



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería



Detección de fallos graduales en rodamientos mediante fusión de señales,
métodos de reducción de dimensionalidad y algoritmos inteligentes

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en ciencias Mecatrónica

Presenta:
Ing. Jonathan Cureño Osornio

Dirigido por:
Dr. Juan José Saucedo Dorantes



Dirección General de Bibliotecas y Servicios Digitales
de Información



Detección de fallos graduales en rodamientos
mediante fusión de señales, métodos de reducción de
dimensionalidad y algoritmos inteligentes

por

Jonathan Cureño Osornio

se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0
Internacional](#).

Clave RI: IGMAC-236934



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Campus San Juan del Río



Detección de fallos graduales en rodamientos mediante fusión de señales,
métodos de reducción de dimensionalidad y algoritmos inteligentes

TESIS

Como parte de los requisitos para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS MECATRÓNICA

Línea Terminal
MECATRÓNICA

Presenta:

Ing. Jonathan Cureño Osornio

Dirigido por:

Dr. Juan José Saucedo Dorantes

SINODALES:

Dr. Juan José Saucedo Dorantes
Presidente

Firma

Dr. Luis Morales Velázquez
Secretario

Firma

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar
Vocal

Firma

Dr. David Alejandro Elvira Ortiz
Suplente

Firma

Dr. Jose Alfonso Antonino Daviu
Suplente

Firma

San Juan del Río, Qro, 05 de Diciembre del 2023

AGRADECIMIENTOS

DEDICATORIAS

Tabla de contenido

Tabla de ilustraciones.....	VII
Índice de tablas	XI
Índice de ecuaciones.....	XII
Resumen	13
Abstract.....	13
Capítulo 1. Introducción.	14
1.1 Antecedentes.....	15
1.2 Descripción del problema.	19
1.3 Justificación.	20
1.4 Hipótesis y Objetivos	21
1.4.1 Hipótesis	21
1.4.2 Objetivo general.	22
1.4.3 Objetivos específicos.	22
1.5 Planteamiento general.....	23
Capítulo 2. Fundamentación Teórica.	25
2.1 Motor de inducción	25
a) Componentes principales de un motor de inducción	25
b) Rotor tipo jaula de ardilla	27
c) Rotor tipo devanado.....	28
d) Fallos principales en los motores	29
e) Componentes frecuenciales de falla para fallos los motores eléctricos	29
2.2 Rodamientos	31
a) Fallas en los rodamientos	31
b) Rodamientos metálicos.....	32
c) Rodamiento híbrido.....	32
d) Rodamiento cerámico	33
2.3 Métodos de procesamiento.....	34
a) Indicadores estadísticos y no estadísticos	34
b) Análisis discriminante lineal (LDA).....	38
c) Algoritmos genéticos.....	40
d) Redes neuronales artificiales (ANN-Artificial Neural Networks).....	42

Capítulo 3. Metodología	43
3.1 Selección de rodamientos.....	45
3.2 Manufactura e inducción de fallos.....	47
3.3 Determinación de las matrices de pruebas	49
3.4 Banco de pruebas	54
3.5 Instrumentación del sistema	54
3.6 Experimentación.....	56
3.7 Tarjetas de adquisición de datos	58
3.8 Remuestreo y normalización de señales	59
3.9 Indicadores estadísticos y no estadísticos	59
3.10 Aplicación de algoritmo genético	60
3.11 Análisis de discriminante lineal (LDA).....	62
3.12 Diagnostico mediante FFNN.....	63
Capítulo 4. Resultados.....	66
4.1 Resultados de la inducción de fallos sobre los rodamientos	67
4.2 Señales obtenidas mediante las tarjetas de adquisición	68
4.3 Clasificación de fallos	70
4.4 Clasificación de fallos para rodamiento metálico	72
4.4.1 Rodamiento metálico-60Hz	72
4.4.2 Rodamiento metálico-50Hz	76
4.4.3 Rodamiento metálico-15Hz	77
4.4.4 Rodamiento metálico-5Hz	79
4.5 Clasificación de fallos para rodamiento híbrido.....	81
4.5.1 Rodamiento híbrido-60Hz	82
4.6 Clasificación de fallos para rodamiento cerámico	84
4.6.1 Rodamiento ceramico-60Hz.....	84
4.7 Clasificación para rodamiento metálico, híbrido y cerámico.....	87
4.7.1 Todos los materiales de rodamiento-60Hz	87
4.7.2 Todos los materiales de rodamiento-50Hz	91
4.7.3 Todos los materiales de rodamiento-15Hz	93
4.7.4 Todos los materiales de rodamiento-5Hz	95
4.8 Clasificación para rodamientos con contaminación en la lubricación	97

4.8.1 Clasificación para todos los rodamientos contaminados 60Hz.....	97
4.8.2 Clasificación para todos los rodamientos contaminados 50Hz.....	101
4.8.3 Clasificación para rodamiento metálico 60Hz	103
4.8.4 Clasificación para rodamiento Híbrido 60Hz	104
4.8.5 Clasificación para rodamiento Cerámico 60Hz	104
Capítulo 5. Conclusiones y Prospectivas	106
5.1 Conclusiones	106
5.2 Prospectivas	107
Referencias bibliográficas	108

Tabla de ilustraciones

Figura 1. Diagrama de planteamiento general (Autoría Propia).....	24
Figura 2. Partes del motor.....	27
Figura 3. Rotor tipo jaula de ardilla (Chapman, 2012).	28
Figura 4. Rotor tipo devanado (Chapman, 2012).	28
Figura 5.Elementos de un rodamiento (Manual SKF, 2019).	31
Figura 6. Rodamiento metálico (Manual SKF, 2019).	32
Figura 7. Rodamiento híbrido (Manual NKE, 2017).	33
Figura 8. Rodamiento cerámico (Manual CS, 2015).	34
Figura 9. Método de aplicación de Algoritmos Genéticos (Algoritmos Genéticos, 2016).....	41
Figura 10. Estructura de la red neuronal (Fentaye, 2016).	43
Figura 11. Diagrama general metodológico (Autoría Propia).	45
Figura 12. Esquema de rodamiento 6203(Autoría Propia).	45
Figura 13. Rodamiento metálico empleado (Autoría Propia).	46
Figura 14. Rodamiento Híbrido empleado (Autoría Propia).	46
Figura 15. Rodamiento cerámico empleado (Autoría Propia).	47
Figura 16. Manufactura de fallos pista exterior (Autoría Propia).....	48
Figura 17 Inducción de fallo de contaminación en la lubricación (Autoría Propia)	49
Figura 18 Cadena cinemática a) Motor de inducción b) Alternador c) Banda de transmisión d) Variador de frecuencia (Autoría Propia).	54
Figura 19. Sensor de corriente (Autoría Propia).	55
Figura 20. Sensor de flujo magnético a) Posición del magnetómetro (Autoría Propia).	55
Figura 21.Proceso de desmontaje del rotor (Autoría Propia).	56
Figura 22. Extracción del rodamiento (Autoría Propia).	57
Figura 23. Inserción del rodamiento en el rotor (Autoría Propia).	57
Figura 24. Tarjetas de adquisición de datos a) Corriente b) Flujo magnético (Autoría Propia).	58
Figura 25. Señal normalizada (Autoría Propia).....	59

Figura 26. Diagrama general para el cálculo de Indicadores estadísticos y no estadísticos (Autoría Propia).	60
Figura 27. Diagrama general para el cálculo de Algoritmo Genéticos (Autoría Propia).	62
Figura 28. Diagrama general para el cálculo de LDA (Autoría Propia).	63
Figura 29. Diagrama de Red Neuronal para pista exterior (Autoría Propia).....	64
Figura 30. Diagrama de Red Neuronal para 12 estados de fallo en pista exterior (Autoría Propia).....	65
Figura 31. Diagrama de Red Neuronal para combinación de fallas en contaminación de la lubricación y pista exterior (Autoría Propia).	66
Figura 32. Resultados de inducción de fallo (Autoría Propia).	68
Figura 33. Señales adquiridas estado sano 60Hz (Autoría Propia).	68
Figura 34. Señales adquiridas estado de 1mm-60Hz (Autoría Propia).	69
Figura 35. Señales adquiridas estado de 3mm-60Hz (Autoría Propia).	69
Figura 36. Señales adquiridas estado de 5mm-60Hz (Autoría Propia).	70
Figura 37. Diagrama general del procesamiento (Autoría Propia).	72
Figura 38. LDA para corriente 60Hz (Autoría Propia).	73
Figura 39. Matriz de confusión para corriente 60Hz (Autoría Propia).	73
Figura 40. LDA para flujo axial 60Hz (Autoría Propia).	74
Figura 41. Matriz de confusión para flujo axial 60Hz (Autoría Propia).	74
Figura 42. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 60Hz (Autoría Propia).	75
Figura 43. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 60Hz 1) Sano 2) 1mm 3) 3mm 4) 5mm (Autoría Propia).....	75
Figura 44. LDA para corriente 50Hz (Autoría Propia).	76
Figura 45. LDA para flujo axial 50Hz (Autoría Propia).	76
Figura 46. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 50Hz (Autoría Propia).	77
Figura 47. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 50Hz 1) Sano 2) 1mm 3) 3mm 4) 5mm (Autoría Propia).....	77
Figura 48. LDA para corriente 15Hz (Autoría Propia).	78
Figura 49. LDA para flujo axial 15Hz (Autoría Propia).	78
Figura 50. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 15Hz (Autoría Propia).	79

Figura 51. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 15Hz 1) Sano 2) 1mm 3) 3mm 4) 5mm (Autoría Propia).....	79
Figura 52. LDA para corriente 5Hz (Autoría Propia).....	80
Figura 53. LDA para flujo axial 5Hz (Autoría Propia).....	80
Figura 54. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 5Hz (Autoría Propia). ..	81
Figura 55. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 5Hz 1) Sano 2) 1mm 3) 3mm 4) 5mm (Autoría Propia).....	81
Figura 56. LDA para corriente 60Hz (Autoría Propia).....	82
Figura 57. LDA para flujo axial 60Hz (Autoría Propia).....	82
Figura 58. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 60Hz (Autoría Propia).	83
Figura 59. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 60Hz 1) Sano 2) 1mm 3) 3mm 4) 5mm (Autoría Propia).....	83
Figura 60. LDA para corriente 60Hz (Autoría Propia).....	84
Figura 61. LDA para flujo axial 60Hz (Autoría Propia).....	85
Figura 62. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 60Hz (Autoría Propia).	86
Figura 63. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 60Hz 1) Sano 2) 1mm 3) 3mm 4) 5mm (Autoría Propia).....	86
Figura 64. Resultados LDA y Matriz de confusión para corriente 60Hz (Autoría Propia).....	88
Figura 65. Resultados LDA y Matriz de confusión para flujo axial 60Hz (Autoría Propia).....	89
Figura 66. Resultados LDA y Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo axial 60Hz (Autoría Propia).....	90
Figura 67. LDA para corriente 50Hz (Autoría Propia).....	91
Figura 68. LDA para flujo axial 50Hz (Autoría Propia).....	91
Figura 69. Resultados LDA y Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo axial 50Hz (Autoría Propia).....	92
Figura 70. LDA para corriente 15Hz (Autoría Propia).....	93
Figura 71. LDA para flujo axial 15Hz (Autoría Propia).....	93
Figura 72. Resultados LDA y Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo axial 15Hz (Autoría Propia).....	94

Figura 73. LDA para corriente 5Hz (Autoría Propia).....	95
Figura 74. LDA para flujo axial 5Hz (Autoría Propia).....	96
Figura 75. Resultados LDA y Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo axial 5Hz (Autoría Propia).	97
Figura 76. LDA para Corriente 60Hz (Autoría Propia).	99
Figura 77. LDA para Flujo axial 60Hz (Autoría Propia).....	99
Figura 78. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 60Hz (Autoría Propia).	99
Figura 79. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo axial 60Hz (Autoría Propia).....	100
Figura 80. LDA para Corriente 50Hz (Autoría Propia).	101
Figura 81. LDA para Flujo axial 50Hz (Autoría Propia).....	101
Figura 82. Resultados LDA y Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo axial 50Hz (Autoría Propia).	102
Figura 83. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 60Hz rodamiento metálico (Autoría Propia).....	103
Figura 84. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 60Hz (Autoría Propia).....	103
Figura 85. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 60Hz rodamiento híbrido (Autoría Propia).....	104
Figura 86. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 60Hz 5) M-5mm (Autoría Propia).....	104
Figura 87. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 60Hz rodamiento híbrido (Autoría Propia).....	105
Figura 88. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 60Hz (Autoría Propia).....	105

Índice de tablas

Tabla 1. Fórmulas empleadas para la aplicación de indicadores estadísticos.....	35
Tabla 2. Fórmulas empleadas para la aplicación de indicadores no estadísticos.	38
Tabla 3. Matriz de pruebas para rodamientos metálicos (Contaminación en la lubricación)	50
Tabla 4. Matriz de pruebas para rodamientos híbridos (Contaminación en la lubricación)	51
Tabla 5. Matriz de pruebas para rodamientos cerámicos (Contaminación en la lubricación)	52
Tabla 6. Matriz de pruebas contaminación de la lubricación.	53
Tabla 7. Especificaciones motor WEG	54
Tabla 8. Resumen de resultados rodamientos híbridos.....	83
Tabla 9. Resumen de resultados rodamientos cerámicos	87

Índice de ecuaciones

Ecuación 1.	30
Ecuación 2.	30
Ecuación 3.	30
Ecuación 4.	30
Ecuación 5.	30
Ecuación 6.	35
Ecuación 7.	35
Ecuación 8.	35
Ecuación 9.	35
Ecuación 10.	36
Ecuación 11.	36
Ecuación 12.	¡Error! Marcador no definido. 36
Ecuación 13.	36
Ecuación 14.	36
Ecuación 15.	36
Ecuación 16.	36
Ecuación 17.	36
Ecuación 18.	36
Ecuación 19.	37
Ecuación 20.	37
Ecuación 21.	38
Ecuación 22.	38
Ecuación 23.	38
Ecuación 24.	38
Ecuación 25.	38
Ecuación 26.	39
Ecuación 27.	39
Ecuación 28.	39
Ecuación 29.	39
Ecuación 30.	39
Ecuación 31.	40

Resumen

En ese trabajo se desarrolló una metodología, capaz de diagnosticar 2 fallos particulares de los rodamientos, fallo en la pista exterior, contaminación de la grasa, así como la combinación de ambas fallas, para 3 materiales distintos de rodamientos (metálico, híbrido y cerámico) y para 4 distintos estados de falla (sano, 1mm, 3mm y 5mm), mediante la adquisición, procesamiento y fusión de las señales de corriente eléctrica y el flujo magnético, procesando dichas variables con el cálculo de indicadores estadísticos y no estadísticos, el empleo de un algoritmo genético, el uso de una herramienta de reducción de dimensionalidad (LDA), clasificando estos resultados con una red neuronal prealimentada (FFNN), logrando la correcta discriminación de los fallos propuestos.

Abstract

In this work a methodology was developed, capable of diagnosing 2 particular bearing failures, failure on the outer race, and grease contamination, as well as the combination of both losses, for 3 different bearing materials (metallic, hybrid, and ceramic) and 4 other failure states (healthy, 1mm, 3mm, and 5mm), using the acquisition, processing and fusion of the electric current signals and magnetic flux, processing these variables with the calculation of statistical and non-statistical indicators, the use of a genetic algorithm, the use of a dimensionality reduction tool (LDA), classifying these results with a pre-fed neural network (FFNN), achieving the correct discrimination of the proposed faults.

Capítulo 1. Introducción.

El diagnóstico predictivo ha tenido un gran auge en los últimos años debido a que el motor de inducción es la herramienta más utilizada en la industria, encargado de transformar la energía eléctrica en energía mecánica, por lo cual, es de vital importancia que el motor opere en las condiciones más óptimas posibles, ya que si esto no sucede así, se pueden tener diversos problemas, causando grandes pérdidas económicas por paros en la producción, fallas catastróficas, mantenimientos correctivos excesivos, etc. Este tipo de diagnóstico se define como el seguimiento organizado con mediciones periódicas o continuas de variables del sistema y su comparación con patrones preestablecidos para la determinación del instante en el que se debe producir una intervención sobre el motor, por ello, en este trabajo se realizará una metodología innovadora para el estudio de 2 fallos específicos en los rodamientos (pista exterior y contaminación) los cuales suelen ser dos fallos muy comunes que aquejan a los rodamientos, además de extender el estudio a 3 tipos distintos de rodamientos fabricados con distintos materiales (metálico, cerámico e híbrido). Para el planteamiento de la presente tesis se realizó un estudio del estado del arte para poder tener un panorama claro sobre el enfoque al que se debe llevar dicha investigación. La forma de estudiar estos fallos de manera más cercana será replicándolos en el laboratorio, manufacturando 3 estados de fallo en la pista exterior del rodamiento para el fallo de pista exterior (1mm de perforación, 3mm y 5mm, además de contar con un estado sano) y para el fallo de contaminación en la lubricación se emplearán las mismas condiciones de fallo mencionadas anteriormente además de introducir un agente contaminante en el interior de los rodamientos para cada tipo de rodamiento y estado de fallo. Una vez obtenidos los datos se llevará a cabo el procesamiento de los mismos, el cual empleará indicadores estadísticos acompañados de un algoritmo genético, una reducción de dimensionalidad de datos mediante LDA (análisis de componentes principales) y LDA (Análisis discriminante lineal) y, por último, una clasificación mediante algoritmos de inteligencia artificial, lo cual permitirá diferenciar los distintos fallos.

1.1 Antecedentes.

En la actualidad se tiene claro el papel fundamental que juegan los motores de inducción dentro de la industria ya que es uno de los principales elementos para que las líneas de producción puedan operar de una manera eficiente, pero debido a que estos se encuentran sometidos a largos tiempos de uso suelen presentar diversos fallos por diferentes razones; anteriormente, en la literatura se ha reportado que muchos de estos fallos suelen suscitarse a consecuencia de un funcionamiento inadecuado de los rodamientos, por lo cual el desarrollo de métodos innovadores para la detección temprana de estos fallos continúa siendo un tema importante.

Como mencionan en su trabajo, Martínez et al. (2009), es de vital importancia disminuir lo más posible los fallos en los motores eléctricos porque estos suelen consumir la mayor parte de la energía eléctrica en el mundo ya que son los responsables de transformar la energía eléctrica a mecánica y cualquier mejora en su eficiencia se ve reflejada directamente en el ahorro de la energía. Por su parte, López (2021) menciona y estudia de forma general las principales averías que suelen presentar los motores de inducción como lo son fallas en los devanados del estator, en los núcleos magnéticos, en la jaula, en los rodamientos y en el eje, los cuales si no se detectan y corrigen de forma temprana pueden producir una avería catastrófica o bien reducir la vida útil del motor.

Según Navarro (2016) los rodamientos son elementos mecánicos que se encuentran en la mayoría de los motores de inducción, por lo cual es necesario conocer sus periodos correctos de funcionamiento y estos dependen principalmente de factores tales como la carga a la que están sometidos, la velocidad de trabajo, la lubricación, el montaje, la temperatura, las fuerzas exteriores generadas por desalineaciones, desequilibrios y hasta los materiales con los que son construidos entre otros; por esto es muy difícil determinar su vida útil de forma general para cada tipo de fallo. A lo largo del tiempo se han buscado diversos métodos que permitan abarcar el mayor número de fallos a estudiar,

como el método propuesto por Ramírez (2019) en el cual se evalúan 2 tipos de rodamiento (metálicos y cerámicos) con 3 diferentes condiciones de daño en la pista interior (sano, 3mm y 5mm) del rodamiento empleando como variables de análisis vibraciones y corrientes para posteriormente procesar dichas señales mediante indicadores estadísticos; realizando un proceso de reducción con las herramientas de PCA y LDA para concluir con un entrenamiento de un algoritmo denominado K-Nearest-Neighbor (KNN) sin embargo centran su estudio en un solo tipo de fallo para los rodamientos. Por su parte, Martínez (2021) emplea un método híbrido, compuesto de software y hardware, mediante el cual realiza la identificación de fallos en los rodamientos usando la técnica de LDA, acompañada de indicadores estadísticos empleados para caracterizar las señales de vibración de la cadena, llevando a cabo la clasificación de los fallos con una red neuronal; en este trabajo, se emplean tres tipos de rodamiento (metálico, híbrido y cerámico), pero solo se estudian 2 condiciones a analizar: el estado sano y el estado de fallo. Otro trabajo relacionado con las fallas en los rodamientos es presentado por Cureño (2021), en el cual centra su estudio en analizar un fallo en específico denominado erosión eléctrica teniendo como condiciones a estudiar 6 severidades de daño (sano, 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm) tomando como variable principal de análisis el flujo magnético disperso obteniendo resultados del procesamiento de diversas técnicas como la transformada de Fourier, la transformada Wavelet y LDA, aunque centra su investigación únicamente en los rodamientos metálicos.

El análisis de diversas gradualidades en los rodamientos es un rubro muy importante ya que esto permite clasificar el nivel de daño que tiene el rodamiento para así poder evitar una falla catastrófica, a pesar de que con flujo ya fue posible identificar algún tipo de fallo no ha sido posible poder diferenciar dos tipos de fallo a la vez. Por esta razón surge la necesidad de emplear la fusión de datos la cual ayudará a obtener información de diversos sensores y así dar un diagnóstico sobre el estado de los rodamientos con los procesamientos propuestos.

En los últimos años se han buscado alternativas para alargar la vida útil de los rodamientos, no solo centrándose en las fallas más comunes de los rodamientos si no también otros factores que terminan influyendo directamente en el motor como lo propuesto por Lugt (2022) donde se buscó obtener el factor de vida útil de la grasa empleada en los rodamientos, para así poder cuantificar las propiedades de esta en óptimo funcionamiento mediante la experimentación en diversos bancos de pruebas estandarizados; proporcionando una fórmula que define el promedio de uso ideal de la misma para de esta manera evitar un sobre uso y lograr una mayor eficiencia en los rodamientos. Dwyer (1999) realizó un estudio acerca de la contaminación en la lubricación que sufren los rodamientos de bolas por restos contenidos en el lubricante y demostrando las condiciones bajo las que dicho desgaste afecta de mayor o menor manera la composición del rodamiento. En dicho trabajo se llevó a cabo la contaminación del lubricante con partículas de diamante para actuar como medio abrasivo, donde se comprobó como existe una relación directa de desgaste entre las bolas de los rodamientos y la pista interior, llegando a repercutir en su correcto funcionamiento y acortando su vida útil. También Gajjal (2020) analizó el comportamiento de desgaste en distintos materiales de rodamientos mediante diversas condiciones de deslizamiento en seco con diferentes condiciones de funcionamiento. Espejo empleó una metodología basada en impregnar partículas de grafito en los rodamientos para posteriormente llevar a cabo micrografías electrónicas de barrido que permitieran observar los niveles de desgaste en cada condición analizada. Otra propuesta para la solución de la problemática de la correcta lubricación y los contaminantes es la de Espejo (2021), donde presentó un prototipo el cual permitió engrasar de forma automática y remota los rodamientos para así controlar de una manera eficaz el nivel de fricción necesario para cada campo de aplicación, además de eliminar la posibilidad de contaminación debido a las condiciones ambientales, o de la mano de obra, este prototipo contó con sensores ultrasónicos montados permanentemente en los rodamientos permitiendo monitorizar el estado de estos.

Una técnica que se ha empezado a probar en este ámbito tan importante buscando mejorar la eficiencia de las cadenas cinemáticas mediante sus componentes principales es el análisis por medio de señales acústicas como lo muestra Romero (2017) en donde propusieron un método de monitoreo de fallo sobre una cadena cinemática empleando la emisión acústica (EA) para distintos estados de falla en los diferentes componentes de la cadena cinemática propuesta como lo son (rodamiento dañado y una barra rota) logrando identificar mediante la transformada de Fourier (FFT) los armónicos de interés para la detección de la falla mecánica en los espectros de señales EA, aunque estudia una falla diferente a la de los rodamientos, no incluye algún otro tipo de rodamiento. Un método similar es el propuesto por Zulma et al. (2016) donde presentaron una metodología capaz de detectar fallas en rodamientos sin la necesidad de colocar ningún transductor en contacto directo con la máquina como con las técnicas convencionales, analizando señales de vibración capturadas con un acelerómetro piezoeléctrico y micrófonos omnidireccionales, procesando las señales obtenidas con el algoritmo de densidad espectral de potencia (PSD) el cual gracias a la diferencia de amplitudes permite detectar la presencia de daño en los rodamientos. Otro trabajo relacionado en este tema es la investigación desarrollada por Anselmo et al. (2020) donde presentaron un enfoque basado en la cuantificación del comportamiento caótico del rodamiento, desarrollando una técnica capaz de diagnosticar la presencia del fallo con la máquina operando en condiciones normales, para esto se empleó el método de análisis de señales basado en el caos usando la densidad de máximos (SAC-DM) mediante la señal de sonido emitida por el motor, esta técnica utiliza un algoritmo que cuenta los picos de la señal sonora en el dominio del tiempo para detectar el fallo esperado, sin llegar a estudiar algún nivel de gradualidad, simplemente diagnostica el estado sano o el fallo.

En base a lo consultado en los trabajos anteriores se puede observar que los motores de inducción juegan un papel fundamental en la composición de las cadenas cinemáticas para los distintos procesos de producción, por lo cual es de

gran interés mejorar la eficiencia de los mismos, por esta razón se han llevado a cabo diversos trabajos analizando sus componentes principales entre los cuales se encuentran los rodamientos, ya que forman parte de los elementos que más suelen verse afectados por distintos fallos. A pesar de que se cuenta con un gran número de trabajos teniendo como tema central el análisis de los rodamientos hasta el momento no se cuenta con un trabajo que centre su investigación en dos distintos fallos en un mismo análisis por lo cual brinda la oportunidad de contribuir de forma positiva con este trabajo; estos fallos serán en la pista exterior y la contaminación de la lubricación, los cuales son de gran importancia ya que son los que más suelen aquejar a los rodamientos de manera gradual, significativa y además son susceptibles de presentarse en la realidad de manera conjunta. Uno de los retos principales será que se tendrá que procesar una gran cantidad de información proveniente de diversos sensores, por lo cual se requerirán métodos adecuados para llevar a cabo la correcta discriminación de los datos.

1.2 Descripción del problema.

Una vez realizada la revisión de los antecedentes que se tienen acerca de este tema se encontraron y destacaron las siguientes problemáticas:

- Los motores son los responsables de consumir la mayoría de la energía eléctrica en el mundo, por lo tanto, sus fallos suelen verse traducidos en mayores consumos de esta energía.
- Los rodamientos son el elemento principal en donde se suelen presentar mayormente los fallos en los motores de inducción por lo cual es importante controlar aspectos de estos como lo son la lubricación, los desequilibrios, desalineaciones, sobre corrientes e incluso los materiales con los que están contruidos, ya que estos desencadenan fallos específicos como la fallo en la pista exterior y la contaminación en la lubricación.
- La mayoría de las investigaciones realizadas centran su estudio en uno o dos materiales con los que están contruidos los rodamientos, sin darle tanta importancia a los materiales cerámicos e híbridos; por otro lado

generalmente se induce solo un tipo de fallo a los rodamientos sin llegar a combinarlos, además que se cuentan con muy pocos trabajos reportados al respecto y por lo cual no se cuenta con un método eficiente que no sea invasivo y que resulte una buena propuesta para su empleo en la industria

- Dos de los principales fallos que más aquejan a los rodamientos son la contaminación en la lubricación y el fallo en la pista exterior, los cuales producen pequeñas perforaciones en su pista exterior, desgaste en las bolas y en las pistas internas, los cuales suelen ir aumentando su gravedad con el tiempo y no se cuenta con un trabajo que analice estos fallos graduales en los tres distintos tipos de materiales (metálico, cerámico e híbrido).
- Anteriormente en la literatura no se ha reportado la combinación de distintos tipos de señales de diagnóstico para la detección de fallos en los rodamientos, ya que se suelen emplear las señales de forma individual.

1.3 Justificación.

Para responder a los problemas planteados en las secciones anteriores, a continuación, se presentarán los aportes que se buscará tener en esta área de oportunidad tan importante para la industria, a través del desarrollo de este trabajo:

- En este trabajo se desarrollará un método de detección de fallos en los rodamientos que permita obtener información adicional del rodamiento que el fabricante a veces no proporciona o no se reporta en la literatura como los niveles de gradualidad de fallo, hasta qué punto se ve afectado por algún material ajeno, o los niveles de contaminación soportados por el mismo.
- Se someterá a los rodamientos a dos tipos distintos de fallo que suelen aquejar a los rodamientos (fallo en la pista exterior y contaminación en la lubricación) tratando de detectar y diferenciar los dos tipos de fallo a la vez.

- Se buscará obtener un método el cual permita la detección de estos fallos mediante el monitoreo en distintos componentes del motor empleando flujo magnético y corrientes.
- Se propondrá un método basado en la combinación de flujo magnético y corriente para lograr un diagnóstico más certero (que el que proporciona cada uno de estos de forma individual) de tal manera que se permita identificar el fallo de manera prematura permitiendo tomar acciones correctivas antes de que ocurra una falla catastrófica.
- Se llevará a cabo la experimentación sobre tres rodamientos compuestos de diferentes materiales (metálicos, cerámicos e híbridos) para así realizar una comparativa de cómo se ven afectados estos rodamientos por cada tipo de fallo a estudiar.

Debido a la gran cantidad de información que se obtendrá de las pruebas a realizar se emplearán herramientas de reducción de dimensionalidad (LDA y LDA) incorporando la fusión de un algoritmo genético con indicadores estadísticos para lograr una clasificación de las distintas gradualidades de los rodamientos en base al material del cual estén constituidos y a los fallos propuestos. Adicionalmente, el uso de algoritmos inteligentes (algoritmos genéticos y redes neuronales) permitirá la clasificación de los fallos.

