVA puede contener componentes espectrales adicionales en el comportamiento de las corrientes medidas del motor, cuyas frecuencias se pueden determinar por la siguiente ecuación. [28] [32] [33] [34]:

$$f_{\text{rodamientos}} = |f_s \pm k f_n|$$

Donde f_s es la frecuencia de alimentación del motor en Hz, f_n es la frecuencia natural correspondiente a la parte del rodamiento y $k= 1, 2, 3 \dots$. La existencia de fallas en los rodamientos se refleja en el análisis espectral de las 3 fases de corrientes eléctricas del motor.

Para el parámetro f_n correspondiente a cada parte del rodamiento se calcula con las siguientes ecuaciones: [28] [32] [33].

f_c = Frecuencia de falla de la jaula.

$$f_c = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b \cos \beta}{D_c} \right)$$

f_o =Frecuencia de falla de la pista de rodadura externa.

$$f_o = \frac{N_B}{2} f_r \left(1 - \frac{D_b \cos \beta}{D_c} \right)$$

f_i = Frecuencia de falla de la pista interna.

$$f_i = \frac{N_B}{2} f_r \left(1 + \frac{D_b \cos \beta}{D_c} \right)$$

f_B = Frecuencia de falla de los elementos rodantes.

$$f_B = \frac{D_c}{D_b} f_r \left[1 - \left(\frac{D_b \cos \beta}{D_c} \right)^2 \right]$$

Con:

f_r = Frecuencia del rotor.

D_b = Diámetro de los elementos rodantes.

D_c = Diámetro de paso.

N_B = número de elementos rodantes.

β = ángulo de contacto de elementos rodantes.

2.6.3 Falla de barras rotas de rotor técnica MCSA

Las fallas de barras rotas en el rotor de un motor de inducción se pueden detectar gracias al campo eléctrico que se genera, donde existen perturbaciones que inducen una fuerza electromotriz y una corriente en el devanado del estator. Como resultado, estas perturbaciones se pueden detectar con un análisis en frecuencia en el cual los componentes espectrales de las fallas en las corrientes del estator están dadas por: [27] [35] [36] [37].

$$f_{\text{rotor}} = (1 \pm 2ks)f_0$$

Donde f_0 es la frecuencia de suministro eléctrico, s es el deslizamiento del motor, y $k = 1, 2, 3, \dots$, respectivamente.

2.6.4 Fallas en rodamientos técnica MCSA

La instalación inadecuada de los rodamientos es la razón principal de las fallas en los rodamientos físicos. Los problemas de instalación como la desalineación y / o la desviación del eje y la inclinación inadecuada de las pistas internas y / o externas crean fuerzas anormales en los rodamientos, las cuales puede describirse por: [27] [28] [36].

$$f_{\text{rodamientos}} = f_0 \pm n_b f_{i,o}$$

Con:

$$f_{i,o} = \frac{n}{2} (1 - s) f_0 \left\{ 1 \pm \frac{BD}{PD} \cos \beta \right\}$$

Donde n_b es el número de elementos rodantes, PD es el diámetro del paso del rodamiento, BD es el diámetro de elemento rodante, β es el ángulo de contacto de la grieta en las carreras, y n es el positivo entero, respectivamente. Aparte de la ecuación anteriormente mostrada que depende de los parámetros constructivos del motor, existe una ecuación experimental, en la que únicamente depende de los elementos rodantes, esta ecuación se usa generalmente para 6–12 elementos rodantes, la ecuación se describe como: [27] [28] [36].

$$f_{\text{rodamientos}} = (0.4n_1 + 0.6n_2)(1 - s)f_0$$

Donde n_1 y n_2 son enteros.

Igualmente, para analizar las fallas de barras rotas de rotor y rodamientos en la técnica MCSA se puede utilizar las ecuaciones para el cálculo de las frecuencias de falla de la técnica EPVA mencionada anteriormente, esto debido a que al calcular las frecuencias tienen comportamientos similares.

2.6.5 Falla de barras rotas de rotor técnica ESA

Un motor de inducción con fallas eléctricas en el rotor, como barras rotas, presenta corrientes de rotor distribuidas de manera desigual. Estas corrientes tienen comportamientos característicos que se muestran junto a la frecuencia fundamental del espectro de corriente. Estas frecuencias están dadas por: [4] [27] [37] [38] [39].

$$f_{\text{rotor}} = (1 \pm 2s)f_s$$

También, se encontrarán armónicos de banda lateral inferior y superior de la corriente. Sin embargo, los armónicos de potencia, emergen al doble de la frecuencia fundamental [4] [27] [37] [38] [39].

2.6.6 Fallas en rodamientos técnica ESA

Las fallas en los rodamientos vienen principalmente dadas por [4] [27] [28] [37] [38] [39]:

$$f_{\text{rodamientos}} = f_0 \pm n_b f_{i,o}$$

Con:

$$f_{i,o} = \frac{n}{2} (1 - s) f_0 \left\{ 1 \pm \frac{BD}{PD} \cos \beta \right\}$$

Donde n_b es el número de elementos rodantes, PD es el diámetro del paso del rodamiento, BD es el diámetro de elemento rodante, β es el ángulo de contacto de la grieta en las carreras, y n es el positivo entero, respectivamente. Teniendo en cuenta que la frecuencia se encuentra al doble de la fundamental. Esta ecuación se usa generalmente para 6–12 elementos rodantes, la ecuación se describe como: [4] [27] [36] [37] [38] [39].

$$f_{\text{rodamientos}} = (0.4n_1 + 0.6n_2)(1 - s)f_0$$

Donde n_1 y n_2 son enteros.

Igualmente, para analizar las fallas de barras rotas de rotor y rodamientos en la técnica ESA se puede utilizar las ecuaciones para el cálculo de las frecuencias de falla de la técnica EPVA mencionada anteriormente, esto debido a que al calcular las frecuencias tienen comportamientos similares.

Por otra parte las formulas donde se encuentran las fallas para ser analizadas en este capítulo están relacionadas con la teoría del numeral 2.2 fallas en motores de inducción, donde se encuentra especificado las causas que desencadenan una falla en un motor eléctrico.

3 MARCO METODOLÓGICO

En este capítulo se expone el desarrollo técnico que integra el sistema en general, mostrando cada uno de los componentes del hardware de la tarjeta de adquisición de datos, además de las características y funcionamiento de cada módulo, adicionalmente se detalla el funcionamiento del software y la interfaz que tiene el sistema con el usuario.

3.1 Especificaciones hardware – software para indicadores de falla.

El dispositivo utilizado para el procesamiento de las variables eléctricas medidas en el motor de inducción es el Teensy 4.1, gracias a su facilidad de tomar señales, digitalizarlas y poder procesarlas, permite crear prototipos de circuitos electrónicos que utilizan tanto hardware como software para su funcionamiento.

3.1.1 Lecturas analógicas

Las lecturas analógicas se realizan mediante los pines del Teensy 4.1 determinados como de lectura analógica, con una resolución de 10 bits, lo que permite que al recibir una señal entre 0 y 5 voltios, el dispositivo tome un valor de 0 a 1023, obteniendo una resolución de:

$$Resolución = \frac{5}{1023} = 4.88mV$$

Para tener buena representación de la señal a muestrear se debe tener en cuenta la frecuencia fundamental de trabajo del motor, y la frecuencia máxima a detectar, para no producir el fenómeno de Aliasing en la señal reconstruida. En la tarjeta de adquisición de datos la frecuencia fundamental de la señal a detectar es de 60Hz y la frecuencia máxima a detectar es de 2.5KHz, debido a que la tarjeta analiza 6 canales de forma simultánea y realiza el procesamiento de cada señal para encontrar las fallas.

Ya determinada la frecuencia máxima por la tarjeta de adquisición de datos y utilizando el teorema de Nyquist, se calcula la frecuencia de muestreo del dispositivo con la siguiente ecuación.

$$f_s = 2 * f_{max}$$

$$f_s = 2 * 2.5Khz = 5 Khz$$

El tiempo que se debe tomar cada punto de la señal es.

$$T = \frac{1}{f_s} = \frac{1}{5KHz} = 0.2 ms$$

Con esto se conocen cuáles son los requerimientos mínimos en el software para detectar fallas del motor de inducción en las barras rotas del rotor y los rodamientos.

3.1.2 Microcontrolador Teensy 4.1

Teensy 4.1 es una placa de desarrollo de microcontrolador compatible con protoboards o tarjetas de prueba, que se programa utilizando cable de conexión tipo USB al PC, integrado con el lenguaje de programación IDE Arduino y lenguaje C. Para este proyecto se utilizó la última versión de esta placa el Teensy 4.1 [43].

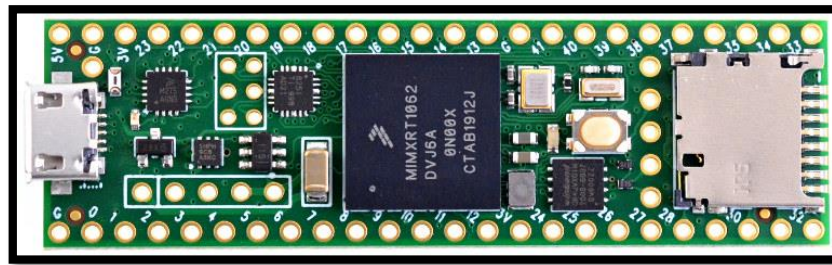


Figura 5. Microcontrolador Teensy 4.1

Fuente: PJRC Electronic Projects Components Available Worldwide, Teensy 4.1 Development Board [Online]. Available: <https://www.pjrc.com/store/teensy41.html>

El Teensy 4.1 es la versión más reciente de la plataforma que presenta un procesador ARM Cortex-M7 a 600MHz, con un chip NXP iMXRT1062, una memoria flash de 8 Mbyte y dos nuevas

ubicaciones para agregar más memoria. El Teensy 4.1 proporciona una mayor capacidad de puertos de entrada y salida que incluye un puerto de Ethernet, un conector de tarjeta SD y un puerto host USB [43].

Características

- ARM Cortex-M7 a 600MHz
- 1024K RAM (512K está estrechamente acoplado)
- 8 Mbyte Flash (64K reservado para recuperación y emulación (EPROM))
- Puerto host USB
- 2 chips más memoria de programa
- 55 pines de I/O totales
- 3 SPI,
- 8 puertos serie
- 35 pines PWM
- 42 entradas/salidas
- 18 entradas analógicas
- Zócalo de la tarjeta microSD
- Administración de encendido / apagado

El Microcontrolador Teensy 4.1 será el encargado de muestrear las señales de los sensores de corriente y voltaje gracias a su resolución predeterminada de 10 bits (rango de entrada de 0 a 1023), pero se puede ajustar hasta 12 bits de resolución, aunque a esa resolución se verá afectada por el ruido. También, en esta placa se desarrolla un programa que identifica las fallas de barras rotas en rotor y rodamientos en los motores de inducción, con la medición de las variables eléctricas voltajes y corrientes junto con el análisis de las técnicas seleccionadas.

3.2 Sensores

Para el diseño de la tarjeta de adquisición de datos es importante tener en cuenta que este dispositivo va a tomar medidas de voltaje y de corriente de un motor trifásico por lo cual se necesita realizar el monitoreo de las 3 fases del motor tanto en voltaje como en corriente.

3.2.1 Sensores voltaje ISO – 124P

Los sensores de voltaje, en cada una de las fases del motor de inducción se utilizó el amplificador ISO 124P con un divisor de voltaje al pin de entrada de dicho sensor con el fin de que la señal de salida no sobrepase los 3,3 voltios, teniendo en cuenta la señal que recibe el divisor del voltaje se encuentra entre 440 Vac y 220Vac. La configuración utilizada en el sensor se muestra en la siguiente imagen:

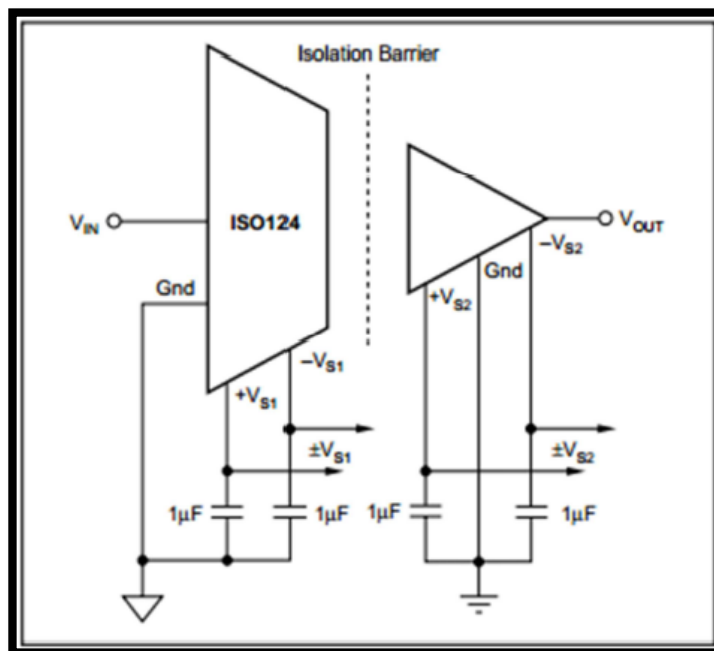


Figura 6 Sensor de Voltaje ISO 124P

Fuente: High-precision isolation amplifier ISO124P. Datasheet, Texas Instruments Incorporated, USA, 2008.

Este sensor funciona realizando una etapa de aislamiento de alta precisión, además de tener incorporada en su configuración la técnica de modulación y demodulación de ciclo completo. La señal de este sensor se obtiene a través de una capacitancia diferencial de 2pf con una demodulación digital, también cuenta con las características suficientes de muestreo para no alterar la integridad de la información de la señal durante su funcionamiento sin importar si las señales son de frecuencias altas que son propensas a generar distorsión en la información [41].

A continuación, se muestra la imagen de la forma de onda en la salida del sensor para los voltajes de alimentación del motor de inducción trifásico.

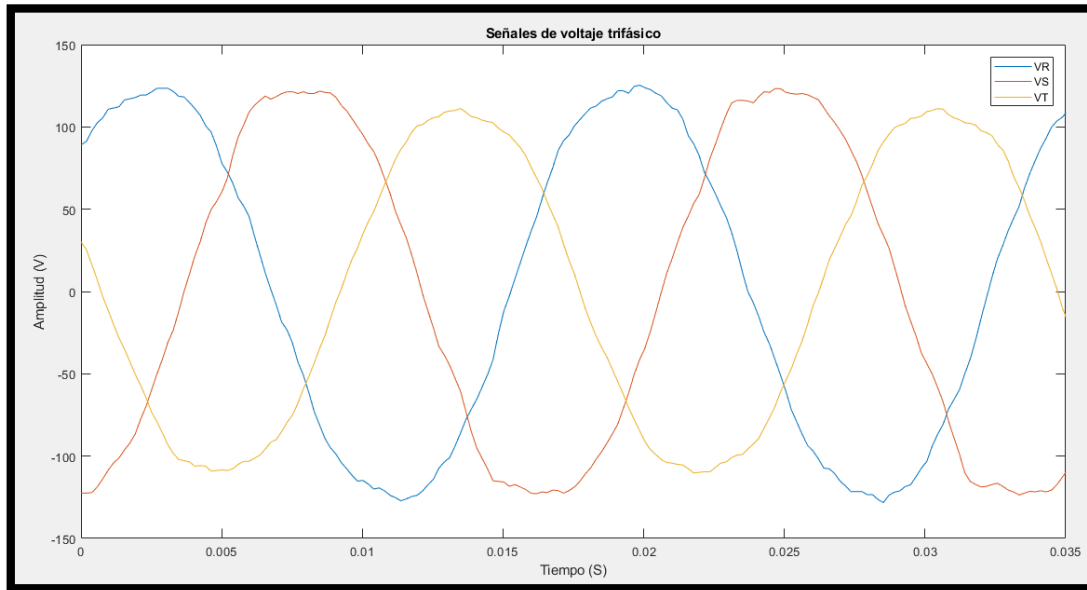


Figura 7 Señales de Voltaje ISO124P

Fuente: Autores

3.2.2 Sensores corrientes SCT- 013

Para este caso se tiene el sensor de corriente de efecto HALL SCT-013 el cual está diseñado para que funcione de manera no invasiva en el sistema, esto con el fin de mantener la maquina siempre activa y sin interrupciones en el momento del análisis. Dicho funcionamiento del sensor se puede asimilar a una pinza amperimétrica debido a su núcleo dividido el cual permite la medición de intensidad eléctrica, además se puede obtener con facilidad la medición con su salida de puerto en Jack para su acople [26][42].

Características:

- Tamaño de apertura 13 mm x 13 mm, cable principal de 1 m, salida de enchufe de tres núcleos estándar de 3.5mm. Tiene dos tipos de tipo de salida: de corriente y de voltaje.
- Aplicaciones para medición de corriente, monitor y protección para motores de CA, equipos de iluminación, compresores de aire, entre otros.
- Entrada 0-10A.
- Salida 0-1V.
- Precisión: $\pm 1\%$.

- Linealidad: $\leq 0.2\%$.
- La relación de vueltas: 1: 1800.
- Tensión de trabajo: 660V.
- Frecuencia de trabajo: 50-1KHz.
- Temperatura de funcionamiento: $-25^{\circ}\text{C} + 70^{\circ}\text{C}$.
- Temperatura de almacenamiento: $-40^{\circ}\text{C} + 90^{\circ}\text{C}$.
- Dielectricidad: 3KV.

Los sensores de corriente SCT 013 posee diferentes modelos que se diferencian entre el tipo de salida, ya sea en voltaje o en corriente y el nivel de amperaje de entrada que soporta el sensor, en la siguiente imagen se muestra los diferentes modelos.

Model	SCT-013-000	SCT-013-005	SCT-013-010	SCT-013-015	SCT-013-020
Input current	0-100A	0-5A	0-10A	0-15A	0-20A
Output type	0-50mA	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V
Model	SCT-013-025	SCT-013-030	SCT-013-050	SCT-013-060	SCT-013-000V
Input current	0-25A	0-30A	0-50A	0-60A	0-100A
Output type	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V

Figura 8 . Modelos sensores de corriente SCT013

Fuente: Split core current transformer, SCT-01, Datasheet, YHDC.

El funcionamiento de este sensor es basado en un transformador de intensidad que contiene en su interior un núcleo, consta de un bobinado en uno de los extremos del núcleo ferroso como se muestra a continuación.

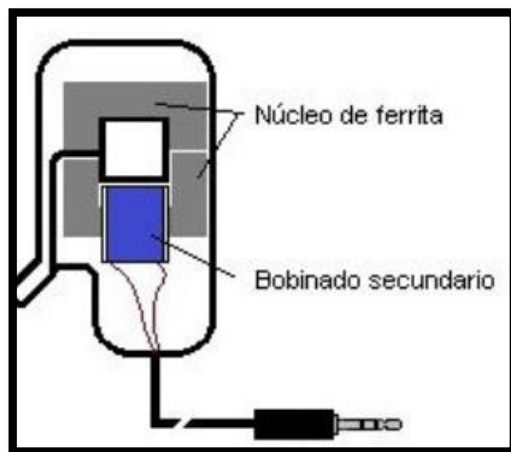


Figura 9. Características físicas sensor de corriente SCT013

Fuente: DIVERTEKA el sitio de los Tecno-Freaks, Control de consume electric con Arduino, [Online]. Available: <http://www.diverteka.com/?p=1966>

Al pasar una de las fases del motor de inducción por medio del núcleo del sensor, se capta el flujo magnético generado conforme al flujo de corriente que circula por medio del cable del motor durante su funcionamiento. Mediante el efecto de inducción electromagnética se aprecia en la salida del sensor una intensidad de voltaje proporcional al consumo de corriente que se tiene en el momento, dado que el sensor tiene una resistencia de carga en la salida del transformador [26] [42].

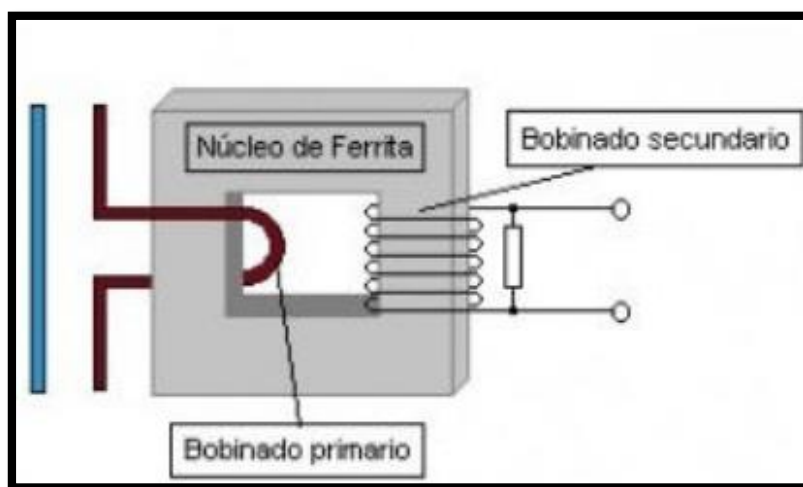


Figura 10 Características internas sensor de corriente SCT013

Fuente: DIVERTEKA el sitio de los Tecno-Freaks, Control de consumo eléctrico con Arduino, [Online]. Available: <http://www.diverteka.com/?p=1966>

Para obtener la señal del sensor de corriente SCT 013 se debe conectar el Jack de tipo audio de 3.5mm al circuito de nivel DC, para adicionar a la señal alterna la componente DC y colocarla en valores positivos para su posterior análisis [42].

A continuación, se muestra la imagen de la forma de onda en la salida del sensor de corriente para las 3 fases de alimentación del motor de inducción trifásico.

