



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería



Análisis de desgaste mediante flujo magnético en la pista exterior de rodamientos bajo diversas severidades de daño

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de
Ingeniero en Electromecánica

Presenta:

Jonathan Cureño Osornio

Dirigido por:

M.C. Israel Zamudio Ramírez

San Juan del Río, Qro, 25 de agosto el 2020



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



Análisis de desgaste mediante flujo magnético en la pista exterior de rodamientos
 bajo diversas severidades de daño

TESIS

Como parte de los requisitos para obtener el título de
 INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Línea Terminal
 ELÉCTRICA

Presenta:

Jonathan Cureño Osornio

Dirigido por:

M.C. Israel Zamudio Ramírez

SINODALES:

M.C. Israel Zamudio Ramírez
 Presidente


 Firma

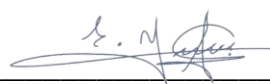
Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos
 Secretario


 Firma

Dr. Juan José Saucedo Dorantes
 Vocal


 Firma

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar
 Suplente


 Firma

San Juan del Río, Qro, 25 de agosto el 2020

AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Mater la Universidad Autónoma de Querétaro, mi segunda casa, por brindarme un espacio donde desarrollarme profesional, académicamente y personalmente, en la cual tuve la oportunidad de pertenecer desde mis estudios de bachillerato.

A mi director de tesis el M.C. Israel Zamudio Ramírez por dirigirme en este trabajo, por su orientación, su tiempo invertido, por alentarme a trabajar de la mejor manera a lo largo del proyecto y ser una excelente guía en la culminación de mi formación educativa.

Al Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos por haber sido parte fundamental del desarrollo teórico y práctico del proyecto, por su tiempo, sus consejos, su apoyo incondicional y por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo.

Al Dr. Juan José Saucedo Dorantes por apoyarme en gran parte del desarrollo práctico de este proyecto, por sus observaciones y su gran ayuda a lo largo de la realización de este trabajo.

Al Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar por su apoyo en las revisiones de la parte teórica del trabajo, por sus observaciones y sus consejos que contribuyeron a la correcta finalización del mismo.

DEDICATORIAS

A mis padres Raymundo y Maribel que siempre me apoyaron, que estuvieron pendientes de mi formación educativa, por todas las enseñanzas, por los consejos que me dieron y por siempre creer en mí.

A mi abuelo Godofredo y a mi tío Roque por ser mis ejemplos a seguir, los que desde pequeño me enseñaron el valor del trabajo, que siempre me apoyaron y me alentaron a seguir adelante.

A toda mi familia ya que siempre me han apoyado y brindado sabios consejos en diferentes momentos de mi vida.

A mis amigos de la preparatoria y la universidad por todos los buenos momentos y las anécdotas que compartimos.

Tabla de contenido

Contenido

Capítulo 1	13
1.1 Introducción.....	13
1.2 Antecedentes.....	15
1.3 Objetivos.	20
1.3.1 Objetivo general.	20
1.3.2 Objetivos específicos.	20
1.4 Descripción del problema.	21
1.5 Justificación.....	21
1.6 Planteamiento general.....	22
Capítulo 2: Fundamentación Teórica.	24
2.1 Cadena Cinemática	24
2.1.1 Definición y clasificación de las cadenas cinemáticas	24
2.1.2 Constitución de las cadenas	25
2.2 Motores de inducción.....	25
2.2.1 Definición y clasificación	25
2.2.2 Elementos que constituyen un motor de inducción.....	27
2.2.3 Principio de Funcionamiento	28
2.2.4 Ventajas y desventajas del motor de inducción	28
2.2.5 Principales fallas en los motores	30
2.3 Rodamientos	32
2.3.1 Definición y principales fallos de un rodamiento.....	32
2.3.2 Estados de fallo en los cojinetes	35
2.4 Flujo Magnético	36

2.4.1 Efecto Hall.....	37
2.4.2 Sensor A1324	38
2.4.3 Sistema Propietario para Adquisición de Flujo	39
2.5 Métodos de Procesamiento	40
2.5.1 Transformadas de Fourier	40
2.5.2 Transformada Discreta Wavelet	41
2.5.3 Indicadores	43
2.5.4 Análisis de componentes principales (PCA)	44
Capítulo 3. Metodología	45
3.1 Selección de Rodamientos y Cortadores	46
3.1.1 Rodamientos	46
3.1.2 Cortadores	47
3.2 Manufactura para inducción de fallos	48
3.2.1 Máquina fresadora	48
3.2.2 Rodamientos	49
3.3 Selección de Cadena Cinemática	50
3.4 Determinación de la Matriz de Pruebas	51
3.5 Instalación de Sensor Propietario de Flujo.....	52
3.6 Experimentación	53
3.7 Tarjeta de Adquisición de datos.....	55
3.8 Procesamiento de Señales de Flujo	55
3.8.1 Procesamiento de flujo para gradualidad mediante FFT	56
3.8.2 Procesamiento de flujo para gradualidad mediante DWT + Energía	57
3.8.3 Procesamiento de flujo para gradualidad mediante Indicadores estadísticos y PCA.....	58