1.4 Hipótesis y Objetivos

1.4.1 Hipótesis

La fusión de señales provenientes de sensores de flujo y corriente instalados en una cadena cinemática y su procesamiento mediante indicadores estadísticos y no estadísticos fusionado con un algoritmo genético, así como de métodos de reducción de dimensionalidad (ejemplo: LDA y PCA) y algoritmos inteligentes (redes neuronales), permitirá detectar y clasificar daños graduales como contaminación en la lubricación por contaminación de elementos externos

(polvos o rebabas), fallo en la pista exterior y su combinación en tres tipos diferentes de rodamientos: metálicos, cerámicos e híbridos.

1.4.2 Objetivo general.

Desarrollar una metodología para la detección de daños graduales por contaminación en la lubricación por contaminantes externos y fallo en la pista exterior en rodamientos, mediante la fusión de corriente y flujo, aplicando indicadores estadísticos y no estadísticos fusionados con un algoritmo genético, así como métodos de reducción de dimensionalidad y algoritmos inteligentes.

1.4.3 Objetivos específicos.

- Manufacturar las fallas graduales en los rodamientos 6203 (metálicos, cerámicos e híbridos) mediante maquinas herramientas y la inserción de residuos de material para realizar diferentes pruebas experimentales considerando los tres materiales, así como diversas gradualidades de fallo.
- Instrumentar la cadena cinemática en la que se experimentará con los rodamientos, mediante sensores de corriente y flujo residual además del sistema de adquisición para la obtención de los datos relacionados con la matriz de pruebas.
- Procesar los datos obtenidos de la experimentación, mediante índices y algoritmos genéticos, permitiendo seleccionar cuales son los mejores indicadores de fallo, métodos de reducción de dimensionalidad (LDA, LDA estadísticos y no estadísticos); para obtener los más significativos y realizar un análisis y comparativa de la información por sensores individuales y luego fusionándolos, para determinar los mejores resultados.
- Realizar la clasificación de las gradualidades de daños analizados, mediante la utilización de algoritmos inteligentes como alguna red neuronal

u otros, utilizando la información que mejores resultados entreguen las herramientas de reducción de dimensionalidad y/o fusión de datos.

- Validar mediante los datos experimentales la eficiencia de la metodología utilizando los datos que no se utilizaron para el entrenamiento y concluir en cuanto al aporte de gradualidad.

1.5 Planteamiento general.

El desarrollo del presente trabajo se visualiza en el esquema mostrado en la Figura 1, donde se muestran de manera resumida los pasos a seguir para lograr los resultados deseados donde primeramente se llevó a cabo la selección de los rodamientos que se emplearían para la experimentación los cuales fueron 3 tipos de rodamiento (metálico, cerámico e híbrido), para la manufactura de los fallos relacionados con fallo en la pista exterior se utilizó una fresadora de banco con la cual se realizaron 3 perforaciones de fallo a dichos rodamientos (1mm, 3mm y 5mm de diámetro) y para la falla de contaminación en la lubricación se contaminaron los rodamientos en su parte interior con polvo magnético, posteriormente se instrumentaron los sensores a utilizar sobre la cadena cinemática a utilizar (sensores de efecto hall para flujo y una pinza amperimétrica para corriente) la cual costa de un motor de 1hp de potencia, un alternador de uso automotriz el cual representa una carga del 30% de capacidad del motor y una banda de transmisión, después se procedió a llevar a cabo la experimentación y adquirir las señales deseadas mediante una tarjeta propietaria FPGA para su posterior procesamiento mediante las técnicas propuestas en este trabajo y finalmente la clasificación de dichas gradualidades mediante una red neuronal.

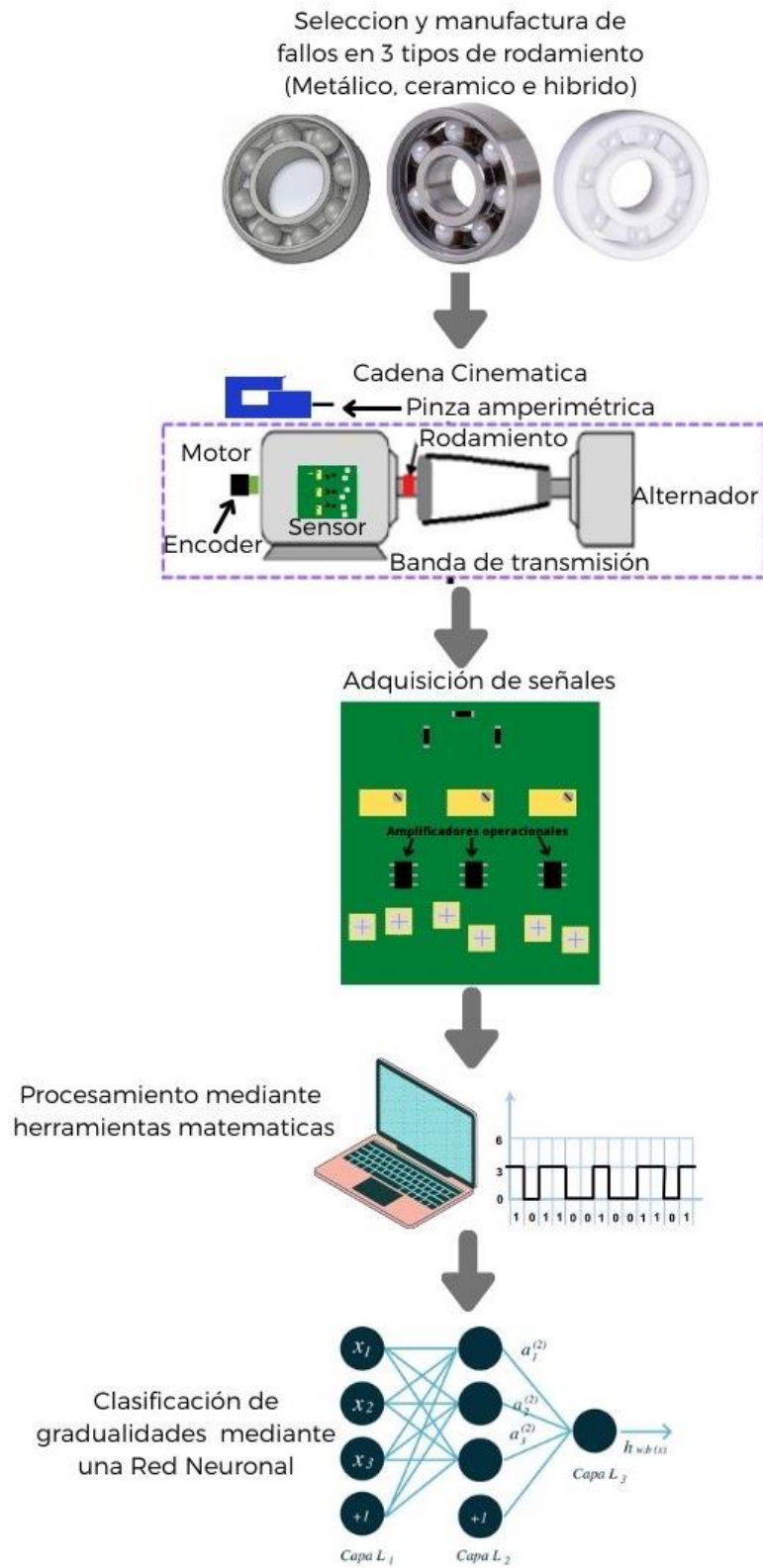


Figura 1. Diagrama de planteamiento general (Autoría Propia).

Capítulo 2. Fundamentación Teórica.

A lo largo de este trabajo se han enunciado las principales problemáticas que suelen afectar a los motores de inducción donde los rodamientos juegan un papel fundamental para el correcto funcionamiento de estos. Ya que existen diversas fallas que suelen aquejar a los rodamientos, esta investigación se centrará en 2 tipos de fallo específicos implementando un método novedoso de procesamiento basado en métodos estadísticos y no estadísticos, algoritmos genético, reducción de dimensionalidad de datos (LDA Y LDA), fusión de datos y logrando una clasificación mediante una red neuronal. Así que a lo largo de este capítulo se dará una explicación que permita observar la importancia de analizar este tipo de fallas, así como de cómo se llevarán a cabo los procesamientos propuestos.

2.1 Motor de inducción

Los motores de inducción o motores asíncronos reciben su nombre debido a que el voltaje en el rotor (que produce la corriente y el campo magnético del rotor) se induce en los devanados del rotor en lugar de estar físicamente conectados por cables. Es te tipo de motores solo cuentan con un conjunto continuo de devanados de amortiguamiento. Debido a estas razones la mayor característica distintiva de un motor de inducción es que no suele necesitar corriente de campo de corriente directa para que este funcione. Este tipo de máquinas suelen ser empleadas principalmente como motores y no como generadores ya que presentan muchas desventajas al ser empleadas de esta manera; por este motivo a este tipo de máquinas comúnmente se les conoce como motores de inducción (Chapman, 2012).

a) Componentes principales de un motor de inducción

Todas las máquinas asíncronas cuentan con un circuito magnético sin polos salientes ranurados en el estator y en el rotor, estos están sometidos a fuerzas

producidas por campos magnéticos giratorios los cuales darán lugar a fugas magnéticas. Por esta razón ambos componentes de la máquina se fabrican a base de ir apilando chapas delgadas de acero al silicio para reducir dichas pérdidas.

Como elementos principales de un motor se tienen al estator b) y al rotor a). En el estator se cuenta con un devanado que comúnmente es trifásico, pero en ciertas ocasiones en máquinas de baja potencia puede ser monofásico o bifásico. Mientras que en el caso del devanado del rotor siempre es polifásico; los dos devanados tendrán el mismo número de polos.

En el bloque de chapas que forman el circuito magnético del rotor se tiene una abertura central donde se coloca el eje o árbol del motor como se observa en la Figura 2 e). En la mayoría de las ocasiones en una de las puntas del eje se coloca un ventilador c) para facilitar que el motor se mantenga a una buena temperatura durante su funcionamiento. Posteriormente se tiene la envoltura de la máquina conocida como la carcasa g), la cual cuenta con 2 tapas laterales en donde se colocan los rodamientos d) lugar donde se aloja directamente el eje. De la misma manera para lograr una buena refrigeración la carcasa cuenta con aletas para facilitar este proceso, a un costado de la carcasa se puede encontrar la placa de características f) la cual cuenta con los datos de funcionamiento más importantes de la máquina. Por último, la caja de bornes h) se encuentra añadida a la carcasa donde van a terminar los extremos de los bobinados.

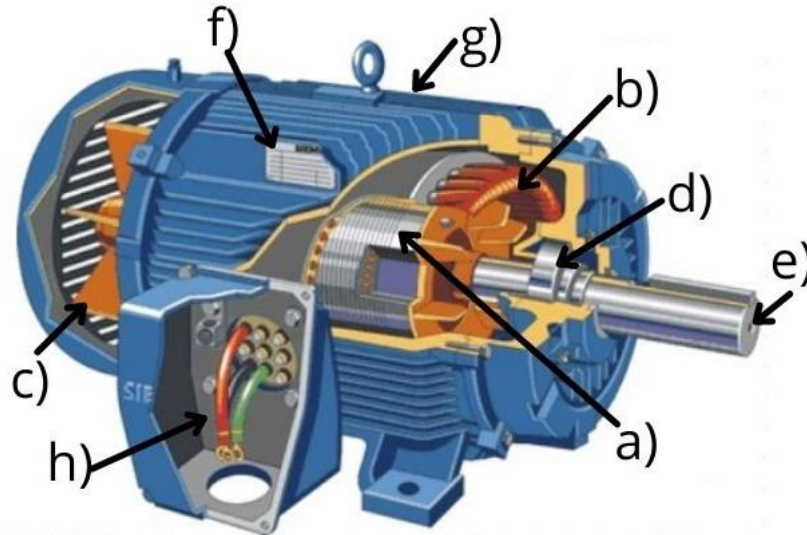


Figura 2. Partes del motor a) Rotor b) Estator c) Ventilador d) Rodamiento e) Eje f) Placa de datos g) Carcasa h) Caja de bornes (Autoría Propia).

En este tipo de motores prácticamente se tiene la misma física en el estator que una máquina síncrona, con la diferencia que el rotor tiene una construcción diferente. Existen 2 tipos diferentes de rotores en motores de inducción los cuales se enuncian a continuación (Rodríguez, 2015)

b) Rotor tipo jaula de ardilla

En la Figura 3 se muestra un ejemplo de los rotores tipo jaula de ardilla pertenecientes a los motores de inducción. Estos están constituidos principalmente por una serie de barras conductoras dispuestas dentro de ranuras labradas en la cara del rotor y puestas en cortocircuito en parte de sus extremos por grandes anillos de cortocircuito, teniendo en su parte central conductores de rotor incrustados para su correcto funcionamiento. Y es conocido de esta manera por su similitud a las ruedas de ejercicio de las ardillas (Chapman, 2012).

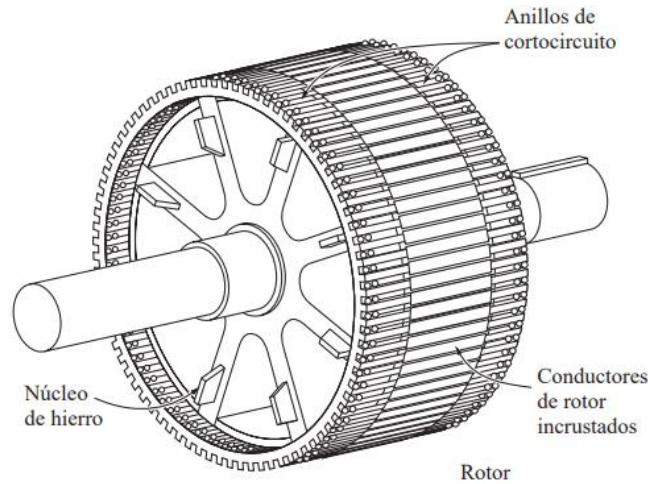


Figura 3. Rotor tipo jaula de ardilla (Chapman, 2012).

c) Rotor tipo devanado

Este tipo de rotor está compuesto por un conjunto completo de devanados trifásicos que son imágenes secuenciales de los devanados del estator. Estas tres fases de dichos devanados pertenecientes al rotor están conectadas en Y (estrella), y los extremos de los alambres del rotor están unidos a los anillos rozantes como se puede ver en la Figura 4. Por esta razón los rotores devanados tienen corrientes en el rotor accesibles en las escobillas del estator permitiendo examinar e insertar una resistencia extra en el circuito del rotor, esto es muy importante ya que permite al usuario modificar el par-velocidad del motor para distintas aplicaciones.

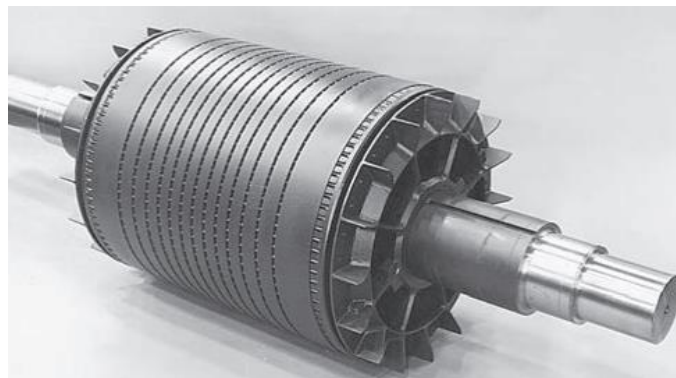


Figura 4. Rotor tipo devanado (Chapman, 2012).

d) Fallos principales en los motores

Los fallos en los motores suelen tener distintas causas entre las cuales se encuentran las fallas mecánicas, térmicas, eléctricas y ambientales. Las principales fallas de las máquinas eléctricas se pueden clasificar en términos generales como:

- Fallas del estator que resultan en la apertura o cortocircuito de uno o más devanados de fase del estator.
- Conexión anormal de los devanados del estator.
- Barra del rotor rota o anillos extremos del rotor agrietados
- Irregularidades estáticas o dinámicas del entrehierro
- Eje doblado (excentricidad dinámica) que puede resultar en un roce entre el rotor y el estator, causando daños graves al núcleo del estator y a los devanados.
- Devanado de campo del rotor en cortocircuito
- Fallas en la caja de engranajes
- Fallas en los rodamientos

De todos estos tipos de falla, los fallos relacionados con los cojinetes, las fallas del estator y las barras rotas son las que suelen ocurrir con mayor frecuencia, pero casi el 40%-50% de todas las fallas están relacionadas con los rodamientos de ahí la importancia de central este estudio de estos (Lebaroud et al. 2009).

e) Componentes frecuenciales de falla para fallos los motores eléctricos

A continuación, se mostrarán las frecuencias particulares de falla para cada tipo de fallo, al realizar un análisis de señal de corriente para motores de inducción (Rosero et al. 2011). Las cuales estarán representadas de la ecuación (1) a la (5):

- Fallo en rodamientos

$$f_{bng} = [f_s \pm f_{m_{i,o}}] \quad (1)$$

$$f_{i,o} = \frac{n}{2} fr \left[1 \pm \frac{bd}{pd} \cos\beta \right]$$

Donde f_s representa la frecuencia fundamental: 1,2, 3, ..., n es el número de bolas del rodamiento y $f_{i,o}$ son las frecuencias características de vibración fr es la velocidad mecánica del rotor en Hz, bd es el diámetro de bola, pd el diámetro de circunferencia media y B es el ángulo de contacto de bolas.

- Falla de excentricidad

$$f_{slot-ecc} = f_s \left[(kR \pm n_d) \left(\frac{1-s}{p} \right) + n_w \right] \quad (2)$$

Donde $k= 1, 2, 3, \dots$, R el número de ranuras rotor, n_d el orden de excentricidad de rotación el cual es 0 para excentricidad estática y 1, 2, 3, ... para excentricidad dinámica, s es el deslizamiento, p es el número de pares de polos y n_w es el orden de armónico de fuerza magnetomotriz del estator.

- Falla en barras y anillo del rotor

$$f_{bdb} = f_s \left[(k) \left(\frac{1-s}{p} \right) + s \right] \quad (3)$$

Donde $k/p= 1, 5, 7, 11, 13, \dots$

Las frecuencias anteriores son similares a las frecuencias de excentricidades, sin mencionar que el análisis de corriente no es capaz de obtener información importante cuando las barras rotas no están continuas.

- Cortocircuito en el devanado del estator

$$f_{sh} = f_s \left[(m) \left(\frac{1-s}{p} \right) + k \right] \quad (4)$$

Donde $k= 1, 2, 3, \dots$ y $m= 1,2,3, \dots$

- Torque de carga pulsante

$$f_{carga} = f_s \left[(1 \pm m) \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] \quad (5)$$

Donde $m= 1,2,3, \dots$

2.2 Rodamientos

Los rodamientos son elementos rodantes en forma circular, cuya tarea principal es ser el apoyo principal de los ejes o arboles de transmisión. Los rodamientos son una clase de apoyo o soporte de ejes, en los cuales la carga se transmite a través de elementos que están en contacto rodante y no deslizante, los cuales forman parte del subsistema de apoyo de las máquinas rotativas (Cortizo, 2003).

Como se muestra en la Figura 5 los rodamientos están compuestos por 2 anillos (la pista exterior y la pista interior), los elementos rodantes (bolas) y una jaula la cual contiene a los elementos rodantes dentro de él funcionando, así como una guía, todo esto protegido por sellos en sus dos caras. Estos rodamientos ofrecen gran precisión y baja fricción, por lo tanto, admiten velocidades de giro elevadas al mismo tiempo que reducen el ruido, el calor, el consumo de energía y el desgaste (Manual SKF,2019).

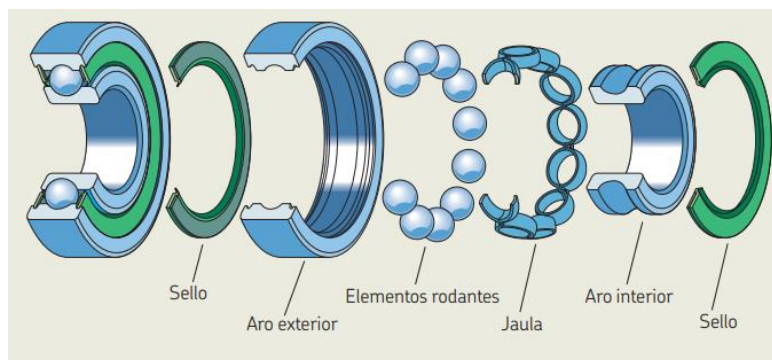


Figura 5.Elementos de un rodamiento (Manual SKF, 2019).

a) Fallas en los rodamientos

Los fallos que más suelen aquejar a los rodamientos son los producidos por algún corto circuito en el bobinado del estator, el paso de corriente por lo

rodamientos (erosión eléctrica), alguna rotura de barra o anillo, fractura o fisura de una bola, desgaste de pistas, fallos en la pista exterior e interior, cargas excesivas, grandes velocidades de trabajo, lubricación incorrecta, mala lubricación por contaminantes externos y hasta por el tipo de materiales que están contruidos.

En este tipo de rodamientos existen distintas clasificaciones, una de las principales es por el material que están contruido existiendo 3 tipos principales los cuales se mencionan a continuación.

b) Rodamientos metálicos

En este tipo de rodamientos todos sus componentes están contruidos por metal como se pueden observar en la Figura 6, excepto los sellos los cuales siempre son de hule. Los rodamientos metálicos son los que suelen tener mayor presencia en la industria por su bajo costo, sin embargo, sus componentes tienden a fatigarse de una manera muy acelerada. Pero en la actualidad aún son los más empleados, estos rodamientos contienen en su interior grasa que ayuda a tener un mejor contacto entre las bolas y las pistas tapados de ambos lados con los sellos de hule para evitar el contacto con agentes contaminantes (Manual SKF, 2019).



Figura 6. Rodamiento metálico (Manual SKF, 2019).

c) Rodamiento híbrido

En la Figura 7 se presenta el rodamiento híbrido, este tipo de rodamiento tiene la misma composición que los rodamientos metálicos con la diferencia que sus bolas son de un material cerámico. La necesidad de aumentar el rendimiento de los rodamientos se han buscado diversas alternativas y una de las mejores fue

mediante buscar un material adecuado con una densidad más baja que el acero ya que así se podían mantener las cargas centrifugas en un nivel bajo además de ofrecer ventajas adicionales. El material que ofrece estas ventajas para tareas exigentes es el nitruro de silicio. Este material cerámico con formula química Si_3N_4 es el más utilizado para los rodamientos por razones técnicas y económicas.

Las propiedades típicas del nitruro en los rodamientos que lo vuelven una excelente opción son: baja densidad (40% menos que la del acero), pequeña expansión térmica (29% de la del acero), alto módulo de elasticidad (151% más que la del acero), gran dureza (HV10 a 20 °C es 1.700 frente a 700 para los aceros para rodamientos), poca fricción, puede soportar altas temperaturas sin perder su dureza, resistencia a la corrosión, no es magnético y es un aislante eléctrico (Lewinschal, 1994).



Figura 7. Rodamiento híbrido (Manual NKE, 2017).

d) Rodamiento cerámico

Estos rodamientos tienen la particularidad de que todos sus elementos son del mismo material el cual es nitruro de silicio como lo muestra la Figura 8. Gracias a sus propiedades térmicas, mecánicas y tribológicas estos rodamientos se suelen emplear en aplicaciones donde se necesite una alta resistencia al desgaste, así como de procesos que sean muy demandantes. Además de estas ventajas este tipo de materiales suele tener otras aportaciones a rubros importantes como lo es las altas velocidades a las que puede trabajar y por su constitución son mucho más silenciosos que los tradicionales, tienen mayor durabilidad ya que el desgaste

térmico y el mecánico es prácticamente inexistente, poseen la propiedad de auto lubricación ya que por su pequeño coeficiente de fricción y buena suavidad de superficie este tipo de rodamientos no necesitan grasa y gracias a las propiedades de dicho material y su alta resistencia estos pueden evitar el daño producido por corrientes a los rodamientos (Riley, 2000).



Figura 8. Rodamiento cerámico (Manual CS, 2015).

2.3 Métodos de procesamiento

a) Indicadores estadísticos y no estadísticos

Este método suele ser muy utilizado ya que los indicadores estadísticos y no estadísticos extraen información de una señal sobre el comportamiento de un sistema en específico. En un sistema donde se tienen diferentes condiciones de operación se obtienen diversas señales con algunos parámetros estadísticos. El objetivo de obtener estas características para la detección de fallas es obtener parámetros que puedan reflejar de forma correcta la condición de funcionamiento y con eso poder lograr una clasificación de fallo en base a dichos patrones (Huerta et al., 2021).

A lo largo del tiempo se ha podido demostrar que existen diversas funciones estadísticas en el dominio del tiempo, como lo son la media, la raíz cuadrada media (RMS), la varianza y la desviación estándar se suelen emplear para lograr

identificar las diferencias entre una señal de vibración y otra en particular, pero también se pueden emplear otros indicadores más complejos como lo son la asimetría y curtosis a una señal, aunque no sea puramente estacionaria. El enfoque dado para el procesamiento de estas señales consiste en tratar la señal monitoreada como una variable aleatoria haciendo posible el cálculo de dichos indicadores. Los indicadores que se emplearan para llevar a cabo el procesamiento están contenidos en la Tabla 1 donde del indicador (6)-(20) X_i es la señal en el dominio del tiempo para la muestra $i= 1,2, \dots, N$, siendo N el número de puntos de datos(Jaen, 2021).

Tabla 1. Fórmulas empleadas para la aplicación de indicadores estadísticos.

Indicadores estadísticos tiempo-frecuencia	Ecuación matemática	
Media	$T_1 = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N X_i $	(6)
Valor máximo	$T_2 = \max (x)$	(7)
Media cuadrática	$T_3 = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (x_i)^2}$	(8)
Raíz cuadrada media	$T_4 = \left(\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N \sqrt{ x_i }\right)^2$	(9)

Desviación estándar	$T_5 = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (x_i - T_1)^2}$	(10)
Varianza	$T_6 = \left(\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (x_i - T_1)^2 \right)$	(11)
Factor de forma RMS	$T_7 = \frac{T_3}{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N X_i }$	(12)
Factor de forma SRM	$T_8 = \frac{T_4}{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N X_i }$	(13)
Factor de cresta	$T_9 = \frac{T_2}{T_3}$	(14)
Factor de latitud	$T_{10} = \frac{T_2}{T_4}$	(15)
Factor de impulso	$T_{11} = \frac{T_2}{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N X_i }$	(16)
Oblicuidad	$T_{12} = \frac{\sum[(x_i - T_1)^3]}{T_5^3}$	(17)
Kurtosis	$T_{13} = \frac{\sum[(x_i - T_1)^4]}{T_5^4}$	(18)

Quinto momento	$T_{14} = \frac{\sum[(x_i - T_1)^5]}{T_5^5}$	(19)
Sexto momento	$T_{15} = \frac{\sum[(x_i - T_1)^6]}{T_5^6}$	(20)

Indicadores no estadísticos

Existen indicadores basados en características no estadísticas que también proporcionan información importante que describe el comportamiento de la información a través del análisis de relaciones o cualidades presentes en los datos, siendo algunos de ellos la dimensión fractal de Katz (KFD) donde los fractales son formas geométricas tales que cuando se subdividen en partes, cada una de estas es una copia aproximada más pequeña que la original, dicha cantidad se utiliza como indicador, de cuando llena un fractal a un espacio, a medida que se aproxima a escalas cada vez más pequeñas o como medida de autosimilitud a la aparición de patrones en señales dentro del dominio del tiempo, calculado con la ecuación (21).

Para el cálculo de la dimensión fractal de Higuchi (HFD) se tiene la ecuación (22) la cual brinda un valor aproximado de la dimensión del gráfico de una función o serie temporal de valor real, el cual se obtiene mediante una aproximación algorítmica.

El parámetro de energía DWT es un indicador normalizado definido como la relación inversa entre la energía de descomposición de una señal de la DWT y la energía de la señal original de una ventana temporal dando como resultado decibelios, mostrando en la ecuación (23) la fórmula necesaria para efectuar su cálculo. Para la entropía Wavelet (S_w) se tiene la ecuación (24) la cual es una medida del grado de orden/desorden presente en una señal wavelet y proporciona información asociada a los procesos dinámicos relacionados con la fuente de la señal original. Y para finalizar se tiene la entropía de Shannon (H) la cual se conoce como la medida de la incertidumbre de una fuente de información, así como del ruido de un sistema, relacionándolo con la incertidumbre que existe en un experimento o en una señal aleatoria, para su cálculo se emplea la ecuación (25) (Díaz et al., 2023).

Tabla 2. Fórmulas empleadas para la aplicación de indicadores no estadísticos.

Indicadores estadísticos tiempo-frecuencia	Ecuación matemática	
Dimensión fractal de Katz (KFD)	$T_{16} = \frac{\log(L/a)}{\log(d/a)}$	(21)
La dimensión fractal de Higuchis (HFD)	$T_{17} = \sum_{m=1}^k L_m(k)$	(22)
Transformación de energía (DWT)	$T_{18} = 10 * \log \left[\frac{\sum_{j=N_b}^{N_s} \phi(j)^2}{\sum_{j=N_b}^{N_s} d_n(j)^2} \right]$	(23)
Entropía de Wavelet (S _w)	$T_{19} = - \sum_{j=m}^n \ln(pi)$	(24)
Entropía de Shannon (H)	$T_{20} = - \sum_{i=0}^{N-1} p(x_i) \log_2[p(x_i)]$	(25)

b) Análisis discriminante lineal (LDA)

En la mayoría de las ocasiones el LDA se suele definir como un algoritmo de extracción de características lineal supervisado, pero esta herramienta también se utiliza para la reducción de lineal de la dimensionalidad. El cual se usa para maximizar la relación que existe entre la varianza con distintas clases y también la relación que existe entre la varianza dentro de la misma clase, con el objetivo de lograr la mayor separación entre las características de ciertos conjuntos de cada clase; siendo el objetivo principal de esta técnica la proyección de cierto conjunto de datos formado por vectores dimensionales en un subespacio más pequeño mediante un mapeo lineal (Haddad et al., 2016).

El algoritmo empleado para la aplicación de LDA se describe a fondo a continuación mostrando los pasos principales para su correcta aplicación (Anowar et al., 2021).