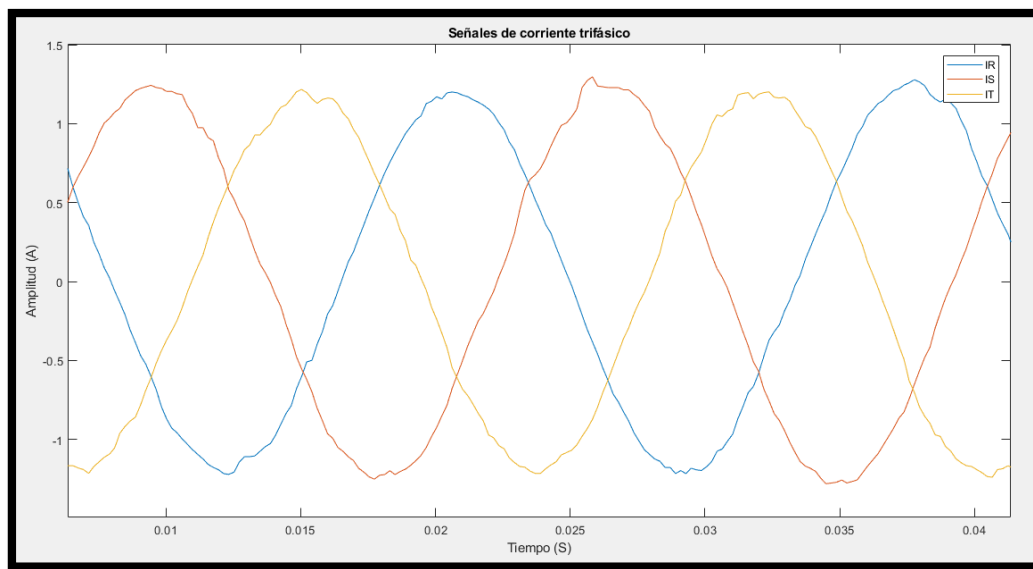


Figura 11 Señales de Corriente sensor SCT013

Fuente: Autores

3.3 Circuito Nivel DC

Para que la tarjeta de adquisición Teensy 4.1 no tenga pérdidas de datos por valores negativos de la forma de onda seno, de corriente y voltaje AC, es necesario agregar un valor DC a cada salida de los sensores, para tener solamente valores positivos en las señales. El siguiente circuito muestra la configuración utilizada para el proceso.

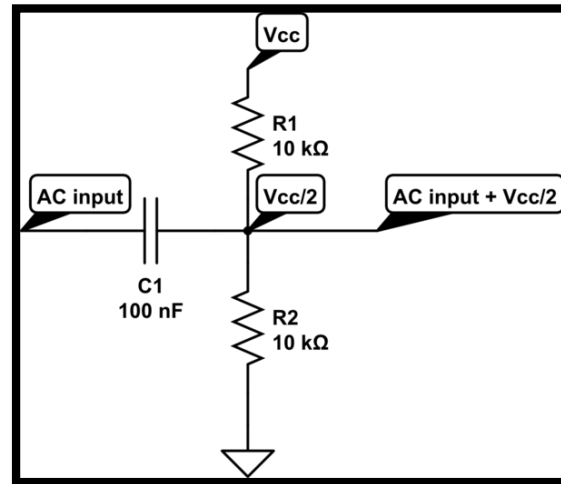


Figura 12. Circuito Nivel DC

Fuente: "¿Cuál es el cambio de nivel de amplificador operacional más simple? - Electrónica", Electronica.guru, 2014. [Online]. Available: <https://electronica.guru/questions/38051/cual-es-el-cambio-de-nivel-de-amplificador-operacional-mas-s>.

Con la configuración del circuito de la figura circuito nivel DC, se asegura que cada señal tenga el nivel necesario para que la tarjeta Teensy 4.1 pueda obtener todos los valores de la onda sinusoidal que se obtiene de la medición de las corrientes y voltajes del estator del motor.

En la siguiente imagen se muestra la simulación del circuito mencionado con una señal de entrada AC (color amarillo) y la señal de salida del circuito con un nivel DC (color azul).

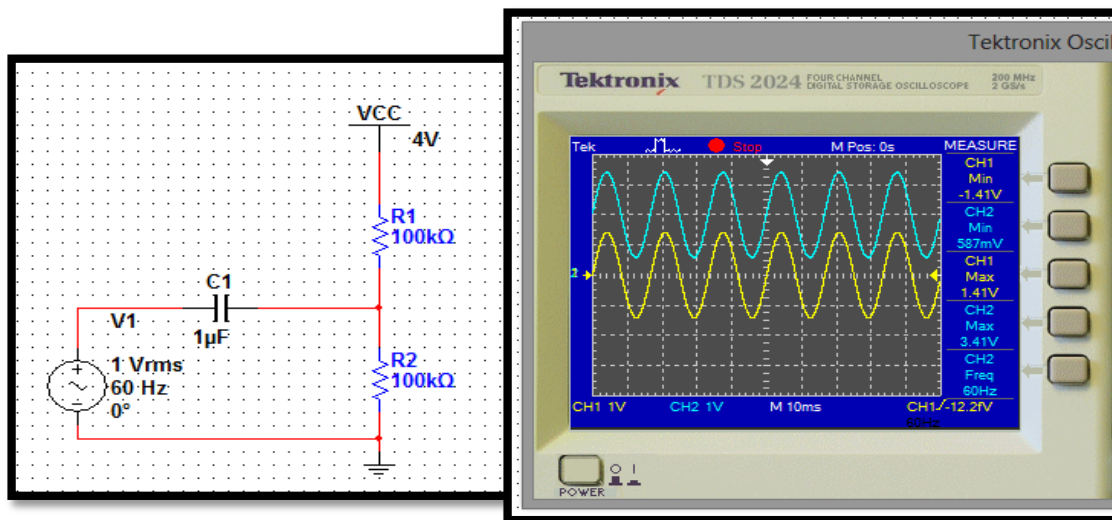


Figura 13. Simulación de Circuito Nivel DC

Fuente: Autores

3.4 Fuentes de alimentación DC – DC dual

Las fuentes de alimentación dual se implementaron en el circuito para alimentar los sensores de voltaje, debido a que estos constan de dos partes por tener un aislamiento interno. Se deben utilizar dos fuentes duales de alimentación para cada fase. Por tal motivo se realizó una fuente para la parte no aislada o sensores de voltajes trifásicos y otra fuente para los componentes aislados que consta de la respuesta del sensor y la conexión con la placa Teensy 4.1. A continuación, se muestra el esquemático del montaje realizado:

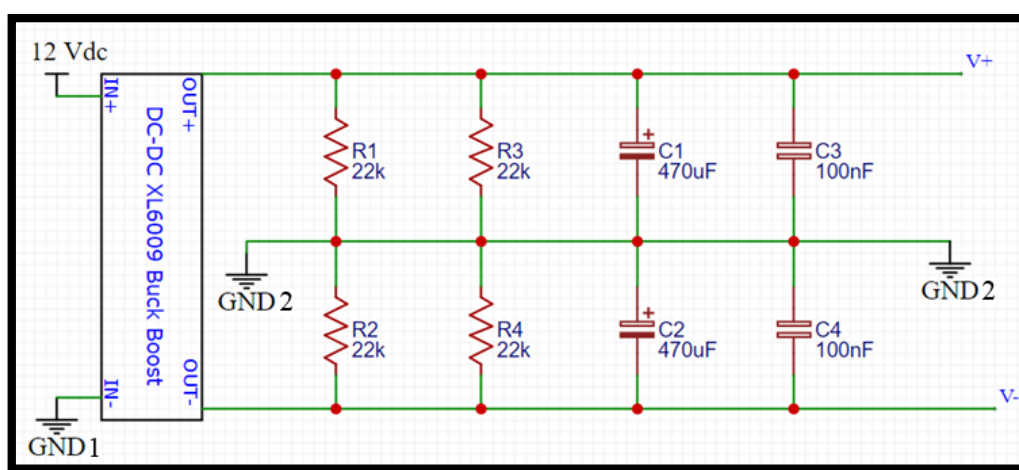


Figura 14. Esquemático Fuente Dual

Fuente: Autores

La anterior configuración se utilizó como solución para generar voltaje dual (positivo y negativo de 12V) de las fuentes de alimentación AC/DC utilizadas para la polarización de los sensores, dichas fuentes son de salida de 12V DC a una corriente de 5A DC, con el fin de suplir la necesidad de alimentación para los sensores.

3.5 Teclado matricial 4x4

Un teclado matricial es un dispositivo que agrupa varios pulsadores en fila y columnas formando una matriz, son controlados mediante cables conductores para que cada pulsador sea utilizado de forma individual, en el mercado existen distintos modelos rígidos o flexibles y con distinto número de teclas, teniendo configuraciones de 3x3, 3x4, y 4x4.

Estos teclados se pueden emplear en diversos proyectos de electrónica o en otras áreas uno ejemplos puede ser solicitar una clave, como teclas de dirección para controlar un brazo robótico o un vehículo, o proporcionar instrucciones a un robot [48].



Figura 15. Teclado Matricial 4x4

Fuente: Autores

El teclado matricial será el encargado de hacer que el usuario pueda ingresar el valor de las revoluciones por minuto (RPM) y corregir el valor en caso de ser errado. Al terminar el proceso puede seleccionar si desea realizar otra medición.

3.6 Pantalla LCD 16x2

La pantalla LCD es un dispositivo de cristal líquido utilizado para mostrar información alfanumérica, el dispositivo LCD 16x2 cuenta con dos filas, de dieciséis caracteres cada una, estos pueden mostrar todo tipo de información sin importar qué tipo de símbolos, caracteres figuras, controlado por medio de un microcontrolador encargado de enviar la información a mostrar en la pantalla [47].



Figura 16. Pantalla LCD 16x2

Fuente: Autores

Estos módulos se utilizan en diferentes campos: electrónica, robótica, informática, telecomunicaciones, telefonía, industria automotriz, entre muchas otras, estos dispositivos son ideales para una visualización pequeña o incluso mediana. La pantalla LCD tiene una versatilidad en su uso y capacidad para mostrar mensajes de texto, ya sea fijos o en movimiento, valores numéricos y cantidad de símbolos especiales [47].

Este dispositivo será el encargado mostrar al usuario el momento de ingresar el parámetro de entrada del sistema el cual es la velocidad o RPM del motor en funcionamiento. Además, registrará toda la información durante el proceso de análisis, el dispositivo está tomando o analizado los datos y también los resultados después de finalizado el proceso, donde indicará al usuario el estado del motor analizado.

3.7 Comunicación mediante puerto Ethernet

El ENC28J60 es un controlador Ethernet autónomo con una interfaz de periféricos en serie (SPI) estándar de la industria. Está diseñado para servir como interfaz de red Ethernet para cualquier controlador equipado con SPI [44].

Este módulo cumple con todas las especificaciones IEEE 802.3. Incorpora varios esquemas de filtrado de paquetes para limitar la entrada de los mismos. También proporciona un módulo interno para un rápido rendimiento de datos y cálculos de suma de comprobación de IP asistidos por

hardware. La comunicación con el controlador de host se implementa a través de dos pines de interrupción y el SPI [44], a continuación se muestra la imagen del módulo mencionado anteriormente.

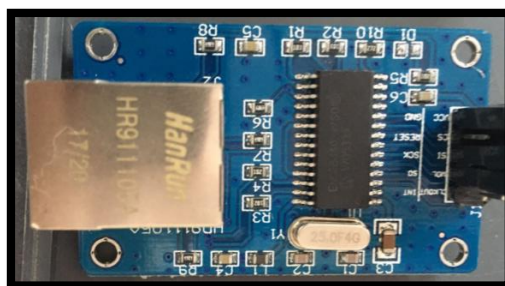


Figura 17. Módulo Ethernet ENC28J60

Fuente: Autores

Éste módulo es utilizado por la tarjeta de adquisición para tener conexión por medio del cable Ethernet con el computador, las dos partes se deben conectar a la misma red de internet, para así, poder indicar al usuario por medio de la interfaz web diseñada, si el motor tiene falla en las barras rotas de rotor, falla en los rodamientos o si se encuentra sano mediante las 3 técnicas de detección de los indicadores de falla.

Características

- Compatible con redes 10/100 Mbps, velocidad de operación 10 Mbps
- Regulador de 3.3 volts incluido en la placa
- Compatible con microcontroladores de 3.3 (también se puede comunicar con CPUs de 5 volts).
- Interfaz Ethernet 802.3 10 Mbps Half o Full Duplex (Manual).
- Interfaz con el microcontrolador host por SPI.
- Soportado por el Stack TCP/IP de Microchip Technology.
- Cristal de 25 Mhz, Conector Ethernet y todo el hardware de soporte incluido
- Aplicaciones en: Servidores web embebidos, control de iluminación, convertidores de protocolos, demótica y automatización, proyectos escolares.

3.7.1 Tarjeta para conexión ethernet arduino MEGA

Arduino Mega 2560 es una placa de desarrollo electrónica que funciona con el microprocesador Atmega2560. Esta placa es ideal para proyectos con gran número de conexiones por ejemplo proyectos de domótica, robótica entre otros. El microcontrolador ATmega2560 está fabricado con tecnología CMOS de 8 Bits, El ATmega2560 tiene 256 KB de memoria flash para almacenar código, 8 KB de SRAM [45] [46], a continuación se visualiza la imagen de la tarjeta mencionada anteriormente.

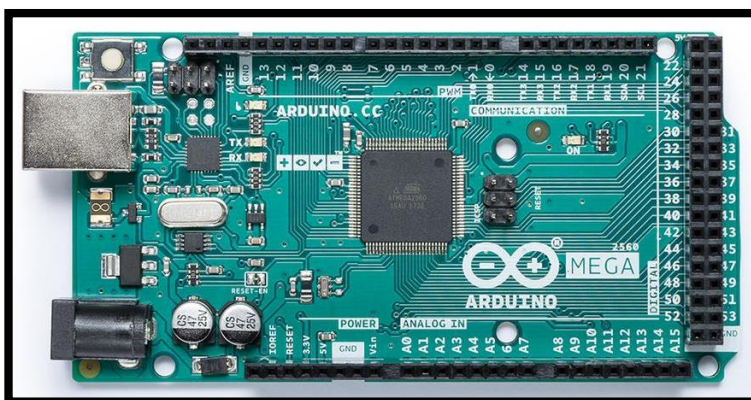


Figura 18. Microcontrolador Arduino MEGA 2560

Fuente: "Arduino Mega 2560 Rev3", *Arduino Online Shop*,. [Online]. Available: <https://store.usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us>.

Esta tarjeta es la encargada de recibir la información de estado del motor y así generar la interfaz web de la página de internet, para indicar al usuario la condición del estado del motor de inducción después de realizar el análisis por parte de la tarjeta de adquisición de datos. Para poder generar la página web del resultado del análisis, el Arduino Mega trabaja junto con el módulo Ethernet ENC28J60 por medio de una conexión SPI y éste trabaja con la tarjeta de adquisición de datos mediante el protocolo de comunicación I2C.

Características

- Microcontrolador Atmel ATmega2560 a 16 Mhz
- Memoria flash de 256 KB (8KB usados por el bootloader que no se pueden usar para tus programas)

- Memoria SRAM de 8 KB.
- Memoria EEPROM de 4 KB.
- Voltaje operativo de 5v
- Voltaje de entrada 7-12v
- 54 pines digitales, de los cuales 15 pueden ser PWM.
- 16 pines analógicos de entrada.
- UARTs, USB, pines RX y TX para comunicación, y también TWI y SPI.
- La intensidad de corriente por cada pin de E/S es de 40mA DC.
- La intensidad de corriente entregada por el pin 3v3 es de 50 mA.

3.7.2 Protocolo de comunicación I2C

Este protocolo de comunicación es utilizado para intercambiar información de circuitos integrados. Es un bus de comunicación en serie que trabaja con 2 líneas transmisoras más un punto común o tierra, es un sistema maestro esclavo en donde el maestro se encarga de la lectura y escritura de los esclavos que estén en la comunicación, asignándole a cada esclavo una dirección de direccionamiento, en este protocolo se realiza la transferencia de datos de forma secuencial enviando un dato en cada ciclo de reloj, en donde solamente se puede enviar o recibir información y no ambas a la vez, la información se transmite en grupos de 8 bits estableciendo velocidades de 100 Kbits/s hasta los 5 Mbits/s , la comunicación I2C tiene una de señal de seguimiento que permite al dispositivo transmisor ya sea maestro o esclavo saber si se ha recibido correctamente el mensaje. [54]

Las señales que utiliza el bus I2C para realizar la comunicación entre un maestro y un esclavo son:

- SCL (System Clock) es la línea de los pulsos de reloj que sincronizan el sistema. Esta permite la transmisión en serie, La generación del pulso del reloj de transmisión es gestionada por los dispositivos maestros.

- SDA (System Data) es la línea de transmisión de datos entre los dispositivos. A través de esta línea se envía toda la información, ya sea la dirección del esclavo, un byte de datos o una señal de confirmación para la recepción.

A continuación se muestra el esquema de la configuración para el protocolo I2C mencionado anteriormente en la conexión de los dispositivos maestro y esclavos.

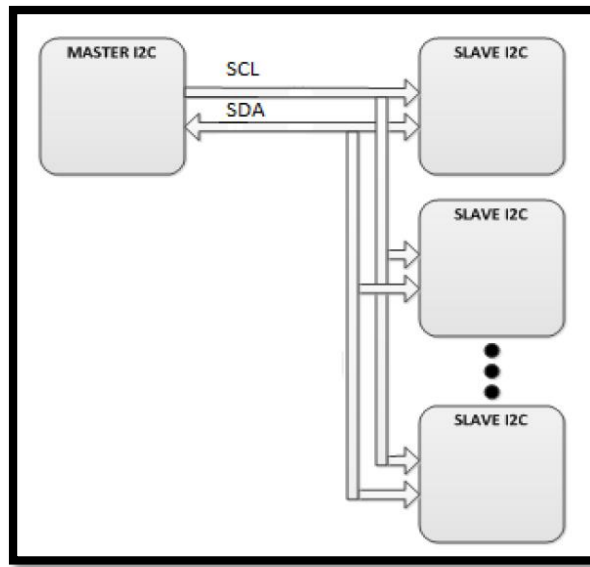


Figura 19. Conexión maestro y esclavos protocolo I2C

Fuente: C. Garcia. “Implementación de analizadores de protocolos de comunicaciones SPI, I2C”. Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Tecnología Electrónica Tesis de Pregrado, 2014.

Luego de configurar la conexión del módulo Ethernet con la placa arduino MEGA, y colocar los parámetros de red de la conexión a internet, en la siguiente imagen se aprecia la interfaz desarrollada para la visualización de los resultados del análisis por parte de la tarjeta de adquisición de datos para las tres técnicas implementadas en el análisis del motor de inducción.



Figura 20. Interfaz Generada a través de la conexión Ethernet

Fuente: Autores

En el caso de la interfaz web desarrollada, se muestran los resultados de los indicadores de falla que realiza la tarjeta de adquisición de datos para que el usuario pueda visualizar el estado que tiene el motor de inducción.

3.8 Diagrama general del sistema

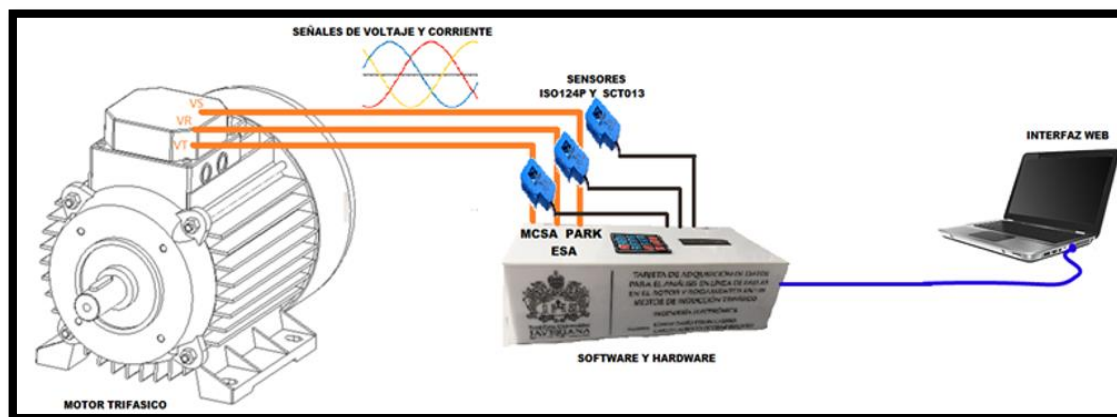


Figura 21. Diagrama General de Sistema

Fuente: Autores

Etapa 1. Se encuentra el motor de inducción trifásico, donde se extrae toda la información de corrientes y voltajes al momento de su operación de forma no invasiva.

Etapa 2. Están los sensores de voltajes y corrientes utilizados para las mediciones de las fases de la red trifásica con sus respectivos circuitos de nivel DC, de esta forma se garantiza que la señal tiene los niveles que soporta la placa Teensy 4.1 (voltajes y corrientes mayores a cero).

Etapa 3. Circuito tarjeta de adquisición de datos de las variables eléctricas sensadas en la etapa 2.

Etapa 4. Se encuentra la visualización de los resultados para el usuario, en la pantalla LCD de la tarjeta de adquisición de datos y en la interfaz web.

3.9 Diagrama de Flujo

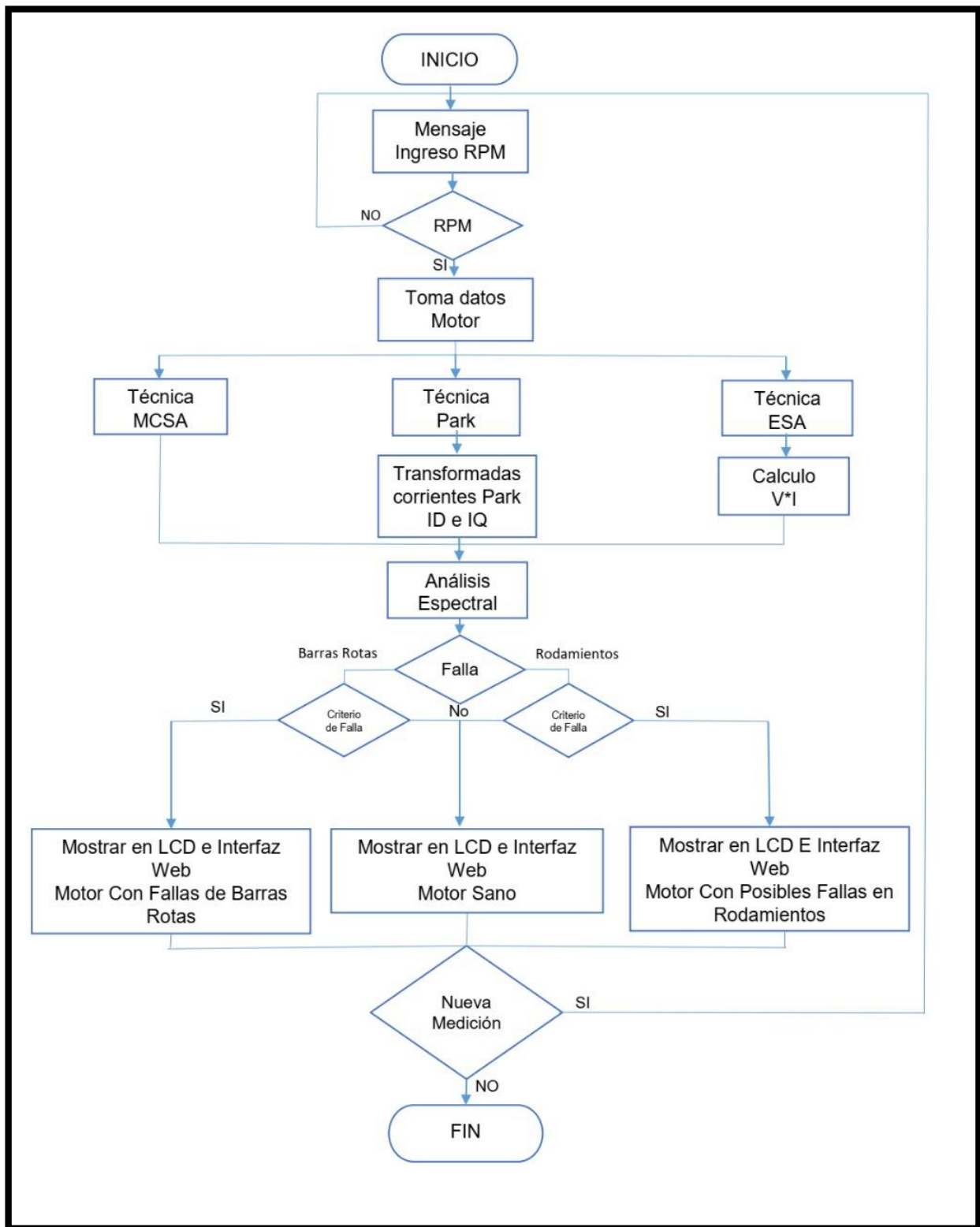


Figura 22. Diagrama de Flujo Sistema

Fuente: Autores

4 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos con sus respectivos análisis en cada prueba realizada con la tarjeta de adquisición de datos en la detección de fallas de barras rotas de rotor y rodamientos.

4.1 Montaje de sistema completo

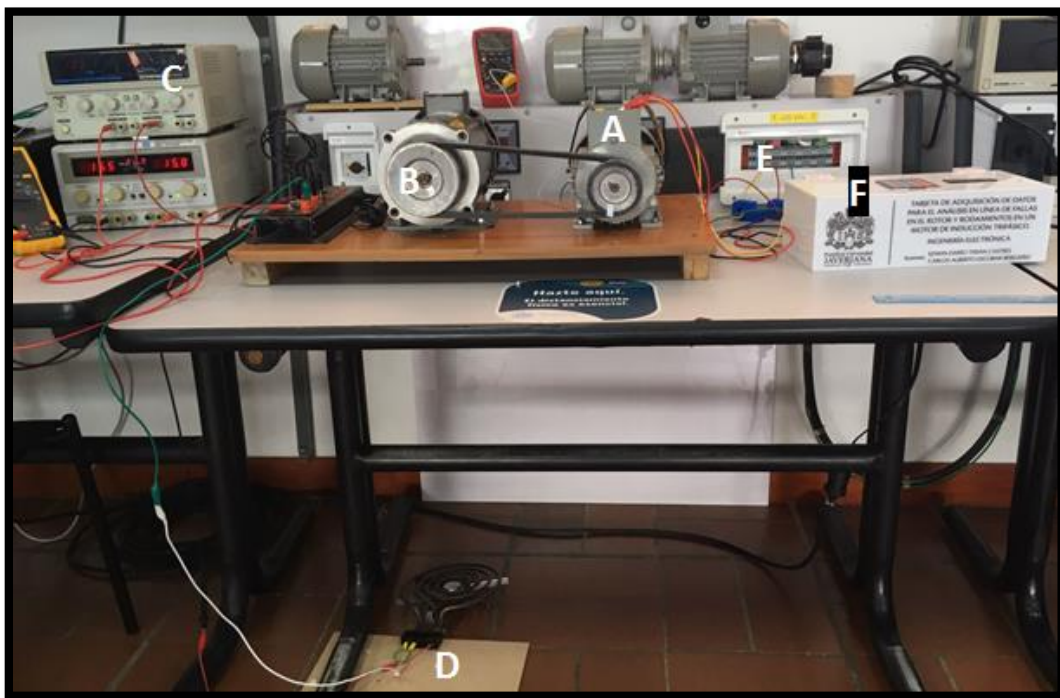


Figura 23. Montaje completo del sistema para pruebas

Fuente: Autores

La imagen anterior es de montaje completo del sistema para pruebas y se encuentran las siguientes partes utilizadas:

A: Motor de inducción trifásico.

B: Motor DC en configuración de generador de corriente para esfuerzo.

C: Fuentes DC en serie para alimentación del generador de corriente DC.

D: Resistencia de potencia para salida de corriente del generador DC.

E: Tablero de conexión de voltaje trifásico a motor de inducción.

F: Tarjeta de adquisición de datos implementada.

4.2 Montaje de motores

En la siguiente imagen se muestra el montaje de los dos motores, corriente directa y motor de inducción trifásica, sujeto a una base, alineado de forma paralela conectándose por medio de una polea de banda que se encuentra entre ellos. El propósito de dicho montaje es simular la carga de trabajo para el motor de inducción trifásico.



Figura 24. Montaje banco de prueba

Fuente: Autores

La imagen anterior es el montaje para realizar el esfuerzo al motor de inducción trifásico y se encuentran las siguientes partes utilizadas:

A: Motor de inducción trifásico.

B: Motor DC en configuración de generador de corriente para esfuerzo.

4.2.1 Motores de pruebas

Para las pruebas se utilizaron dos motores de la marca SIEMENS de 0.5 HP con alimentación de 220/440V a 60Hz, operando con una corriente de 1.9/0.95. A una velocidad nominal de 1590 rpm.

Uno de los motores presenta fallas de barras rotas en rotor y rodamientos, mientras que el otro motor se encuentra en perfectas condiciones, adicionalmente se realizaron pruebas con el motor de solo con falla de barras rotas y luego solo con falla de rodamientos.

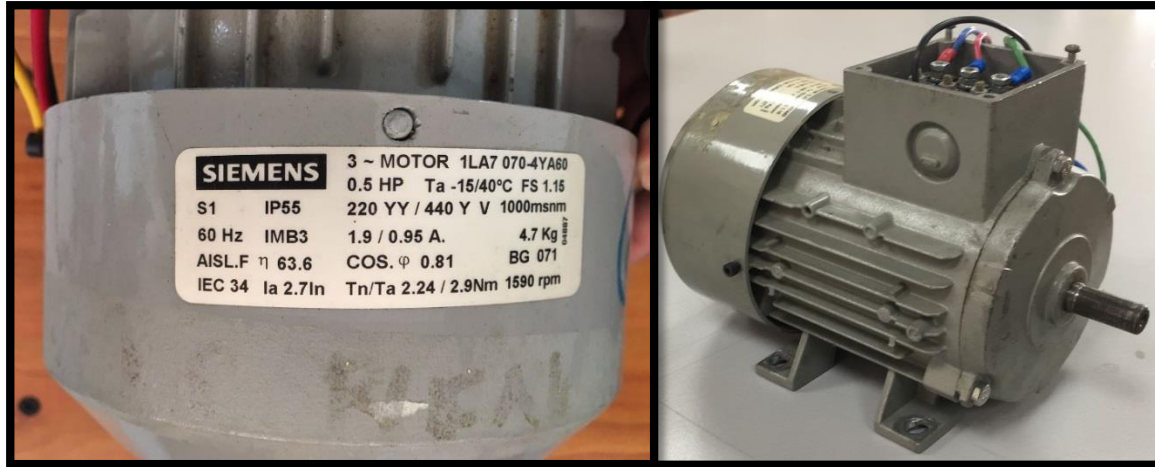


Figura 25. Motor SIEMENS de 0.5 HP

Fuente: Autores

4.2.2 Generador de carga

Para las pruebas del dispositivo, se realizó un montaje experimental que utiliza un motor eléctrico de corriente directa de la marca BALDOR de la serie CD3450 en la configuración de generador de corriente directa, con el fin de producir un torque simulando la carga en el motor de inducción trifásico, para así, poder llegar a la velocidad nominal.



Figura 26. Motor DC BALDOR CD3450

Fuente: Autores

4.3 Fallas inducidas de barras rotas en rotor y rodamientos.

La falla que se encuentra en el rotor es de dos barras rotas y para los rodamientos están ubicadas en: la jaula, pista interna y externa.

4.3.1 Falla de barras rotas en rotor

El rotor del motor de inducción que se encuentra con falla en el laboratorio de ingeniería electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana, tiene dos barras rotas producidas por perforaciones de un diámetro aproximado de 5 mm y una profundidad alrededor de 10 mm, las dos perforaciones se encuentran en el rotor debido a trabajos de grado anteriores, donde se necesitaba encontrar esta falla, dicho rotor se utilizó debido a que es un elemento del laboratorio disponible para el análisis de barras rotas en rotor para trabajos de grado, La siguiente imagen muestra el rotor disponible para las mediciones.



Figura 27. Falla de barras rotas en rotor

Fuente: Autores

4.3.2 Fallas en rodamientos

Las fallas que presentan los rodamientos delantero y trasero en el motor de inducción trifásico están ubicadas en la jaula, pista interna y externa, se realizó la extracción de un fragmento de la jaula, limado en el canal interno y cortes en la pista externa para producir las fallas en las tres partes del rodamiento, dichas modificaciones se realizaron para la búsqueda de fallas con la tarjeta de adquisición de datos, debido a que en cada parte del rodamiento se analiza la aparición de armónicos. En la siguiente imagen muestran las alteraciones a los rodamientos para su análisis.



Figura 28. Fallas en rodamientos

Fuente: Autores

La imagen anterior son las fallas inducidas en los rodamientos del motor de inducción trifásico:

A: falla pista interna.

B: falla pista externa.

C: falla de jaula.

4.4 Resultado de pruebas

Para determinar el comportamiento, precisión y repetibilidad que tiene la tarjeta de adquisición de datos desarrollada, se realizaron un total de 20 pruebas en los dos motores de inducción, el motor con barras rotas en rotor y falla en rodamientos junto al motor sano (motor sin fallas de barras rotas en rotor y rodamientos), a diferentes revoluciones, primero a 1774 RPM que equivale al 0% de carga a velocidad nominal, segunda a 1634 RPM que es el 75% de carga a velocidad nominal y a 1590 rpm que corresponde al 100% de carga a velocidad nominal. Adicionalmente se realizaron pruebas en el motor de inducción solamente con fallas de barras rotas en rotor y luego con fallas en los rodamientos.

4.4.1 Resultado 0% carga a velocidad nominal

Motor con Fallas Barras Rotas y Rodamiento					
Barras Rotas			Rodamientos		Técnica
Total Pruebas	Pruebas Correctas	Porcentaje	Pruebas Correctas	Porcentaje	
20	20	100%	1	5%	MCSA
20	20	100%	1	5%	EPVA
20	18	90%	0	0%	ESA

Tabla 4. Resultado motor con fallas 0% carga a velocidad nominal

Motor Sano					
Barras Rotas			Rodamientos		Técnica
Total Pruebas	Pruebas Correctas	Porcentaje	Pruebas Correctas	Porcentaje	
20	0	0%	20	100%	MCSA
20	0	0%	20	100%	EPVA
20	0	0%	19	95%	ESA

Tabla 5. Resultado motor sano 0% carga a velocidad nominal

Motor con Falla Barras Rotas					
Barras Rotas			Rodamientos		Técnica
Total Pruebas	Pruebas Correctas	Porcentaje	Pruebas Correctas	Porcentaje	
20	20	100%	19	95%	MCSA
20	20	100%	19	95%	EPVA
20	19	95%	18	90%	ESA

Tabla 6. Resultado motor con falla barra rotas 0% carga a velocidad nominal

Motor con Falla Rodamientos					
Barras Rotas			Rodamientos		Técnica
Total Pruebas	Pruebas Correctas	Porcentaje	Pruebas Correctas	Porcentaje	
20	0	0%	1	5%	MCSA
20	0	0%	1	5%	EPVA
20	0	0%	0	0%	ESA

Tabla 7. Resultado motor con falla rodamientos 0% carga a velocidad nominal

4.4.2 Resultado 75% carga a velocidad nominal

Motor con Fallas Barras Rotas y Rodamiento					
Barras Rotas			Rodamientos		Técnica
Total Pruebas	Pruebas Correctas	Porcentaje	Pruebas Correctas	Porcentaje	
20	20	100%	3	15%	MCSA
20	19	95%	5	25%	EPVA
20	18	90%	8	40%	ESA

Tabla 8. Resultado motor con fallas 75% carga a velocidad nominal

Motor Sano					
Barras Rotas			Rodamientos		Técnica
Total Pruebas	Pruebas Correctas	Porcentaje	Pruebas Correctas	Porcentaje	
20	20	100%	20	100%	MCSA
20	20	100%	17	85%	EPVA
20	16	80%	20	100%	ESA

Tabla 9. Resultado motor sano 75% carga a velocidad nominal

Motor con Falla Barras Rotas					
Barras Rotas			Rodamientos		Técnica
Total Pruebas	Pruebas Correctas	Porcentaje	Pruebas Correctas	Porcentaje	
20	20	100%	18	90%	MCSA
20	19	95%	15	75%	EPVA
20	19	95%	16	80%	ESA

Tabla 10. Resultado motor con falla barra rotas 75% carga a velocidad nominal

Motor con Falla Rodamientos					
Barras Rotas			Rodamientos		Técnica
Total Pruebas	Pruebas Correctas	Porcentaje	Pruebas Correctas	Porcentaje	
20	19	95%	5	25%	MCSA
20	18	90%	4	20%	EPVA
20	17	85%	13	65%	ESA

Tabla 11. Resultado motor con falla rodamientos 75% carga a velocidad nominal

4.4.3 Resultado 100% carga a velocidad nominal

Motor con Fallas Barras Rotas y Rodamiento					
Barras Rotas			Rodamientos		
Total Pruebas	Pruebas Correctas	Porcentaje	Pruebas Correctas	Porcentaje	Técnica
20	20	100%	7	35%	MCSA
20	20	100%	9	45%	EPVA
20	20	100%	20	100%	ESA

Tabla 12. Resultado motor con fallas 100% carga a velocidad nominal

Motor Sano					
Barras Rotas			Rodamientos		
Total Pruebas	Pruebas Correctas	Porcentaje	Pruebas Correctas	Porcentaje	Técnica
20	20	100%	20	100%	MCSA
20	20	100%	19	95%	EPVA
20	17	85%	20	100%	ESA

Tabla 13. Resultado motor sano 100% carga a velocidad nominal

Motor con Falla Barras Rotas					
Barras Rotas			Rodamientos		
Total Pruebas	Pruebas Correctas	Porcentaje	Pruebas Correctas	Porcentaje	Técnica
20	20	100%	18	90%	MCSA
20	20	100%	18	90%	EPVA
20	19	95%	17	85%	ESA

Tabla 14. Resultado motor con falla barra rotas 100% carga a velocidad nominal

Motor con Falla Rodamientos					
Barras Rotas			Rodamientos		
Total Pruebas	Pruebas Correctas	Porcentaje	Pruebas Correctas	Porcentaje	Técnica
20	19	95%	11	55%	MCSA
20	17	85%	10	50%	EPVA
20	18	90%	16	80%	ESA

Tabla 15. Resultado motor con falla rodamientos 100% carga a velocidad nominal

4.4.4 Visualización resultados de pruebas

Los pruebas anteriormente expuestas son detectadas por la tarjeta de adquisición de datos y se muestran al usuario mediante la pantalla LCD y la interfaz web. Se distingue el tipo de fallo y la técnica que detectó, para las barras rotas en rotor, en el caso de no detectar ningún tipo de falla la visualización será de “Motor Sano”. A continuación, se muestran cómo ve el usuario el resultado final en el dispositivo.



Figura 29. Visualización Display LCD barras rotas

Fuente: Autores



Figura 30. Resultado Interfaz web motor con barras rotas en rotor

Fuente: Autores



Figura 31. Resultado Interfaz web motor sano

Fuente: Autores

Las siguientes imágenes muestran los resultados de la visualización para el dispositivo de adquisición de datos, en el caso que encuentre fallas en los rodamientos, mostrando al usuario mediante la pantalla LCD y la interfaz web, la técnica y el tipo de fallo encontrado.



Figura 32. Resultado Análisis LCD motor con fallo en rodamientos

Fuente: Autores



Figura 33. Resultado Interfaz web motor con fallo en rodamientos

Fuente: Autores

4.5 Análisis de pruebas

Los datos para realizar el análisis espectral, se obtienen dando la instrucción a la tarjeta de adquisición de imprimir por el monitor serie de IDE de arduino y se procede a guardar en un archivo individual para ser procesado por medio de la herramienta Matlab, que permite realizar la gráfica de comportamiento de las variables eléctricas medidas.

Luego de analizar los comportamientos de los armónicos en cada uno de los porcentajes de carga para el motor de inducción, se determinó mostrar las gráficas de las pruebas al 100% de carga a la velocidad nominal, debido a que en ese escenario se visualizan mejor los armónicos de falla y se asegura un porcentaje de efectividad alto en el comportamiento de la tarjeta de adquisición de datos, adicionalmente los resultados obtenidos con cargas por debajo del 75% de la velocidad nominal son resultados no acordes al estado del motor de inducción debido a que las fallas se aprecian con el esfuerzo del motor trabajando a una velocidad cercana a la nominal.

4.5.1 Análisis barras rotas de rotor técnica MCSA

Mediante los criterios de falla definidos en el capítulo 2, se determinó que para encontrar falla de barras rotas del rotor se deben visualizar armónicos de frecuencias con valores de magnitud mayor a -39 dB, dicho valor es el nivel requerido para determinar la aparición de barras rotas en el rotor de un motor de inducción.

En la siguiente tabla se indica las frecuencias a las cuales se deben encontrar los armónicos de las bandas laterales del motor de inducción para la carga de 100% de la velocidad nominal:

Carga	Velocidad (rpm)	Deslizamiento (S)	Frecuencia Correspondiente a barra rotas (Hz)	
100 % de Nominal	1587	0.1183	45.8	74.2

Tabla 16. Frecuencias barras rotas técnica MCSA

Las imágenes del análisis espectral que realiza la tarjeta de adquisición de datos que se muestran a continuación, son los resultados de las pruebas realizadas en un motor con fallas en barras rotas en rotor junto con el motor sano a una carga de 100% de la velocidad nominal.

En las siguientes imágenes de las 3 fases de alimentación de la técnica MCSA, se observa el comportamiento de las bandas laterales en el dominio de la frecuencia para el motor sano y con falla en las barras rotas, donde se aprecia los niveles de amplitud en dB son los definidos en la técnica para la detección de la falla y en el caso del motor sano se encuentran en valores de puntos de alta resistencia lo cual asemeja a un deterioro del rotor.

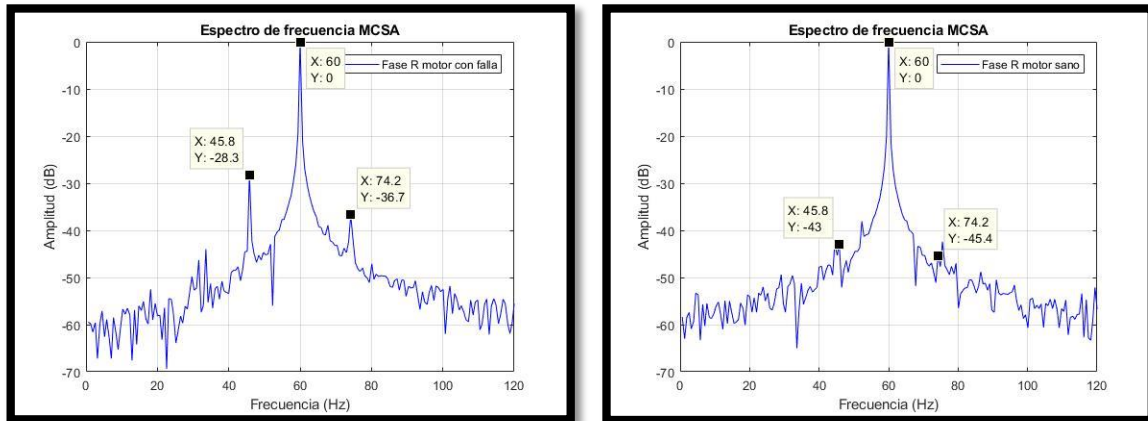


Figura 34. Espectro frecuencia técnica MCSA fase R motor con falla barras y sano.