Siendo Las entradas: $X \in \mathbf{R}^{n \times d}$ y las salidas: $Y \in \mathbf{R}^{n \times k}$ (Siendo \mathbf{R} todos los números reales)

a) Calcular el vector con las medias de cada clase

$$m_i = \begin{bmatrix} m_{w_i} \\ m_{w_i} \\ \vdots \\ m_{w_c} \end{bmatrix} \text{ para } i = 1, 2, \dots, c \quad (26)$$

b) Construir dos matrices de dispersión de acuerdo a la entrada (entre clases y dentro de clases)

- Matriz de covarianza dentro de las clases

$$S_w = \sum_{i=1}^c S_i \text{ donde: } S_i = \sum_{x \in D_i} (x - m_i)(x - m_i)^T \quad (27)$$

$$m_i = \frac{1}{n_i} \sum_{x \in D_i} x_k \quad (28)$$

Donde:

m = media de todas las clases

m_i = vector con las medias de cada clase

N_i = numero de muestras por clase

C = numero de clases evaluadas

- Matriz de Covarianza entre clases

$$S_B = \sum_{i=1}^c N_i (m_i - m)(m_i - m)^T \quad (29)$$

c) Calcular los Eigenvalores y los Eigenvectores de las matrices de dispersión

$$A_v = \lambda v \text{ donde: } A = S_w^{-1} S_B \quad (30)$$

d) Clasificar los Eigenvectores en orden descendente

- e) Formular una matriz M^{dxk} empleando los Eigenvalores
- f) Transformar la matriz de entrada X usando la matriz M para obtener el subespacio generado Y .

$$Y = X * W \quad (31)$$

$W = \text{Matriz de transformación}$ $X = \text{Datos originales}$

c) Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos, son una herramienta utilizada para la optimización combinatoria, la cual se desarrolló en la década de los 70 teniendo como principal autor Holland en 1975, estos algoritmos emplean principalmente los principios y definiciones de la evolución natural como normalmente se conoce mediante el mejoramiento de las características de cada individuo y como estas se van modificando a través del tiempo (López-Vargas et al, 2015).

De forma sencilla el funcionamiento general de los algoritmos genéticos se reduce a la selección de una población, la selección, la cruce y por último la mutación como se muestra en la Figura 9 ; pero para lograr tener una correcta clasificación se deben desarrollar tomando en cuenta las siguientes consideraciones; Las variables a utilizar se nombran como variables de diseño y se representan con cadenas binarias de tamaño definido las cuales representan genes naturales, de igual manera una agrupación de estos genes componen a un individuo, una cantidad finita de estos individuos conforma un cromosoma y cuando estos se juntas conforman una población; que primero se forma de manera aleatoria. Es ideal tener una cantidad significativa de individuos ya que esto permite abarcar la mayor parte de un espacio de diseño. Para lograr esto se busca hacer una distribución aleatoria de dichos individuos de manera que alguno o algunos de estos se coloquen cerca de algún valor optimo. Entonces estos individuos se seleccionan y se ejecuta una recombinación por medio de operaciones genéticas, cruzando bits entre individuos y mutaciones. Y tal y como ocurre en la naturaleza al mutar se pierden los eslabones débiles, de igual manera en este método la recombinación de la población seleccionada origina una nueva

población en la cual solo se incluyen los individuos con un valor óptimo y se eliminan los restantes, este proceso se repite de manera indefinida hasta que toda la población se asemeje de mayor manera al valor óptimo buscado (Yosimar,2014).

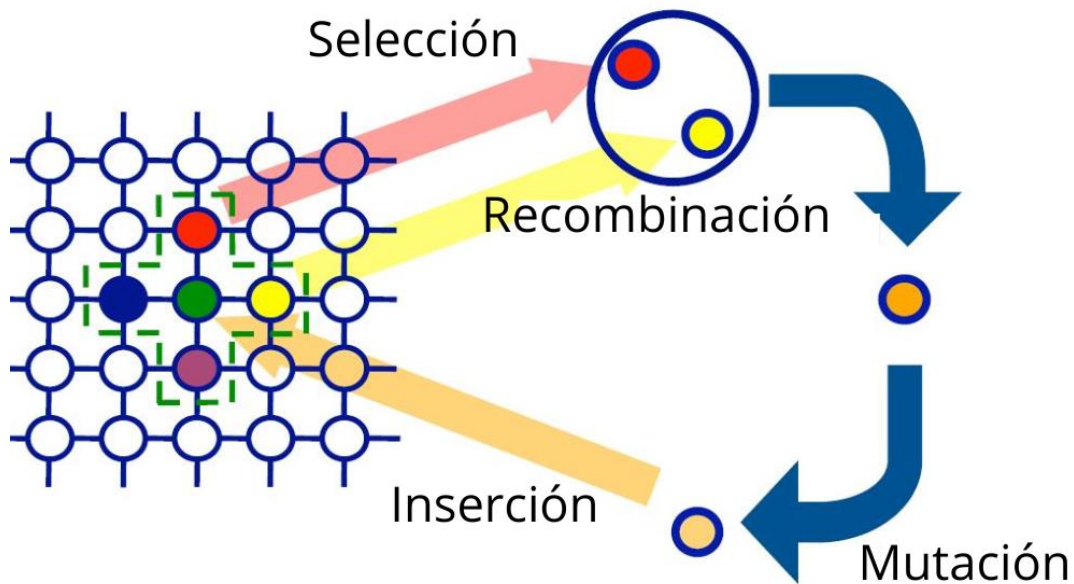


Figura 9. Método de aplicación de Algoritmos Genéticos (Algoritmos Genéticos, 2016).

Los principales elementos de los algoritmos genéticos utilizados en el desarrollo de dicho procedimiento son:

- Reproducción
- Cruzamiento
- Mutación
- Elitismo

La operación de reproducción consiste en la selección de individuos de la población actual sin realizarles ningún cambio, para formar parte de la nueva población esto con el fin de brindar la posibilidad de supervivencia a problemas ya desarrollados. A su vez, la operación de cruce consiste en crear nuevos descendientes a partir de los individuos anteriormente seleccionados (en este punto dichos individuos se convierten en padres), según un factor de cruzamiento se seleccionará uno o más puntos de cruce dentro del cromosoma de cada padre.

Por otro lado, la operación de mutación consiste en realizar modificaciones a un individuo seleccionado derivado de una probabilidad de mutación, modificando uno o más valores en su representación binaria, este factor debe ser seleccionado de forma correcta ya que si el factor es muy bajo no existirá un cambio significativo en los individuos y la población no tendrá diversidad, pero si este factor es muy alto la población final no tendrá relación alguna con la población inicial.

Para poder obtener soluciones optimas, se debe evaluar la población del algoritmo genético, dicha evaluación consiste en calcular el valor de aptitud de cada individuo buscando un mínimo o un máximo según sea el caso, Ya que el objetivo del algoritmo genético es buscar soluciones optimas en los problemas de optimización, el valor de aptitud es de suma importancia ya que permite separar a los mejores individuos de los peores.

Por lo tanto, las soluciones optimas se obtienen seleccionando a los mejores individuos de cada generación del proceso de optimización hasta terminar las iteraciones requeridas por el usuario (Renner, 2003).

d) Redes neuronales artificiales (ANN-Artificial Neural Networks)

Las redes neuronales son un sistema de procesamiento de datos que se basa diseño e infraestructura en un sistema neuronal como el de los seres humanos, logrando tomar decisiones en base a un análisis previamente realizado. Las clasificaciones realizadas mediante las redes neuronales se realizan aprendiendo de los datos que se obtienen mediante el procesamiento de las señales ya adquiridas con la experimentación o empleando algún modelo validado (Chayjan, 2010).

Existen diversas maneras de modelar una red neuronal artificial, dependiendo en propósito de esta, sin embargo, la mayoría de los investigadores optan por usar una red neuronal prealimentada con retro propagación (FFBP, feed forward back propagation neural network). Aunque todas estas técnicas suelen

compartir una estructura similar, para encontrar el tipo de red que más se amolde a la aplicación que se requiere es mediante un proceso de prueba y error, estos procesamientos de capacitación para las redes neuronales suelen ser mucha carga computacional. La estructura de la FFBP está dada por una capa de entrada, una o varias capas ocultas y una capa de salida (contenidas en cada capa se encuentran las neuronas como se muestra en la Figura 10. Para el entrenamiento de esta red se utiliza el algoritmo de back propagation (BP), en el cual la primera capa de salida va actualizando sus valores, dando un valor deseado para cada neurona de salida, a su vez el valor del coeficiente de peso es actualizado al igual que las reglas del aprendizaje dando así resultados correctos para problemas siguientes pero resultados erróneos para los demás problemas; durante este entrenamiento los cálculos se van llevando a cabo en la entrada de la red hacia la siguiente salida mandando los valores erróneos a las capas anteriores, este proceso se ejecuta capa por capa convirtiendo la salida de cada capa en la siguiente entrada (Camarena 2014).

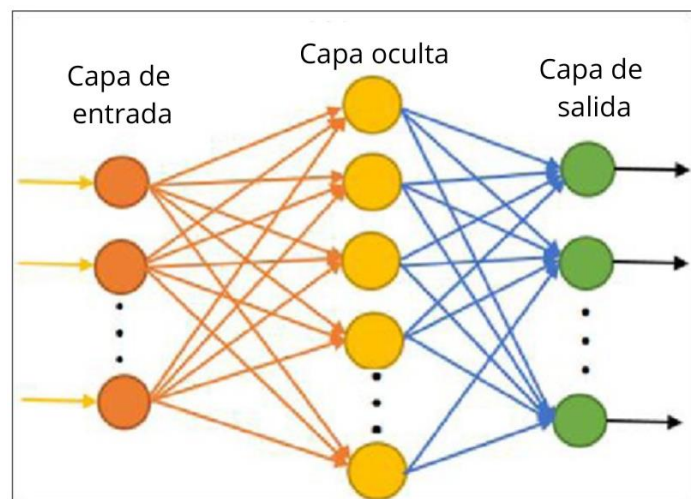


Figura 10. Estructura de la red neuronal (Fentaye, 2016).

Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se presenta el proceso metodológico que se llevó a cabo para la realización de este trabajo, mostrando en la figura 11 el diagrama general

correspondiente. Lo primero fue seleccionar los rodamientos que se emplearían como sujetos de prueba a lo largo de este estudio, posteriormente se manufacturaron los fallos sobre los rodamientos para fallo en la pista exterior y para la contaminación en la lubricación respectivamente, una vez seleccionados los fallos a estudiar se determinó cuantas repeticiones se llevarían a cabo y cuáles serían las condiciones de operación del motor. Para realizar la experimentación se montó un banco de pruebas que permitiera realizar los ensayos requeridos, sobre este banco de pruebas se ensamblaron los sensores de corriente y flujo magnético para poder adquirir las señales requeridas, junto con las tarjetas de adquisición basadas en FPGA (Field Programmable Gate Array) y se procedió a realizar la experimentación con los fallos propuestos. Una vez terminadas las pruebas sobre el banco de pruebas fueron almacenadas en un disco duro más señales adquiridas para su procesamiento. En la etapa de procesamiento lo primero que se realizó fue un remuestreo de las señales acompañado de una normalización matemática, aunado a esto se realizó el cálculo de 20 indicadores estadísticos y no estadísticos, para continuar con la aplicación de un algoritmo genético que permitiera encontrar cuales indicadores estadísticos brindaran mayor información, como penúltimo paso se aplicó una herramienta de LDA para tratar de reducir la dimensionalidad de los datos obtenidos; por último se entrenó una Red Neuronal Prealimentada para lograr dar un diagnóstico correcto entre los distintos estados de fallo con los que se cuentan.

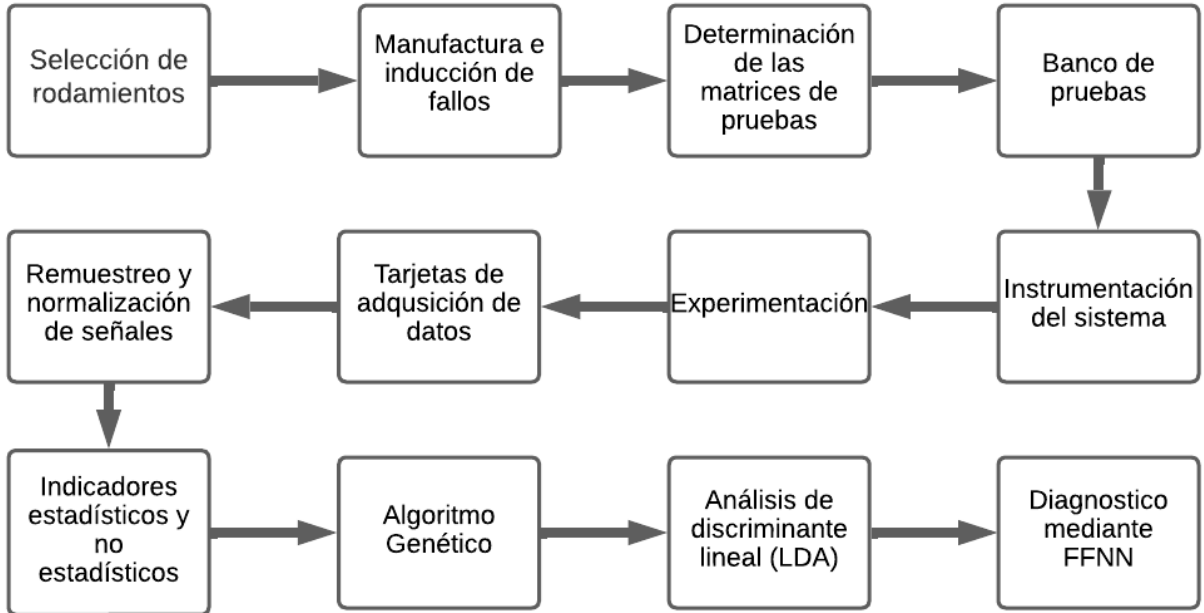


Figura 11. Diagrama general metodológico (Autoría Propia).

3.1 Selección de rodamientos

Para este trabajo se contó con 3 tipos de rodamientos, estos rodamientos tienen las mismas medidas y especificaciones de trabajo, a excepción del material por el que se encuentran contruidos. Se selecciono uno de los rodamientos más empleados en la industria el cual es el rodamiento 6203 el cual cuenta con un diámetro exterior de 40mm un diámetro interior de 17mm y 8 bolas.

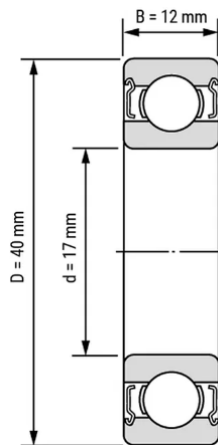


Figura 12. Esquema de rodamiento 6203(Autoría Propia).

Los distintos tipos de rodamiento son presentados a continuación:

- Rodamiento Metálico

Este rodamiento cuenta con la jaula exterior e interior construida a base de metal, al igual que la jaula que contiene a las bolas y a las bolas del mismo.



Figura 13. Rodamiento metálico empleado (Autoría Propia).

- Rodamiento Híbrido

El rodamiento híbrido al igual que el metálico cuenta con una jaula exterior e interior y una jaula en material metálico, pero las bolas de este rodamiento son de un material diferente denominado nitruro de silicio.



Figura 14. Rodamiento Híbrido empleado (Autoría Propia).

- Rodamiento Cerámico

Este último rodamiento está compuesto en su totalidad por un material llamado nitruro de silicio.



Figura 15. Rodamiento cerámico empleado (Autoría Propia).

3.2 Manufactura e inducción de fallos

Para la manufactura de los fallos fueron necesarias 2 distintas etapas, la primera fue para el fallo en la pista exterior el cual consistió en la perforación de la pista exterior de los rodamientos, para esto se empleó una fresadora de banco Bridgeport la cual se encuentra en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Campus San Juan del Río, así como 3 cortadores de carburo H87 "MASTER C de 3 distintos calibre (1mm,3mm y 5mm) los cuales cumplían con las especificaciones necesarias para poder inducir el fallo sobre los rodamientos debido a la dureza de los mismos; en la figura 16 se observa el proceso de perforación sobre los 3 distintos rodamientos.

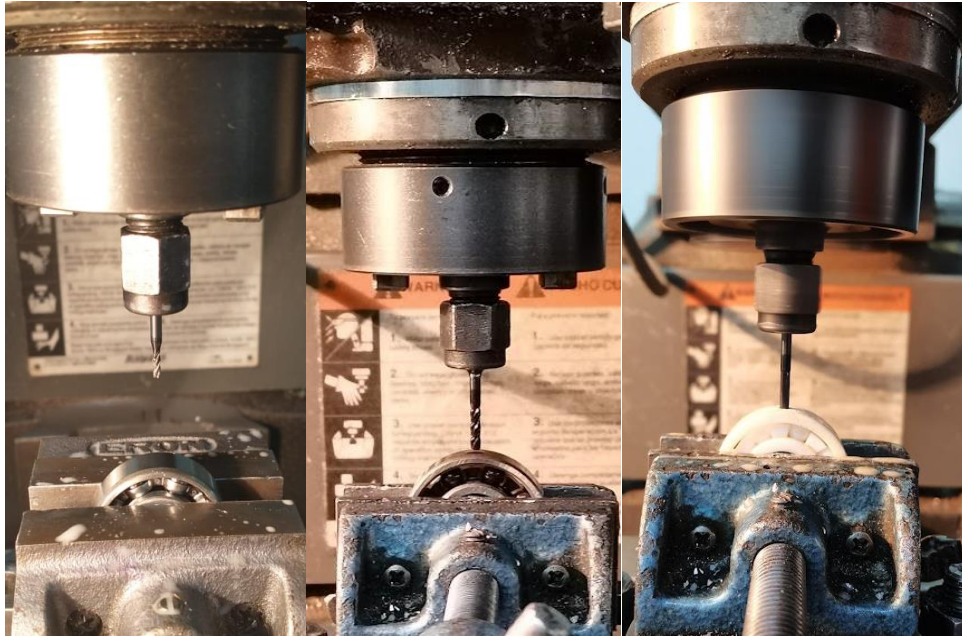


Figura 16. Manufactura de fallos en la pista exterior (Autoría Propia).

Como segunda etapa se realizó la contaminación en la lubricación para esto fue necesaria una báscula de precisión la cual permitiera cuantificar cuanta contaminación se estaría ingresando al rodamiento, para lo cual se seleccionaron 3 gramos de contaminación, este gramaje se combinaría con grasa nueva especial para rodamientos (BAT 3) y se colocaría nuevamente en los rodamientos, se tomaron los rodamientos ya perforados previamente y se retiraron los sellos de goma que contienen, se limpió la grasa en su totalidad para poder ingresar nuevamente la grasa pero ya contaminada y volverlos a sellar como se ejemplifica en la figura 17.



Figura 17 Inducción de fallo de contaminación en la lubricación (Autoría Propia)

3.3 Determinación de las matrices de pruebas

Para poder obtener una base de datos extensa y que permitiera obtener buenos resultados se seleccionaron cuatro distintas matrices de pruebas mostradas en las tablas siguientes; donde cada prueba tuvo una duración de 30 segundos de los cuales 10 segundos pertenecieron al estado transitorio y 20 segundo al estado estable (donde se basara este trabajo).

En la tabla 3 se muestran las repeticiones totales que se tendrán para los fallos en el rodamiento metálico teniendo como estados el caso sano, perforación en la pista exterior de 1mm, perforación en la pista exterior de 3mm y perforación en la pista exterior de 5mm, a su vez cada una de estas pruebas se realizarán en 4 distintas frecuencias de alimentación 5Hz, 15Hz, 50Hz y 60Hz, repitiendo cada una de estas pruebas 15 veces para lograr un estudio estadísticamente significativo.

Tabla 3. Matriz de pruebas para rodamientos metálicos (Fallo en la pista exterior)

Tipo de rodamiento	Estado de rodamiento	Frecuencias	Repeticiones Fallo en la pista exterior	No. Pruebas
Metálico	Sano	5 Hz con variador	15	60
		15 Hz con variador	15	
		50 Hz con variador	15	
		60 Hz con variador	15	
	1mm	5 Hz con variador	15	60
		15 Hz con variador	15	
		50 Hz con variador	15	
		60 Hz con variador	15	
	3mm	5 Hz con variador	15	60
		15 Hz con variador	15	
		50 Hz con variador	15	
		60 Hz con variador	15	
	5mm	5 Hz con Variador	15	60
		15 Hz con variador	15	
		50 Hz con variador	15	
		60 Hz con variador	15	

Posteriormente en la tabla 4 se observan las pruebas hechas para los rodamientos híbridos teniendo los mismos estados de fallo que el anterior (Sano, 1mm, 3mm, 5mm) y con ayuda de un variador de frecuencia 4 distintas frecuencias de operación (5Hz, 15Hz, 50Hz, 60Hz) realizando 15 repeticiones por frecuencia al final se obtienen 60 muestras por cada estado de fallo.

Tabla 4. Matriz de pruebas para rodamientos híbridos (Fallo en la pista exterior).

Tipo de rodamiento	Estado de rodamiento	Frecuencias	Repeticiones Fallo en la pista exterior	No. Pruebas
Híbrido	Sano	5 Hz con variador	15	60
		15 Hz con variador	15	
		50 Hz con variador	15	
		60 Hz con variador	15	
	1mm	5 Hz con variador	15	60
		15 Hz con variador	15	
		50 Hz con variador	15	
		60 Hz con variador	15	
	3mm	5 Hz con variador	15	60
		15 Hz con variador	15	
		50 Hz con variador	15	
		60 Hz con variador	15	
	5mm	5 Hz con Variador	15	60
		15 Hz con variador	15	
		50 Hz con variador	15	
		60 Hz con variador	15	

A continuación, se tiene la tabla 5 donde se presentan las pruebas realizadas con los rodamientos cerámicos, al igual que en las dos tablas anteriormente mostradas se tienen el mismo número de repeticiones para este tipo de fallo al igual que sus 4 estados de fallo (Sano, 1mm, 3mm, 5mm) y las 4 distintas frecuencias de alimentación (5Hz, 15Hz, 50Hz, 60Hz).

En la parte final de esta tabla se muestra la suma total del número de pruebas llevadas a cabo con los 3 tipos de rodamiento (metálico, híbrido y cerámico) donde por cada estado de fallo se realizaron 60 repeticiones teniendo 4 estados da un

total de 240 pruebas esto multiplicado por los 3 tipos de rodamientos que se tienen, se obtiene un total de 720 pruebas realizadas para el fallo de contaminación en la lubricación (perforación en la pista exterior.)

Tabla 5. Matriz de pruebas para rodamientos cerámicos (Fallo en la pista exterior)

Tipo de rodamiento	Estado de rodamiento	Frecuencias	Repeticiones Fallo en la pista exterior	No. Pruebas
Cerámico	Sano	5 Hz con variador	15	60
		15 Hz con variador	15	
		50 Hz con variador	15	
		60 Hz con variador	15	
	1mm	5 Hz con variador	15	60
		15 Hz con variador	15	
		50 Hz con variador	15	
		60 Hz con variador	15	
	3mm	5 Hz con variador	15	60
		15 Hz con variador	15	
		50 Hz con variador	15	
		60 Hz con variador	15	
	5mm	5 Hz con Variador	15	60
		15 Hz con variador	15	
		50 Hz con variador	15	
		60 Hz con variador	15	
Total de pruebas para fallo en la pista exterior				720

Por último, en esta sección, se tiene la tabla 6 donde se explica la combinación de fallos en los rodamientos que se experimentaron, teniendo la falla

en la pista exterior (Perforación en la pista exterior) y la falla de contaminación en la lubricación del rodamiento) al mismo tiempo, por el número tan elevado de pruebas se decidió acotar las frecuencias de alimentación a 2 casos (50Hz y 60Hz) para todos los materiales de rodamiento y para todos los estados de fallo los cuales fueron el estado Sano, el estado de falla en pista exterior de 3mm combinado con el estado de contaminación de lubricación con 3g de contaminación y la falla de pista exterior de 5mm combinado con la contaminación de la lubricación con 3g de contaminación; obteniendo así un total de 270 pruebas para esta última matriz de pruebas.

Tabla 6. Matriz de pruebas contaminación de la lubricación.

		Rodamiento Metálico			
		Frecuencia	50Hz	60Hz	
Estados de rodamiento	Sano		15	15	
	3mm y 3g		15	15	
	5mm y 3g		15	15	
		Rodamiento Híbrido			
Estados de rodamiento	Sano		15	15	
	3mm y 3g		15	15	
	5mm y 3g		15	15	
		Rodamiento Cerámico			
Estados de rodamiento	Sano		15	15	
	3mm y 3g		15	15	
	5mm y 3g		15	15	
		Total	135	135	270

3.4 Banco de pruebas

Para la realización de la experimentación se seleccionó una cadena cinemática compuesta de un motor de inducción marca WEG, cuyas especificaciones son mostradas en la tabla 7.

Tabla 7. Especificaciones motor WEG

Parámetros	Especificaciones
Tensión de alimentación	208-230/460 V
Velocidad nominal (60Hz)	3355 rpm
Potencia	1 Hp
Corriente nominal	2.83 A
Eficiencia nominal	75.5 %
Factor de potencia	0.87
Peso	9 kg

Este motor mostrado en la figura 18 está conectado a un alternador de uso automotriz mediante una banda de transmisión y un sistema de poleas, donde el alternador actúa como un 30% de la carga nominal del motor; y se encuentra alimentado por medio de un variador de frecuencia WEG SFW 08.

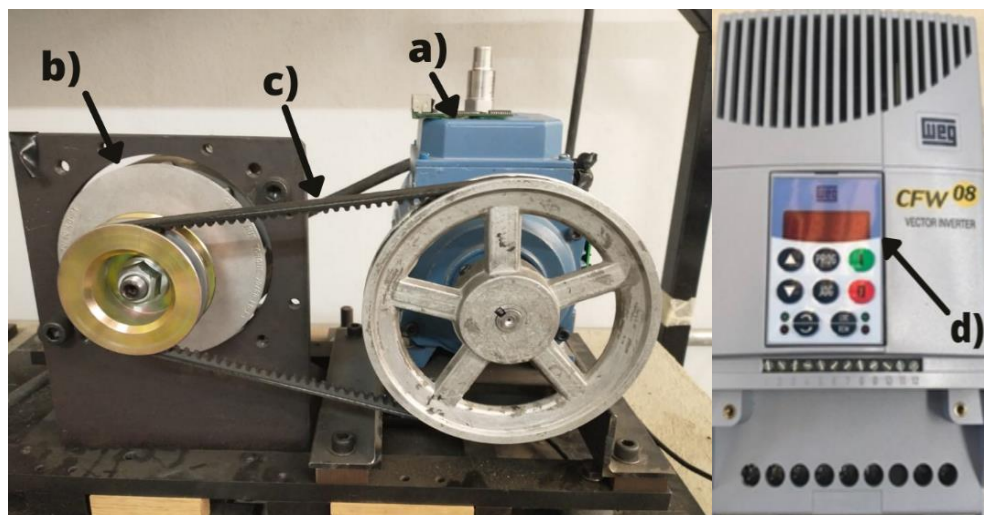


Figura 18 Cadena cinemática a) Motor de inducción b) Alternador c) Banda de transmisión d) Variador de frecuencia (Autoría Propia).

3.5 Instrumentación del sistema

Las variables de interés para este trabajo fueron 2: la corriente y el flujo magnético por lo tanto se colocaron 2 distintos sensores que permitieran el monitoreo de cada una de estas variables en la figura 19 se puede observar la pinza amperimétrica utilizada para el monitoreo de la corriente la cual es una pinza de corriente marca YHDC SCT013 con factor de conversión 30 A/1V clase 1 colocada en una de las líneas de alimentación del motor.



Figura 19. Sensor de corriente (Autoría Propia).

Para el monitoreo de flujo magnético se empleó un magnetómetro triaxial modelo BM1422AGMV el cual permite capturas las 3 señales de flujo magnético (flujo radial, flujo axial y flujo combinado) posicionado de manera frontal a la placa de datos del motor a una distancia aproximada de 15 centímetros como se muestra en la figura 20, esto para evitar que el sensor se sature

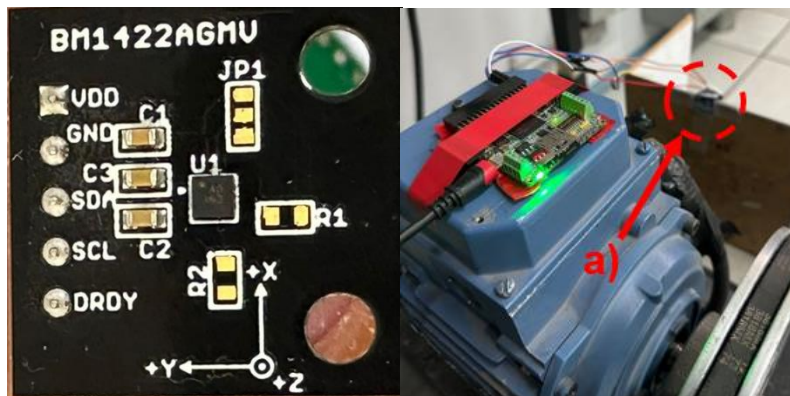


Figura 20. Sensor de flujo magnético a) Posición del magnetómetro (Autoría Propia).

3.6 Experimentación

Para la experimentación fue necesario desmontar el rotor del motor ya que en esta parte es donde se encuentran colocados los rodamientos, para esto es necesario acceder al motor desde la parte posterior del mismo desmontando el ventilador y extrayendo el rotor como se observa en la figura 21.