Fuente: Autores

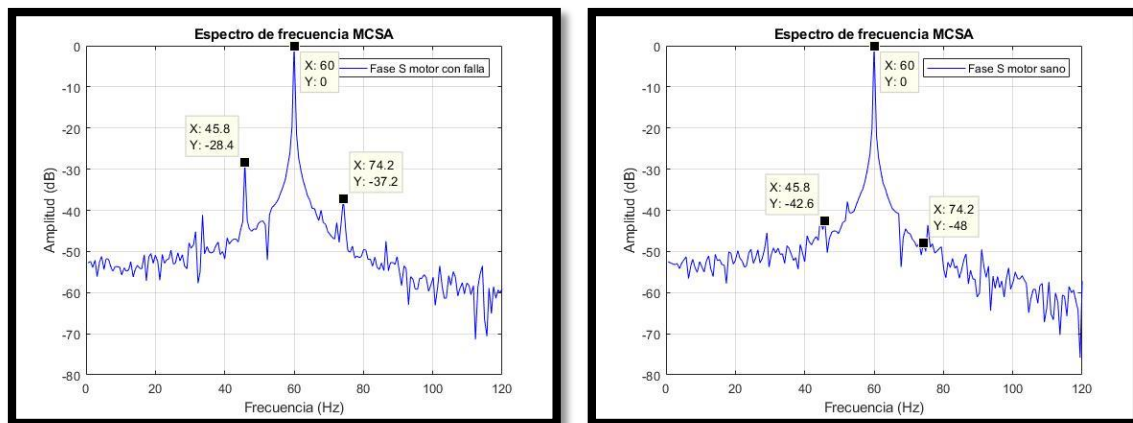


Figura 35. Espectro frecuencia técnica MCSA fase S motor con falla barras y sano

Fuente: Autores

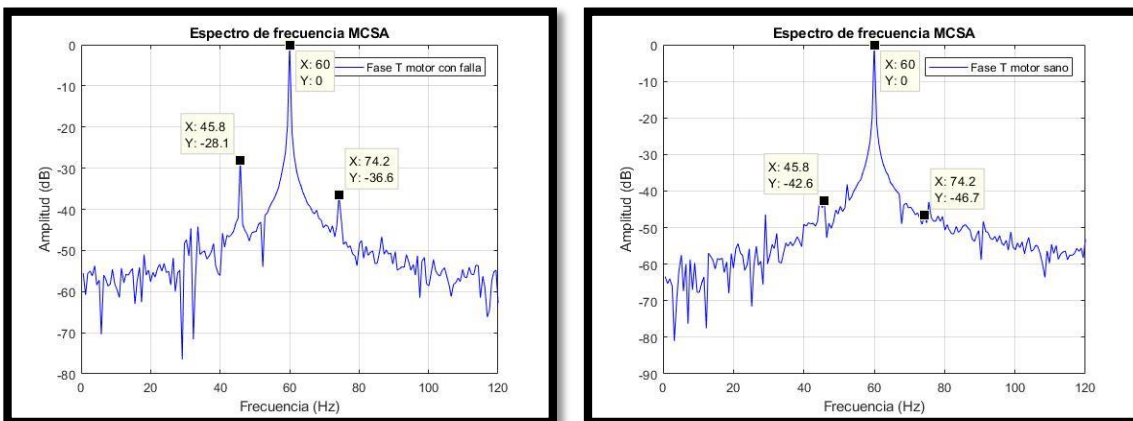


Figura 36. Espectro frecuencia técnica MCSA fase T motor con falla barras y sano

Fuente: Autores

En las figuras anteriores se encuentran las comparaciones de los niveles en las frecuencias de falla correspondientes a barras rotas de rotor en 45.8 Hz y 74.2 Hz para el motor con fallas y motor sano, donde se encuentra el comportamiento de las tres fases de los motores de inducción, mostrando en cada fase para el motor de falla la amplitud requerida para la falla en barras rotas en rotor.

4.5.2 Análisis rodamientos técnica MCSA

Mediante los criterios de falla definidos en el capítulo 2, se determinó que para determinar la posible falla en los rodamientos, se deben visualizar armónicos en las frecuencias calculadas por las formulas y con valores de magnitud mayores o iguales a 420, dicho nivel es el valor mínimo requerido para determinar la posible falla de los rodamientos.

En la siguiente tabla se indica las frecuencias a las cuales se deben encontrar los armónicos del motor de inducción para la carga de 100% de la velocidad nominal:

Carga	Velocidad aproximada (rpm)	Deslizamiento (S)	Frecuencia Correspondiente a falla en rodamientos (Hz)					
100 % de Nominal	1587	0.1183	226.02	345.4	427.7	563.1	665.0	683.1

Tabla 17. Frecuencias falla en rodamientos técnica MCSA

Las imágenes del análisis espectral que realiza la tarjeta de adquisición de datos que se muestran a continuación, son los resultados las pruebas realizadas en un motor con fallas en rodamientos junto con el motor sano a una carga de 100% de la velocidad nominal.

En las siguientes imágenes de las 3 fases de alimentación de la técnica MCSA, se observa el comportamiento de 3 frecuencia diferentes, donde la técnica detecta armónicos mayores al nivel de magnitud mínimo definido para detectar una posible falla en rodamientos.

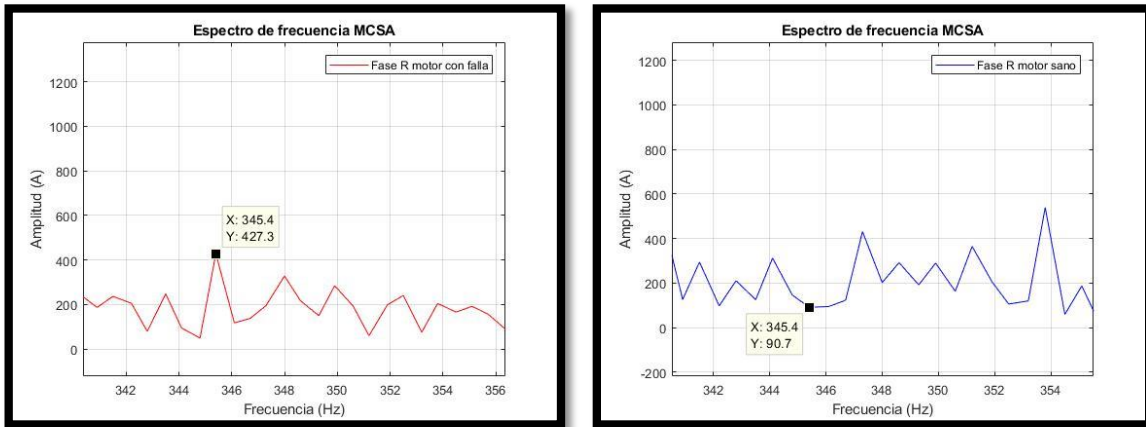


Figura 37. Espectro frecuencia técnica MCSA fase R motor con falla rodamientos y sano

Fuente: Autores

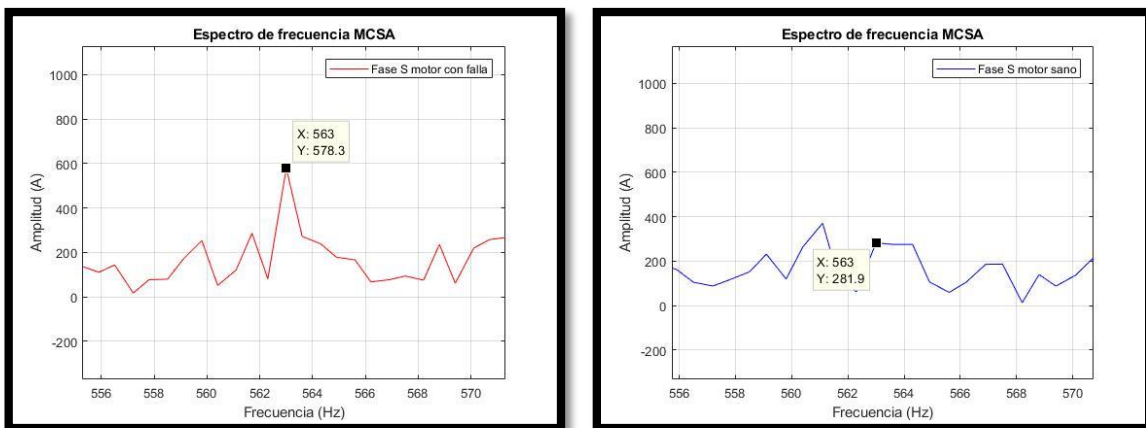


Figura 38. Espectro frecuencia técnica MCSA fase S motor con falla rodamientos y sano

Fuente: Autores

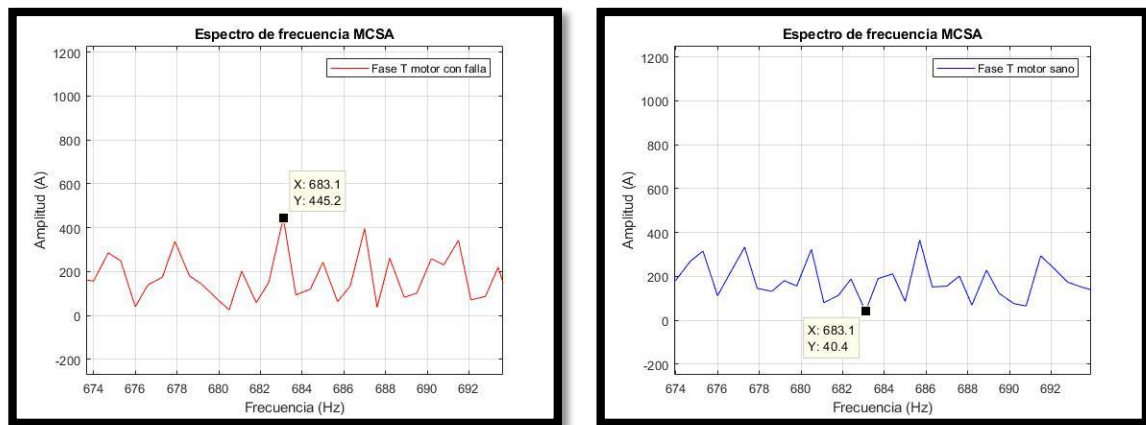


Figura 39. Espectro frecuencia técnica MCSA fase T motor con falla rodamientos y sano

Fuente: Autores

En las figuras anteriores se encuentran tres diferentes frecuencias asociadas a falla en rodamientos para cada una de las fases del motor de inducción, donde se puede apreciar que sobrepasan el nivel mínimo requerido de 420 para ser considerado como posible falla en rodamientos debido al criterio ya definido.

4.5.3 Análisis barras rotas de rotor técnica ESA

Mediante los criterios de falla definidos en el capítulo 2, se determinó que para encontrar falla de barras rotas del rotor se deben visualizar armónicos de frecuencias con valores de magnitud mayor a -39 dB, dicho valor es el nivel requerido para determinar la aparición de barras rotas en el rotor de un motor de inducción.

En la siguiente tabla se indica las frecuencias a las cuales se deben encontrar los armónicos de bandas laterales del motor de inducción para la carga de 100% de la velocidad nominal:

Carga	Velocidad aproximada (rpm)	Deslizamiento (S)	Frecuencia Correspondiente a barra rotas (Hz)	
100 % de Nominal	1588	0.1183	91.7	148.5

Tabla 18.Frecuencias barras rotas técnica ESA

Las imágenes del análisis espectral que realiza la tarjeta de adquisición de datos que se muestran a continuación, son los resultados las pruebas realizadas en un motor con fallas de barras rotas en rotor junto con el motor sano a una carga de 100% de la velocidad nominal.

En las siguientes imágenes de las 3 fases de alimentación de la técnica ESA, se observa el comportamiento de las bandas laterales en el dominio de la frecuencia para el motor sano y con falla en las barras rotas, donde se aprecia los niveles de amplitud en dB son los definidos en la técnica para la detección de la falla y en el caso del motor sano se encuentran en valores de puntos de alta resistencia lo cual asemeja a un deterioro del rotor.

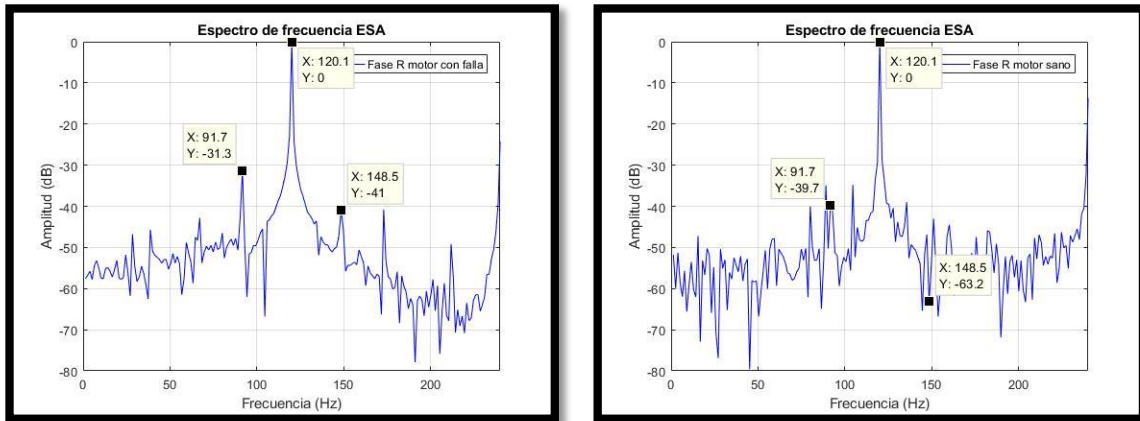


Figura 40. Espectro frecuencia técnica ESA fase R motor con falla barras y sano

Fuente: Autores

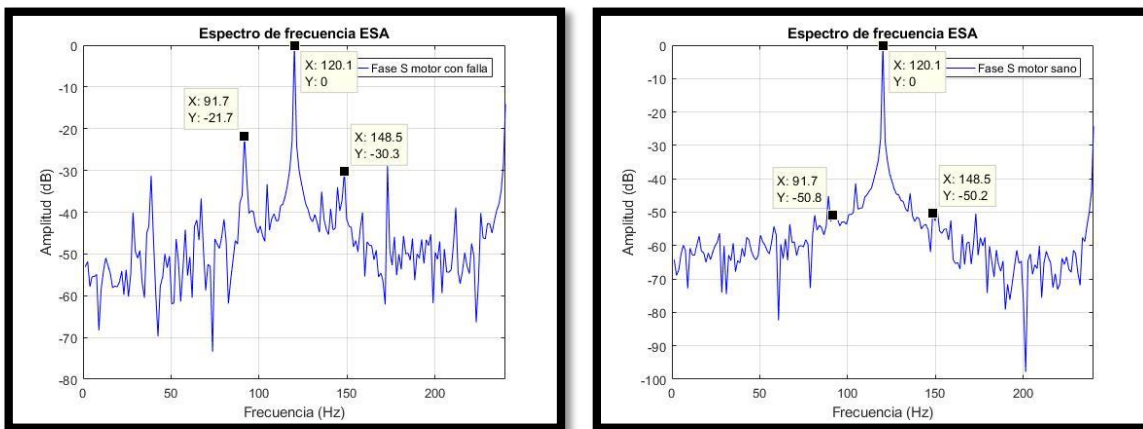


Figura 41. Espectro frecuencia técnica ESA fase S motor con falla barras y sano

Fuente: Autores

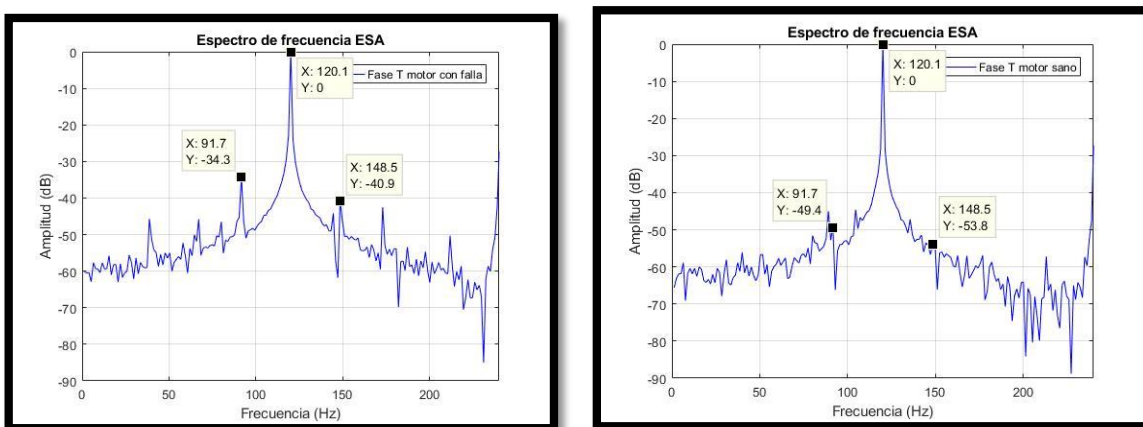


Figura 42. Espectro frecuencia técnica ESA fase T motor con falla barras y sano

Fuente: Autores

En las figuras anteriores se encuentran las comparaciones de los niveles en las frecuencias de falla correspondientes a barras rotas de rotor en 91.7 Hz y 148.5 Hz para el motor con fallas y motor sano, donde se encuentra el comportamiento de las tres fases de los motores de inducción, verificando para cada fase en el caso de motor con falla la amplitud requerida para barras rotas en rotor.

4.5.4 Análisis rodamientos técnica ESA

Mediante los criterios de falla definidos en el capítulo 2, se determinó que para determinar la posible falla en los rodamientos, se deben visualizar armónicos en las frecuencias calculadas por las formulas y con valores de magnitud mayores o iguales a 600000, dicho nivel es el valor mínimo requerido para determinar la posible falla de los rodamientos.

En la siguiente tabla se indica las frecuencias a las cuales se deben encontrar los armónicos del motor de inducción para la carga de 100% de la velocidad nominal:

Carga	Velocidad aproximada (rpm)	Deslizamiento (S)	Frecuencia Correspondiente a falla en rodamientos (Hz)					
100 % de Nominal	1587	0.1183	211.9	303.4	487.9	661.7	753.7	968.3

Tabla 19. Frecuencias falla en rodamientos tecnica ESA

Las imágenes del análisis espectral que realiza la tarjeta de adquisición de datos que se muestran a continuación, son los resultados las pruebas realizadas en un motor con fallas de rodamientos junto con el motor sano a una carga de 100% de la velocidad nominal.

En las siguientes imágenes de las 3 fases de alimentación de la técnica ESA, se observa el comportamiento de 3 frecuencia diferentes, donde la técnica detecta armónicos mayores al nivel de magnitud mínimo definido para detectar una posible falla en rodamientos.