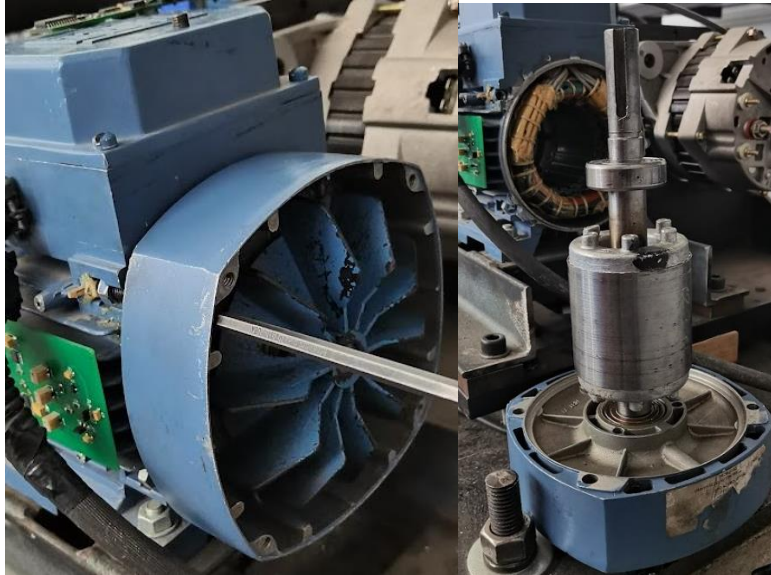


Figura 21. Proceso de desmontaje del rotor (Autoría Propia).

Una vez que se logra desmontar el rotor lo siguiente es quitar el rodamiento que está colocada para poder colocar los siguientes rodamientos a experimentar, este proceso se realiza con ayuda de un extractor en cual se coloca sujetando al rodamiento en la parte inferior y en la parte superior del eje para poder tener un apoyo firme como se hace en la figura 22.



Figura 22. Extracción del rodamiento (Autoría Propia).

Y como último paso se coloca el nuevo rodamiento sobre el eje del rotor, para esto se coloca el rotor en una prensa hidráulica como se ve en la figura 23 donde con ayuda de un tubo metálico se va deslizando el rodamiento sobre el eje, a presión uniforme.



Figura 23. Inserción del rodamiento en el rotor (Autoría Propia).

Por último, se vuelve a colocar el rotor dentro del estator y a colocar los tornillos, el ventilador y las protecciones del motor para poder poner alimentarlo y comenzar con la captura de datos.

3.7 Tarjetas de adquisición de datos

La adquisición de los datos de estudio se realizó mediante 2 tarjetas propietarias del grupo de investigación con el que colaboramos mostradas en la figura 24, las cuales están basadas en FPGA (Field Programmable Gate Array) con una se realizó la captura de las señales de flujo magnético (Axial, radial y combinado) y con la otra se capturaron las señales de corriente. Las señales fueron capturadas con una frecuencia de muestreo de 6000Hz para las señales de corriente y de 4000Hz para las señales de flujo magnético obteniendo como resultados matrices en .txt para su posterior procesamiento.

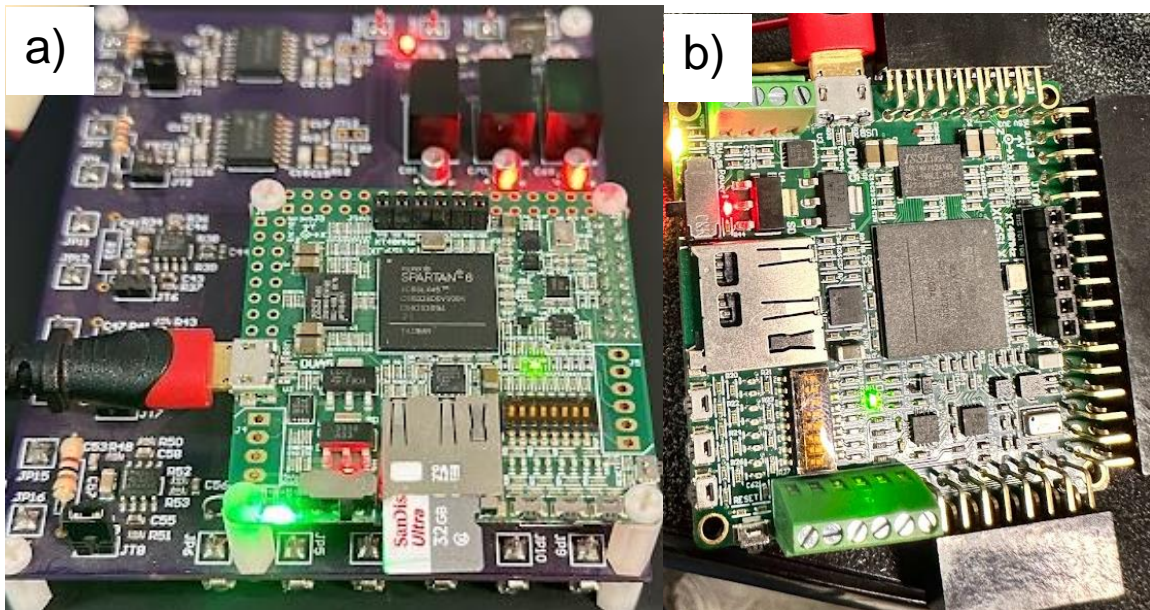


Figura 24. Tarjetas de adquisición de datos a) Corriente b) Flujo magnético (Autoría Propia).

3.8 Remuestreo y normalización de señales

Esta es la primera etapa de procesamiento después de haber adquirido las señales, lo primero que se realizó fue un remuestreo de las señales para uniformar el tamaño de las mismas (para en etapas posteriores poder realizar la fusión de ambas y no tener problemas de dimensionalidad), ya que las señales de corriente fueron adquiridas con una frecuencia de muestreo de 6000Hz y las señales de flujo con una frecuencia de 4000Hz. Dicho remuestreo se realizó de manera digital con una herramienta de Matlab denominada “*resample*” dejando ambas señales (corriente y flujo) a una frecuencia uniforme de 8000Hz.

El siguiente paso en esta etapa fue realizar una etapa de normalización para todas las señales, igual de manera digital con la herramienta “*range*”, acotando todas las señales en un rango de -1 a 1.

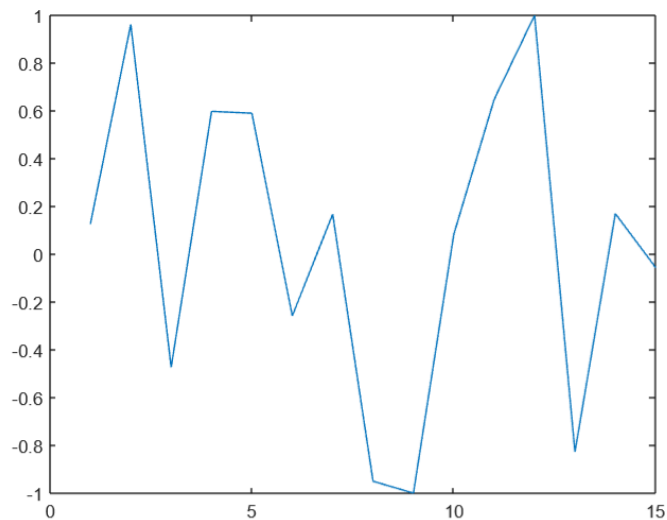


Figura 25. Señal normalizada (Autoría Propia).

3.9 Indicadores estadísticos y no estadísticos

Después de la normalización de las señales obtenidas se obtiene la señal cruda ya en un rango favorable para procesarla, a continuación en la figura 26 se muestra un diagrama general del procedimiento que se llevó a cabo para esta parte del procesamiento; al analizar la señal de manera visual se pudo apreciar

que la señal adquirida no tenía una cantidad de ruido significativa, y al probar implementar un filtro las señales capturadas a 5Hz se alteraban por lo que se decidió que no se colocaría ningún filtro, como la señal se capturo durante 30 segundos y se programó una rampa de arranque de 10 segundos, se tienen 20 segundos en el estado estable, los cuales fueron segmentados en ventanas de 1 segundo obteniendo así 20 ventanas por cada muestra, como se contaban con 15 repeticiones por cada fallo se multiplica el número de ventanas por el número de repeticiones, obteniendo la primer columna de nuestra matriz de resultados la cual contara con 300 muestras. Para el cálculo de indicadores se consideran las 4 señales capturadas (1 para corriente y 3 para flujo) y para cada una de estas señales se calculan los 20 indicadores estadísticos y no estadísticos mostrados en la tabla 1, obteniendo 80 indicadores para cada muestra y por último se tienen los 4 estados de fallo de cada tipo de rodamiento (Sano, 1mm, 3mm y 5mm) por lo cual este procesamiento se realiza para cada tipo de rodamiento a estudiar; para al final obtener una matriz resultante en 3 dimensiones de 300 muestras x 80 indicadores x 4 estados de fallo.

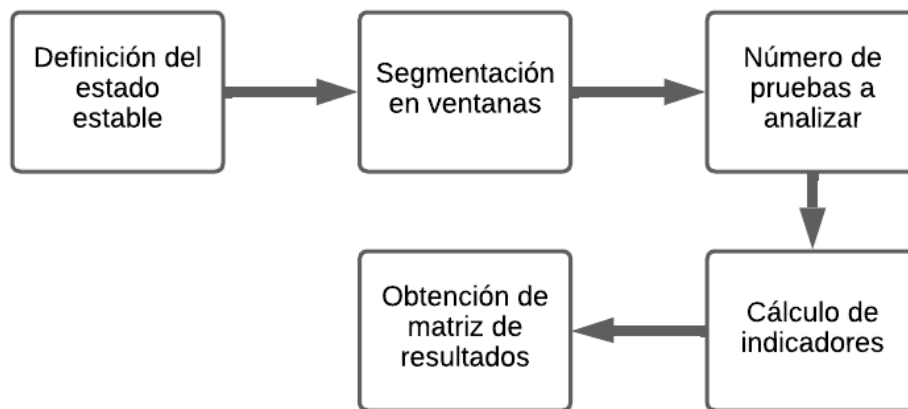


Figura 26. Diagrama general para el cálculo de Indicadores estadísticos y no estadísticos (Autoría Propia).

3.10 Aplicación de algoritmo genético

En la figura 27 se muestra un diagrama de flujo con las etapas desarrolladas para la aplicación del algoritmo genético, el cual se emplea como forma automática de seleccionar los indicadores estadísticos y no estadísticos que aportan información más relevante para lograr una correcta clasificación de los

fallos a estudiar, en la primer etapa se genera la población inicial de forma aleatoria para garantizar una diversidad de soluciones potenciales (en este caso fue de 20 la población inicial, la cual representa los 20 indicadores estadísticos y no estadísticos que se calcularon en la etapa anterior), posteriormente la población se evalúa en una función objetivo para poder encontrar los mejores individuos y sus valores de aptitud (se empleó una matriz de covarianza y de eigenvectores) necesarios para la siguiente etapa donde se comprueba si la población cumple con el criterio establecido para finalizar la ejecución del algoritmo, si la población no es considerada como solución se realiza un proceso de reproducción, cruzamiento y mutación de los individuos para obtener una nueva población, donde esta reproducción emplea a los mejores individuos utilizando un valor de probabilidad de cruce para seleccionar el orden de intercambio donde en este caso fue de 0.5; por último, la mutación modifica valores de posición específicos en función de un valor de probabilidad que se estableció de 0.2. Al terminar dicho ciclo, la nueva población se evalúa y prueban hasta que alcanza el criterio de parada, designando una solución óptima. Este bloque tiene como valor de entrada la matriz obtenida del cálculo de indicadores estadísticos (la cual contiene 1 señal de corriente, 1 señal de flujo axial, 1 señal de flujo radial y 1 señal de flujo combinado) por lo que a la salida nos entrega una matriz similar pero acotada a los indicadores estadísticos que nos entregan información más significativa para su clasificación.

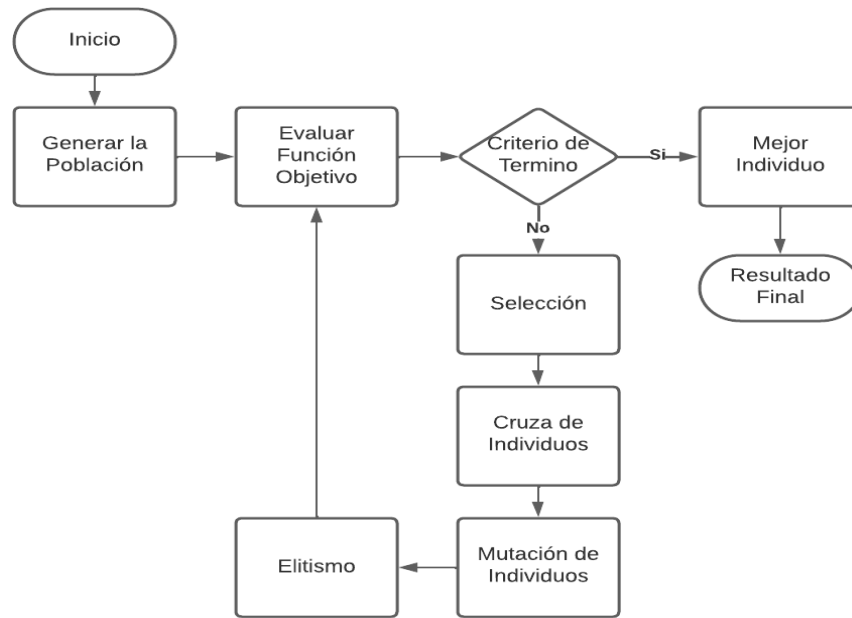


Figura 27. Diagrama general para el cálculo de Algoritmo Genéticos (Autoría Propia).

3.11 Análisis de discriminante lineal (LDA)

Como resultado de la etapa anterior se tiene un subconjunto de indicadores del conjunto original obtenido mediante el algoritmo genético (el cual proporciona los indicadores más significativos), dicho subconjunto se obtuvo para cada frecuencia de alimentación estudiada (5Hz, 15Hz, 50Hz y 60Hz) los cuales contaban con las 4 señales a analizar y los 4 estados de fallo propuestos.

Para continuar con el procesamiento fue necesaria la implementación de una técnica de reducción de dimensionalidad mostrada en la figura 28, para la cual fue seleccionado el análisis discriminante lineal el cual busca maximizar la separación lineal entre cada una de las clases seleccionadas para esto es necesario conocer cada una de las clases y asignarles una etiqueta, ya que esta técnica es Supervisada; después se procesa a calcular los vectores con las medias de cada clase, posteriormente se calculan las matrices de covarianza y se resuelven mediante el problema generalizado de eigenvalores y eigenvectores, al obtener dichas soluciones se procede a seleccionar los discriminantes lineales más significativos, ordenando de mayor a menor los eigenvalores y se selecciona el espacio a proyectar donde en este caso fue en 3D debido a el número tan grande de fallos a estudiar (Si bien en la primer clasificación realizada bastaría con

una reducción a 2D se buscó uniformar el método de diagnóstico por lo cual todos los análisis se realizaron con la misma metodología); teniendo como último paso la transformación de los datos al nuevo subespacio.

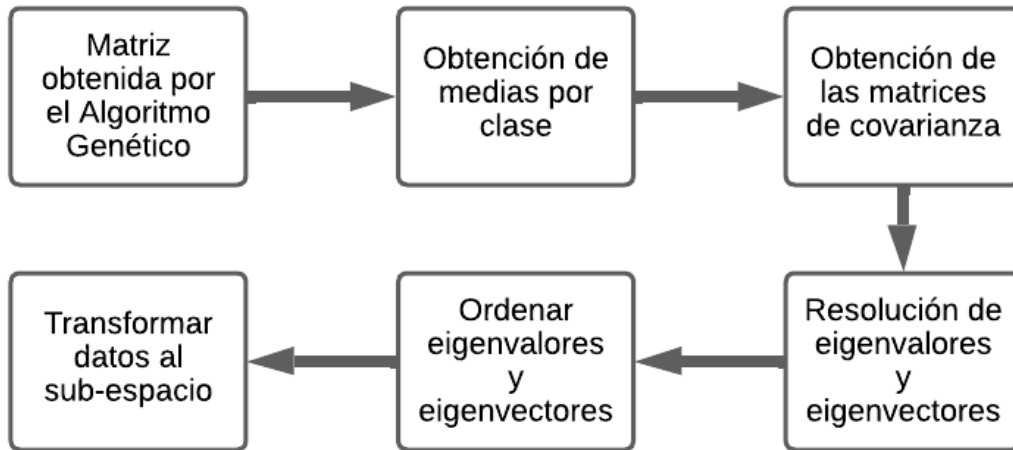


Figura 28. Diagrama general para el cálculo de LDA (Autoría Propia).

3.12 Diagnostico mediante FFNN

Para finalizar se realizó la implementación de un clasificador inteligente, donde se seleccionó una red neuronal prealimentada con retropropagación. Al tener diversos casos de estudio y diversas combinaciones de los mismos se entrenaron 3 distintas redes neuronales, las cuales se describirán a continuación.

La primera red neuronal mostrada en la figura 29, fue para poder clasificar los 4 estados de falla principales para fallo en la pista exterior (sano, 1mm, 3mm, 5mm) en cada uno de los materiales experimentados (metálico, híbrido y cerámico), esta red tenía como entrada el resultado obtenido por la LDA el cual estaba representado en 3 dimensiones por lo tanto la capa de entrada estaría constituida por 3 neuronas; se determinó que se contaría con 2 capas ocultas, la primera tendría 3 neuronas y la segunda 6 (esto ya que tras varios corrimientos se determinó que era la combinación que arrojaba mejores resultados); por último; en la capa de salida se tendrían 4 neuronas, cada una asociada a cada uno de los estados de falla que se busca clasificar. Esta red se emplea tres distintas veces, una para cada material de estudio. Todas las redes neuronales empleada se corrieron durante 1000 épocas y se utilizó la función “tansig” como

función de activación para la capa de entrada y la capa oculta y “softmax” para la capa de salida.

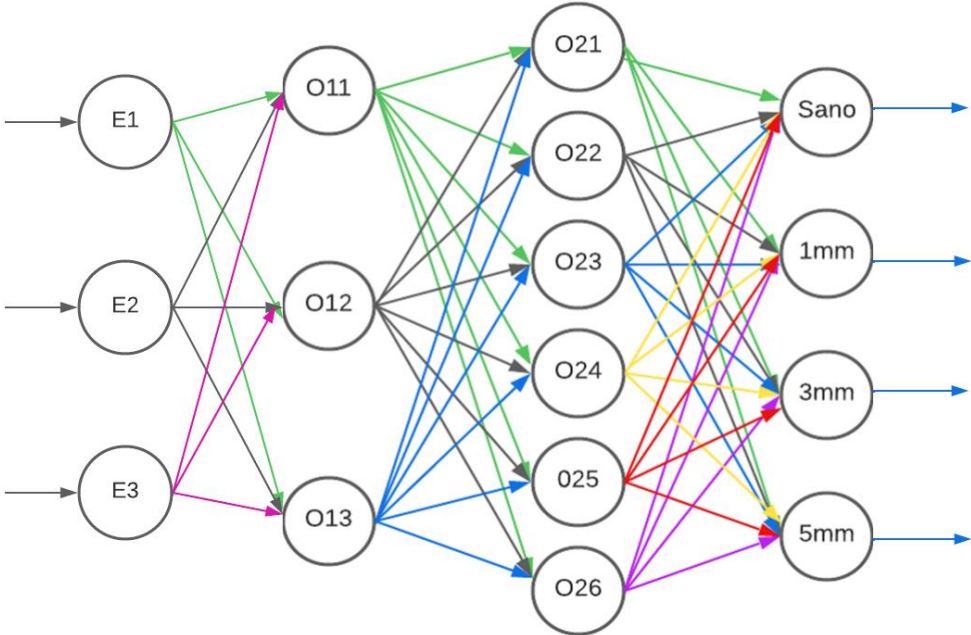


Figura 29. Diagrama de Red Neuronal para fallo en la pista exterior (Autoría Propia).

La segunda red neuronal que se programo es mostrada en la figura 30, la cual fue usada para discriminar los 12 estados de fallo al combinar todos los estados de fallo (Sano, 1mm, 3mm y 5mm) con los 3 materiales del rodamiento (metálico, híbrido y cerámico), teniendo una composición en la red neuronal similar a la anterior, teniendo 3 neuronas en la capa de entrada, 2 capas ocultas con 3 y 6 neuronas respectivamente y 12 neuronas en su capa de salida, una neurona para cada estado de rodamiento a analizar, utilizando una simbología del primer carácter del material del rodamiento junto con el estado de fallo (Metálico 1mm = M-1mm).

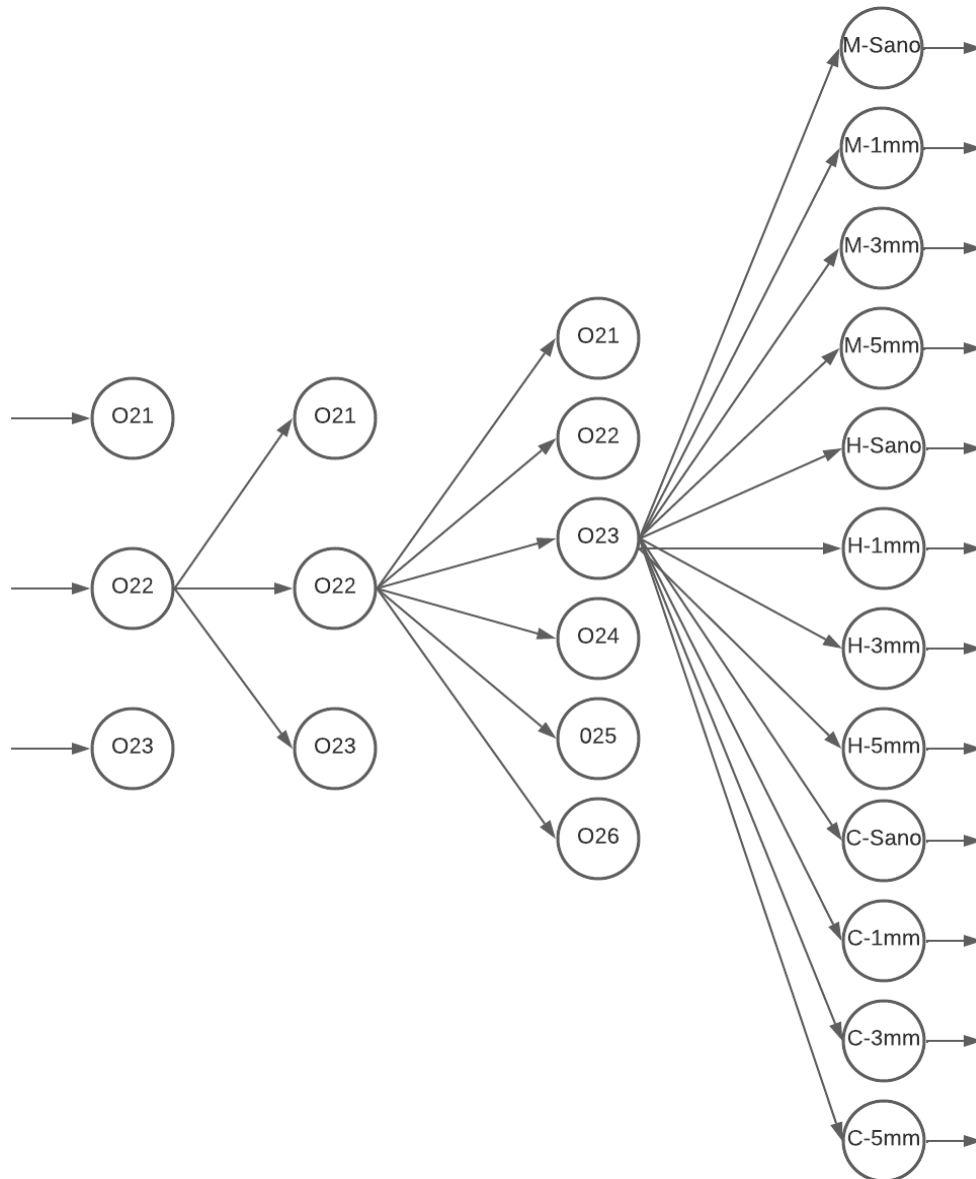


Figura 30. Diagrama de Red Neuronal para 12 estados de fallo en la pista exterior (Autoría Propia).

La última red neuronal utilizada para el diagnóstico de las fallas propuestas es la mostrada en la figura 31, la cual fue empleada para clasificar la combinación entre los fallos de contaminación en la lubricación y los fallos de pista exterior con las combinaciones expuestas en la tabla 5. La composición de la red neuronal es igual a las anteriores teniendo 3 capas de entrada (una para cada eje de la dimensión seleccionada), 2 capas ocultas la primera con 3 neuronas y las

segunda con 6, con diferencia en la capa de salida donde se cuenta con 9 neuronas permitiendo asociar cada una de ellas a cada estado de fallo propuesto, teniendo los 3 distintos fallos y materiales clasificados.

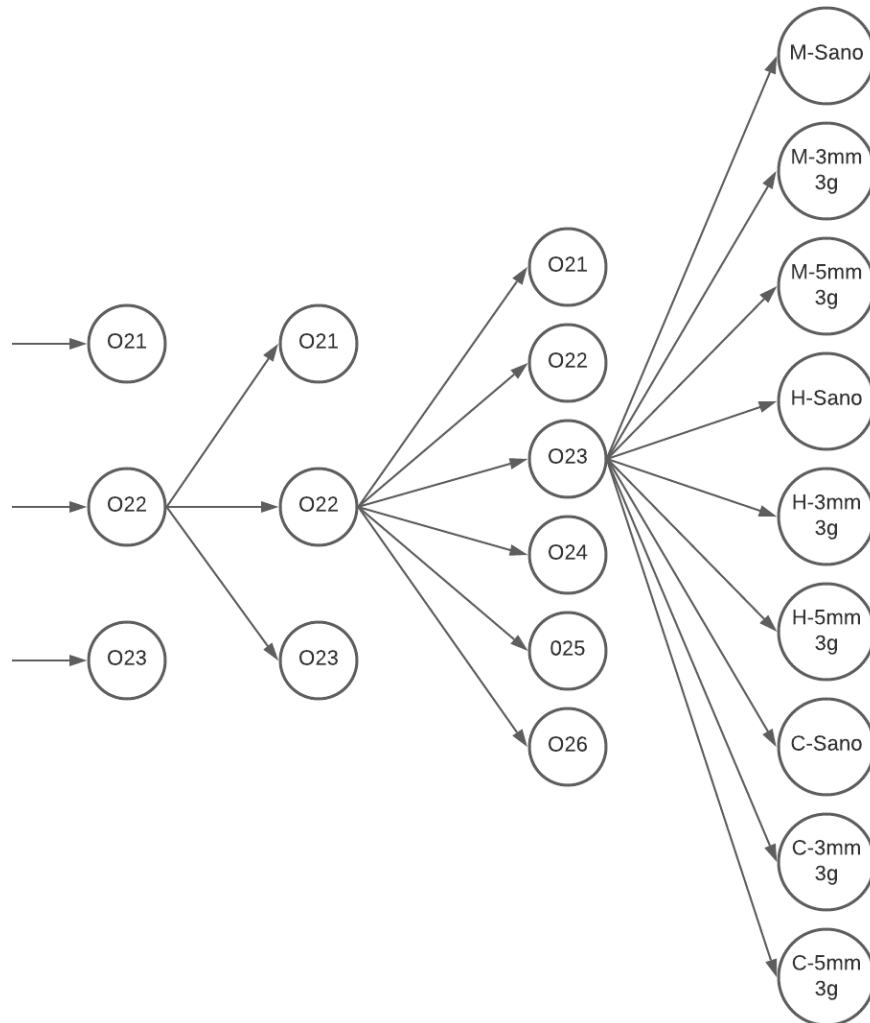


Figura 31. Diagrama de Red Neuronal para combinación de fallos en contaminación de la lubricación y fallo en la pista exterior (Autoría Propia).

Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se mostraran los resultados obtenidos después de haber realizado los pasos anteriormente mostrados en la metodología; empezando con mostrar algunos de los fallos inducidos sobre la pista exterior de los rodamientos utilizados así como la contaminación que se introdujo dentro de la grasa de estos,

continuando con las señales capturadas por las tarjetas de adquisición y los resultados obtenidos al término del procesamiento, mostrando los resultados de los clasificadores inteligentes aplicados.

4.1 Resultados de la inducción de fallos sobre los rodamientos

En la figura 32 se pueden observar algunas de las fallas que indujeron sobre los rodamientos teniendo los rodamientos metálicos con 1mm de diámetro de perforación, 3mm de diámetro de perforación y 5mm de diámetro de perforación y a su vez la combinación de ambas fallas teniendo el rodamiento de 3mm con 3 gramos de contaminación y 5mm de perforación con 3 gramos de contaminación.

Estos estados de falla fueron similares para los 3 materiales con los que se contaba teniendo la perforación del rodamiento híbrido en 1mm, 3mm y 5mm junto con la combinación de ambos fallos con una contaminación en la grasa de 3 gramos en el rodamiento de 3mm y con una contaminación de 3 gramos en el rodamiento de 5mm.

Por último, se realizaron los mismos fallos sobre los rodamientos cerámicos teniendo una perforación en la pista exterior de 1mm, 3mm y 5mm; así como la contaminación de 3 gramos en los rodamientos perforados con 3mm y 5mm.

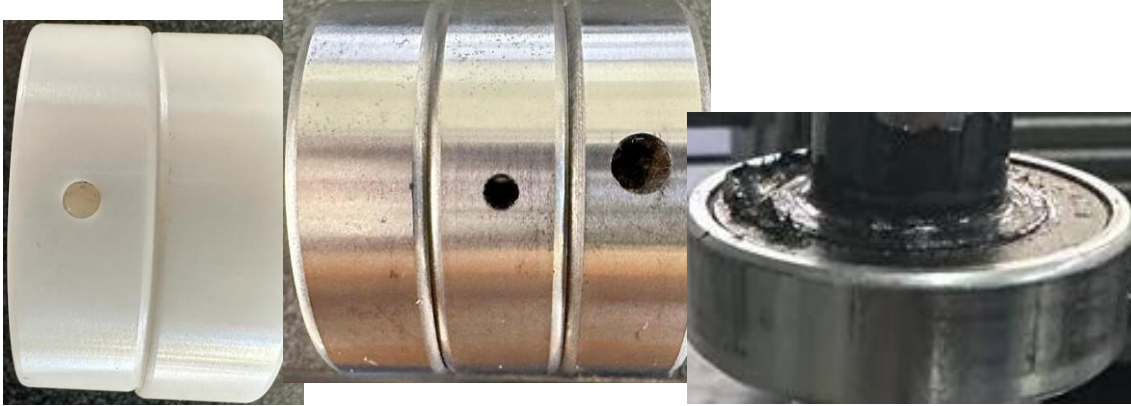


Figura 32. Resultados de inducción de fallo (Autoría Propia).