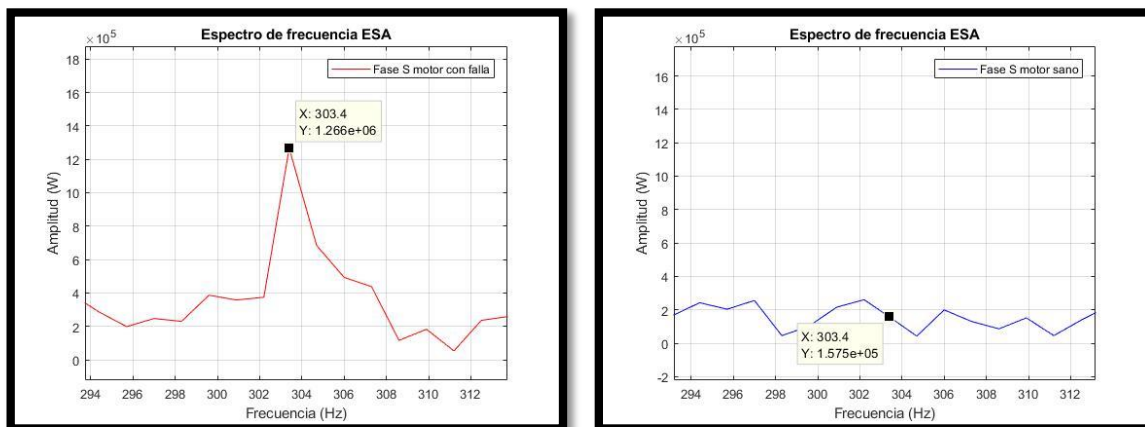


Figura 43. Espectro frecuencia técnica ESA fase S motor con falla rodamientos y sano

Fuente: Autores

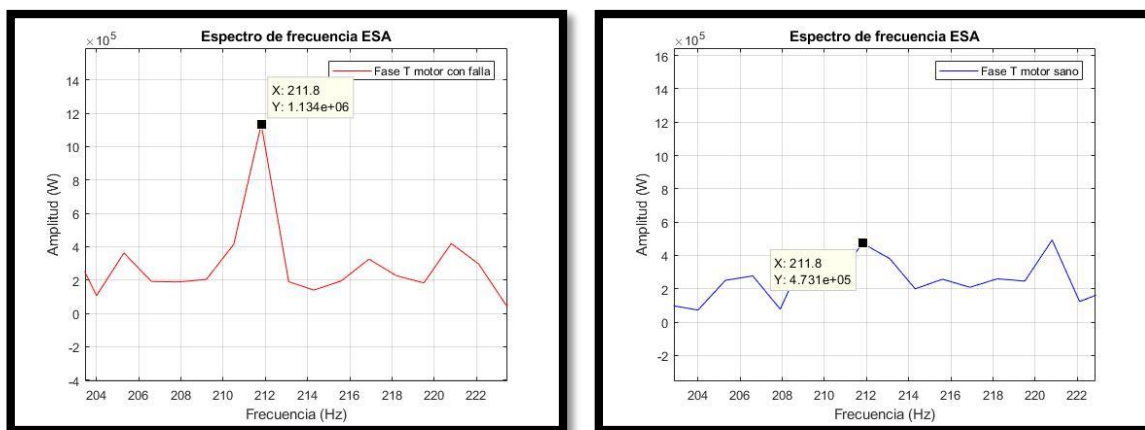


Figura 44. Espectro frecuencia técnica ESA fase T motor con falla rodamientos y sano

Fuente: Autores

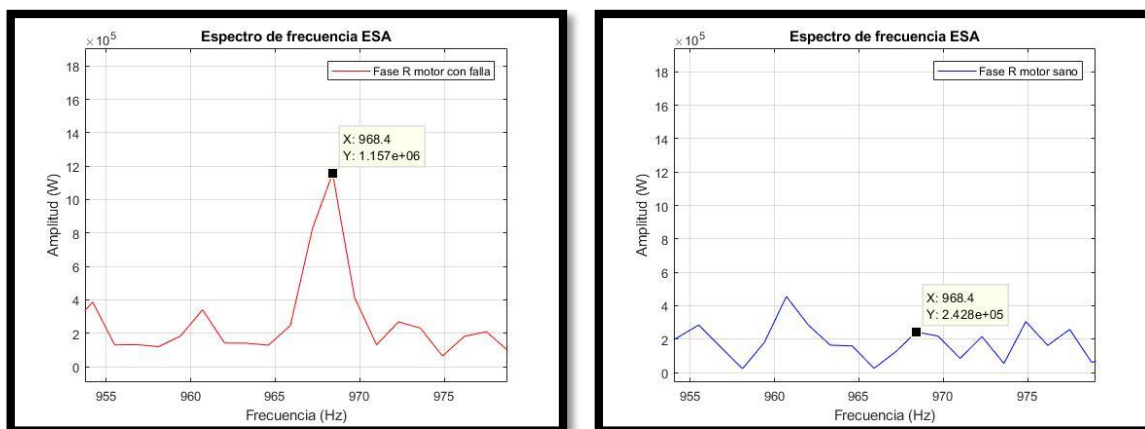


Figura 45. Espectro frecuencia técnica ESA fase R motor con falla rodamientos y sano

Fuente: Autores

En las figuras anteriores se encuentran tres diferentes frecuencias asociadas a falla en rodamientos para cada una de las fases del motor de inducción, donde se puede apreciar que sobrepasan el nivel mínimo requerido de 600000 para ser considerado como posible falla en rodamientos debido al criterio ya definido.

4.5.5 Análisis barras rotas de rotor técnica EPVA

Mediante los criterios de falla definidos en el capítulo 2, se determinó que para encontrar falla de barras rotas del rotor se deben visualizar armónicos de frecuencias con valores de magnitud mayor a -39 dB, dicho valor es el nivel requerido para determinar la aparición de barras rotas en el rotor de un motor de inducción.

En la siguiente tabla se indica las frecuencias a las cuales se deben encontrar los armónicos de bandas laterales del motor de inducción para la carga de 100% de la velocidad nominal:

Carga	Velocidad aproximada (rpm)	Deslizamiento (S)	Frecuencia Correspondiente a barra rotas (Hz)	
100 % de Nominal	1588	0.1183	91.7	148.5

Tabla 20.Frecuencias barras rotas técnica EPVA

Las imágenes del análisis espectral que realiza la tarjeta de adquisición de datos que se muestran a continuación, son los resultados las pruebas realizadas en un motor con fallas de barras rotas en rotor junto con el motor sano a una carga de 100% de la velocidad nominal.

En las siguientes imágenes de las 2 corrientes de la transformación de Park de la técnica EPVA, se observa el comportamiento de las bandas laterales en el dominio de la frecuencia para el motor sano y con falla en las barras rotas, donde se aprecia los niveles de amplitud en dB son los definidos en la técnica para la detección de la falla y en el caso del motor sano se encuentran en valores de puntos de alta resistencia lo cual asemeja a un deterioro del rotor.

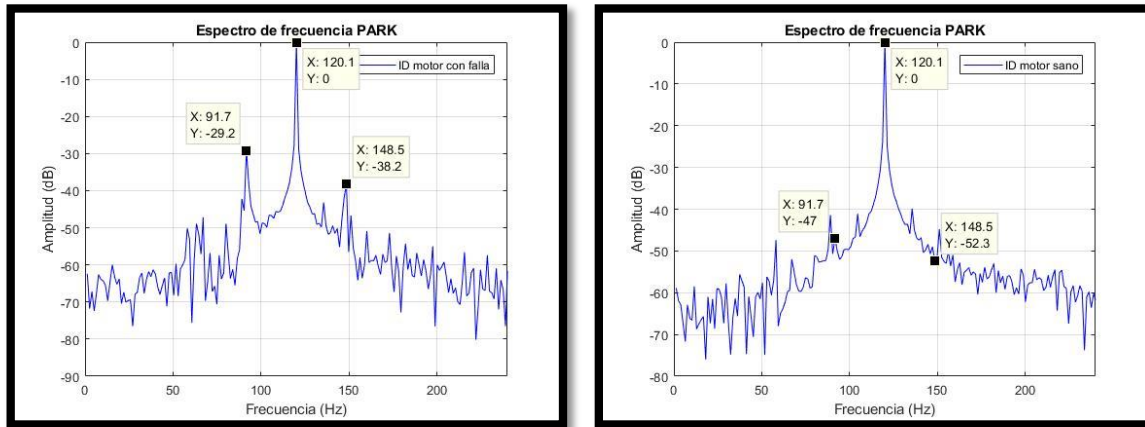


Figura 46. Espectro frecuencia técnica EPVA ID motor con falla barras y sano

Fuente: Autores

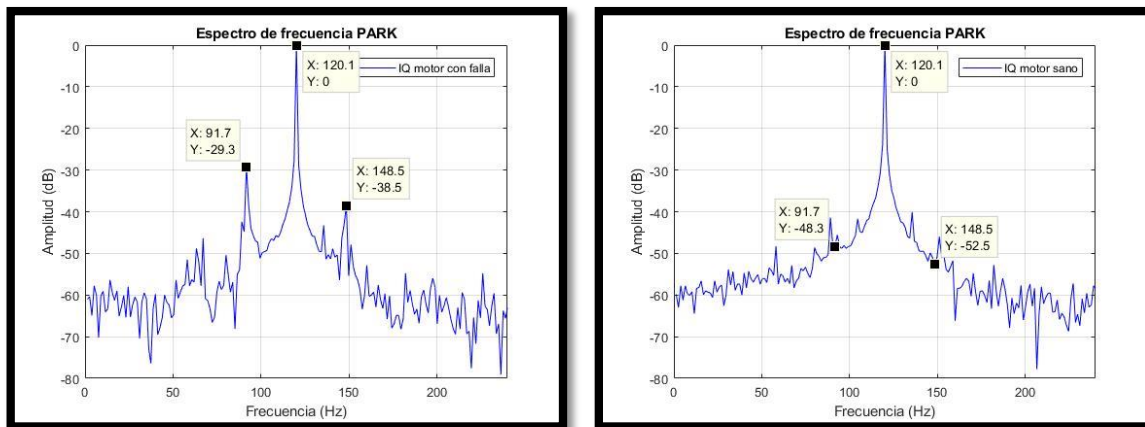


Figura 47. Espectro frecuencia técnica EPVA IQ motor con falla barras y sano

Fuente: Autores

En las figuras anteriores se encuentran las comparaciones de los niveles en las frecuencias de falla correspondientes a barras rotas de rotor en 91.7 Hz y 148.5 Hz para el motor con fallas y motor sano, donde se encuentra el comportamiento de las tres fases de los motores de inducción, validando en el caso de motor con falla que cumple con el nivel requerido para barras rotas en rotor.

4.5.6 Análisis rodamientos técnica EPVA

Mediante los criterios de falla definidos en el capítulo 2, se determinó que para determinar la posible falla en los rodamientos, se deben visualizar armónicos en las frecuencias calculadas por las formulas y con valores de magnitud mayores o iguales a 420, dicho nivel es el valor mínimo requerido para determinar la posible falla de los rodamientos.

En la siguiente tabla se indica las frecuencias a las cuales se deben encontrar los armónicos del motor de inducción para la carga de 100% de la velocidad nominal:

Carga	Velocidad aproximada (rpm)	Deslizamiento (S)	Frecuencia Correspondiente a falla en rodamientos (Hz)					
100 % de Nominal	1587	0.1183	191.5	324.2	437.8	539.0	661.7	728.3

Tabla 21. Frecuencias falla en rodamientos técnica EPVA

Las imágenes del análisis espectral que realiza la tarjeta de adquisición de datos que se muestran a continuación, son los resultados las pruebas realizadas en un motor con fallas en rodamientos junto con el motor sano a una carga de 100% de la velocidad nominal.

En las siguientes imágenes de las 2 corrientes de la transformación de Park para técnica EPVA, se observa el comportamiento de 2 frecuencia diferentes, donde la técnica detecta armónicos mayores al nivel de magnitud mínimo definido para detectar una posible falla en rodamientos.

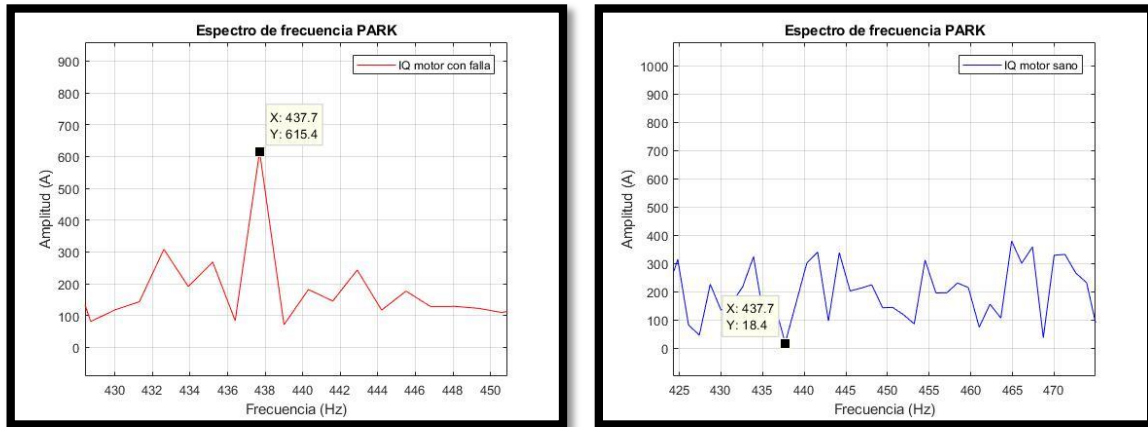


Figura 48. Espectro frecuencia técnica EPVA IQ motor con falla rodamientos y sano

Fuente: Autores

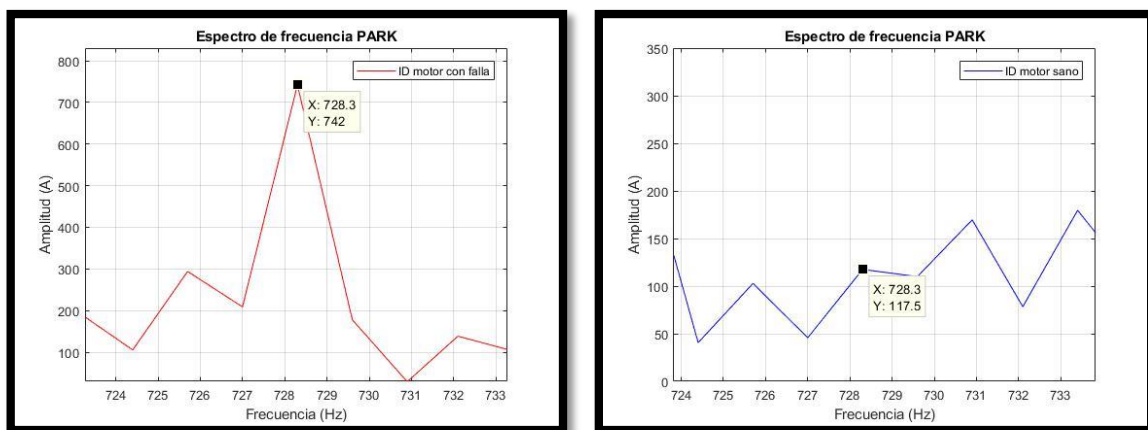


Figura 49. Espectro frecuencia técnica EPVA ID motor con falla rodamientos y sano

Fuente: Autores

En las figuras anteriores se encuentran dos diferentes frecuencias asociadas a falla en rodamientos para cada una de las fases del motor de inducción, donde se puede apreciar que sobrepasan el nivel mínimo requerido de 610 para ser considerado como posible falla en rodamientos debido al criterio ya definido.

Para ver el resultado de las pruebas realizadas (ver Anexo 3 y 4).

En la siguiente tabla se muestra los resultados generales de la operación de la tarjeta de adquisición de datos desarrollada.

Resultados Generales de Operación			
Técnica	% de carga	% de Efectividad	
		Barras Rotas	Fallo en Rodamientos
MCSA	Menor 75%	0%	0%
	De 75% a 99%	98%	20%
	100%	98%	45%
ESA	Menor 75%	0%	0%
	De 75% a 99%	90%	53%
	100%	98%	90%
EPVA	Menor 75%	0%	0%
	De 75% a 99%	95%	23%
	100%	98%	48%

Tabla 22. Resultados de operación de análisis de falla de técnicas MCSA, ESA y EPVA.

En la tabla anterior se establecen los porcentajes de efectividad al momento de detectar las fallas de barras rotas en rotor y rodamientos para el motor de inducción en cada una de las 3 técnicas implementadas en la tarjeta de adquisición de datos para 3 porcentajes de carga diferentes.

CONCLUSIONES

Se implementó una tarjeta de adquisición de datos capaz de analizar fallas de barras rotas en rotor y rodamientos por medio de 3 técnicas (MCSA, ESA, y EPVA), mediante el procesamiento con la placa de desarrollo Teensy 4.1, obteniendo un promedio de efectividad en los análisis de 95% en detectar falla de barras rotas y 60% para falla en rodamientos.

Se definió los indicadores para la detección de fallas de barras rotas en rotor y rodamientos mediante el análisis en frecuencia del comportamiento de los motores de inducción, por medio de la FFT implementada en la placa de desarrollo Teensy 4.1, con los motores disponibles en el laboratorio guayacanes de ingeniería electrónica.

Se logró la comunicación entre los módulos del sistema desarrollado por medio de un protocolo general de comunicación I2C, para el envío de resultados de los indicadores de falla de barras rotas y rodamientos a la interfaz web externa del sistema y conocer el estado del motor.

La precisión de la tarjeta de adquisición de datos es significativa cuando el motor gira a una velocidad cercana de operación nominal, debido a que los puntos de análisis de fallas se aprecian con mayor magnitud.

Se evidencia que los indicadores establecidos hacen que el sistema pueda encontrar las fallas de barras rotas y rodamientos en el motor, donde se analiza en cada punto de frecuencia la magnitud y así determinar el estado del motor.

TRABAJOS FUTUROS

Esta investigación se puede ampliar agregando al análisis fallas a detectar en los motores de inducción tipo jaula de ardilla, como de corto circuito, y excentricidad en el entre hierro. Además de agregar técnicas de análisis como corriente de secuencia negativa y análisis de voltaje inducido en una bobina de búsqueda.

También se puede considerar implementar otro tipo de transformadas para el procesamiento de datos como Hilbet y Wavelet para análisis en frecuencia, con el fin de tener resultados confiables al momento de detectar fallas en los motores de inducción.

Asimismo, se puede mejorar el software del dispositivo de adquisición de datos para procesar mayor cantidad de datos y obtener resultados con mayor resolución.

REFERENCIAS

- [1]. D. F. Pires, V. FernãoPires, J.F. Martins, A.J. Pires, "Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors based on a current and virtual flux approach", *Energy Conversion and Management*, Volume 50, Issue 4, April 2009, Pages 1026-1032.
- [2]. F.J. Villalobos-Piña, R.A. Salas, "Algoritmo robusto para el diagnóstico de fallas eléctricas en el motor de inducción trifásico basado en herramientas espectrales y ondeletas", *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, Vol. 12, no, 3, p. 292-303. July–September, 2015.
- [3]. E. Cabal-Yepez, M. Valtierra-Rodriguez, R.J. Romero-Troncoso, A. Garcia-Perez, R.A. Osornio-Rios, H. Miranda-Vidales, R. Alvarez-Salas, "FPGA-based entropy neural processor for online detection of multiple combined faults on induction motors", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 30, Pages 123-130, July 2012.
- [4]. Paz Parra, A.; Amaya Enciso, M.C.; Olaya Ochoa, J.; Palacios Penaranda, J.A., "Stator fault diagnosis on squirrel cage induction motors by ESA and EPVA," in *Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA), 2013 Workshop on*, vol., no., pp.1-6, 6-7 July 2013.
- [5]. A. Paz Parra, M. C. Amaya Enciso, J. Olaya Ochoa, E. Franco Mejía, "Metodología para el diagnóstico de fallas en motores de inducción trifásicos tipo jaula de ardilla a través de sistemas expertos basados en redes bayesianas", *Encuentro Nacional de Investigación y Desarrollo ENID*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2012.
- [6]. Siyambalapitiya, D.J.T.; McLaren, P.G., "Reliability improvement and economic benefits of on-line monitoring systems for large induction machines", *IEEE Transactions On Industry Applications*, Volume 26, no. 6, November/Dicember 1990.
- [7]. C. Pezzani, G. Bossio, C. De Angelo, "Winding distribution effects on induction motor rotor fault diagnosis", *Mechatronics*, Volume 24, Issue 8, December 2014, Pages 1050-1058, ISSN 0957-4158.
- [8]. E. Cabal-Yepez, R.J. Romero-Troncoso, A. Garcia-Perez, R.A. Osornio-Rios, "Single-parameter fault identification through information entropy analysis at the startup-transient current in induction motors", *Electric Power Systems Research*, Volume 89, August 2012, Pages 64-69, ISSN 0378-7796.

- [9]. M. Seera, C. Peng Lim, S. Nahavandi, C. Kiong Loo, "Condition monitoring of induction motors": A review and an application of an ensemble of hybrid intelligent models, *Expert Systems with Applications*, Volume 41, Issue 10, August 2014, Pages 4891-4903, ISSN 0957-4174.
- [10]. Seyed Abbas Taher, MajidMalekpour, Mohammad Farshadnia, Diagnosis of broken rotor bars in induction motors based on harmonic analysis of fault components using modified adaptive notch filter and discrete wavelet transform, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Volume 44, May 2014, Pages 26-41, ISSN 1569-190X.
- [11] Y. Sheng, "The Transforms and Applications Handbook".CRC Press, 1996.
- [12] Proakis J, Manolakis D. (2007). *Digital SignalProcessing*, cuarta edición. Upper Saddle River, NJ : Pearson Education.
- [13] C. Sidney Burrus, Ramesh a. Gopinath, and HaitaoGuo. (1998). *Introduction to wavelets and wavelet transforms : a primer*. UpperSaddleRiver, NJ, Prentice Hall.
- [14]. Dorrbercker Santiago A, Fernandez Sergio J, Berreiro Eugenio R, Alvarez Luis M, Arce Jorge C, Zurita Yeranís, Palmero Juan M, " Matriz De Falla De Los Motores De Inducción", *Aplicaciones Industriales, Energética*, Volume 28, Diciembre 2006.
- [15]. J F. Acosta Orozco, M. Vera-Lizcano, J. Velasco Medina," FFT de 8 Puntos IEEE754 Sintetizado en FPGA", *X Simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial*, Universidad del Valle, Cali, Colombia
- [16]. D. Sotomayor Cárdenas, S. Castellanos Villa, "Diseño Y Construcción De Un Banco de Pruebas Para La Detección De Fallas En Motores De Inducción Trifásicos", *Ingeniería Mecánica*, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2016.
- [17]. L. Gallego Ávila, "Evaluación Del Rotor En Motores Eléctricos De Inducción De Jaula De Ardilla Mediante El Análisis De Espectros", *Ingeniería Eléctrica*, Universidad De La Salle, Bogotá D.C., 2015.
- [18] P. Gardel Sotomayor, "Aportaciones al mantenimiento predictivo de motores de inducción mediante una metodología de diagnóstico basada en el uso combinado de técnicas estadísticas y Redes Neuronales Artificiales", *Doctorado*, Universidad de Valladolid, Escuela de Ingenierías Industriales, Departamento de ingeniería Eléctrica.
- [19] A. García Martínez y D. Campos Delgado, "Diagnóstico y Simulación de Fallas Máquinas de Inducción", *Theorema Revista Científica*, pp. 65,66, 2015.

- [20] Z. Medrano Hurtado, C. Pérez Tello, M. de Armas Teyra and C. Amaro Hernández, "Un estudio sobre la localización, detección y diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas", 2013.
- [21] Los 50 modos de falla de los motores eléctricos.", *Congreso de mantenimiento & confiabilidad Latinoamérica*, 2016. [Online]. Available: <https://cmc-latam.com/los-50-modos-falla-los-motores-electricos/>.
- [22] Boletín Motortico", *MotorTico.com*, 2016. [Online]. Available: <http://www.motortico.com/biblioteca/MotorTico/2016%20APR%20-%20Falla%20de%20Cortocircuito%20en%20Bobinados%20Maquinas%20CA.pdf>.
- [23] J.G. Herrera, "Análisis de la Eficiencia de los Motores de Inducción que Operan bajo Diferentes Condiciones de Fallos" Trabajo de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Valencia, 2018.
- [24] A. da Silva., "INDUCTION MOTOR FAULT DIAGNOSTIC AND MONITORING METHODS", Master of Electrical and Computer Engineering, Marquette University, 2006.
- [25] Á. Fradejas Ordax, "Aplicación de la técnica de estimación espectral MUSIC y de la Transformada de Park para la detección de fallos en motores de inducción", Pregrado, Universidad de Valladolid, 2016.
- [26] K. Mondragón Salamanca, "APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DEL VECTOR DE PARK EN LINEA, PARA DETECCIÓN DE LAS FALLAS EN MOTORES JAULA DE ARDILLA", Pregrado, Universidad Javeriana Cali, 2015.
- [27] G. Arboleda Yerbe, M. Narváez Paredes, "DETECCIÓN DE FALLA DE BARRAS ROTAS EN EL ROTOR DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO TIPO JAULA DE ARDILLA EMPLEANDO TÉCNICAS DE ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTES – MCSA Y ANÁLISIS ESPECTRAL DE POTENCIA – ESA". Pregrado, Universidad Javeriana Cali, 2014.
- [28] M.M. Martínez Amaya, V. Dix Sánchez, "DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN TRIFÁSICO TIPO JAULA DE ARDILLA EMPLEANDO ANÁLISIS DE VIBRACIONES". Pregrado, Universidad Javeriana Cali, 2017.
- [29] D.A. Sotomayor, S.D. Castellanos, "Diseño y Construcción de un Banco de Pruebas para la Detección de Fallas en Motores de Inducción Trifásicos" Trabajo de Maestría, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador, 2016.

- [30] A. J. Marques Cardoso, y otros “*Rotor Cage Fault Diagnosis in Three-phase Induction Motors, by Park's Vector Approach*”. IEEE, 1995. Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE 1995.
- [31] A. Aboubou, M. Sahraoui, S. Zouzou, A. Rezzoug and H. Razik, "Broken Bars And/Or End Rings Detection In ThreePhase Induction Motors By The Extended Park's Vector Approach", 2004.
- [32] A. Ibrahim, M. El Badaoui, F. Guillet and F. Bonnardot, “*A New Bearing Fault Detection Method in Induction Machines Based on Instantaneous Power Factor*”. IEEE transactions on industrial electronics, vol. 55, no. 12, 2008.
- [33] J. H. Silva and A. Marques Cardoso, “*Bearing Failures Diagnosis in Three-Phase Induction Motors by Extended Park's Vector Approach*”. IEEE, 2005.
- [34] J. H. Silva and A. Marques Cardoso, “*Diagnóstico de Avarias nos Rolamentos de Motores de Indução Trifásicos*”. IEEE, 2005.
- [35] M. El Hachemi Benbouzid and G. Kliman, “*What Stator Current Processing-Based Technique to Use for Induction Motor Rotor Faults Diagnosis?*”. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 18, NO. 2, JUNE 2003.
- [36] J. Hoon Jung, J. Jae Lee and B. Hwan Kwon, “*Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA*”. IEEE transactions on industrial electronics, vol. 53, no. 6, 2006.
- [37] J. Cusidó, L. Romeral, J. A. Ortega, J. Rosero and A. García Espinosa, “*Fault Detection in Induction Machines Using Power Spectral Density in Wavelet Decomposition*”. IEEE transactions on industrial electronics, vol. 55, no. 2, 2008.
- [38] G. Didier et al., “*Rotor fault detection using the instantaneous power signature*”. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2004.
- [39] M. Drif and A. Marques Cardoso, “*Rotor Cage Fault Diagnostics in Three-Phase Induction Motors, by the Instantaneous Non-Active Power Signature Analysis*”. IEEE, 2007.
- [40] P. Dominguez “*TÉCNICAS DE CONTROL VECTORIAL EN MOTORES ELÉCTRICOS ASÍNCRONOS*”. Revista Digital de Investigación y Postgrado de la Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”, Vicerrectorado Barquisimeto. Venezuela. Vol. 3 No., 2013. Pp. 438-450.
- [41] High-precision isolation amplifier ISO124P. Datasheet, Texas Instruments Incorporated, USA, 2008.

- [42] L. Llamas. Ingeniería, informática y diseño, Sensor de corriente eléctrica no invasivo con arduino y SCT-013, [Online]. Available: <https://www.luisllamas.es/arduino-sensor-corriente-sct-013/>
- [43] PJRC Electronic Projects Components Available Worldwide, Teensy 4.1 Development Board [Online]. Available: <https://www.pjrc.com/store/teensy41.html>.
- [44] Satand-Alone Ethernet Controller whit SPI Interface ENC28J60. Datasheet, Microchip Technology Inc, 2004
- [45] "Arduino Mega 2560 Rev3", *Arduino Online Shop*. [Online]. Available: <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3?selectedStore=us>.
- [46] "Arduino Mega: todo sobre la gran placa de desarrollo", *Hardware libre*. [Online]. Available: <https://www.hwlibre.com/arduino-mega/>.
- [47]. Herramientas Tecnológicas Profesionales, HETPRO, "LCD 16x2", *Hetpro-store.com*, 2021. [Online]. Available: <https://hetpro-store.com/lcd-16x2-blog/>. [Accessed: 19- Nov- 2021].
- [48] L. Llamas. Ingeniería, informática y diseño, Usar un teclado matricial con Arduino, [Online]. Available: <https://www.luisllamas.es/arduino-teclado-matricial/>
- [49] J. Oviedo Silvia.; E. Quiroga Jabid; G. Plata” Validación Experimental de la Metodología Motor Current Signature Analysis para un Motor de Inducción de 2 HP”. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 2014, no 70, p. 108-118.
- [50] D. Tantivas ; J. Gonzales. “Detección de barras rotas en motores de inducción utilizando SMCSA (Square Motor Current Signature Analysis)”. *Res. Comput. Sci.*, 2014, vol. 73, p. 193-202.
- [51] A. Paz Parra, ‘METHODODOLOGY FOR FAULT DIAGNOSIS IN THREE PHASE SQUIRREL CAGE INDUCTION MOTORS THROUGH EXPERT SYSTEMS BASED ON BAYESIAN NETWORKS, Doctorado, Universidad del Valle, Cali, 2015.
- [52]A. Rico, M. Tristancho, “Detección de Fallas en un Motor de inducción usando MCSA (Motor Current Signatura Analysis)”, Trabajo de Grado, Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [53] A. Cassagnes, “Implementación y análisis de algoritmos de cálculo de Transformada Rápida de Fourier para su aplicación en sistemas OFDM”, Trabajo de Grado, Universidad de Buenos Aires, 2016.

[54] C. Garcia. “Implementación de analizadores de protocolos de comunicaciones SPI, I2C”. Universidad Carlos III de Madrid, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Tecnología Electrónica Tesis de Pregrado, 2014.

ANEXOS

Anexo 1. Sistema general de prueba

El sistema para realizar las pruebas consta de la tarjeta de adquisición desarrollada, el motor eléctrico de alimentación trifásico sano o con fallas y el motor DC en modo generador conectado a 2 fuentes de alimentación DC en serie para hacer que el motor DC genere la carga al motor trifásico y una resistencia de 18Ω para que el motor eléctrico conceda la corriente generada.



Anexo 2. Prototipo funcional

El prototipo funcional consta de todo lo desarrollado en el capítulo 3



Anexo 3. Resultado pruebas motor con fallas

Pruebas realizadas con un motor con fallas de barras rotas y rodamientos en el sistema general de pruebas Anexo 1, a diferentes porcentajes de carga.

Prueba 0% de Carga				
RPM	# Prueba	Resultado	Falla Barras Rotas	Falla Rodamientos
1770	1	Falla	MCSA ESA EPVA	
1772	2	Falla	MCSA ESA EPVA	
1773	3	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA
1773	4	Falla	MCSA ESA EPVA	
1771	5	Falla	MCSA EPVA	
1773	6	Falla	MCSA ESA EPVA	
1771	7	Falla	MCSA ESA EPVA	
1771	8	Falla	MCSA ESA EPVA	
1773	9	Falla	MCSA ESA EPVA	
1771	10	Falla	MCSA ESA EPVA	
1771	11	Falla	MCSA ESA EPVA	
1771	12	Falla	MCSA ESA EPVA	EPVA
1771	13	Falla	MCSA ESA EPVA	
1771	14	Falla	MCSA ESA EPVA	
1771	15	Falla	MCSA EPVA	
1771	16	Falla	MCSA ESA EPVA	
1771	17	Falla	MCSA ESA EPVA	
1771	18	Falla	MCSA ESA EPVA	
1771	19	Falla	MCSA ESA EPVA	
1771	20	Falla	MCSA ESA EPVA	

Prueba 75% de Carga				
RPM	# Prueba	Resultado	Falla Barras Rotas	Falla Rodamientos
1634	1	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA ESA
1634	2	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA EPVA
1634	3	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA ESA EPVA
1634	4	Falla	MCSA ESA EPVA	
1634	5	Falla	MCSA ESA	
1634	6	Falla	MCSA ESA EPVA	
1634	7	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1634	8	Falla	MCSA EPVA	
1634	9	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA EPVA
1634	10	Falla	MCSA ESA EPVA	
1634	11	Falla	MCSA ESA EPVA	
1634	12	Falla	MCSA ESA EPVA	
1634	13	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1634	14	Falla	MCSA ESA EPVA	
1634	15	Falla	MCSA ESA EPVA	
1634	16	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA EPVA
1634	17	Falla	MCSA EPVA	MCSA ESA EPVA
1634	18	Falla	MCSA ESA EPVA	
1634	19	Falla	MCSA ESA EPVA	
1634	20	Falla	MCSA ESA EPVA	

Prueba 100% de Carga				
RPM	# Prueba	Resultado	Falla Barras Rotas	Falla Rodamientos
1589	1	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA ESA EPVA
1589	2	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA ESA EPVA
1589	3	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	4	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA ESA EPVA
1589	5	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	6	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	7	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	8	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA EPVA
1589	9	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA ESA EPVA
1589	10	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	11	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA ESA EPVA
1589	12	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	13	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	14	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	15	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA EPVA
1589	16	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA ESA EPVA
1589	17	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	18	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA ESA EPVA
1589	19	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	20	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA

Ahora se realiza la prueba con la falla de barras rotas en el motor de inducción

Prueba 0% de Carga con barras rotas				
RPM	# Prueba	Resultado	Falla Barras Rotas	Falla Rodamientos
1589	1	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	2	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA
1589	3	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	4	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	5	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	6	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	7	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	8	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	9	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	10	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	11	Falla	MCSA ESA EPVA	EPVA
1589	12	Falla	MCSA EPVA	
1589	13	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	14	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	15	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	16	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	17	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	18	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	19	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	20	Falla	MCSA ESA EPVA	

Prueba 75% de Carga con barras rotas				
RPM	# Prueba	Resultado	Falla Barras Rotas	Falla Rodamientos
1589	1	Falla	MCSA ESA EPVA	EPVA
1589	2	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA
1589	3	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	4	Falla	MCSA ESA EPVA	EPVA
1589	5	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	6	Falla	MCSA ESA	
1589	7	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	8	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	9	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA ESA
1589	10	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	11	Falla	MCSA ESA EPVA	EPVA
1589	12	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	13	Falla	MCSA EPVA	
1589	14	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	15	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	16	Falla	MCSA ESA EPVA	EPVA
1589	17	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	18	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	19	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	20	Falla	MCSA ESA EPVA	EPVA

Prueba 100% de Carga con barras rotas				
RPM	# Prueba	Resultado	Falla Barras Rotas	Falla Rodamientos
1589	1	Falla	MCSA ESA EPVA	EPVA
1589	2	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA
1589	3	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	4	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	5	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	6	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	7	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	8	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	9	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA ESA
1589	10	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	11	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	12	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	13	Falla	MCSA EPVA	
1589	14	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	15	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	16	Falla	MCSA ESA EPVA	EPVA
1589	17	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	18	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1589	19	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	20	Falla	MCSA ESA EPVA	

Ahora se realiza la prueba con la falla de rodamientos en el motor de inducción

Prueba 0% de Carga con falla de rodamientos				
RPM	# Prueba	Resultado	Falla Barras Rotas	Falla Rodamientos
1589	1	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	2	Falla	MCSA ESA EPVA	MCSA
1589	3	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	4	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	5	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	6	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	7	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	8	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	9	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	10	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	11	Falla	MCSA ESA EPVA	EPVA
1589	12	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	13	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	14	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	15	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	16	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	17	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	18	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	19	Falla	MCSA ESA EPVA	
1589	20	Falla	MCSA ESA EPVA	

Prueba 75% de Carga con falla de rodamientos				
RPM	# Prueba	Resultado	Falla Barras Rotas	Falla Rodamientos
1589	1	Falla		MCSA ESA
1589	2	Falla	MCSA	ESA
1589	3	Sano		
1589	4	Sano		
1589	5	Falla	ESA	MCSA ESA
1589	6	Falla		EPVA ESA
1589	7	Sano		
1589	8	Falla	EPVA	ESA
1589	9	Falla		ESA
1589	10	Falla		ESA
1589	11	Falla		EPVA ESA
1589	12	Falla	ESA	
1589	13	Falla		MCSA ESA
1589	14	Sano		
1589	15	Sano		
1589	16	Falla		EPVA ESA
1589	17	Falla	EPVA	MCSA ESA
1589	18	Falla		EPVA ESA
1589	19	Falla	ESA	
1589	20	Falla		MCSA ESA

Prueba 100% de Carga con falla de rodamientos				
RPM	# Prueba	Resultado	Falla Barras Rotas	Falla Rodamientos
1589	1	Falla		MCSA ESA
1589	2	Falla	MCSA	MCSA ESA EPVA
1589	3	Falla		MCSA ESA EPVA
1589	4	Sano		
1589	5	Falla	ESA EPVA	MCSA ESA
1589	6	Falla		MCSA ESA EPVA
1589	7	Sano		
1589	8	Falla	EPVA	MCSA ESA
1589	9	Falla		MCSA ESA EPVA
1589	10	Falla		MCSA ESA
1589	11	Falla		ESA EPVA
1589	12	Falla	ESA	ESA
1589	13	Falla		MCSA ESA EPVA
1589	14	Sano		
1589	15	Falla		ESA
1589	16	Falla		ESA EPVA
1589	17	Falla	EPVA	MCSA ESA EPVA
1589	18	Falla		ESA EPVA
1589	19	Sano		
1589	20	Falla		MCSA ESA EPVA

Anexo 4. Resultado pruebas motor sano

Pruebas realizadas con un motor sano con el sistema general de pruebas Anexo 1, a diferentes porcentajes de carga.

Prueba 0% de Carga				
RPM	# Prueba	Resultado	Falla Barras Rotas	Falla Rodamientos
1772	1	Falla	MCSA ESA EPVA	
1773	2	Falla	MCSA ESA EPVA	
1772	3	Falla	MCSA ESA EPVA	
1773	4	Falla	MCSA ESA EPVA	
1771	5	Falla	MCSA ESA EPVA	ESA
1772	6	Falla	MCSA ESA EPVA	
1772	7	Falla	MCSA ESA EPVA	
1772	8	Falla	MCSA ESA EPVA	
1772	9	Falla	MCSA ESA EPVA	
1772	10	Falla	MCSA ESA EPVA	
1773	11	Falla	MCSA ESA EPVA	
1772	12	Falla	MCSA ESA EPVA	
1772	13	Falla	MCSA ESA EPVA	
1772	14	Falla	MCSA ESA EPVA	
1773	15	Falla	MCSA ESA EPVA	
1773	16	Falla	MCSA ESA EPVA	
1773	17	Falla	MCSA ESA EPVA	
1772	18	Falla	MCSA ESA EPVA	
1772	19	Falla	MCSA ESA EPVA	
1772	20	Falla	MCSA ESA EPVA	

Prueba 75% de Carga				
RPM	# Prueba	Resultado	Falla Barras Rotas	Falla Rodamientos
1634	1	Sano		
1634	2	Falla	ESA	
1634	3	Falla		EPVA
1634	4	Sano		
1634	5	Sano		
1634	6	Sano		
1634	7	Falla	ESA	
1634	8	Sano		
1634	9	Falla		EPVA
1634	10	Sano		
1634	11	Sano		
1634	12	Sano		
1634	13	Falla	ESA	
1634	14	Sano		
1634	15	Sano		EPVA
1634	16	Sano		
1634	17	Sano		
1634	18	Falla	ESA	
1634	19	Sano		
1634	20	Sano		

Prueba 100% de Carga				
RPM	# Prueba	Resultado	Falla Barras Rotas	Falla Rodamientos
1590	1	Sano		
1590	2	Sano		
1591	3	Sano		
1590	4	Sano		
1591	5	Falla	ESA	
1591	6	Sano		
1591	7	Falla	ESA	
1590	8	Falla		EPVA
1590	9	Sano		
1591	10	Sano		
1591	11	Sano		
1590	12	Sano		
1591	13	Sano		
1591	14	Sano		
1590	15	Falla	ESA	
1591	16	Sano		
1591	17	Sano		
1590	18	Sano		
1590	19	Sano		
1590	20	Sano		

Anexo 5. Manual de usuario

MANUAL DE USUARIO

TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL ANÁLISIS EN LÍNEA DE FALLAS EN EL ROTOR Y RODAMIENTOS EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN



Carlos Alberto Escobar Bergaño
Edwin Darío Terán Castro

INTRODUCCIÓN

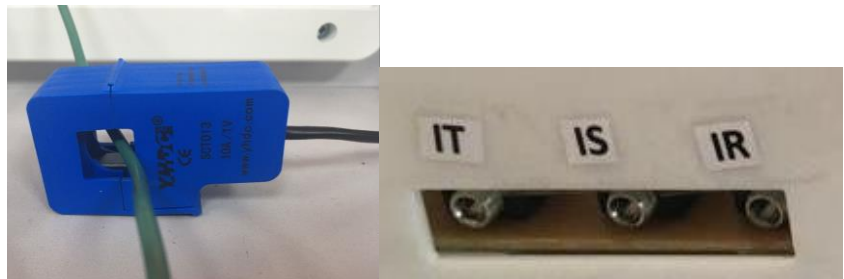
La tarjeta de adquisición de datos para el análisis en línea de fallas en el rotor y rodamientos en un motor de inducción trifásico, fue desarrollada para encontrar fallas que afecten el funcionamiento de motores eléctricos, esta se desarrolló con el fin de realizar el análisis mientras el motor esté en funcionamiento y dependiendo del resultado del análisis con el dispositivo se pueda hacer un mantenimiento preventivo.

A continuación, se realiza una descripción de la conexión de los cables procedentes del estator de motor de inducción a la tarjeta de adquisición:

1. Conecte los cables de voltaje procedentes del estator del motor de inducción a las borneras de conexión que están marcadas con su respectiva fase de alimentación según donde corresponda para el voltaje.



Para conectar los sensores de corriente asegúrese que cada uno de los cables de alimentación esté abrazado por un sensor y que este se conecte a la bornera de conexión correspondiente.

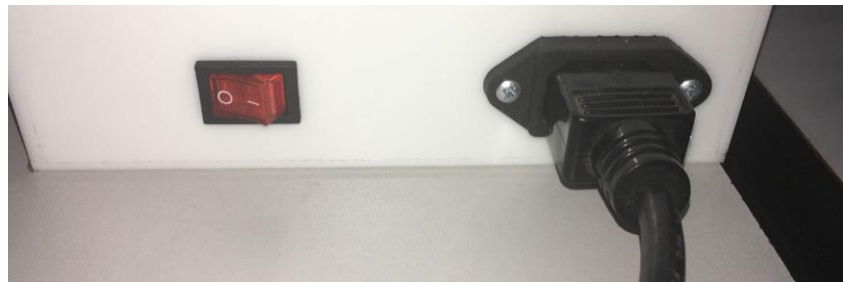


CONEXIÓN

Introduzca el cable de red del puerto ethernet en el lugar marcado para que el dispositivo tenga una conexión a red y se pueda mostrar la interfaz web



Cuando realice las conexiones anteriores ahora si puede prender el dispositivo con el interruptor ON/OFF que está destinado para este propósito



Después de encender la consola en la pantalla LCD se podrá visualizar



INGRESOS DE DATOS

Esto indica que la consola está preparándose, después debe ingresar los datos de las RPM a las que el motor este girando, se podrá realizar con el teclado que está en la parte superior al lado de la pantalla LCD.



VALIDACIÓN

Luego de ingresar el valor de RPM o velocidad de giro del motor, el Sistema muestra el valor ingresado por el teclado.