4.2 Señales obtenidas mediante las tarjetas de adquisición

A continuación, en la figura 33 se muestran las gráficas obtenidas de las señales de corriente y flujo magnético sin ningún procesamiento, con los rodamientos metálicos, para el estado sano con una frecuencia de 60Hz.

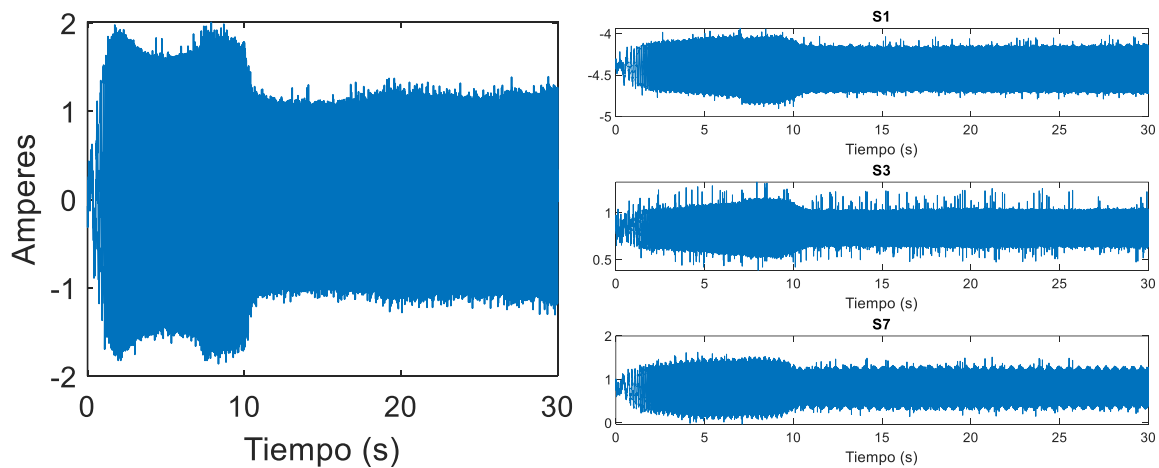


Figura 33. Señales adquiridas estado sano 60Hz (Autoría Propia).

En la figura 34 se tienen las gráficas que representan las señales de corriente y flujo magnético para el estado de fallo de 1mm de perforación en la pista exterior con una frecuencia de 60Hz para el rodamiento metálico.

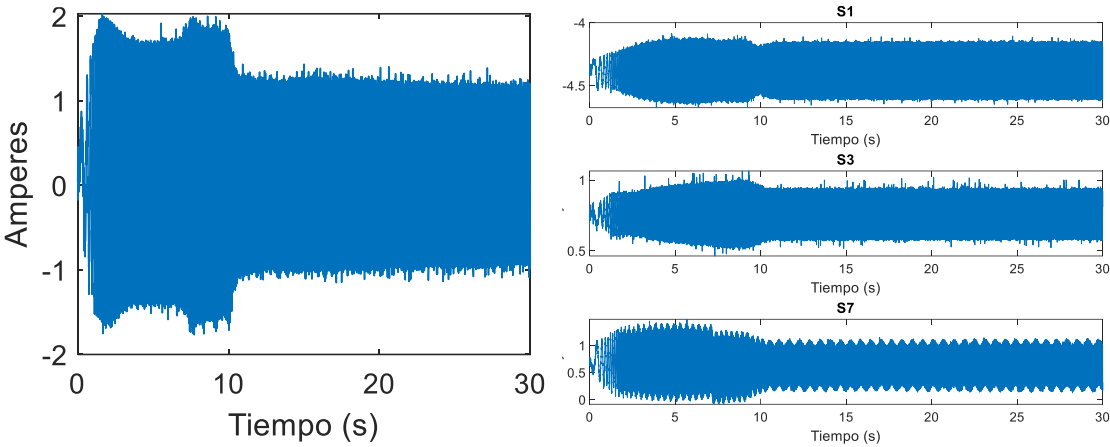


Figura 34. Señales adquiridas estado de 1mm-60Hz (Autoría Propia).

Posteriormente se tienen en la figura 35 las señales obtenidas de las señales de corriente y flujo magnético para la misma frecuencia de operación 60Hz, para el estado de fallo de 3mm de perforación en rodamiento metálico.

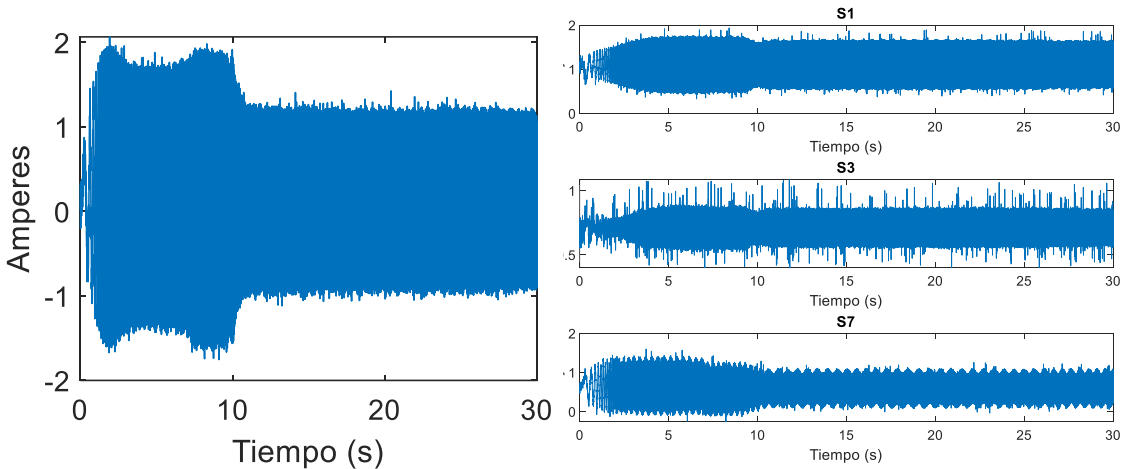


Figura 35. Señales adquiridas estado de 3mm-60Hz (Autoría Propia).

Para finalizar esta sección se tiene la figura 36 donde son mostradas las gráficas de corriente y flujo magnético para el rodamiento metálico con perforación de 5mm y frecuencia de alimentación de 60Hz.

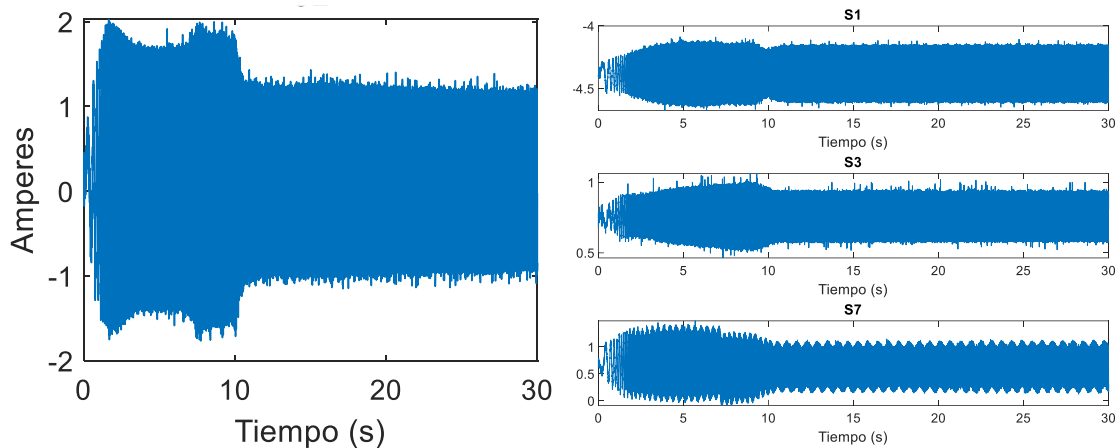


Figura 36. Señales adquiridas estado de 5mm-60Hz (Autoría Propia).

Estas señales crudas mostradas anteriormente, nos permiten apreciar de manera visual y práctica, como no existe una diferencia significativa entre la señal del estado sano y las distintas señales de fallo, lo mismo ocurre para las otras frecuencias de operación (5Hz, 15Hz y 50Hz) y para los demás materiales de rodamiento (Híbrido y cerámico), por lo cual no se consideró necesario mostrar las otras señales ya que no nos proporcionar información suficiente para lograr una clasificación entre los estados de fallo. Por lo que fue necesario implementar los procesamientos mostrados a continuación.

4.3 Clasificación de fallos

En la figura 37 se muestra un diagrama general del procesamiento llevado a cabo para la clasificación de fallos en los rodamientos relacionados con la pista exterior, la contaminación y la combinación de ambos, comenzando por las señales adquiridas, 1 para corriente y 3 para flujo magnético para posteriormente obtener los indicadores estadísticos y no estadísticos obteniendo una matriz con las dimensiones mencionadas anteriormente, después se aplicó el algoritmo genético el cual reduce la dimensión de la matriz obtenida con los indicadores debido a que solo se seleccionó el flujo magnético para realizar la clasificación de los fallos (ya que es el que más información aporta), y por los indicadores que serán seleccionados por el algoritmo genético (los que mayor información aportan

para una correcta clasificación), para por ultimo emplear la red neuronal prealimentada, logrando 4 distintas clasificaciones:

- Para 4 estados de fallo de pista exterior (Sano, 1mm, 3mm y 5mm) para los 3 distintos materiales empleados (metálico, híbrido y cerámico).
- Para 12 estados de fallo de pista exterior, combinando los 4 estados de fallo de cada rodamiento junto con los 3 materiales estudiados.
- Para 9 estados de fallo combinando los fallos de pista exterior y de contaminación teniendo un estado sano para cada material de rodamiento, un estado de fallo de 3 gramos de contaminación con 3mm de perforación y un estado de fallo de 3 gramos de contaminación con 5mm de perforación (Igualmente para cada material de rodamiento).
- Para 5 estados de fallo, separando los fallos de pista exterior y contaminación al mismo tiempo teniendo el estado sano, 3mm, 5mm, 3mm/3g y 5mm/3g.

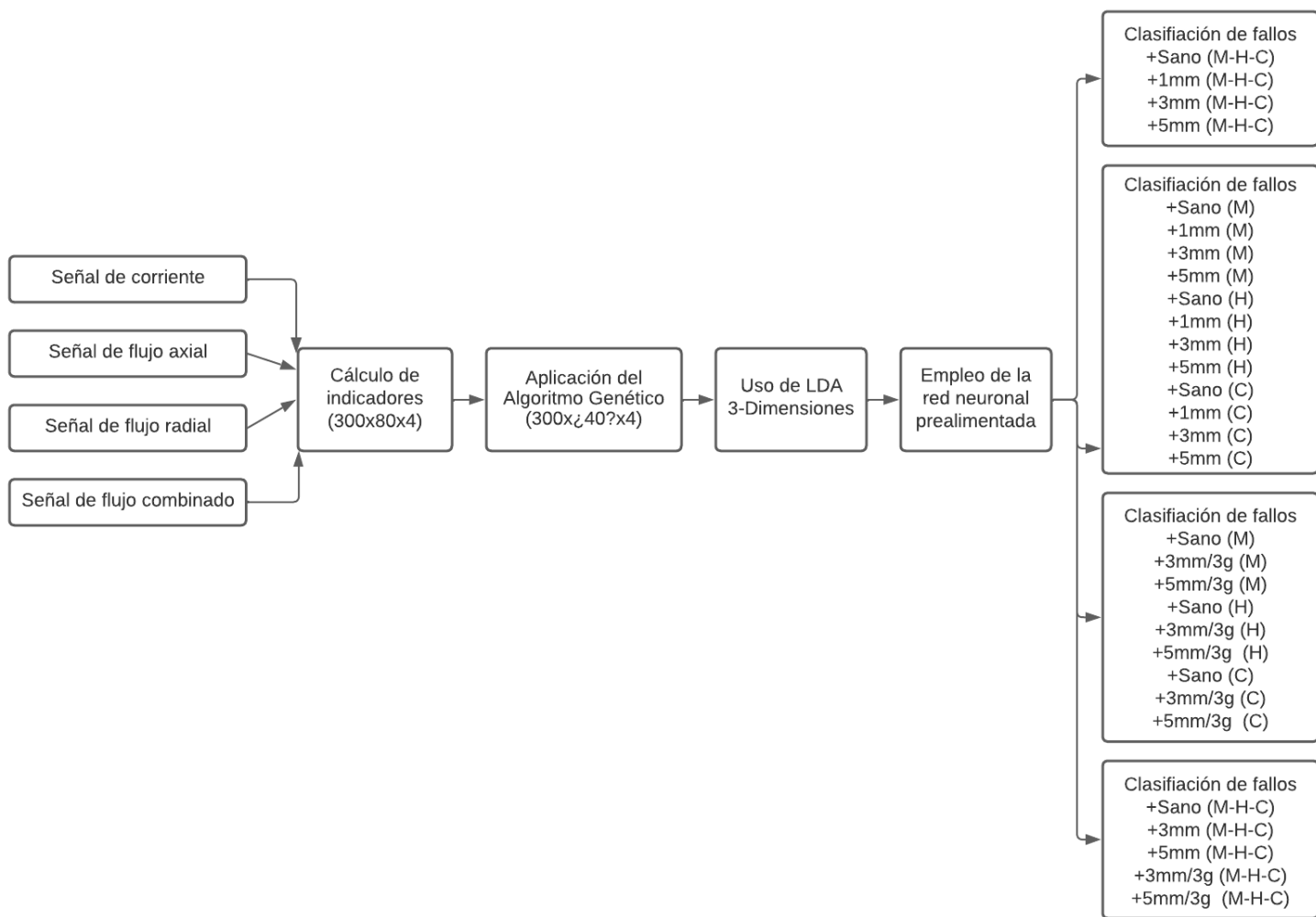


Figura 37. Diagrama general del procesamiento (Autoría Propia).

4.4 Clasificación de fallos para rodamiento metálico

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos después de haber aplicado la metodología propuesta anteriormente junto con la primera red neuronal mostrada con las 4 frecuencias de fallo a estudiar.

4.4.1 Rodamiento metálico-60Hz

En la figura 38 se muestra la gráfica en tercera dimensión obtenida por el uso de LDA para la corriente eléctrica donde se observa como la mayoría de los estados de fallo están prácticamente combinados sin permitir alguna clasificación de los mismos.

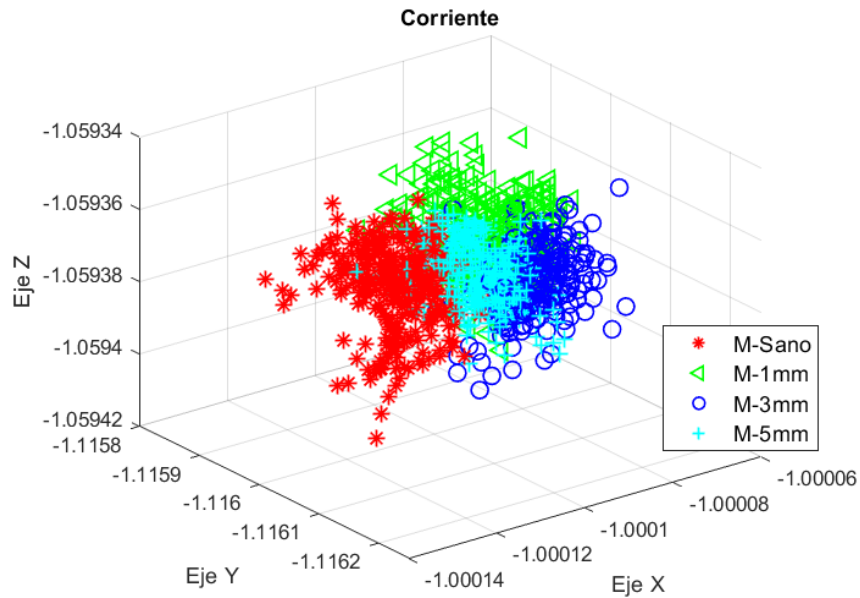


Figura 38. LDA para corriente 60Hz (Autoría Propia).

Continuando se puede observar en la figura 39 la matriz de confusión resultante de la aplicación de la primera red neuronal propuesta anteriormente, donde se confirma lo visto en la gráfica anterior donde solo se logra un 60% de correcta clasificación para los estados de falla.

Matriz de Confusión

Clases de Salida	1	53 14.7%	5 1.4%	8 2.2%	16 4.4%	64.6% 35.4%
	2	6 1.7%	74 20.6%	8 2.2%	12 3.3%	74.0% 26.0%
	3	18 5.0%	1 0.3%	47 13.1%	13 3.6%	59.5% 40.5%
	4	13 3.6%	10 2.8%	27 7.5%	49 13.6%	49.5% 50.5%
		58.9% 41.1%	82.2% 17.8%	52.2% 47.8%	54.4% 45.6%	61.9% 38.1%
	1	2	3	4		
	Clase Objetivo					

Figura 39. Matriz de confusión para corriente 60Hz 1) Sano 2) 1mm 3) 3mm 4) 5mm (Autoría Propia).

Posteriormente se tiene la figura 40 con la gráfica de LDA con el flujo magnético axial, se seleccionó esta señal de flujo ya que es la que históricamente ha dado mejores resultados, además de qué manera visual es la que mejor logra separar los distintos estados.

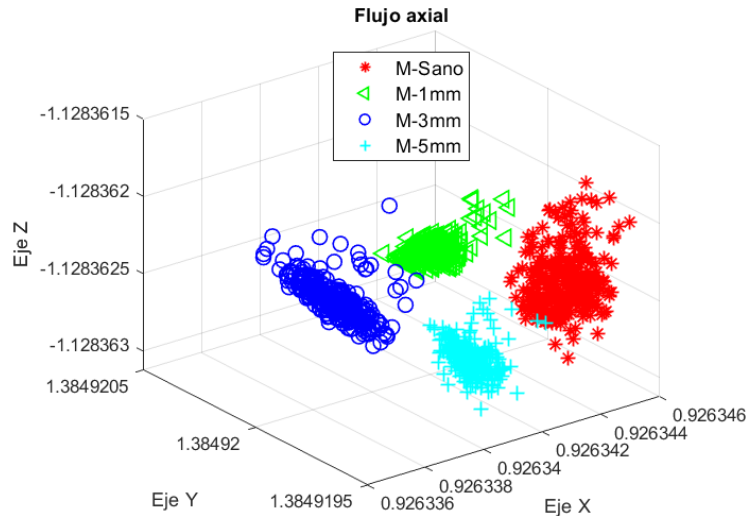


Figura 40. LDA para flujo axial 60Hz (Autoría Propia).

En la figura 41, se tiene la matriz de confusión para la gráfica mostrada anteriormente donde la red neuronal permite clasificar los distintos estados de fallo un 94.2%, si bien es un resultado mejor que el logrado solo con corriente aún no se logra un 100%.

Clases de Salida	Clase Objetivo				
	1	2	3	4	
1	85 23.6%	0 0.0%	0 0.0%	12 3.3%	87.6% 12.4%
2	2 0.6%	76 21.1%	14 3.9%	1 0.3%	81.7% 18.3%
3	0 0.0%	8 2.2%	68 18.9%	13 3.6%	76.4% 23.6%
4	3 0.8%	6 1.7%	8 2.2%	64 17.8%	79.0% 21.0%
	94.4% 5.6%	84.4% 15.6%	75.6% 24.4%	71.1% 28.9%	81.4% 18.6%

Figura 41. Matriz de confusión para flujo axial 60Hz 1) Sano 2) 1mm 3) 3mm 4) 5mm (Autoría Propia).

Posteriormente en la figura 42 se muestra el resultado de LDA obtenido con la combinación de las dos variables presentadas anteriormente (Corriente y flujo magnético), donde a simple vista se observa cómo los 4 casos de falla se separan.

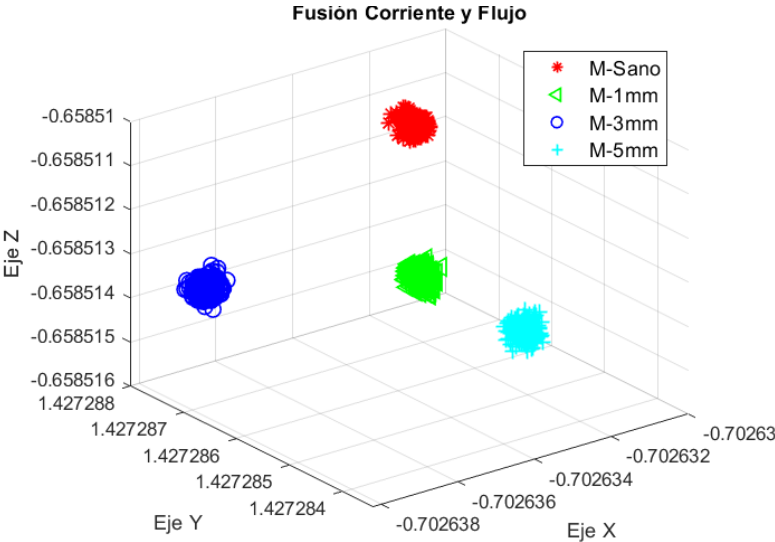


Figura 42. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 60Hz (Autoría Propia).

Luego se muestra en la figura 43, la matriz de confusión de la red neuronal encargada de clasificar los 4 estados de fallo resultantes del uso de LDA con la combinación de flujo y corriente obteniendo un 100% de correcta clasificación.

Matriz de Confusión

	1	2	3	4		
Clase de Salida	1	90 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	2	0 0.0%	90 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	3	0 0.0%	0 0.0%	90 25.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90 25.0%	100% 0.0%
		100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
	1	2	3	4		
	Clase Objetivo					

Figura 43. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 60Hz 1) Sano 2) 1mm 3) 3mm 4) 5mm (Autoría Propia).

4.4.2 Rodamiento metálico-50Hz

A continuación, en la figura 44 se observa la gráfica resultante del análisis LDA a la señal de corriente del rodamiento metálico con una frecuencia de 50Hz. Donde la mayoría de las señales de fallo se encuentran revueltas entre sí, lo cual no permite clasificar las distintas gradualidades de fallo.

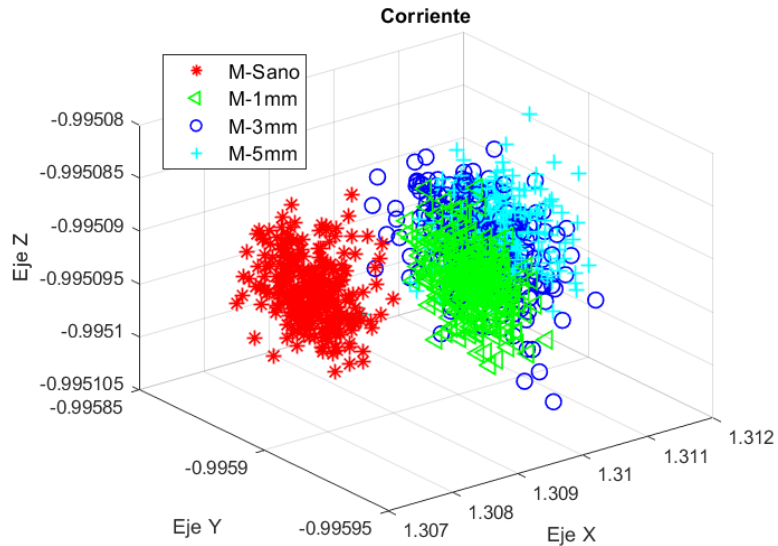


Figura 44. LDA para corriente 50Hz (Autoría Propia).

La siguiente grafica mostrada es la figura 45 donde se observa como el flujo axial en esta ocasión parece ser capaz de lograr discriminar de manera correcta los 4 estados de fallo para el rodamiento metálico a una frecuencia de 50Hz.

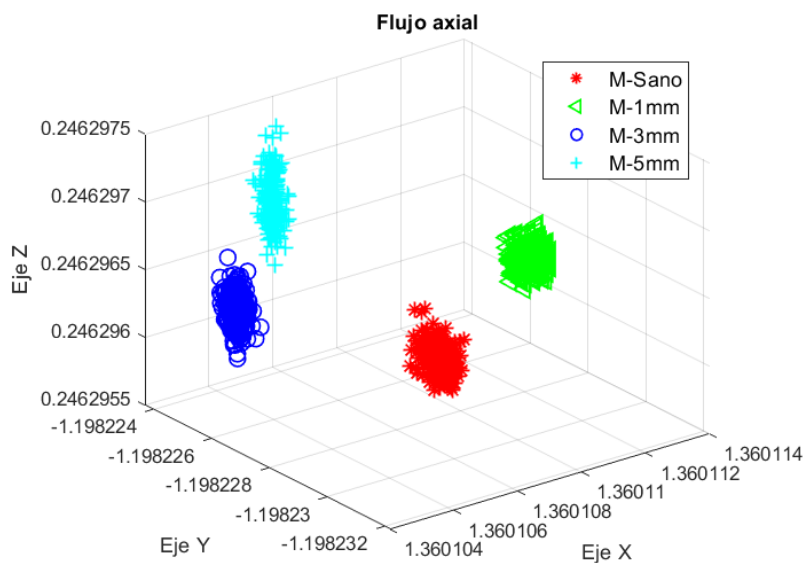


Figura 45. LDA para flujo axial 50Hz (Autoría Propia).

Aunque en este caso en particular el flujo magnético es capaz de discriminar los estados de fallo no siempre ocurre así por lo cual en la figura 46 observamos el resultado del análisis LDA con la combinación de corriente y flujo magnético donde es aún más evidente una correcta clasificación entre los distintos estados propuestos.

Continuando en la figura 47 se tiene la matriz de confusión de la combinación entre las señales de flujo magnético y corriente, mostrando lo que se podía observar en la gráfica anterior, un 100% de efectividad en la clasificación de los 4 estados de fallo en el rodamiento metálico con 50Hz de frecuencia.

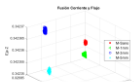


Figura 46. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 50Hz (Autoría Propia).

Matriz de Confusión

Clase de Salida	Clase Objetivo				
	1	2	3	4	
1	90 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	90 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
3	0 0.0%	0 0.0%	90 25.0%	0 0.0%	100% 0.0%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90 25.0%	100% 0.0%
	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%

Figura 47. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 50Hz 1) Sano 2) 1mm 3) 3mm 4) 5mm (Autoría Propia).

4.4.3 Rodamiento metálico-15Hz

Avanzando en la figura 48 se muestra la gráfica resultante de LDA la cual contiene las señales de corriente, en donde el estado sano se separa de los estados de fallo, aunque las distintas gradualidades permanecen mezcladas entre ellas.

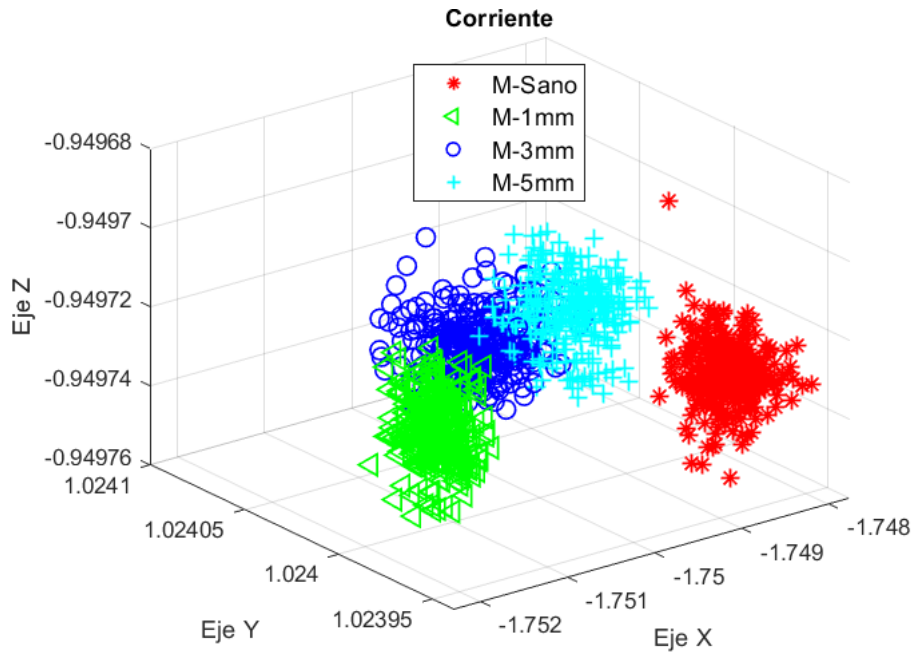


Figura 48. LDA para corriente 15Hz (Autoría Propia).

Después, en la figura 49 se tiene la gráfica de flujo axial, la cual continúa arrojando mejores resultados por si sola que las señales de corriente, aunque no logra hacer una correcta clasificación por completo.

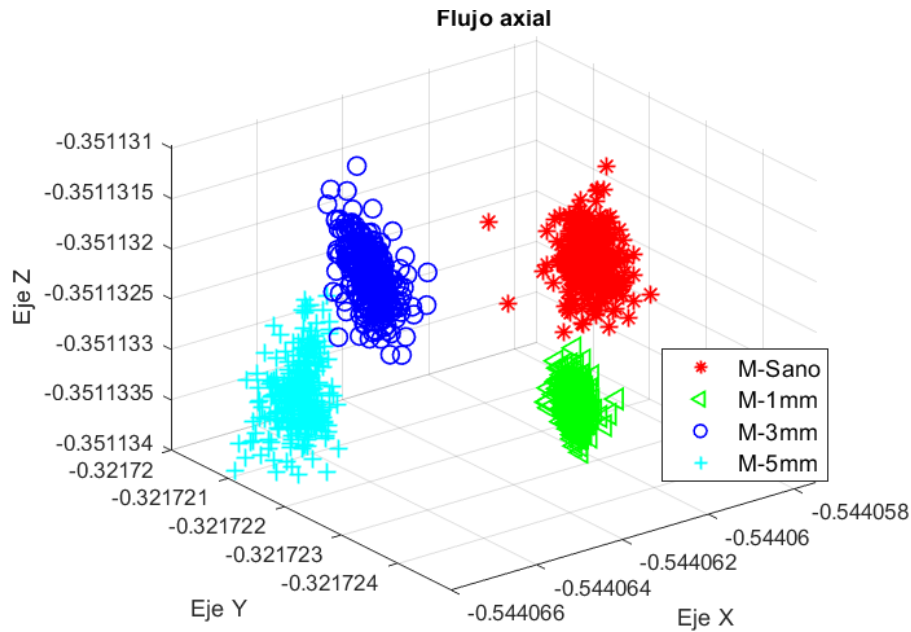


Figura 49. LDA para flujo axial 15Hz (Autoría Propia).