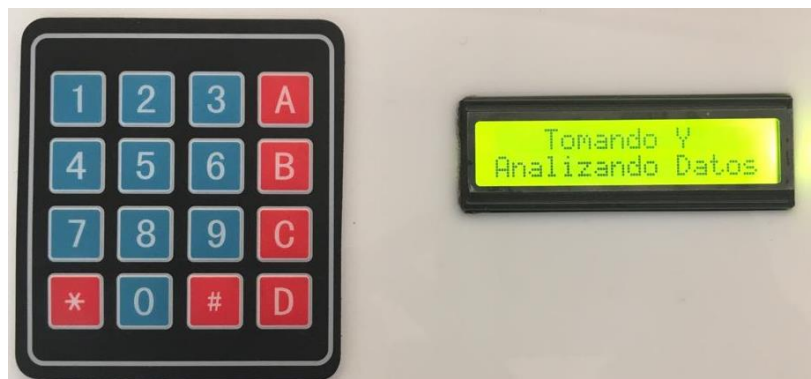


Posteriormente se debe confirmar para avanzar, en este caso será presionar la tecla # para seguir con el análisis del motor, en el caso que se realice una marcación errada presione * para volver a ingresar el valor.



Si presiona # el sistema empieza su proceso de análisis y la tarjeta muestra en la pantalla LCD el mensaje “tomando y analizando datos”

TOMANDO Y ANALIZADO DATOS



RESULTADOS

Al terminar el procesamiento de las muestras tomadas para cada uno de las técnicas desarrolladas, aparece en la pantalla la palabra FINALIZADO, lo cual indica que ha terminado el análisis y muestra los resultados en la pantalla LCD e interfaz web. El Sistema publica cada una de las fallas detectadas junto con la técnica asociada.



Por último, el sistema requiere nuevamente una confirmación para realizar el siguiente análisis, presionando * vuelve a iniciar todo el proceso documentado anteriormente. En caso de no querer realizar otra medición puede apagar el dispositivo del botón ON/OFF visualizado en la parte lateral derecha de la tarjeta de adquisición de datos.

INTERFAZ WEB

La tarjeta de adquisición de datos también puede mostrar los resultados a través de una página web mediante una dirección IP que se debe asignar dependiendo de su conexión a internet. Para ello debe conectar un cable ethernet con conexión a internet en el puerto que la tarjeta tiene para este proceso y tener instalado en su computador el IDE de arduino para programarlo.

Después debe conectar el cable que viene con la tarjeta al Arduino MEGA y a su computador.



INTERFAZ WEB

Seguidamente debe de descargar el archivo en el cual se encuentra toda la configuración de la interfaz web y tendrá que modificar la dirección IP de su código.

El código lo puede descargar del siguiente enlace:

<https://drive.google.com/file/d/1sCt5hRx-W73hELWTok5PXY4MDN6tBeN/view?usp=drivesdk>.

La parte que debe cambiar en el código está marcada con la descripción “INGRESE AQUÍ SU DIRECCIÓN IP” y debe hacerlo con comas, como este ejemplo: “172, 20, 10, 10”.

Nota: La dirección IP que debe ingresar en el código debe ser 2 IP más altas que la dirección IP de su equipo.

```
#include <SPI.h>
#include <UIPEthernet.h>
#include <Wire.h>

int estadoM;
int estadoE;
int estadoP;
byte mac[] = { 0x74, 0x69, 0x69, 0x2D, 0x30, 0x31 };
byte ip[] = { 172, 20, 10, 10 }; // INGRESE AQUÍ SU DIRECCIÓN IP
EthernetServer server(80);
```

INTERFAZ WEB

Después de modificar la dirección IP en el código debe programar la tarjeta Due con su nuevo código para esto tendrá que dar click en subir.



Cuando el IDE de Arduino muestre que el código se subió, desconecte el cable de programación y reinicie la tarjeta de adquisición. Ahora podrá ver los resultados en el navegador web de su preferencia ingresando la IP que asigno en el código.

Nota 2: Los dispositivos en los cuales se desea ver los resultados mediante un navegador web deben estar conectados a la misma red de internet que la tarjeta.

INTERFAZ WEB



Para ver los resultados en la interfaz web tiene que recargar la página aproximadamente 45 segundos después de que la tarjeta empiece a realizar el análisis.

Si no sabe cómo obtener la dirección IP siga estos pasos.

Instrucción CMD para obtener dirección IP

DIRECCIÓN IP

1. Ingrese a ejecutar presionando las teclas Win+R.
2. En el campo que se despliega escriba; cmd y presione Enter. Para utilizar CMD para obtener dirección IP.
3. Escriba: ipconfig y presione Enter. Allí podrá ver todas las conexiones de red de su equipo.
4. Busque su dirección IP. Busque la conexión que se encuentre activa y corrobore que tenga la etiqueta Dirección IPv4. La lista de ipconfig es larga, por lo que es posible que deba deslizar hasta el final para encontrar la dirección IPv4. Allí podrá encontrar su IP. Tenga en consideración que su IP interna está compuesta por 4 series de dígitos de máximo tres números cada una separada por un punto.

Anexo 6 código IDE Arduino.

```
//Código Trabajo de Grado "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA TARJETA DE
ADQUISICIÓN DE DATOS PARA EL ANÁLISIS EN LÍNEA DE FALLAS
//
//          EN EL ROTOR Y RODAMIENTOS EN UN MOTOR DE INDUCCIÓN
TRIFÁSICO""
//Autores: CARLOS ALBERTO ESCOBAR BERGAÑO
//          EDWIN DARÍO TERÁN CASTRO

#include "arduinoFFT.h" // Se importa librería para realizar FFT (Transformada
Rápida de Fourier)
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Keypad.h>      // importa libreria Keypad

#define DATOS 8192 //8192//Se define el número de muestras a tomar siempre
debe ser potencias de 2 inferior a 8200
#define FRECUENCIA_MUESTREO 5289//5200 //Hz, Se define la frecuencia de
muestreo en Hz y esta debe ser inferior a 10000 debido a ADC

unsigned int Periodo_Muestreo; unsigned long microseconds; //Definimos la
variable para calcular el periodo o tiempo de muestreo en microsegundos

// Definimos variables

const byte FILAS = 4;      // define numero de filas
const byte COLUMNAS = 4;   // define numero de columnas
char keys[FILAS][COLUMNAS] = { // define la distribucion de teclado externo
    {'D', 'C', 'B', 'A'},
    {'#', '9', '6', '3'},
    {'0', '8', '5', '2'},
    {'*', '7', '4', '1'}
};

byte pinesFilas[FILAS] = {9, 8, 7, 6}; // pines correspondientes a las filas
byte pinesColumnas[COLUMNAS] = {5, 4, 3, 2}; // pines correspondientes a las
columnas
float rpm;
float S = 0;
char TECLA; // almacena la tecla presionada
char CLAVE[3]; // almacena en un array 6 digitos ingresados
char TECLA2;
byte INDICE = 0; // indice del array
int num;
String txt = "";
boolean t = true;
float valorrotor = -39.00;
float valorrodamiento1 = 800.00;
float valorrodamiento2 = 480.00;
float valorrodamientooesa1 = 1150000.00;
float valorrodamientooesa2 = 600000.00;
float valorrodamientopark1 = 1300.00;
float valorrodamientopark2 = 610.00;
float frecuenciaparada = 1000.00;
arduinoFFT FFT = arduinoFFT(); // create FFT object
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);
```

```

Keypad teclado = Keypad(makeKeymap(keys), pinesFilas, pinesColumnas, FILAS,
COLUMNAS); // crea objeto

double DatosV1R[DATOS]; //Datos sensor de voltaje
double DatosV2R[DATOS]; //Datos sensor de voltaje
double DatosV3R[DATOS]; //Datos sensor de voltaje
double DatosC1R[DATOS]; //Datos sensor de corriente
double DatosC2R[DATOS]; //Datos sensor de corriente
double DatosC3R[DATOS]; //Datos sensor de corriente
double vImag[DATOS]; //Parte Imaginaria de la FFT

// inicio de programa
void setup() {
  // Se inicia el puerto serial para envio de datos
  Serial.begin(115200);

  Wire.begin();
  // Se calcula el periodo de muestreo
  Periodo_Muestreo = round(1000000 * (1.0 / FRECUENCIA_MUESTREO )); // T = 1/f
= s * 1000000 para tener el tiempo en segundos

  //LCD
  // Inicializar el LCD
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.init();
  //Encender la luz de fondo.
  lcd.backlight();
  // Escribimos el Mensaje en el LCD.
  lcd.clear(); // Limpia la pantalla
}

void loop() {

  int banderarotormcsa = 0;
  int banderarotoresa = 0;
  int banderarotorpark = 0;
  int banderarodamcsa = 0;
  int banderarodaesa = 0;
  int banderarodapark = 0;
  lcd.clear();
  lcd.print("AnálisisEnLinea");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Motor Trifásico");
  delay(4000);
  lcd.clear();

  /*CONEXION PAGINA WEB*/
  Wire.beginTransmission(20); // Comunicarse con esclavo #23
  Wire.write('J');
  Wire.endTransmission();

  /*Ingreso de RPM*/
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);

```

```

lcd.print("Ingresar Teclado");
lcd.setCursor(4, 1);
lcd.print("Valor RPM");
TECLA = teclado.getKey();

t = true;
INDICE = 0 ;
txt = "";
while (t == true)
{
    TECLA = teclado.getKey();    // obtiene tecla presionada y asigna a
variable
    if (TECLA != NO_KEY)        // comprueba que se haya presionado una tecla
    {
        CLAVE[INDICE] = TECLA;    // almacena en array la tecla presionada
        INDICE++;                // incrementa indice en uno
        //Serial.println(TECLA);    // envia a monitor serial la tecla
presionada

    }

    if (INDICE == 4)            // si ya se almacenaron los 4 digitos
    {
        t = false;
        for (int i = 0; i < 4; i++) {
            txt = txt + CLAVE[i];
        }
    }
}
num = txt.toInt();

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("RPM Ingresada Es");
lcd.setCursor(6, 1);
lcd.print(num);
delay(3000);

rpm = num;

t = true;
while (t == true) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Continuar -> #");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Borrar -> *");
    delay(150);
    TECLA2 = teclado.getKey();    // obtiene tecla presionada y asigna a
variable
    if (TECLA2 == '#') {        // comprueba que se haya presionado una tecla
        t = false;            // obtiene tecla presionada y asigna a
variable
    }
    if (TECLA2 == '*') {        // comprueba que se haya presionado una tecla
}

```

```

/* Frecuencia Fallas barras rotas Tecnica MCSA */
float WS = (60 * 60) / 2; // WS=((60*Fa)/# de pares de polos)   Fa=
Frecuencia de Alimentacion
S = (WS - rpm) / WS;
float falla_rotor1 = ((1 + (2 * S)) * 60);
float falla_rotor2 = ((1 - (2 * S)) * 60);
float falla_rotor3 = ((1 + (2 * S)) * 120);
float falla_rotor4 = ((1 - (2 * S)) * 120);
float Nb = 8.0 ; // numero de balines o elementos rodantes
float N = rpm / 60.0 ; // velocidad mecanica de rotor
float Db = 5.94; // diametro de balin o elemento rodante
float Beta = 0.0 ; // angulo de contacto elementos rodantes
float Dc = 26.1 ; // diametro medio entre las pistas

float Fnjaula = ((N / 2) * (1 - ((Db * cos(Beta)) / Dc)));
float Fnbola = ((Dc * N) / (Db * Db)) * (1 - (((Db * cos(Beta)) / Dc) * ((Db
* cos(Beta)) / Dc)));
float Fnpexterna = (((Nb * N) / 2) * (1 - ((Db * cos(Beta)) / Dc)));
float Fnpinterna = (((Nb * N) / 2) * (1 + ((Db * cos(Beta)) / Dc)));

//fallas en esa y epva son al 2*Fo

/* Se genera un retardo de 10 segundos para que el motor pueda arrancar y se
estabilice*/
Serial.println(F("Esperando Los Datos"));
Serial.println(F("Las RPM " ));
Serial.println(rpm);
lcd.clear();
lcd.setCursor(3, 0);
lcd.print("Tomando Y");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Analizando Datos");
//delay(500);

/*Tomando Muestras*/
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    microseconds = micros();

    DatosC1R[i] = analogRead(3);
    DatosC2R[i] = analogRead(6);
    DatosC3R[i] = analogRead(7);
    vImag[i] = 0;
    while (micros() < (microseconds + Periodo_Muestreo)) {
    }
}

///////////////////////////////// MCSA ///////////////////////////////////
/*Se utiliza la librería para realizar la FFT*/
/*FFT Sensores de Corriente*/

FFT.DCRemoval(DatosC1R, DATOS);
FFT.Windowing(DatosC1R, DATOS, FFT_WIN_TYP_RECTANGLE, FFT_FORWARD);
FFT.Compute(DatosC1R, vImag, DATOS, FFT_FORWARD);

```

```

FFT.ComplexToMagnitude(DatosC1R, vImag, DATOS);

/*FFT Sensor de Corriente 2*/
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    vImag[i] = 0;
}
FFT.DCRemoval(DatosC2R, DATOS);
FFT.Windowing(DatosC2R, DATOS, FFT_WIN_TYP_RECTANGLE, FFT_FORWARD);
FFT.Compute(DatosC2R, vImag, DATOS, FFT_FORWARD);
FFT.ComplexToMagnitude(DatosC2R, vImag, DATOS);
/*FFT Sensor de Corriente 3*/
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    vImag[i] = 0;
}
FFT.DCRemoval(DatosC3R, DATOS);
FFT.Windowing(DatosC3R, DATOS, FFT_WIN_TYP_RECTANGLE, FFT_FORWARD);
FFT.Compute(DatosC3R, vImag, DATOS, FFT_FORWARD);
FFT.ComplexToMagnitude(DatosC3R, vImag, DATOS);

////////// Rodamientos MCSA//////////
////////// Inicio Fallas en Jaula MSCA //////////
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosV1R[i] = (((i * 1.0 * FRECUENCIA_MUESTREO) / DATOS)); /* vector
de frecuencias de FFT*/
    DatosV2R[i] = (60 + ((i + 4) * Fnjaula)); //
frecuencias de fallas a buscas rodamientos
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    for (int i2 = 0; i2 < DATOS; i2++)
    {
        if ((DatosV1R[i2] >= (DatosV2R[i] - 0.2)) && (DatosV1R[i2] <=
(DatosV2R[i] + 0.2)) && DatosV1R[i2] <= frecuenciaparada ) {
            if ((int)DatosV1R[i2] != 180 && (int)DatosV1R[i2] != 300 &&
(int)DatosV1R[i2] != 420 && (int)DatosV1R[i2] != 540 && (int)DatosV1R[i2] !=
660 && (int)DatosV1R[i2] != 780 && (int)DatosV1R[i2] != 900) {
                if ((DatosC1R[i2] > valorrodamiento1 || DatosC2R[i2] >
valorrodamiento1 || DatosC3R[i2] > valorrodamiento1) && (DatosV1R[i2] <=
220.00) ) {
                    banderarodamcsa++;
                }
                else if ((DatosC1R[i2] > valorrodamiento2 || DatosC2R[i2] >
valorrodamiento2 || DatosC3R[i2] > valorrodamiento2) && DatosV1R[i2] > 220.00
)
                {
                    banderarodamcsa++;
                }
            }
        }
    }
}

////////// Final Jaula MCSA //////////
////////// Inicio Fallas BOLA MCSA //////////

```

```

    for (int i = 0; i < DATOS; i++)
    {
        DatosV2R[i] = (60 + ((i + 2) * Fnbola)); // frecuencias de fallas a
        buscas rodamientos bola
    }
    for (int i = 0; i < DATOS; i++)
    {
        for (int i2 = 0; i2 < DATOS; i2++)
        {
            if ((DatosV1R[i2] >= (DatosV2R[i] - 0.2)) && (DatosV1R[i2] <=
            (DatosV2R[i] + 0.2)) && DatosV1R[i2] <= frecuenciapara) {
                if ((int)DatosV1R[i2] != 180 && (int)DatosV1R[i2] != 300 &&
                (int)DatosV1R[i2] != 420 && (int)DatosV1R[i2] != 540 && (int)DatosV1R[i2] !=
                660 && (int)DatosV1R[i2] != 780 && (int)DatosV1R[i2] != 900) {
                    if ((DatosC1R[i2] > valorrodamiento1 || DatosC2R[i2] >
                    valorrodamiento1 || DatosC3R[i2] > valorrodamiento1) && (DatosV1R[i2] <=
                    220.00) ) {
                        banderarodamcsa++;
                    }
                    else if ((DatosC1R[i2] > valorrodamiento2 || DatosC2R[i2] >
                    valorrodamiento2 || DatosC3R[i2] > valorrodamiento2) && DatosV1R[i2] > 220.00
                    )
                    {
                        banderarodamcsa++;
                    }
                }
            }
        }
    }
    /////////////////////////////////////////////////// Final BOLA MCSA ////////////////////////////////////////
    /////////////////////////////////////////////////// Inicio Fallas Pista Externa MCSA ////////////////////////////////////////
    for (int i = 0; i < DATOS; i++)
    {
        DatosV2R[i] = (60 + ((i + 1) * Fnpexterna)); // frecuencias de fallas a
        buscas rodamientos Pista Externa
    }
    for (int i = 0; i < DATOS; i++)
    {
        for (int i2 = 0; i2 < DATOS; i2++)
        {
            if ((DatosV1R[i2] >= (DatosV2R[i] - 0.2)) && (DatosV1R[i2] <=
            (DatosV2R[i] + 0.2)) && DatosV1R[i2] <= frecuenciapara) {
                if ((int)DatosV1R[i2] != 180 && (int)DatosV1R[i2] != 300 &&
                (int)DatosV1R[i2] != 420 && (int)DatosV1R[i2] != 540 && (int)DatosV1R[i2] !=
                660 && (int)DatosV1R[i2] != 780 && (int)DatosV1R[i2] != 900) {
                    if ((DatosC1R[i2] > valorrodamiento1 || DatosC2R[i2] >
                    valorrodamiento1 || DatosC3R[i2] > valorrodamiento1) && (DatosV1R[i2] <=
                    220.00) ) {
                        banderarodamcsa++;
                    }
                    else if ((DatosC1R[i2] > valorrodamiento2 || DatosC2R[i2] >
                    valorrodamiento2 || DatosC3R[i2] > valorrodamiento2) && DatosV1R[i2] > 220.00
                    )
                    {
                        banderarodamcsa++;
                    }
                }
            }
        }
    }

```

```

    }
}
}
//////////FIN Pista Externa MCSA //////////
////////// Inicio Rodamiento Pista Interna MCSA //////////
//
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosV2R[i] = (60 + ((i + 1) * Fnpinterna)); // frecuencias de fallas a
    buscas rodamientos Pista Interna
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    for (int i2 = 0; i2 < DATOS; i2++)
    {
        if ((DatosV1R[i2] >= (DatosV2R[i] - 0.2)) && (DatosV1R[i2] <=
(DatosV2R[i] + 0.2)) && DatosV1R[i2] <= frecuenciaparada ) {
            if ((int)DatosV1R[i2] != 180 && (int)DatosV1R[i2] != 300 &&
(int)DatosV1R[i2] != 420 && (int)DatosV1R[i2] != 540 && (int)DatosV1R[i2] !=
660 && (int)DatosV1R[i2] != 780 && (int)DatosV1R[i2] != 900) {
                if ((DatosC1R[i2] > valorrodamiento1 || DatosC2R[i2] >
valorrodamiento1 || DatosC3R[i2] > valorrodamiento1) && (DatosV1R[i2] <=
220.00) ) {
                    banderarodamcsa++;
                }
                else if ((DatosC1R[i2] > valorrodamiento2 || DatosC2R[i2] >
valorrodamiento2 || DatosC3R[i2] > valorrodamiento2) && DatosV1R[i2] > 220.00
)
                {
                    banderarodamcsa++;
                }
            }
        }
    }
}
}
////////// FIN Pista Interna MCSA //////////
////////// Barras Rotas MCSA //////////
/*Normalizar y Poner datos en dB*/
/*Encontrar el valor maximo*/
float maxVal = 0;
float maxVal2 = 0;
float maxVal3 = 0;
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    //compara cada numero del array con el maxVal
    if (maxVal < DatosC1R[i]) {
        maxVal = DatosC1R[i];
    }
    if (maxVal2 < DatosC2R[i]) {
        maxVal2 = DatosC2R[i];
    }
    if (maxVal3 < DatosC3R[i]) {
        maxVal3 = DatosC3R[i];
    }
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{

```

```

    DatosC1R[i] = DatosC1R[i] / maxVal; //normalizar datos
    DatosC2R[i] = DatosC2R[i] / maxVal2;
    DatosC3R[i] = DatosC3R[i] / maxVal3;
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosC1R[i] = 20 * log10(DatosC1R[i]);
    DatosC2R[i] = 20 * log10(DatosC2R[i]);
    DatosC3R[i] = 20 * log10(DatosC3R[i]);
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    if (((DatosV1R[i] >= (falla_rotor1 - 0.2)) && (DatosV1R[i] <=
(falla_rotor1 + 0.2)) ) || ((DatosV1R[i] >= (falla_rotor2 - 0.2)) &&
(DatosV1R[i] <= (falla_rotor2 + 0.2)) )) {
        if (DatosC1R[i] > valorrotor || DatosC2R[i] > valorrotor || DatosC3R[i]
> valorrotor) {
            banderarotormcsa++;
        }
    }
}
}
//////////////////// Final Barras Rotas MCSA //////////////////////
//////////////////////ESA////////////////////////////////////////
// Tomar Datos//
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosV1R[i] = 0.0;
    DatosV2R[i] = 0.0;
    DatosV3R[i] = 0.0;
    DatosC1R[i] = 0.0;
    DatosC2R[i] = 0.0;
    DatosC3R[i] = 0.0;
    vImag[i] = 0.0;
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    microseconds = micros();
    DatosC1R[i] = analogRead(3);
    DatosC2R[i] = analogRead(6);
    DatosC3R[i] = analogRead(7);
    DatosV1R[i] = analogRead(0);
    DatosV2R[i] = analogRead(1);
    DatosV3R[i] = analogRead(2);
    vImag[i] = 0;
    while (micros() < (microseconds + Periodo_Muestreo)) {
    }
}
//calculo ESA
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosC1R[i] = DatosC1R[i] * DatosV1R[i];
    DatosC2R[i] = DatosC2R[i] * DatosV2R[i];
    DatosC3R[i] = DatosC3R[i] * DatosV3R[i];
}
//FFT tecnica Esa
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{

```



```

    vImag[i] = 0.0;
}
FFT.DCRemoval(DatosC1R, DATOS);
FFT.Windowing(DatosC1R, DATOS, FFT_WIN_TYP_RECTANGLE, FFT_FORWARD);
FFT.Compute(DatosC1R, vImag, DATOS, FFT_FORWARD);
FFT.ComplexToMagnitude(DatosC1R, vImag, DATOS);

/*FFT Sensor de Corriente 2*/
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    vImag[i] = 0.0;
}
FFT.DCRemoval(DatosC2R, DATOS);
FFT.Windowing(DatosC2R, DATOS, FFT_WIN_TYP_RECTANGLE, FFT_FORWARD);
FFT.Compute(DatosC2R, vImag, DATOS, FFT_FORWARD);
FFT.ComplexToMagnitude(DatosC2R, vImag, DATOS);
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    vImag[i] = 0.0;
}
FFT.DCRemoval(DatosC3R, DATOS);
FFT.Windowing(DatosC3R, DATOS, FFT_WIN_TYP_RECTANGLE, FFT_FORWARD);
FFT.Compute(DatosC3R, vImag, DATOS, FFT_FORWARD);
FFT.ComplexToMagnitude(DatosC3R, vImag, DATOS);

////////// Inicio Fallas Rodamientos ESA //////////
////////// Inicio fallas en jaula ESA//////////
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosV3R[i] = ((i * 2.00 * FRECUENCIA_MUESTREO) / DATOS)); /* vector de
frecuencias de FFT*/
    DatosV2R[i] = (120 + ((i + 4) * Fnjaula)); // fallas
ESA
}

for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    for (int i2 = 0; i2 < DATOS; i2++)
    {
        if ((DatosV3R[i2] >= (DatosV2R[i] - 0.2)) && (DatosV3R[i2] <=
(DatosV2R[i] + 0.2)) && DatosV3R[i2] <= frecuenciaparada) {
            if ((int)DatosV3R[i2] != 360 && (int)DatosV3R[i2] != 600 &&
(int)DatosV3R[i2] != 840 && (int)DatosV3R[i2] != 240 && (int)DatosV3R[i2] !=
480) {
                if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientoesa1 || DatosC2R[i2] >
valorrodamientoesa1 || DatosC3R[i2] > valorrodamientoesa1) && (DatosV3R[i2] <=
365.00)) {
                    banderarodaesa++;
                }
                else if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientoesa2 || DatosC2R[i2] >
valorrodamientoesa2 || DatosC3R[i2] > valorrodamientoesa2) && (DatosV3R[i2] >
365.00))
                {
                    banderarodaesa++;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }
}
//////////Final Jaula ESA //////////
////////// Inicio Fallas BOLA ESA //////////
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosV3R[i] = ((i * 2.0 * FRECUENCIA_MUESTREO ) / DATOS)); /* vector de
frecuencias de FFT*/
    DatosV2R[i] = (120 + ((i + 2) * Fnbola)); // fallas
ESA
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    for (int i2 = 0; i2 < DATOS; i2++)
    {
        if ((DatosV3R[i2] >= (DatosV2R[i] - 0.2)) && (DatosV3R[i2] <=
(DatosV2R[i] + 0.2)) && DatosV3R[i2] <= frecuenciaparada ) {
            if ((int)DatosV3R[i2] != 360 && (int)DatosV3R[i2] != 600 &&
(int)DatosV3R[i2] != 840 && (int)DatosV3R[i2] != 240 && (int)DatosV3R[i2] !=
480) {
                if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientooesal || DatosC2R[i2] >
valorrodamientooesal || DatosC3R[i2] > valorrodamientooesal) && (DatosV3R[i2] <=
365.00)) {
                    banderarodaesa++;
                }
                else if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientooesa2 || DatosC2R[i2] >
valorrodamientooesa2 || DatosC3R[i2] > valorrodamientooesa2) && (DatosV3R[i2] >
365.00))
                {
                    banderarodaesa++;
                }
            }
        }
    }
}
////////// Fin BOLA ESA //////////
////////// Inicio Fallas Pista Externa ESA //////////
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosV3R[i] = ((i * 2.0 * FRECUENCIA_MUESTREO ) / DATOS)); /* vector de
frecuencias de FFT*/
    DatosV2R[i] = (120 + ((i + 1) * Fnpexterna)); //
fallas ESA
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    for (int i2 = 0; i2 < DATOS; i2++)
    {
        if ((DatosV3R[i2] >= (DatosV2R[i] - 0.2)) && (DatosV3R[i2] <=
(DatosV2R[i] + 0.2)) && DatosV3R[i2] <= frecuenciaparada ) {
            if ((int)DatosV3R[i2] != 360 && (int)DatosV3R[i2] != 600 &&
(int)DatosV3R[i2] != 840 && (int)DatosV3R[i2] != 240 && (int)DatosV3R[i2] !=
480) {
                if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientooesal || DatosC2R[i2] >
valorrodamientooesal || DatosC3R[i2] > valorrodamientooesal) && (DatosV3R[i2] <=
365.00)) {
                    banderarodaesa++;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    else if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientoesa2 || DatosC2R[i2] >
valorrodamientoesa2 || DatosC3R[i2] > valorrodamientoesa2) && (DatosV3R[i2] >
365.00))
    {
        banderarodaesa++;
    }
}
}
}
}
}
//////////////// Fin Rodamiento Pista Externa ESA ////////////////
//////////////// Inicio fallas Rodamiento Pista Interna ESA ////////////////
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosV3R[i] = ((i * 2.0 * FRECUENCIA_MUESTREO) / DATOS)); /* vector de
frecuencias de FFT*/
    DatosV2R[i] = (120 + ((i + 1) * Fnpinterna)); //
fallas ESA
}

for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    for (int i2 = 0; i2 < DATOS; i2++)
    {
        if ((DatosV3R[i2] >= (DatosV2R[i] - 0.2)) && (DatosV3R[i2] <=
(DatosV2R[i] + 0.2)) && DatosV3R[i2] <= frecuenciaparada ) {
            if ((int)DatosV3R[i2] != 360 && (int)DatosV3R[i2] != 600 &&
(int)DatosV3R[i2] != 840 && (int)DatosV3R[i2] != 240 && (int)DatosV3R[i2] !=
480 ) {
                if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientoesa1 || DatosC2R[i2] >
valorrodamientoesa1 || DatosC3R[i2] > valorrodamientoesa1) && (DatosV3R[i2] <=
365.00)) {
                    banderarodaesa++;
                }
                else if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientoesa2 || DatosC2R[i2] >
valorrodamientoesa2 || DatosC3R[i2] > valorrodamientoesa2) && (DatosV3R[i2] >
365.00))
                {
                    banderarodaesa++;
                }
            }
        }
    }
}
}
//////////////// Fin Rodamiento Pista Interna ////////////////
//////////////// Barras Rotas ESA ////////////////
/*Normalizar y Poner datos en dB*/
/*Encontrar el valor maximo*/
maxVal = 0;
maxVal2 = 0;
maxVal3 = 0;
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    //compara cada numero del array con el maxVal
    if (maxVal < DatosC1R[i]) {
        maxVal = DatosC1R[i];
    }
}

```

```

    }
    if (maxVal2 < DatosC2R[i]) {
        maxVal2 = DatosC2R[i];
    }
    if (maxVal3 < DatosC3R[i]) {
        maxVal3 = DatosC3R[i];
    }
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosC1R[i] = DatosC1R[i] / maxVal;
    DatosC2R[i] = DatosC2R[i] / maxVal2;    //normalizar vectores
    DatosC3R[i] = DatosC3R[i] / maxVal3;
}

for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosC1R[i] = 20 * log10(DatosC1R[i]);
    DatosC2R[i] = 20 * log10(DatosC2R[i]);
    DatosC3R[i] = 20 * log10(DatosC3R[i]);
}

// Búsqueda de Fallas//
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    if (((DatosV3R[i] >= (falla_rotor3 - 0.2)) && (DatosV3R[i] <=
(falla_rotor3 + 0.2)) || ((DatosV3R[i] >= (falla_rotor4 - 0.2)) &&
(DatosV3R[i] <= (falla_rotor4 + 0.2)) ) )) {
        if (DatosC1R[i] > valorrotor || DatosC2R[i] > valorrotor || DatosC3R[i]
> valorrotor) {
            banderarotores++;
        }
    }
}

///////// Final Barras Rotas ESA ///////////////////////////////////
/////////EPVA//////////////////////////////////////
// Tomar Datos//
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosC1R[i] = 0.0;
    DatosC2R[i] = 0.0;
    DatosC3R[i] = 0.0;
    vImag[i] = 0.0;
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    microseconds = micros();
    DatosC1R[i] = analogRead(3);
    DatosC2R[i] = analogRead(6);
    DatosC3R[i] = analogRead(7);
    vImag[i] = 0;
    while (micros() < (microseconds + Periodo_Muestreo)) {
    }
}
}
//calculo EPVA
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{

```

```

    DatosC1R[i] = (0.81649 * DatosC1R[i]) - (0.40824 * DatosC2R[i]) - (0.40824
* DatosC3R[i]); // ID
    DatosC2R[i] = (0.70710 * DatosC2R[i]) - (0.70710 * DatosC3R[i]); // IQ
}
//FFT tecnica EPVA
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    vImag[i] = 0;
}
FFT.DCRemoval(DatosC1R, DATOS);
FFT.Windowing(DatosC1R, DATOS, FFT_WIN_TYP_RECTANGLE, FFT_FORWARD);
FFT.Compute(DatosC1R, vImag, DATOS, FFT_FORWARD);
FFT.ComplexToMagnitude(DatosC1R, vImag, DATOS);

for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    vImag[i] = 0;
}
FFT.DCRemoval(DatosC2R, DATOS);
FFT.Windowing(DatosC2R, DATOS, FFT_WIN_TYP_RECTANGLE, FFT_FORWARD);
FFT.Compute(DatosC2R, vImag, DATOS, FFT_FORWARD);
FFT.ComplexToMagnitude(DatosC2R, vImag, DATOS);

////////// Inicio Fallas en Rodamiento EPVA //////////
////////// Inicio Fallas Jaula EPVA //////////
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosV3R[i] = (((i * 2.0 * FRECUENCIA_MUESTREO) / DATOS)); /* vector de
frecuencias de FFT*/
    DatosV2R[i] = (120 + ((i + 5) * Fnjaula)); // fallas
EPVA
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    for (int i2 = 0; i2 < DATOS; i2++)
    {
        if ((DatosV3R[i2] >= (DatosV2R[i] - 0.2)) && (DatosV3R[i2] <=
(DatosV2R[i] + 0.2)) && DatosV3R[i2] <= frecuenciaparada) {
            if ((int)DatosV3R[i2] != 360 && (int)DatosV3R[i2] != 600 &&
(int)DatosV3R[i2] != 840) {
                if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientopark1 || DatosC2R[i2] >
valorrodamientopark1) && DatosV3R[i2] <= 220.00) {
                    banderarodapark++;
                }

                else if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientopark2 || DatosC2R[i2] >
valorrodamientopark1) && DatosV3R[i2] > 220.00)
                {
                    banderarodapark++;
                }
            }
        }
    }
}
}
//////////Final Jaula EPVA//////////
////////// Inicio Bola EPVA//////////
for (int i = 0; i < DATOS; i++)

```

```

{
    DatosV3R[i] = ((i * 2.0 * FRECUENCIA_MUESTREO ) / DATOS)); /* vector de
frecuencias de FFT*/
    DatosV2R[i] = (120 + ((i + 4) * Fnbola)); // fallas
EPVA
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    for (int i2 = 0; i2 < DATOS; i2++)
    {
        if ((DatosV3R[i2] >= (DatosV2R[i] - 0.2)) && (DatosV3R[i2] <=
(DatosV2R[i] + 0.2)) && DatosV3R[i2] <= frecuenciaparada ) {
            if ((int)DatosV3R[i2] != 360 && (int)DatosV3R[i2] != 600 &&
(int)DatosV3R[i2] != 840 ) {
                if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientopark1 || DatosC2R[i2] >
valorrodamientopark1 ) && DatosV3R[i2] <= 220.00) {
                    banderarodapark++;
                }

                else if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientopark2 || DatosC2R[i2] >
valorrodamientopark1) && DatosV3R[i2] > 220.00)
                {
                    banderarodapark++;
                }
            }
        }
    }
}
////////// Fin Fallas Bola EPVA//////////
////////// Inicio Pista Interna EPVA//////////
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosV3R[i] = ((i * 2.0 * FRECUENCIA_MUESTREO ) / DATOS)); /* vector de
frecuencias de FFT*/
    DatosV2R[i] = (120 + ((i + 1) * Fnpinterna)); //
fallas EPVA
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    for (int i2 = 0; i2 < DATOS; i2++)
    {
        if ((DatosV3R[i2] >= (DatosV2R[i] - 0.2)) && (DatosV3R[i2] <=
(DatosV2R[i] + 0.2)) && DatosV3R[i2] <= frecuenciaparada ) {
            if ((int)DatosV3R[i2] != 360 && (int)DatosV3R[i2] != 600 &&
(int)DatosV3R[i2] != 840 ) {
                if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientopark1 || DatosC2R[i2] >
valorrodamientopark1 ) && DatosV3R[i2] <= 220.00) {
                    banderarodapark++;
                }

                else if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientopark2 || DatosC2R[i2] >
valorrodamientopark1) && DatosV3R[i2] > 220.00)
                {
                    banderarodapark++;
                }
            }
        }
    }
}
}

```

```

    }
}
////////// Fin Pista Interna EPVA//////////
////////// Inicio Pista Externa EPVA//////////
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosV3R[i] = ((i * 2.0 * FRECUENCIA_MUESTREO) / DATOS); /* vector de
frecuencias de FFT*/
    DatosV2R[i] = (120 + ((i + 1) * Fnpexterna)); //
fallas EPVA
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    for (int i2 = 0; i2 < DATOS; i2++)
    {
        if ((DatosV3R[i2] >= (DatosV2R[i] - 0.2)) && (DatosV3R[i2] <=
(DatosV2R[i] + 0.2)) && DatosV3R[i2] <= frecuenciaparada) {
            if ((int)DatosV3R[i2] != 360 && (int)DatosV3R[i2] != 600 &&
(int)DatosV3R[i2] != 840) {
                if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientopark1 || DatosC2R[i2] >
valorrodamientopark1) && DatosV3R[i2] <= 220.00) {
                    banderarodapark++;
                }
                else if ((DatosC1R[i2] > valorrodamientopark2 || DatosC2R[i2] >
valorrodamientopark1) && DatosV3R[i2] > 220.00)
                {
                    banderarodapark++;
                }
            }
        }
    }
}
}
////////// Barras Rotas EPVA //////////
/*Normalizar y Poner datos en dB*/
/*Encontrar el valor maximo*/
maxVal = 0;
maxVal2 = 0;
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    //compara cada numero del array con el maxVal
    if (maxVal < DatosC1R[i]) {
        maxVal = DatosC1R[i];
    }
    if (maxVal2 < DatosC2R[i]) {
        maxVal2 = DatosC2R[i];
    }
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosC1R[i] = DatosC1R[i] / maxVal;
    DatosC2R[i] = DatosC2R[i] / maxVal2;
}
for (int i = 0; i < DATOS; i++)
{
    DatosC1R[i] = 20 * log10(DatosC1R[i]);
    DatosC2R[i] = 20 * log10(DatosC2R[i]);
}
}

```

```

    for (int i = 0; i < DATOS; i++)
    {
        if ((DatosV3R[i] >= (falla_rotor3 - 0.2)) && (DatosV3R[i] <= (falla_rotor3
+ 0.2)) || (DatosV3R[i] >= (falla_rotor4 - 0.2)) && (DatosV3R[i] <=
(falla_rotor4 + 0.2))) {
            if (DatosC1R[i] > valorrotor || DatosC2R[i] > valorrotor) {
                banderarotorpark++;
            }
        }
    }
    ///////////////////////////////////////////////////Final Barras Rotas EPVA//////////////////////////////////////

Serial.println(F("Datos Fin"));
lcd.clear();
lcd.setCursor(3, 1);
lcd.print("Finalizado");
delay(3000);

if (banderarotormcsa >= 1 && banderarodamcsa <= 2) {
    Wire.beginTransaction(20);
    Wire.write('A');
    Wire.endTransmission();
    delay(500);
}
if (banderarodamcsa > 2 && banderarotormcsa < 1) {
    Wire.beginTransaction(20); // Comunicarse con esclavo #23
    Wire.write('D');
    Wire.endTransmission();
    delay(500);
}
if (banderarotormcsa >= 1 && banderarodamcsa > 2) {
    Wire.beginTransaction(20);
    Wire.write('G');
    Wire.endTransmission();
    delay(500);
}
if (banderarotoresa >= 1 && banderarodaesa <= 2) {
    Wire.beginTransaction(20); // Comunicarse con esclavo #23
    Wire.write('B');
    Wire.endTransmission();
    delay(500);
}
if (banderarodaesa > 2 && banderarotoresa < 1) {
    Wire.beginTransaction(20); // Comunicarse con esclavo #23
    Wire.write('E');
    Wire.endTransmission();
    delay(500);
}
if (banderarodaesa > 2 && banderarotoresa >= 1) {
    Wire.beginTransaction(20); // Comunicarse con esclavo #23
    Wire.write('H');
    Wire.endTransmission();
    delay(500);
}
if (banderarotorpark >= 1 && banderarodapark <= 2) {
    Wire.beginTransaction(20); // Comunicarse con esclavo #23
    Wire.write('C');
}

```



```

    Wire.endTransmission();
    delay(500);
}

if (banderarodapark > 2 && banderarotorpark <1) {
    Wire.beginTransmission(20); // Comunicarse con esclavo #23
    Wire.write('F');
    Wire.endTransmission();
    delay(500);
}
if (banderarodapark > 2 && banderarotorpark >= 1) {
    Wire.beginTransmission(20); // Comunicarse con esclavo #23
    Wire.write('I');
    Wire.endTransmission();
    delay(500);
}

if (banderarotormcsa >= 1) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Tecnica MCSA");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Falla Barra Rota");
    //    lcd.setCursor(13, 1);
    //    lcd.print(banderarotormcsa);
    //    Wire.beginTransmission(20); // Comunicarse con esclavo #23
    //    Wire.write('A');
    //    Wire.endTransmission();
    delay(7000);
}
if (banderarodamcsa > 2) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Tecnica MCSA");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Falla Rodamiento");
    //    lcd.setCursor(13, 1);
    //    lcd.print(banderarodamcsa);
    //    Wire.beginTransmission(20); // Comunicarse con esclavo #23
    //    Wire.write('D');
    //    Wire.endTransmission();
    delay(7000);
}

if (banderarotoresa >= 1) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Tecnica ESA");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Falla Barra Rota");
    //    lcd.setCursor(13, 1);
    //    lcd.print(banderarotoresa);

    //    Wire.beginTransmission(20); // Comunicarse con esclavo #23
    //    Wire.write('B');
    //    Wire.endTransmission();
    delay(7000);
}

```

```

}
if (banderarodaesa > 2) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Tecnica ESA");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Falla Rodamiento");
    //    lcd.setCursor(13, 1);
    //    lcd.print(banderarodaesa);

    //    Wire.beginTransaction(20); // Comunicarse con esclavo #23
    //    Wire.write('E');
    //    Wire.endTransmission();
    //    delay(7000);
}

if (banderarotorpark >= 1) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Tecnica EPVA");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Falla Barra Rota");
    //    lcd.setCursor(13, 1);
    //    lcd.print(banderarotorpark);
    //    Wire.beginTransaction(20); // Comunicarse con esclavo #23
    //    Wire.write('C');
    //    Wire.endTransmission();
    //    delay(7000);
}

if (banderarodapark > 2) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Tecnica EPVA");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("Falla Rodamiento");
    //    lcd.setCursor(13, 1);
    //    lcd.print(banderarodapark);
    //    Wire.beginTransaction(20); // Comunicarse con esclavo #23
    //    Wire.write('F');
    //    Wire.endTransmission();
    //    delay(7000);
}

if (banderarodaesa <= 2 && banderarodapark <= 2 && banderarodamcsa <= 2 &&
banderarotormcsa < 1 && banderarotoresa < 1 && banderarotorpark < 1) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Estado Del Motor");
    lcd.setCursor(3, 1);
    lcd.print("Motor Sano");
    Wire.beginTransaction(20); // Comunicarse con esclavo #23
    Wire.write('S');
    Wire.endTransmission();
    delay(7000);
}

```

```

Serial.println(banderarodaesa);
Serial.println(banderarodapark);
Serial.println(banderarodamcsa);
Serial.println(banderarotoresa);
Serial.println(banderarotorpark);
Serial.println(banderarotormcsa);
// lcd.clear();
// lcd.print("FIN TOTAL");
// delay(5000);
boolean y = true;
while (y == true) {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Nueva Medicion");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("Presione -> *");
  delay(150);
  TECLA2 = teclado.getKey(); // obtiene tecla presionada y asigna a
variable
  if (TECLA2 == '*') {      // comprueba que se haya presionado una tecla
    y = false;             // obtiene tecla presionada y asigna a
variable
  }
}
}

```