Nuevamente se puede observar como en la figura 50 los distintos estados de fallo son separados sin ningún problema con la fusión de las dos señales estudiadas, discriminando los estados de sano de las 3 gradualidades de fallo.

Para continuar se muestra la figura 51, donde está contenida la matriz de confusión de la red neuronal perteneciente a la clasificación del rodamiento metálico empleando la fusión de señales de corriente y flujo para 15Hz de alimentación, logrando un 100% de discriminación entre cada uno de los fallos propuestos.

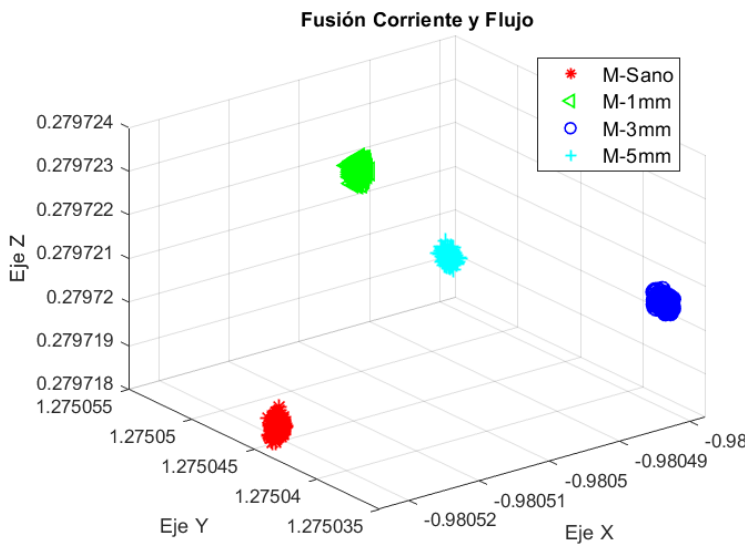


Figura 50. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 15Hz (Autoría Propia).

Clase de Salida	1	2	3	4	Clase Objetivo
1	90 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	90 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
3	0 0.0%	0 0.0%	90 25.0%	0 0.0%	100% 0.0%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90 25.0%	100% 0.0%
	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%

Figura 51. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 15Hz 1) Sano 2) 1mm 3) 3mm 4) 5mm (Autoría Propia).

4.4.4 Rodamiento metálico-5Hz

En la figura 52 se muestra la gráfica correspondiente a la señal de corriente del rodamiento metálico con alimentación de 5 Hz, después de aplicarle el análisis LDA, en la cual se muestran los 4 estados de falla con una clasificación parcial.

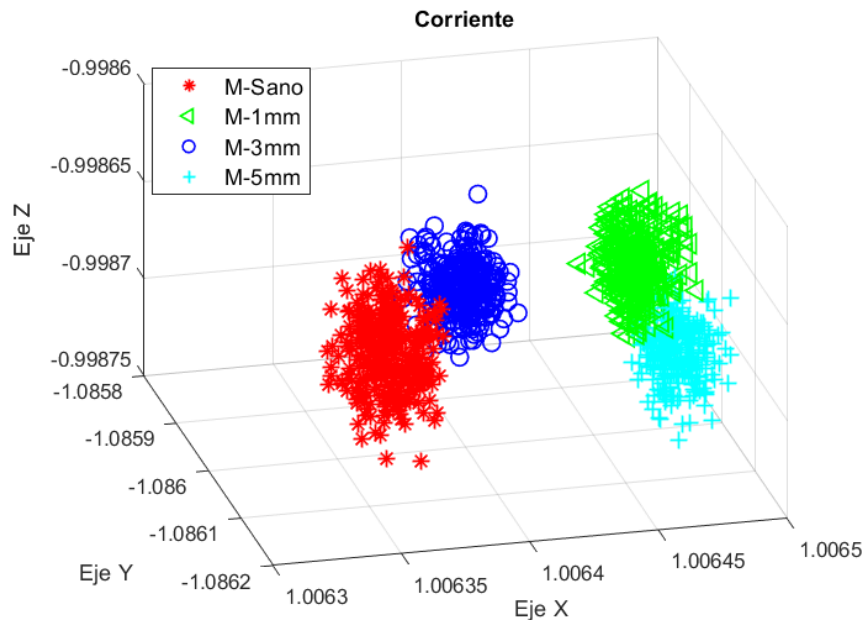


Figura 52. LDA para corriente 5Hz (Autoría Propia).

Posteriormente se tiene la figura 53, en donde se observan las señales de flujo magnético axial con el cual no es posible clasificar los distintos fallos estudiados ya que se mezclan las pruebas sanas con el fallo de 3mm.

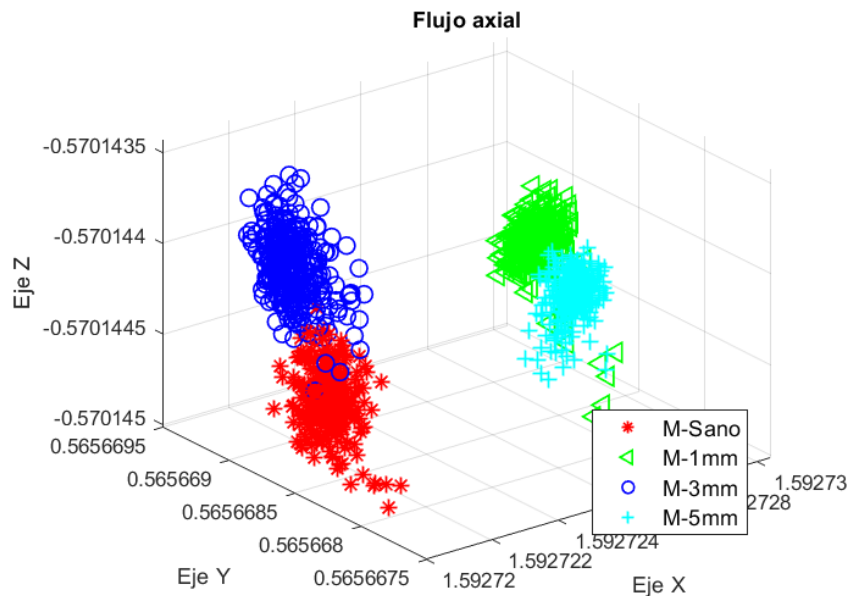


Figura 53. LDA para flujo axial 5Hz (Autoría Propia).

La última gráfica de esta sección se observa en la figura 54, la cual muestra el resultado del análisis LDA para la combinación de la corriente y el flujo

magnético, en donde los 4 estados de fallo se separan de manera muy clara, agrupándose de manera muy precisa.

Para la clasificación obtenida de la fusión de señales de corriente y flujo magnético se tiene la matriz de confusión mostrada en la figura 55 donde los porcentajes de clasificación se mantienen en 100% para los 4 estados de fallo en este tipo de rodamiento metálico.

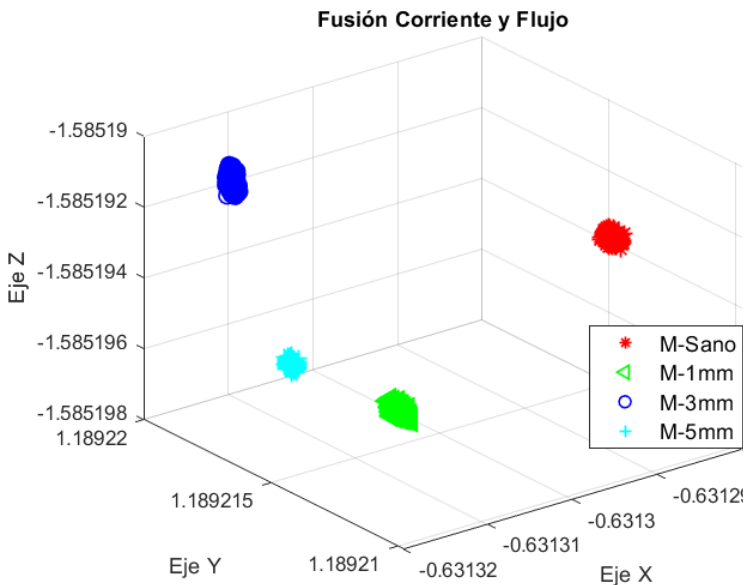


Figura 54. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 5Hz (Autoría Propia).

Clase de Salida	1	2	3	4	
1	90 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	90 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
3	0 0.0%	0 0.0%	90 25.0%	0 0.0%	100% 0.0%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90 25.0%	100% 0.0%
	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
	1	2	3	4	Clase Objetivo

Figura 55. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 5Hz 1) Sano 2) 1mm 3) 3mm 4) 5mm (Autoría Propia).

4.5 Clasificación de fallos para rodamiento híbrido

En este tipo de rodamiento se obtuvieron resultados favorables al emplear la fusión de señales (corriente y flujo), al igual que en la sección anterior, logrando clasificar los 4 distintos estados de fallo (Sano, 1mm, 3mm y 5mm) para todas las frecuencias de alimentación propuestas empezando por 5Hz, 15Hz, 50Hz y 60Hz. Si bien las señales de corriente y las de flujo magnético de manera individual aportaban información necesaria para una correcta clasificación, por si solas no lograban discriminar completamente los distintos estados de falla. Por lo anterior

en las siguientes secciones solo se mostrarán las gráficas resultantes de los procesamientos para 60Hz.

4.5.1 Rodamiento híbrido-60Hz

Para este rodamiento se obtuvo la gráfica mostrada en la figura 56, la cual muestra el resultado del análisis por LDA en 3 dimensiones donde se aprecian los 4 estados de fallo sin lograr ser discriminados de manera clara.

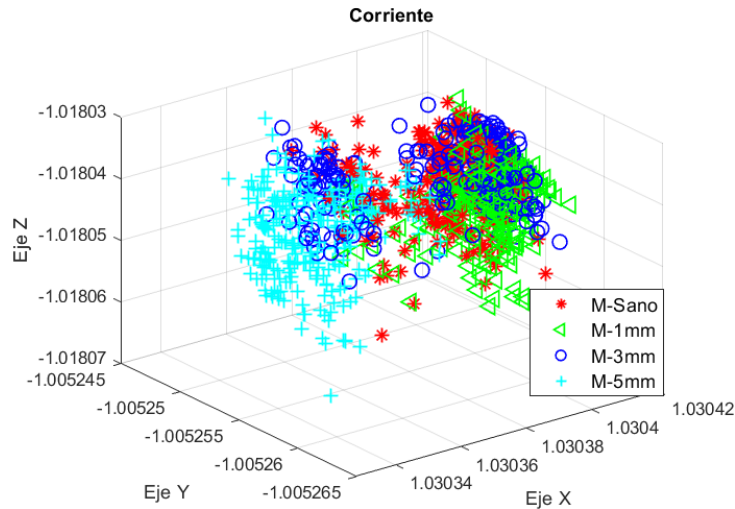


Figura 56. LDA para corriente 60Hz (Autoría Propia).

Continuando se muestra la gráfica de la figura 57, donde se observan las distintas señales de cada estado de fallo donde 2 de estas se logran separar de manera correcta, mientras que los otros dos estamos se combinan entre sí, sin permitir lograr una clasificación por completo.

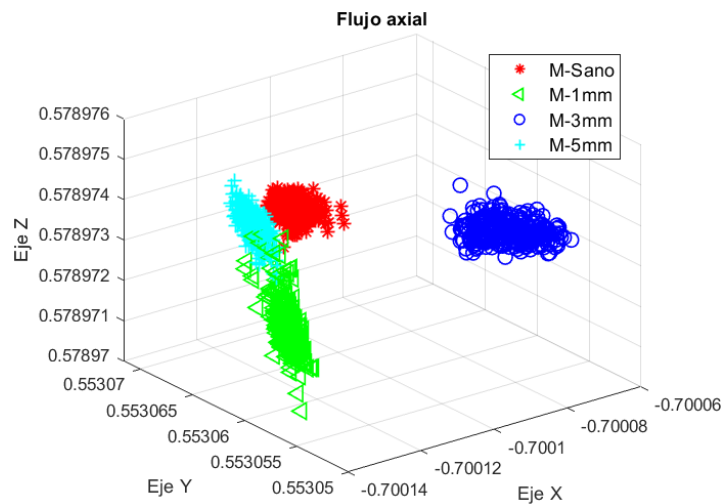


Figura 57. LDA para flujo axial 60Hz (Autoría Propia).

El ultimo análisis de LDA es mostrado en la figura 58, teniendo una correcta discriminación entre los 4 estados de fallo propuestos, esto gracias a la fusión de corriente y flujo magnético.

El clasificador inteligente empleado para el diagnóstico de estos 4 estados de fallo para el rodamiento cerámico fue la misma red neuronal propuesta para el rodamiento metálico, ya que cuenta con las mismas entradas y salidas, logrando una correcta clasificación de los estados de fallo, mostrados en la figura 59.

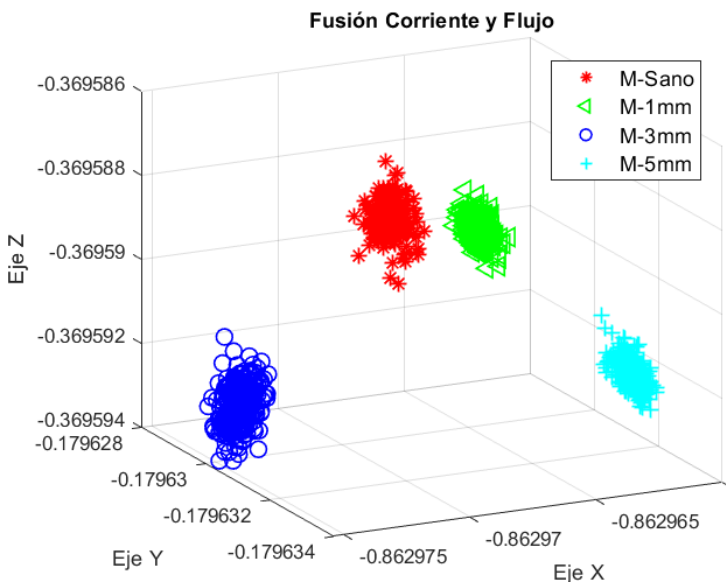


Figura 58. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 60Hz (Autoría Propia).

	1	2	3	4	
1	90 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	90 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
3	0 0.0%	0 0.0%	90 25.0%	0 0.0%	100% 0.0%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90 25.0%	100% 0.0%
	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
	1	2	3	4	
	Clase Objetivo				

Figura 59. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 60Hz 1) Sano 2) 1mm 3) 3mm 4) 5mm (Autoría Propia).

A continuación, en la tabla 8 se presenta un resumen de los resultados obtenidos al realizar el mismo procedimiento efectuado anteriormente para las 4 frecuencias de alimentación propuestas, demostrando que el método es capaz de realizar una correcta discriminación para todas las frecuencias que se trabajaron.

Tabla 8. Resumen de resultados rodamientos híbridos

FRECUENCIA DE RESULTADOS DE LA

ALIMENTACIÓN	MATRIZ DE CONFUSIÓN
60HZ	100%
50HZ	100%
15HZ	100%
5HZ	100%

4.6 Clasificación de fallos para rodamiento cerámico

En esta sección se muestran las gráficas correspondientes al análisis LDA de los fallos en los rodamientos cerámicos, así como la matriz de confusión resultante de la red neuronal aplicada para la clasificación del estado sano de los fallos de 1mm, 3mm y 5mm de perforación en la pista exterior. Para este tipo de rodamiento también se logró discriminar los 4 estados de fallo en cada una de las frecuencias propuestas (5Hz, 15Hz, 50Hz y 60Hz) pero para fines prácticos solo se mostrarán las gráficas correspondientes a la frecuencia de 60Hz.

4.6.1 Rodamiento cerámico-60Hz

En la figura 60 se muestra la gráfica LDA para las señales de corriente para los 4 distintos estados de fallo, aunque al igual que en los casos anteriores, no es posible realizar una separación de los diferentes fallos.

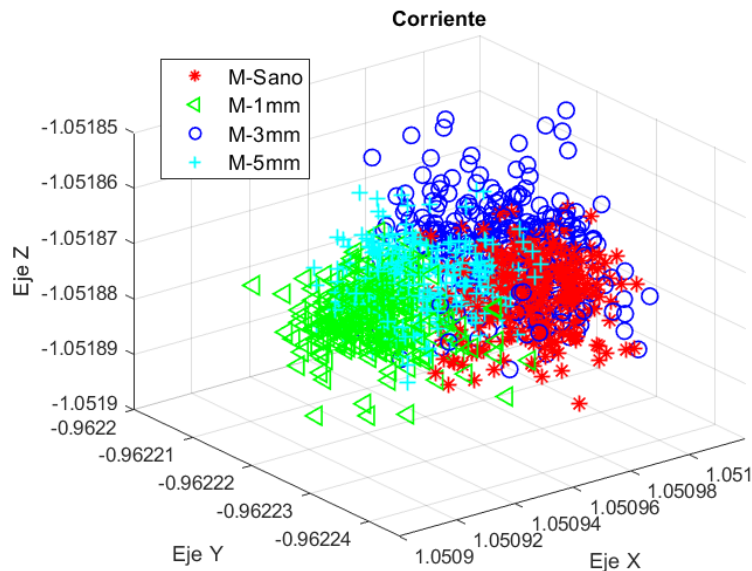


Figura 60. LDA para corriente 60Hz (Autoría Propia).

Posteriormente, se tiene la figura 61 la cual contiene la gráfica LDA generada con las señales de flujo axial, donde es un poco más clara la presencia de los diferentes estados de fallo, aunque una vez más se puede observar como 2 de los estados se combinan entre sí.

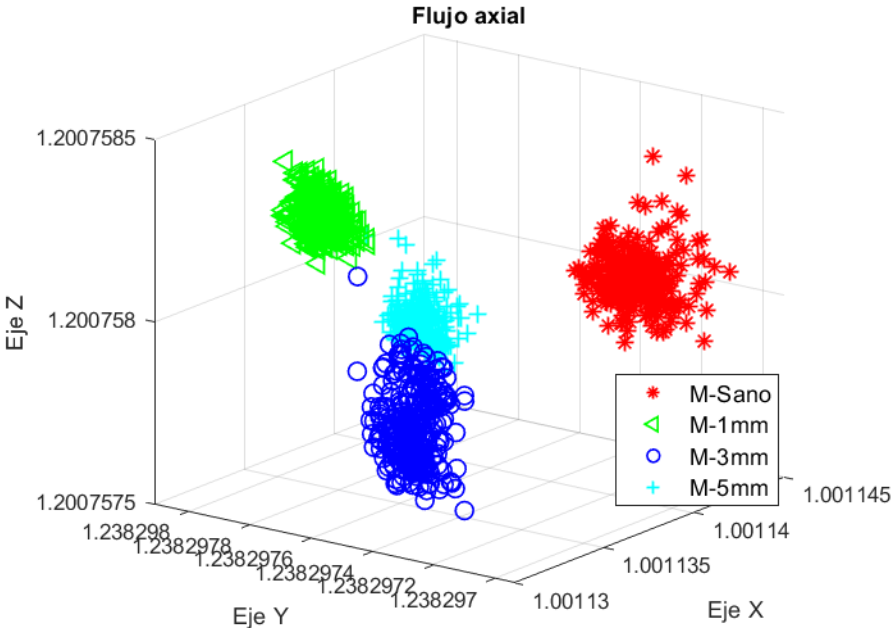


Figura 61. LDA para flujo axial 60Hz (Autoría Propia).

Prosiguiendo en la figura 61 se observa el resultado de la fusión entre corriente y flujo con LDA, gracias a la cual se puede ver de manera clara como cada estado es separado el uno del otro, dando la pauta para una correcta clasificación.

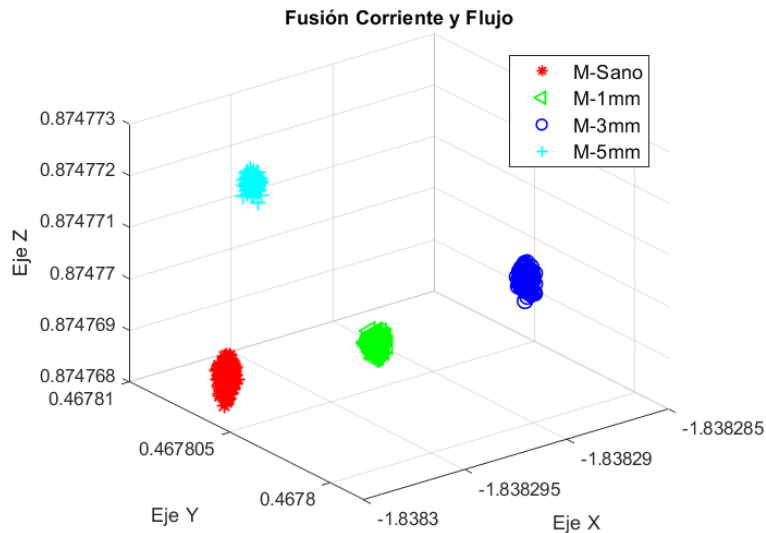


Figura 62. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 60Hz (Autoría Propia).

Para finalizar se muestra la figura 62, la cual contiene la matriz de confusión de la red neuronal empleada para la clasificación de los fallos en el rodamiento cerámico, como se puede observar se logran un 100% de efectividad para cada estado de fallo logrando una clasificación correcta.

Matriz de Confusión

	1	2	3	4		
Clase de Salida	1	90 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	2	0 0.0%	90 25.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	3	0 0.0%	0 0.0%	90 25.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90 25.0%	100% 0.0%
		100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
	a	b	c	d		
	Clase Objetivo					

Figura 63. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 60Hz 1) Sano 2) 1mm 3) 3mm 4) 5mm (Autoría Propia).

Al igual que en los materiales metálico e híbrido, para el material cerámico se experimentó con 4 distintas frecuencias de alimentación, por lo cual en la tabla 9 se muestra un resumen de los resultados obtenidos para las otras 3 frecuencias

que no fueron mostradas en este capítulo. Donde se observa que se logra un 100% de correcta clasificación para los 4 estados de fallo para todas las frecuencias.

Tabla 9. Resumen de resultados rodamientos cerámicos

FRECUENCIA DE ALIMENTACIÓN	RESULTADOS DE LA MATRIZ DE CONFUSIÓN
60HZ	100%
50HZ	100%
15HZ	100%
5HZ	100%

4.7 Clasificación para rodamiento metálico, híbrido y cerámico

Esta sección muestra los resultados obtenidos de la clasificación de la combinación de los 4 estados de falla propuestos (5Hz, 15Hz, 50Hz y 60Hz) para los 3 distintos materiales de rodamiento (metálico, híbrido y cerámico) discriminadas a la vez, buscando un diagnóstico muy completo, ya que en total se tendrían 12 estados con distintas condiciones de fallo. Para lo cual se cuenta con las siguientes etiquetas:

Rodamientos metálicos: M-sano, M-1mm, M-3mm y M-5mm

Rodamientos híbridos: H-sano, H-1mm, H-3mm y H-5mm

Rodamientos cerámicos: C-sano, C-1mm, C-3mm y C-5mm

4.7.1 Todos los materiales de rodamiento-60Hz

Como se puede observar en la figura 63, se tienen las 12 señales de corriente correspondientes a los 3 tipos de materiales de rodamiento y para los 4 estados de falla a analizar (Sano, 1mm, 3mm y 5mm) donde de manera visual es prácticamente imposible discriminarlos entre sí, lo cual se puede corroborar al observar los resultados mostrados en la matriz de confusión, donde el porcentaje de correcta clasificación ronda el 41.6%.

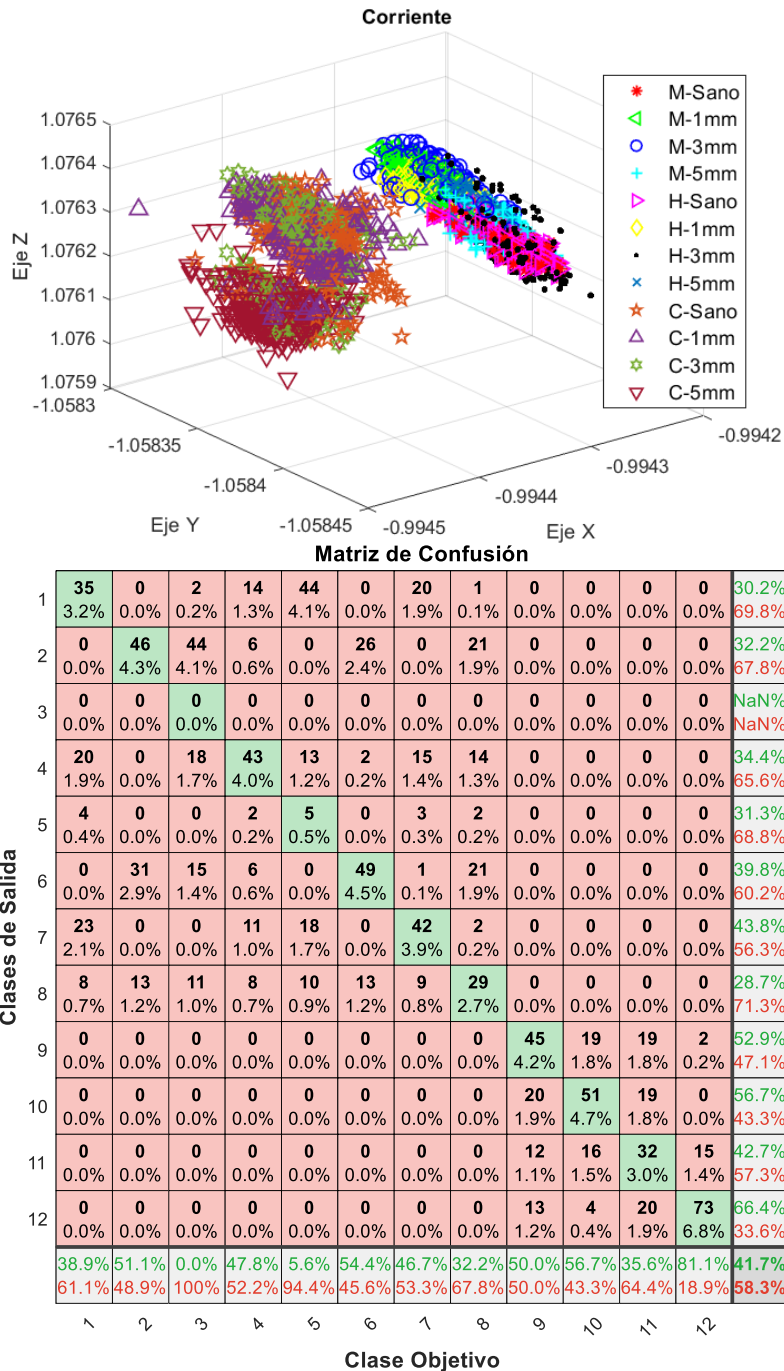


Figura 64. Resultados LDA y Matriz de confusión para corriente 60Hz 1) M-Sano 2) M-1mm 3) M-3mm 4) M-5mm 5) H-Sano 6) H-1mm 7) H-3mm 8) H-5mm 9) C-Sano 10) C-1mm 11) C-3mm 12) C-5mm (Autoría Propia).

Para continuar en la figura 64 se tiene la gráfica que muestra las 12 señales de flujo axial correspondientes a cada señal de fallo de los rodamientos a estudiar al igual que la matriz de confusión resultante de emplear la segunda red neuronal

propuesta en la metodología, obteniendo mejores valores de clasificación que para las señales de corriente, pero sin lograr superar el 78.1% de efectividad.

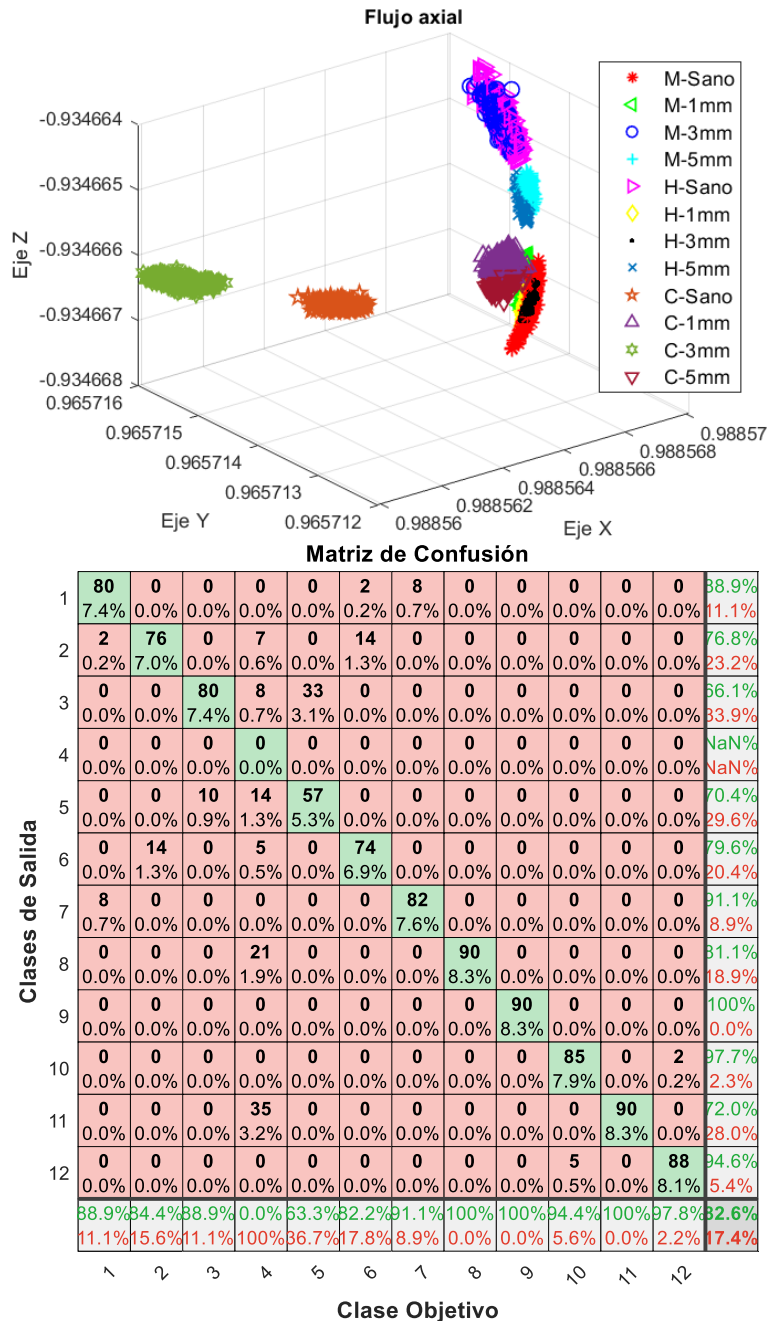


Figura 65. Resultados LDA y Matriz de confusión para flujo axial 60Hz 1) M-Sano 2) M-1mm 3) M-3mm 4) M-5mm 5) H-Sano 6) H-1mm 7) H-3mm 8) H-5mm 9) C-Sano 10) C-1mm 11) C-3mm 12) C-5mm (Autoría Propia).

Para finalizar los procesamientos para señales de 60Hz se muestra en la figura 65 los resultados de la fusión entre corriente y flujo magnético, obteniendo la gráfica

de LDA y posteriormente se muestra la matriz de confusión con los resultados de la clasificación de los 12 estados de fallo a analizar logrando obtener un 96.9% de correcta clasificación de manera general. Lo cual representa un porcentaje elevado debido a la gran cantidad de fallas que se tienen.

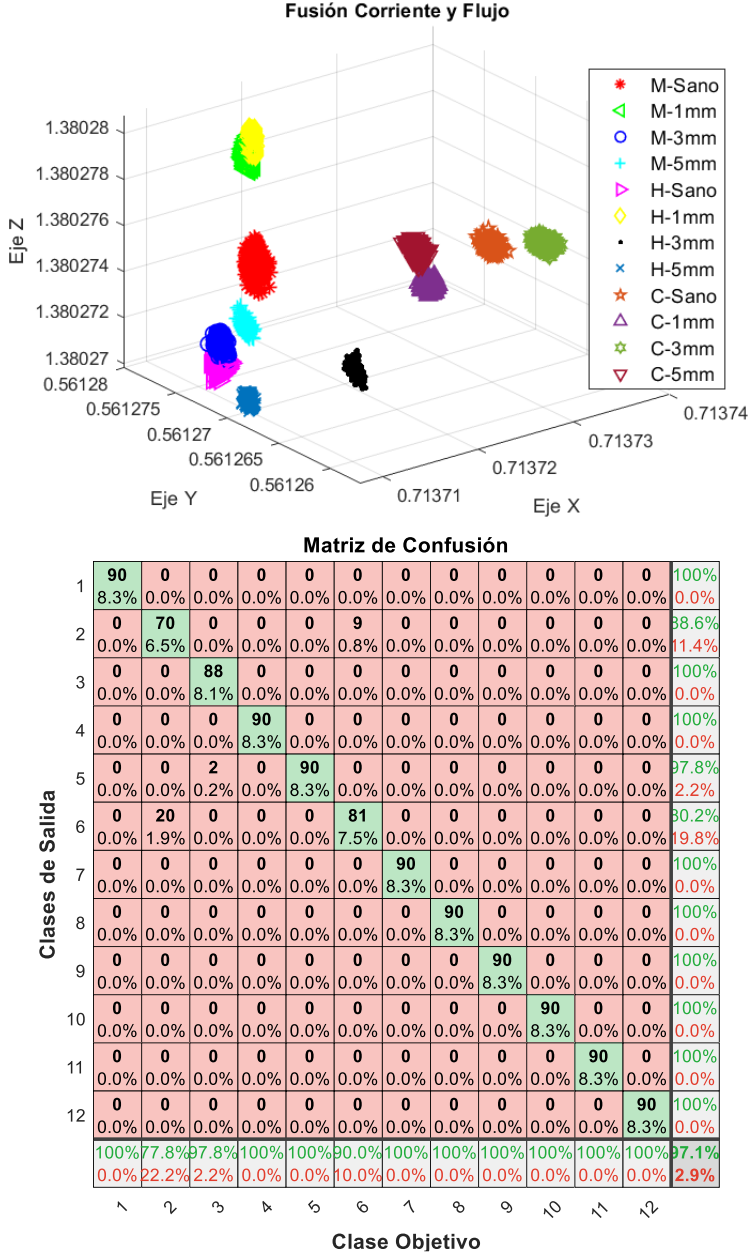


Figura 66. Resultados LDA y Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo axial 60Hz 1) M-Sano 2) M-1mm 3) M-3mm 4) M-5mm 5) H-Sano 6) H-1mm 7) H-3mm 8) H-5mm 9) C-Sano 10) C-1mm 11) C-3mm 12) C-5mm (Autoría Propia).

4.7.2 Todos los materiales de rodamiento-50Hz

De manera similar que, en el caso anterior, en la figura 66 se puede observar como las señales de corriente de los distintos estados de fallo y de todos los tipos de materiales, se mezclan entre sí, sin permitir una discriminación entre los fallos.

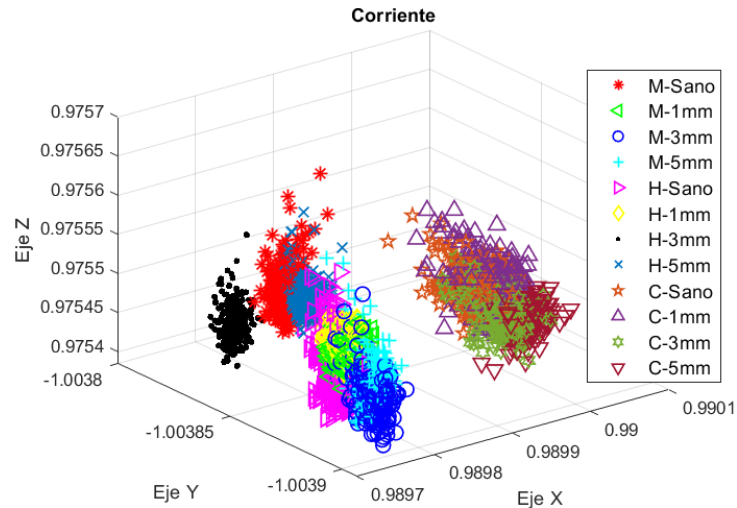


Figura 67. LDA para corriente 50Hz (Autoría Propia).

En la figura 67 se puede apreciar la gráfica resultante del análisis LDA para las señales de flujo axial para los 12 estados de falla propuestos donde hay algunas señales que logran separarse, pero la mayoría continúan combinándose entre si lo que no permite realizar una discriminación de los estados de fallo.

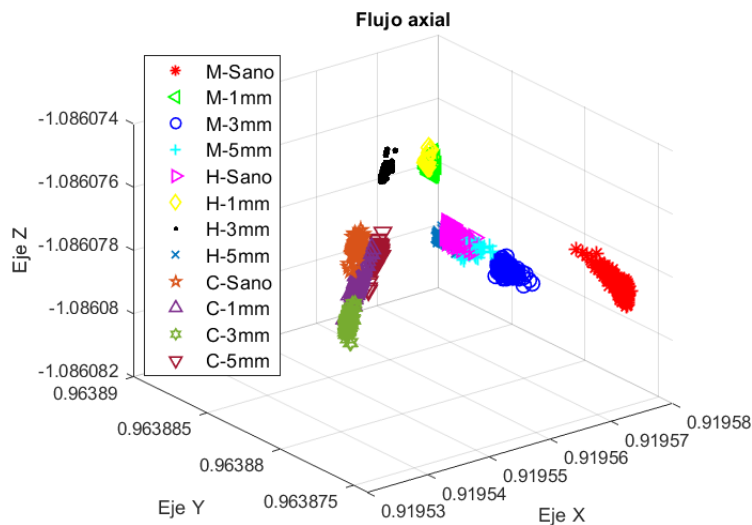


Figura 68. LDA para flujo axial 50Hz (Autoría Propia).

Al termino de esta sección se encuentra la figura 68, la cual muestra la gráfica LDA con los 12 estados de fallo analizados y la matriz de confusión de la red neuronal empleada, la cual gracias a sus 12 neuronas de salida nos permite clasificar de manera individual cada estado de fallo, teniendo en este caso en particular un porcentaje de efectividad del 99.1%.

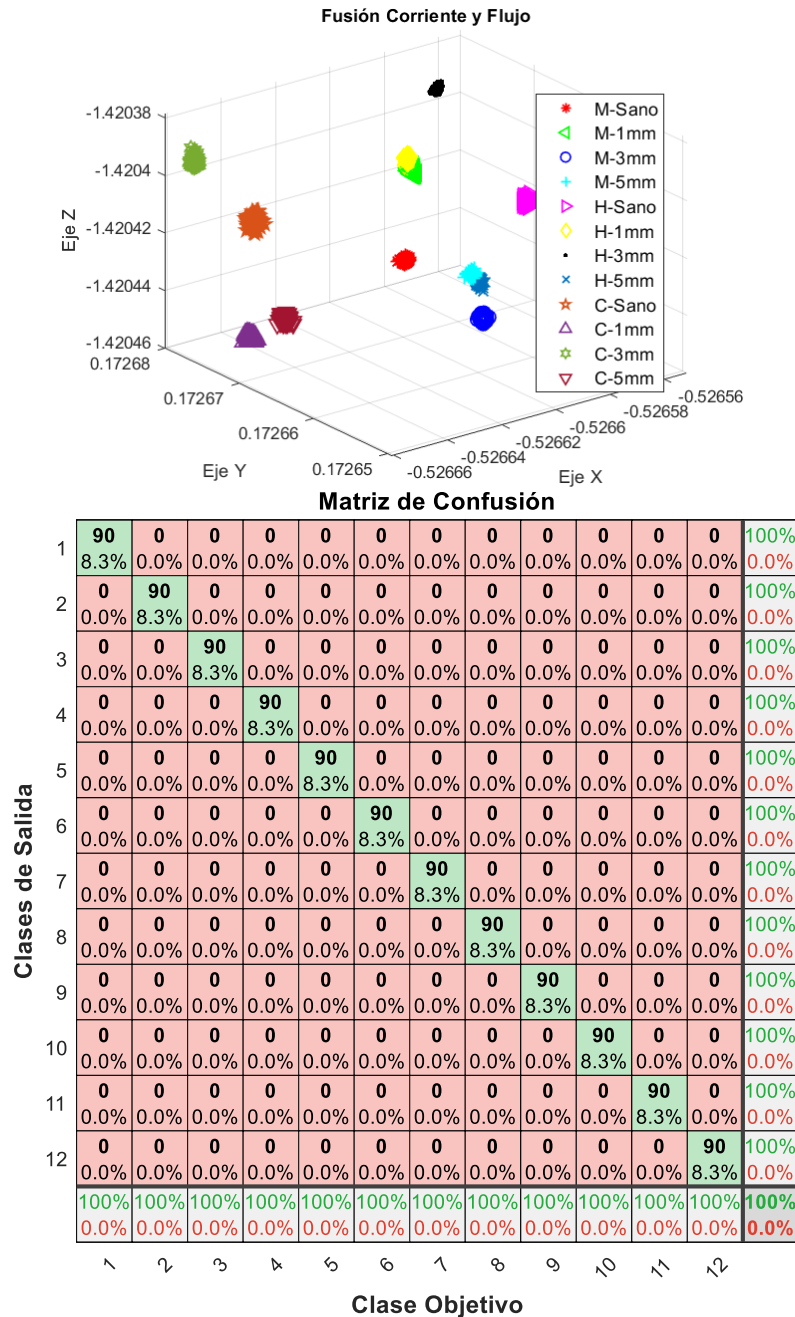


Figura 69. Resultados LDA y Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo axial 50Hz 1) M-Sano 2) M-1mm 3) M-3mm 4) M-5mm 5) H-Sano 6) H-1mm 7) H-3mm 8) H-5mm 9) C-Sano 10) C-1mm 11) C-3mm 12) C-5mm (Autoría Propia).

4.7.3 Todos los materiales de rodamiento-15Hz

En la figura siguiente (Figura 69) se pueden observar las señales obtenidas del análisis LDA para corriente, observando que los 12 fallos a estudiar se mezclan entre sí, por lo cual no es posible apreciar a cada estado por separado.

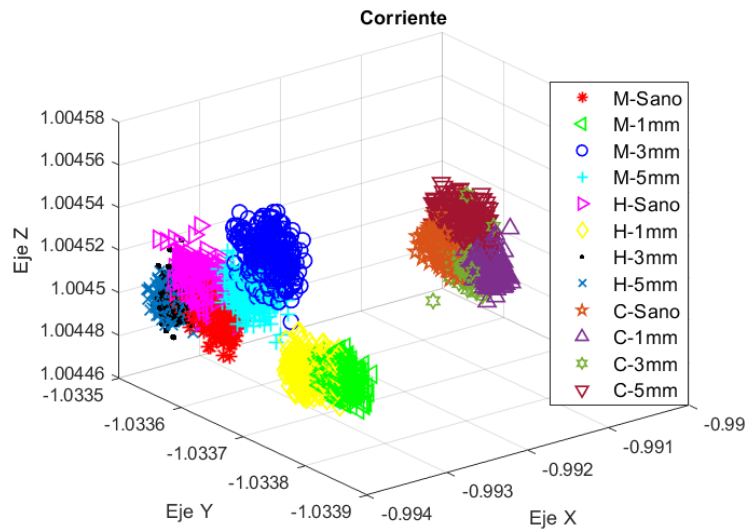


Figura 70. LDA para corriente 15Hz (Autoría Propia).

Continuando con las señales de flujo mostradas en la figura 70, observamos que ocurre lo mismo que en las señales de corriente, que hay un acumulamiento de todos los estados de fallo en algunos puntos del subespacio, por lo tanto, no es posible llevar a cabo alguna clasificación de los mismos.

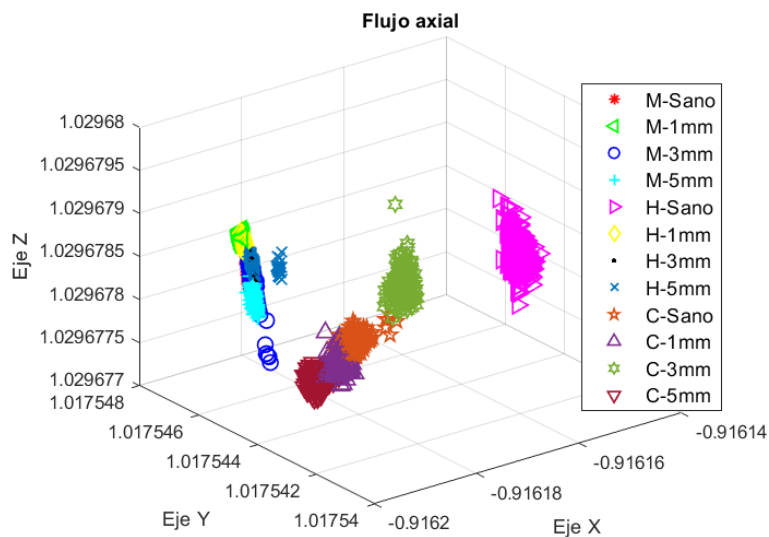
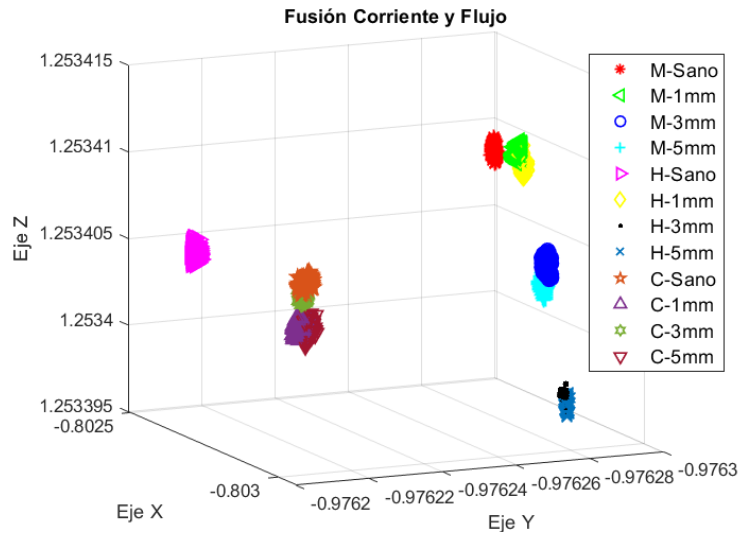


Figura 71. LDA para flujo axial 15Hz (Autoría Propia).

Para finalizar con la frecuencia de alimentación de 15Hz, en la figura 71 se tiene el resultado de la fusión de señales (corriente y flujo magnético) con el análisis LDA donde a simple vista es un poco complicado clasificar los distintos estados, pero con la ayuda de la red neuronal es posible realizar un diagnóstico con un 94.1% de certeza entre cada uno de 12 estados de fallo propuestos.



Matriz de Confusión

1	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100%	
	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
2	0	85	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	91.4%
	0.0%	7.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.6%
3	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100%
	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100%
	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
5	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100%
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	0	5	0	0	0	82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94.3%
	0.0%	0.5%	0.0%	0.0%	0.0%	7.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.7%
7	0	0	0	0	0	0	72	25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	74.2%
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.7%	2.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	25.8%
8	0	0	0	0	0	0	18	65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	78.3%
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.7%	6.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	21.7%
9	0	0	0	0	0	0	0	0	84	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98.8%
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	7.8%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.2%
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	88	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100%
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
11	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	89	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	93.7%
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	0.0%	8.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	6.3%
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	97.8%
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	2.2%
	100%	94.4%	100%	100%	100%	91.1%	80.0%	72.2%	83.3%	97.8%	98.9%	100%	94.0%	100%	94.4%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	94.1%
	0.0%	5.6%	0.0%	0.0%	0.0%	8.9%	20.0%	27.8%	16.7%	2.2%	1.1%	0.0%	6.0%	0.0%	5.6%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	5.9%	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12											

Figura 72. Resultados LDA y Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo axial 15Hz 1) M-Sano 2) M-1mm 3) M-3mm 4) M-5mm 5) H-Sano 6) H-1mm 7) H-3mm 8) H-5mm 9) C-Sano 10) C-1mm 11) C-3mm 12) C-5mm (Autoría Propia).

4.7.4 Todos los materiales de rodamiento-5Hz

Para las señales de corriente en esta frecuencia se tiene un comportamiento singular mostrado en la figura 72, ya que la mayoría de los estados de fallo siguen un patrón de crecimiento vertical en un eje, aunque sigue sin ser posible lograr una separación entre los distintos estados de fallo propuestos.

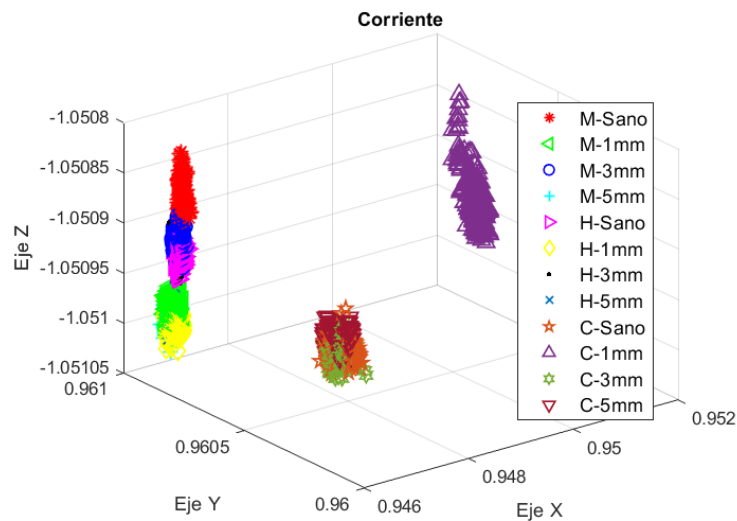


Figura 73. LDA para corriente 5Hz (Autoría Propia).

Para la figura 73, se tiene la gráfica que muestra las firmas obtenidas del flujo axial donde no es posible buscar realizar alguna clasificación entre cada uno de los estados de falla, debido a que la mayoría de dichos estados se combinan entre sí.

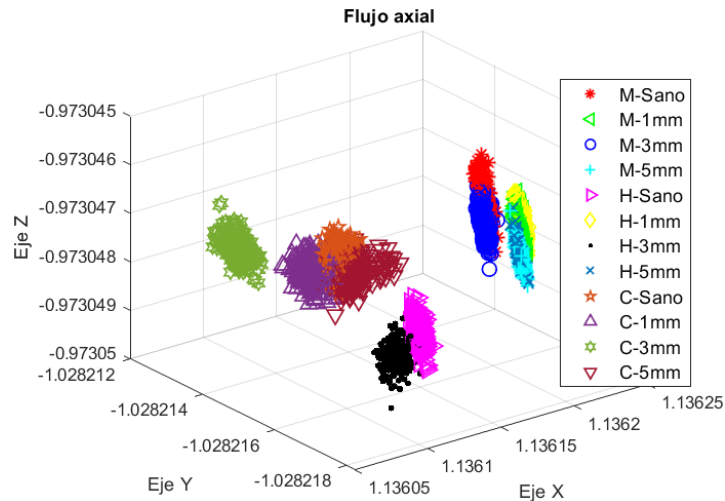
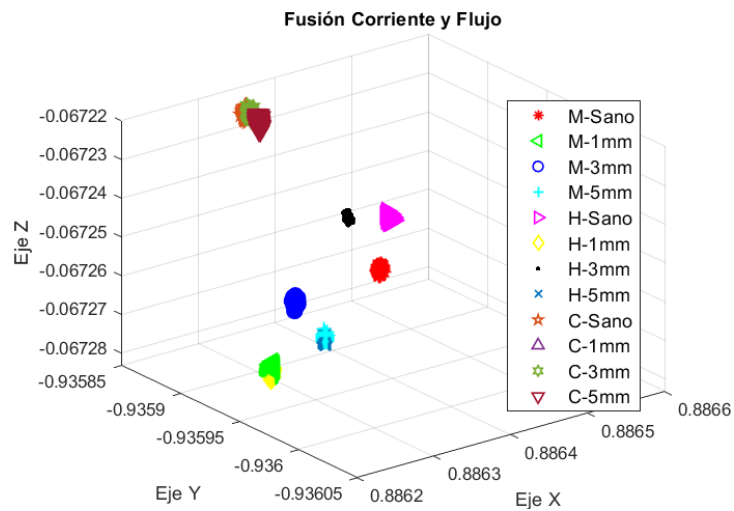


Figura 74. LDA para flujo axial 5Hz (Autoría Propia).

Por último, en la figura 74 se muestra el resultado del análisis LDA en 3D para la combinación de corriente y flujo magnético donde en esta ocasión, se logran discriminar la mayoría de los estados de fallo, aunque no en su totalidad, por lo tanto, en la matriz de confusión se puede observar que se tiene un porcentaje de clasificación de 89.6%, siendo el más bajo en las distintas frecuencias de alimentación propuestas.



Matriz de Confusión

Clases de Salida	1	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100%	
		8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	2	0	73	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36.9%
		0.0%	6.8%	0.0%	0.0%	0.0%	1.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	13.1%
	3	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100%
		0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	4	0	0	0	54	0	0	0	46	0	0	0	0	0	0	0	54.0%
		0.0%	0.0%	0.0%	5.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	46.0%
	5	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100%
		0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
	6	0	17	0	0	0	79	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32.3%
		0.0%	1.6%	0.0%	0.0%	0.0%	7.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	17.7%
7	0	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	0	0	100%	
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
8	0	0	0	36	0	0	0	44	0	0	0	0	0	0	0	55.0%	
	0.0%	0.0%	0.0%	3.3%	0.0%	0.0%	0.0%	4.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	45.0%	
9	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	0	100%	
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	100%	
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	100%	
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	90	0	100%	
	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	8.3%	0.0%	0.0%	
	100%	31.1%	100%	50.0%	100%	37.8%	100%	48.9%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	39.8%	
	0.0%	18.9%	0.0%	40.0%	0.0%	12.2%	0.0%	51.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.2%	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12					
	Clase Objetivo																

Figura 75. Resultados LDA y Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo axial 5Hz 1) M-Sano 2) M-1mm 3) M-3mm 4) M-5mm 5) H-Sano 6) H-1mm 7) H-3mm 8) H-5mm 9) C-Sano 10) C-1mm 11) C-3mm 12) C-5mm (Autoría Propia).

4.8 Clasificación para rodamientos con contaminación en la lubricación

En esta sección se realizarán 2 distintos tipos de clasificaciones, estas se realizaron siguiendo la misma metodología que para las clasificaciones anteriores, la primera clasificación mostrara los resultados obtenidos para la discriminación de todos los fallos de contaminación propuestos para los 3 tipos de materiales a la vez y para las 2 frecuencias de alimentación propuestas (50Hz y 60Hz); la segunda parte se hará comparando los estados de fallo de pista exterior contra los estados de fallo de contaminación para cada uno de los materiales de rodamiento que se tienen (metálico, híbrido y cerámico) buscando diferenciar el estado sano de los estados de fallo para las fallas mencionadas anteriormente.

4.8.1 Clasificación para todos los rodamientos contaminados 60Hz

Lo primero que se muestra en este apartado en la figura 75 y 76, son los análisis LDA correspondientes a las señales de corriente y de flujo axial para los 9 estados de fallo propuestos a analizar para la combinación de contaminación en los diferentes materiales de rodamiento, teniendo las fallas de rodamiento metálico (sano, 3 gramos de contaminación con 3mm de perforación y gramos de contaminación con 5mm de perforación) las fallas de rodamiento híbrido (sano, 3 gramos de contaminación con 3mm de perforación y gramos de contaminación con 5mm de perforación) y por último los rodamientos cerámicos (sano, 3 gramos de contaminación con 3mm de perforación y gramos de contaminación con 5mm de perforación). Donde no se puede apreciar de manera visual ninguna clasificación o discriminación de los distintos fallos propuestos ya que la mayoría de señales se encuentran encimadas unas con otras en los dos casos, para corriente y para flujo magnético.

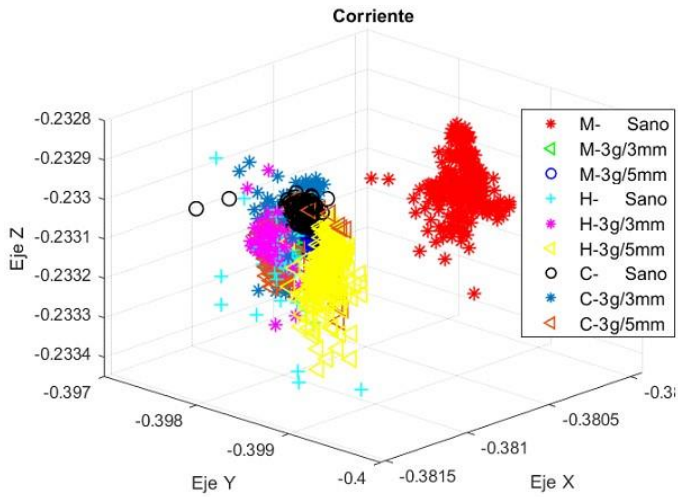


Figura 76. LDA para Corriente 60Hz (Autoría Propia).

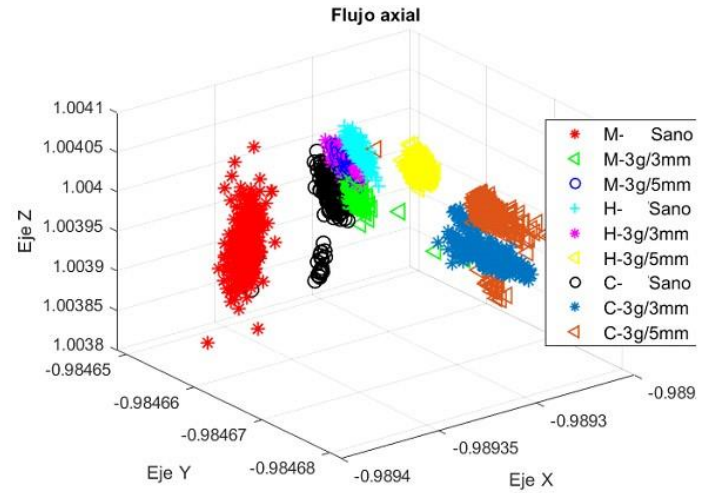


Figura 77. LDA para Flujo axial 60Hz (Autoría Propia).

En la figura 77, se observa el resultado obtenido para los 9 casos de fallo mencionados anteriormente teniendo 3 estados de fallo para metálico, 3 estados de falla para híbrido y 3 estados de fallo para cerámico, mostrando la aplicación de LDA con fusión de corriente y flujo permitiendo lograr una mejora considerable al utilizar cada variable por separado.

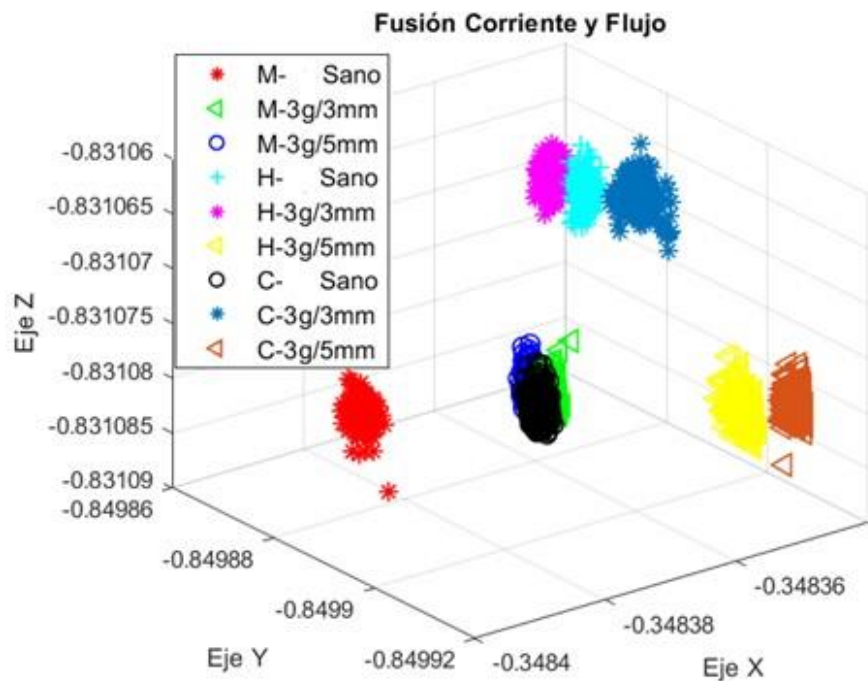


Figura 78. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 60Hz (Autoría Propia).

Y para finalizar este apartado se muestra el resultado de la matriz de confusión en la figura 78 al emplear la red neuronal propuesta para la clasificación de los 9 fallos con distintos materiales de rodamiento logrando un porcentaje de efectividad muy bueno, el cual ronda el 95.2% de efectividad.

Matriz de Confusión

Clase de Salida	1	89 11.0%	1 0.1%	1 0.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	3 0.4%	0 0.0%	0 0.0%	94.7% 5.3%
	2	0 0.0%	80 9.9%	10 1.2%	1 0.1%	1 0.1%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.1%	0 0.0%	86.0% 14.0%
	3	1 0.1%	9 1.1%	79 9.8%	0 0.0%	1 0.1%	0 0.0%	4 0.5%	0 0.0%	0 0.0%	84.0% 16.0%
	4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	85 10.5%	1 0.1%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.1%	0 0.0%	97.7% 2.3%
	5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	87 10.7%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	6	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90 11.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	7	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	83 10.2%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	8	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	4 0.5%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	88 10.9%	0 0.0%	95.7% 4.3%
	9	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90 11.1%	100% 0.0%
			98.9% 1.1%	88.9% 11.1%	87.8% 12.2%	94.4% 5.6%	96.7% 3.3%	100% 0.0%	92.2% 7.8%	97.8% 2.2%	100% 0.0%
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
		Clase Objetivo									

Figura 79. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo axial 60Hz
 1) M-Sano 2) M-3g/3mm 3) M-3g/5mm 4) H-Sano 5) H-3g/3mm 6) H-3g/5mm 7) C-Sano
 8) C-3g/3mm 9) C-3g/5mm (Autoría Propia).

4.8.2 Clasificación para todos los rodamientos contaminados 50Hz

El siguiente procesamiento que se realizó se muestra en la figura 79 y 80 donde se tiene el resultado para las figuras correspondientes a LDA de las señales de corriente y flujo axial en las cuales no se puede concluir nada de manera concreta, ya que todos los casos de estudio propuestos, referentes a los 3 tipos de materiales de los rodamientos y a los 3 casos de estudio para cada material se encuentran mezclados sin permitir realizar alguna clasificación de los mismos.

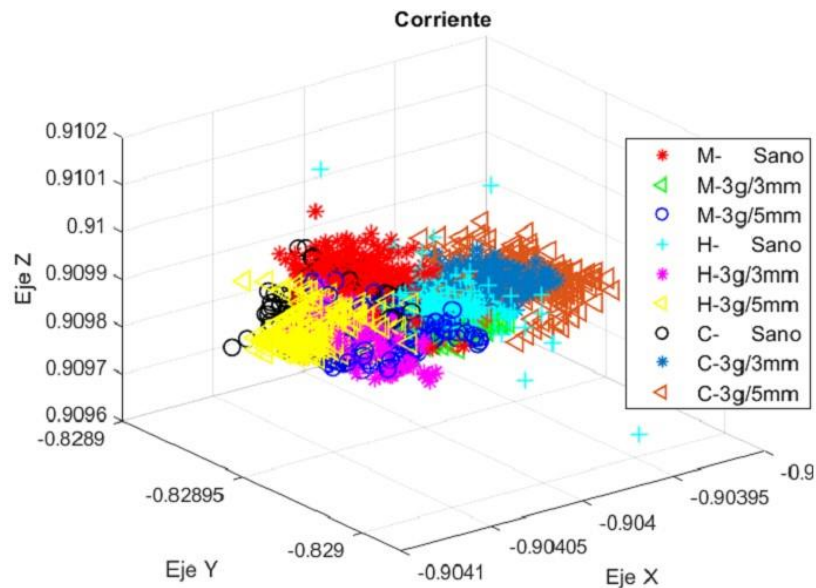


Figura 80. LDA para Corriente 50Hz (Autoría Propia).

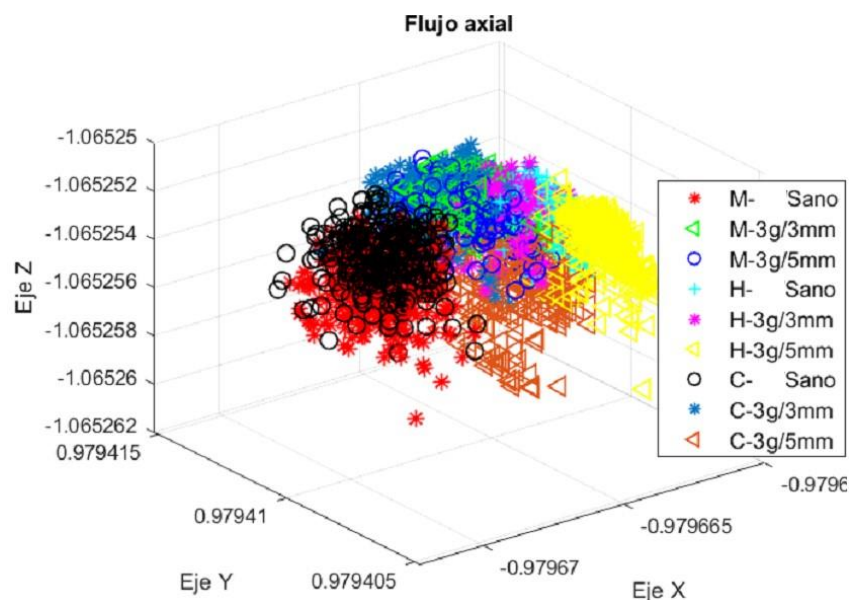


Figura 81. LDA para Flujo axial 50Hz (Autoría Propia).

Por último, se muestra en la figura 81 respectivamente la gráfica correspondiente a la fusión de señales de corriente y flujo magnético procesadas mediante la LDA junto con la matriz de confusión que muestra los resultados de la red neuronal propuesta logrando una clasificación del 96.7% de efectividad para los 9 estados de fallo propuesto.

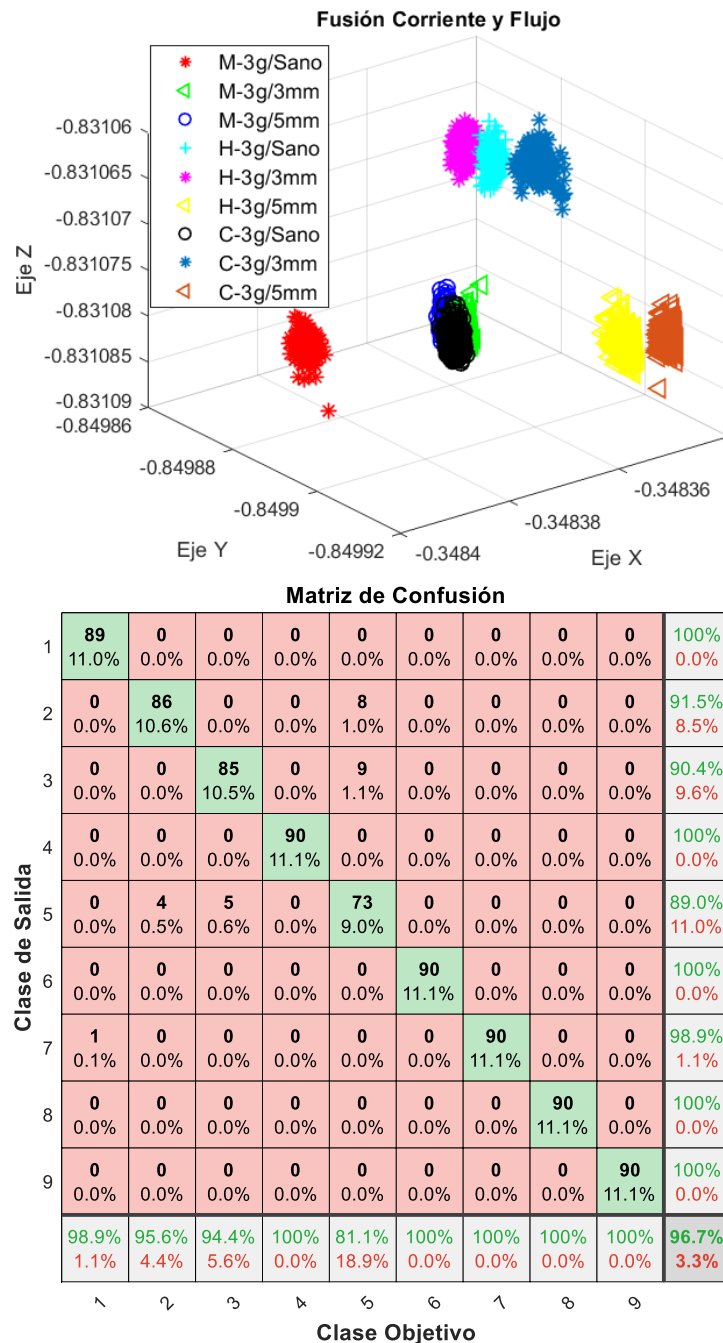


Figura 82. Resultados LDA y Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo axial 50Hz 1) M-Sano 2) M-3g/3mm 3) M-3g/5mm 4) H-Sano 5) H-3g/3mm 6) H-3g/5mm 7) C-Sano 8) C-3g/3mm 9) C-3g/5mm (Autoría Propia).

4.8.3 Clasificación para rodamiento metálico 60Hz

En la figura 82 se pueden observar los resultados obtenidos de discriminar los 2 fallos de contaminación en la lubricación (M-3g/3mm y M-3g/5mm) correspondientes a una contaminación de 3 gramos en la grasa del rodamiento y a la perforación de la pista exterior del rodamiento de 3mm y 5mm correspondientemente y los 2 estados de fallo para pista exterior (M-3mm y M-5mm) los cuales cuentan con 1 perforación en la pista exterior de 3mm y 5mm de diámetro y por último el estado sano, todo esto para rodamientos compuestos de material metálico. Continuando se muestra en la figura 83 la matriz de confusión obtenida del uso de la red neuronal para la clasificación de los 5 fallos mencionados anteriormente logrando el 100% de efectividad para todos los estados que se buscaba discriminar.

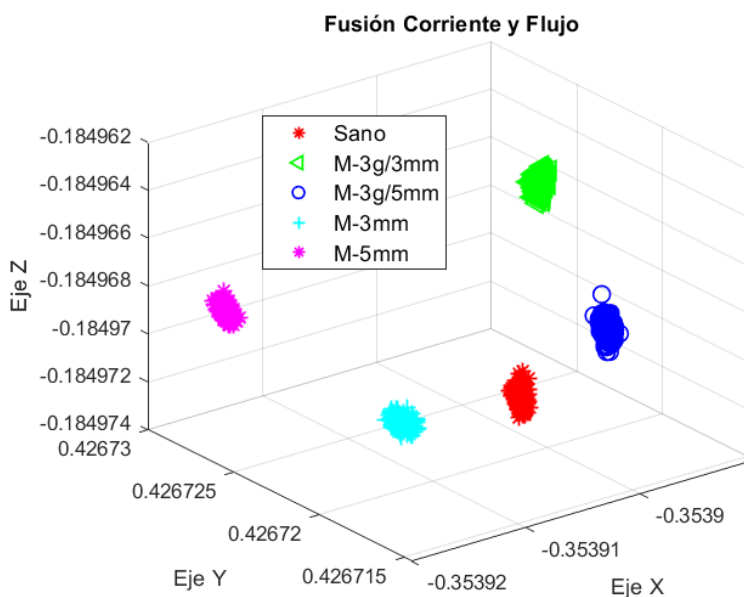


Figura 83. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 60Hz rodamiento metálico (Autoría Propia).

	1	2	3	4	5	
1	90 20.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	90 20.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
3	0 0.0%	0 0.0%	90 20.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90 20.0%	0 0.0%	100% 0.0%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90 20.0%	100% 0.0%
	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
	1	2	3	4	5	
	Clase Objetivo					

Figura 84. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 60Hz 1) Sano 2) M-3g/3mm 3) M-3g/5mm 4) M-3mm 5) M-5mm (Autoría Propia).

4.8.4 Clasificación para rodamiento Híbrido 60Hz

Continuando con la figura 84 se muestra el análisis LDA para las 5 condiciones de fallo del rodamiento híbrido teniendo las 2 condiciones de contaminación (3 gramos de contaminación con 3mm de perforación y 3 gramos de perforación con 5mm de perforación) y los 2 estados de pista exterior (3mm de perforación en la pista exterior y 5mm de perforación en la pista exterior) más el estado sano. Donde en la figura 85 se muestra la matriz de confusión la cual indica los valores porcentuales correspondientes a la clasificación de cada falla propuesta, obteniendo un 100% de correcta discriminación entra cada uno de los estados de fallo.

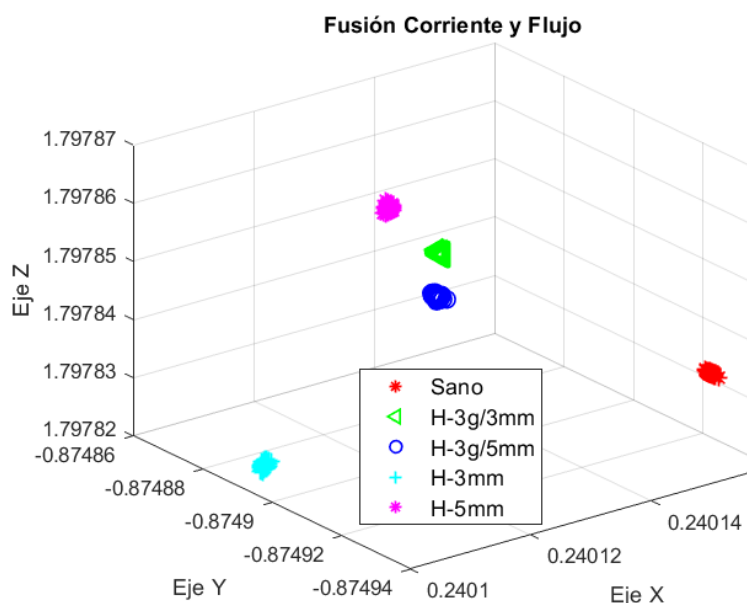


Figura 85. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 60Hz rodamiento híbrido (Autoría Propia).

Clase de Salida	1	2	3	4	5	
1	90 20.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	90 20.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
3	0 0.0%	0 0.0%	90 20.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90 20.0%	0 0.0%	100% 0.0%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90 20.0%	100% 0.0%
	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
	1	2	3	4	5	
	Clase Objetivo					

Figura 86. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 60Hz 1) Sano 2) M-3g/3mm 3) M-3g/5mm 4) M-3mm 5) M-5mm (Autoría Propia).

4.8.5 Clasificación para rodamiento Cerámico 60Hz

Para terminar esta sección se tienen los resultados obtenidos para el rodamiento cerámico en la figura 86 mostrando la gráfica correspondiente a LDA

para los mismos estados de falla propuestos en las figuras anteriores teniendo el estado sano, 3 gramos de contaminación con 3mm de perforación, 3 gramos de contaminación con 5mm de perforación, 3mm de perforación y 5mm de perforación.

Donde se observa que se encuentran en regímenes bastante alejados permitiendo tener una correcta discriminación visual. Aunado a esto se muestra en la figura 87, la matriz de confusión obtenida, donde se aprecia de manera cuantitativa los resultados obtenidos de dicha clasificación logrando un 100% de correcta clasificación para cada uno de los estados que se tienen.

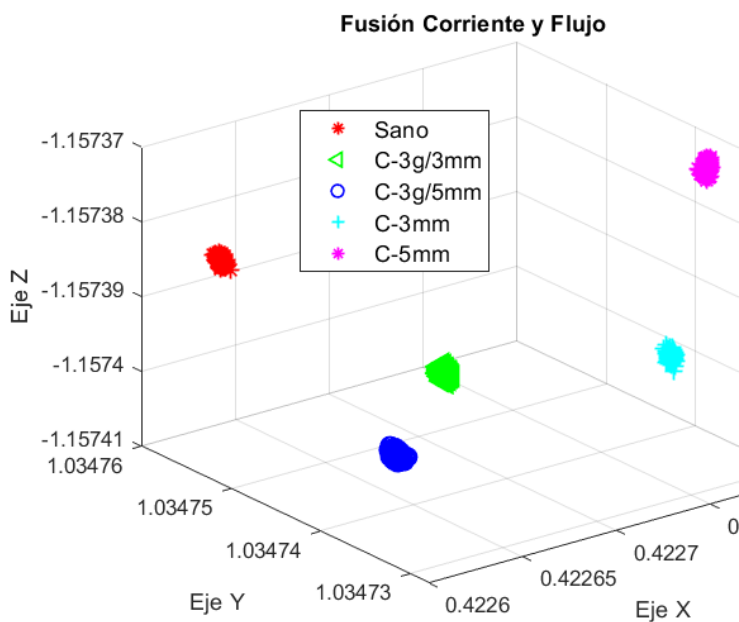


Figura 87. LDA para la combinación de Corriente y Flujo 60Hz rodamiento híbrido (Autoría Propia).

Clase de Salida	1	2	3	4	5	
1	90 20.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	90 20.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
3	0 0.0%	0 0.0%	90 20.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90 20.0%	0 0.0%	100% 0.0%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	90 20.0%	100% 0.0%
	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
	1	2	3	4	5	

Figura 88. Matriz de confusión para la combinación de corriente y flujo 60Hz 1) Sano 2) M-3g/3mm 3) M-3g/5mm 4) M-3mm 5) M-5mm (Autoría Propia).

Debido a que los resultados más significativos se obtuvieron para las señales de alimentación de 60Hz y 50Hz, no se realizó la experimentación de los fallos a 15Hz y a 5Hz, por lo cual estas 2 últimas clasificaciones se limitaron a estas 2 frecuencias.

Capítulo 5. Conclusiones y Prospectivas

5.1 Conclusiones

Después de haber realizado la metodología en su totalidad se llegó a las siguientes conclusiones. Se logro realizar un aporte en temas de diagnóstico, ya que como se sabe, al realizar el estudio del estado de arte se observa que la corriente y el flujo magnético suelen ser 2 variables fundamentales para realizar el diagnóstico de fallos en motores eléctricos, por lo que al realizar la fusión de señales de corriente y de flujo axial se obtiene una herramienta muy potente para el diagnóstico de fallas en rodamientos, ya que al utilizar dichas variables se ha logrado obtener resultados muy satisfactorios, logrando distintas clasificaciones importantes entre los distintos estados de fallo que se propusieron y de los distintos materiales de rodamiento a estudiar.

Las distintas clasificaciones que se realizaron se mencionan a continuación: Clasificación de fallos en rodamientos referentes a pista exterior con 12 distintos estados de fallo (4 severidades para cada material a estudiar) logrando una clasificación efectiva del 97.1% para frecuencia de alimentación de 60Hz, una correcta clasificación de 100% para la frecuencia de 50Hz, un 94% de correcta clasificación para la frecuencia de 15Hz y por último 89.8% de correcta discriminación entre cada uno de los estados de fallo para la frecuencia de alimentación de 5Hz.

Clasificación de los 9 estados de fallo referentes a la contaminación en los rodamientos para los 3 materiales con los que se trabajó, teniendo 3 estados de sano (1 para cada material a analizar), 3 estados de falla con 3 gramos de contaminación y una perforación de 3mm (1 para cada material a analizar) y para finalizar 3 estados de falla con 3 gramos de contaminación y una perforación de 5mm. Obteniendo una clasificación correcta del 95.2% para la frecuencia de 60Hz y una de 96.7% de efectividad para la frecuencia de alimentación de 50Hz.

Para finalizar se realizó la clasificación para cada material de rodamiento que se estudió (Metálico, híbrido y cerámico) entre 5 distintos estados de fallo para cada material por separado, teniendo 1 estado sano, 2 estados de falla de pista exterior y 2 estados de falla de contaminación en la grasa teniendo una clasificación del 100% de efectividad para los tres materiales propuestos.

Gracias a dichas clasificaciones se puede concluir que los objetivos propuestos en este trabajo se cumplieron en su totalidad, logrando realizar un aporte importante a esta rama del diagnóstico de fallos en motores de inducción la cual es de suma importancia para la industria de nuestro país y a nivel internacional.

5.2 Prospectivas

Como logro observarse en los resultados de este trabajo la fusión de corriente y el flujo magnético resulta en una herramienta muy útil para la clasificación de distintas fallas en los rodamientos a la vez, logrando discriminar 2 distintos tipos de fallo a la vez, por lo cual sería interesante llevar a cabo una implementación de dicha metodología en alguna tarjeta programable que permita realizar un diagnóstico en tiempo real, esto comenzando por un mismo motor buscando no realizar una etapa de reentrenamiento, si no emplear las base de datos ya obtenidas y realizar las validaciones reproduciendo los distintos niveles de falla que se estudiaron y comprobar que el sistema sea capaz de detectarlo de manera automática, sin la ayuda de algún usuario experto.

A su vez se puede aumentar la matriz de datos obtenida, mediante la reproducción de diversos fallos que aquejan a los rodamientos e incluirlos en dicha validación permitiendo lograr un monitoreo completo para esta falla tan recurrente en los motores eléctricos.

Referencias bibliográficas

- Ángel, M., & Pozueta, R. (2018). *Máquinas asíncronas o de inducción*. <http://personales.unican.es/rodrigma/primer/publicaciones.htm>
- Camarena-Martinez, D., Valtierra-Rodríguez, M., Garcia-Perez, A., Osornio-Ríos, R. A., & Romero-Troncoso, R. D. J. (2014). Empirical mode decomposition and neural networks on FPGA for fault diagnosis in induction motors. *The Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/90814>
- Chayjan, R. A., & Esna-Ashari, M. (2010). Comparison between artificial neural networks and mathematical models for estimating equilibrium moisture content in raisin. In *Agric Eng Int: CIGR Journal* (Vol. 12, Issue 1). <http://www.cigrjournal.org>
- Cortizo Rodriguez J. L., Fernandez Rico J.E., Fernandez Rodriguez M.R. Elementos de máquinas Teoría y Problemas. Universidad de Oviedo.
- Cureño Osornio J. (2020). Análisis de desgaste mediante flujo magnético en la pista exterior de rodamientos bajo diversas severidades de daño. (Tesis Licenciatura). Universidad Autónoma de Querétaro: Querétaro, México.
- Díaz, D., Díaz, R., Amaya, M. C., & Palacios, J. (2010). Análisis del cortocircuito entre espiras de un motor de inducción tipo jaula de ardilla mediante la aplicación del método de elementos finitos (mef) Inter-turn shortcircuit analysis in an induction machine by finit elements method. In *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia N.º* (Vol. 51).
- Díaz-Saldaña, G.; Osornio-Ríos, R.A.; Zamudio-Ramírez, I.; Cruz-Albarrán, I.A.; Trejo-Hernández, M.; Antonino-Daviu, J.A. Methodology for Tool Wear Detection in CNC Machines Based on Fusion Flux Current of Motor and Image Workpieces. *Machines* 2023, 11, 480. <https://doi.org/10.3390/machines11040480>

- Dwyer-Joyce, R. S. (1999). Predicting the abrasive wear of ball bearings by lubricant debris. *Wear*, 233–235, 692–701. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(99\)00184-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(99)00184-2)
- Enríquez Ugalde J. M. (2020). Diagnóstico multi-falla en cadena cinemática utilizando termografía infrarroja y análisis de componentes principales. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Querétaro: Querétaro, México.
- Espejo, J. (2021). *Reinventando el engrase de rodamientos*. 28–30.
- Gajjal, P. S., & Lathkar, G. S. (2021). Wear behaviour of sintered bearings using additives in dry sliding. *Materials Today: Proceedings*, 46(xxxx), 2483–2488. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.413>
- Haddad, R. Z., & Strangas, E. G. (2016). On the Accuracy of Fault Detection and Separation in Permanent Magnet Synchronous Machines Using MCSA/MVSA and LDA. In *IEEE Transactions on Energy Conversion* (Vol. 31, Issue 3, pp. 924–934). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2558183>
- Huerta-Rosales, J. R., Granados-Lieberman, D., Garcia-Perez, A., Camarena-Martinez, D., Amezquita-Sanchez, J. P., & Valtierra-Rodriguez, M. (2021). Short-circuited turn fault diagnosis in transformers by using vibration signals, statistical time features, and support vector machines on fpga. *Sensors*, 21(11). <https://doi.org/10.3390/s21113598>
- Jaen Cuellar A. Y. (2014). Diseño de arquitecturas basadas en FPGA para algoritmos Genéticos, aplicado a la optimización de controladores en sistemas de posicionamiento. (Tesis Doctorado). Universidad Autónoma de Querétaro: Querétaro, México
- Jaen-Cuellar, A. Y., Osornio-Ríos, R. A., Trejo-Hernández, M., Zamudio-Ramírez, I., Díaz-Saldaña, G., Pacheco-Guerrero, J. P., & Antonino-Daviu, J. A. (2021). System for tool-wear condition monitoring in cnc machines under variations of

- cutting parameter based on fusion stray flux-current processing. *Sensors*, 21(24). <https://doi.org/10.3390/s21248431>
- Lebaroud, A., & Clerc, G. (2008). Classification of Induction Machine Faults by Optimal Time-Frequency Representations. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 55(12), 4290–4298. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2004666>
- Lewinschal, L., “Bearings for high speed operation”, SKF Evolution, N.º 2 1994, págs. 22-26. <http://evolution.skf.com/bearings-for-high-speed-operations/>
- López-Vargas J. C., Arango-Marín J. A. (2015). Genetic algorithm for reducing the makespan in a flexible hybrid flow shop with unrelated parallel machines, and sequence-dependent setup times. *Entramado* vol.11 no.1 Cali Jan./June 2015
- Lucena-Junior, J. A., de Vasconcelos Lima, T. L., Bruno, G. P., Brito, A. V., de Souza Ramos, J. G. G., Belo, F. A., & Lima-Filho, A. C. (2020). Chaos theory using density of maxima applied to the diagnosis of three-phase induction motor bearings failure by sound analysis. *Computers in Industry*, 123, 103304. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103304>
- Lugt, P. M., & Berens, F. (2022). The Grease Life Factor concept for ball bearings. *Tribology International*, 169(January), 107460. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107460>
- Luis, I., & Romero, A. (2017). *Facultad de Ingeniería medición de vibraciones en una cadena cinemática*”.
- Martinez E., Torrent M. (2009). Determinación del rendimiento en motores de inducción trifásicos según la Norma IEC 60034-2-1. *Técnica Industrial* 282

- Martínez Luna A.K. (2021). Clasificación de fallos en rodamientos en cadenas cinemáticas utilizando la técnica de análisis de componentes principales. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Querétaro: Querétaro, México.
- Medrano-Hurtado, Z. Y., Pérez-Tello, C., Gómez-Sarduy, J., & Vera-Pérez, M. (2016). Nueva metodología de diagnóstico de fallas en rodamientos en una máquina síncrona mediante el procesamiento de señales vibro-acústicas empleando análisis de densidad de potencia. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(1), 73–85. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.01.007>
- Navarro Carmona, M. (Universidad de S. (2016). *Diagnóstico de fallos en rodamientos*. 1–98. <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5704/fichero/PFC+Maria+Navarro.pdf>
- Ramírez Chávez M. (2019). Sensor inteligente basado en técnicas de tiempo-frecuencia para supervisión de fallas en cojinetes cerámicos y metálicos. 88.(Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Querétaro: Querétaro, México.
- Renner, G., Ekart, A., (2003), Genetic Algorithms in Computer Aided Design, *Computer-Aided Design*, 35 (8), pp. 709 – 726.
- Reséndiz Ochoa E. (2020). Sistema de visión artificial para el monitoreo de motores de inducción eléctrica y la cadena cinemática mediante termografía infrarroja. 80. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Querétaro: Querétaro, México.
- Riley, F. L. (2000).(n.d.). *Silicon Nitride and Related Materials*. J. Am. Ceram. Soc., 83 [2] 245–65
- Rodamientos SKF (2019). SKF, Duoflex, CARB, ICOS, INSOCOAT, KMT, KMTA, Monoflex, Multiflex, NoWear, SensorMount, SKF Explorer, SYSTEM 24 y Wave son marcas registradas del Grupo SKF.

Rosa Lopez R. (2015). Estudio sobre la viabilidad de los estadísticos de orden superior de la corriente de alimentación como indicadores para determinar el estado de un motor de inducción. Universidad de Valladolid

Rosero Garcia J., Rosero Garcia E., Romeral Luis J., (2011). FAILURE DETECTION IN INDUCTION MACHINES BASED ON WAVELET TRANSFORM AND STFT. Revista Visión Electrónica Año 5 No. 1 pp. 38 - 47 Enero - Junio de 2011 Universidad Distrital Francisco José de Caldas - Facultad Tecnológica

Saucedo Dorantes, J. J. (2017). *Metodologías para mejorar la confiabilidad del diagnóstico de fallas en cadenas cinemáticas basado en algoritmos inteligentes y fusión de datos*. 110.(Tesis Doctoral). Universidad Autónoma de Querétaro: Querétaro, México.

Stephen J. Chapman. (2012). Máquinas eléctricas. Quinta Edición. Editorial Mc Graw Hill