Capítulo 4. Resultados	59
4.1 Resultado de Inducción de Fallos	59
4.2 Adquisición de datos sin procesamiento	60
4.2.1 Señales adquiridas para 50 Hz con variador	60
4.2.1 Señales adquiridas para 60 Hz Directo	63
4.3 Procesamiento de señales mediante FFT.....	67
4.3.1 Procesamiento de 50 Hz para $K=1$	67
4.3.2 Procesamiento de 50 Hz para $K=4$	71
4.4 Procesamiento de señales mediante DWT + Energía.....	75
4.4.1 Procesamiento DWT para 5Hz con variador de frecuencia	75
4.4.2 Procesamiento DWT para 15Hz con variador de frecuencia	76
4.4.3 Procesamiento DWT para 50Hz con variador de frecuencia	77
4.4.4 Procesamiento DWT para 60Hz con variador de frecuencia	78
4.4.5 Procesamiento DWT para 60Hz con arranque directo	79
4.5 Procesamiento de señales mediante PCA con Indicadores Estadísticos	81
4.5.1 Procesamiento PCA para 5Hz con variador de frecuencia	81
4.5.2 Procesamiento PCA para 15Hz con variador de frecuencia	83
4.5.3 Procesamiento PCA para 50Hz con variador de frecuencia	85
4.5.4 Procesamiento PCA para 60Hz con variador de frecuencia	86
4.5.5 Procesamiento PCA para 60Hz con arranque directo	88
Capítulo 5: Conclusiones y Prospectivas	89
5.1 Conclusiones	89
5.2 Prospectivas	90
Referencias	91

Tabla de Ilustraciones

Figura 1 Diagrama de planteamiento general.....	23
Figura 2 Ejemplo de una cadena cinemática cerrada.....	24
Figura 3 Ejemplo de una cadena cinemática abierta.....	24
Figura 4 Tipos de motores eléctricos.....	26
Figura 5 Partes del motor de inducción.....	27
Figura 6 Esquema de consecuencia de aumentar carga.....	29
Figura 7 Transito desde el suministro energético hasta la salida de tres fases.....	30
Figura 8 Partes de los rodamientos.....	33
Figura 9 Espectros de vibraciones de cojinetes sano / dañado.....	34
Figura 10 Esquema de un rodamiento de elementos rodantes.....	36
Figura 11 Efecto Hall y Fuerza Lorentz.....	37
Figura 12 Sección transversal del sensor empleado.....	39
Figura 13. Esquemático del Sensor Propietario de Flujo	40
Figura 14. Descomposición de señales wavelet y bandas de frecuencia asociadas	42
Figura 15 Ejemplo de procesamiento por PCA.....	45
Figura 16 Diagrama general de metodología	46
Figura 17 Rodamiento Seleccionado 6203 2RS / C3	47
Figura 18 Cortadores de carburo empleados para la inducción de fallos	48
Figura 19. Maquina Fresadora Bridgeport.....	48
Figura 20. Rodamiento listo para la inducción del fallo.....	49
Figura 21. Manufactura de los fallos sobre el rodamiento.....	49
Figura 22. Cadena cinemática a) Motor de inducción b) Alternador c) Banda de transmisión d) Variador de frecuencia.....	50
Figura 23. Instalación de la tarjeta en la parte lateral del motor de inducción.....	52
Figura 24. Proceso de desensamblado del motor.....	53
Figura 25. Extracción del rodamiento sobre el eje.....	53
Figura 26. Inserción del rodamiento sobre el eje.....	54

Figura 27. Sistema de adquisición de datos.....	55
Figura 28. Pasos para aplicar FFT.....	56
Figura 29. Pasos para aplicar DWT.....	57
Figura 30. Pasos para aplicar PCA.....	58
Figura 31. Rodamientos con la falla inducida.....	60
Figura 32. Señal adquirida para 50 Hz Sano.....	61
Figura 33. Señal adquirida para 50 Hz 5mm de fallo.....	61
Figura 34. Señal adquirida para 50 Hz 4mm de fallo.....	62
Figura 35. Señal adquirida para 50 Hz 3mm de fallo.....	62
Figura 36. Señal adquirida para 50 Hz 2mm de fallo.....	63
Figura 37. Señal adquirida para 50 Hz 1mm de fallo.....	63
Figura 38. Señal adquirida para 60 Hz directo Sano.....	64
Figura 39. Señal adquirida para 60 Hz directo fallo de 5mm.....	64
Figura 40. Señal adquirida para 60 Hz directo fallo de 4mm.....	65
Figura 41. Señal adquirida para 60 Hz directo fallo de 3mm.....	65
Figura 42. Señal adquirida para 60 Hz directo fallo de 2mm.....	66
Figura 43. Señal adquirida para 60 Hz directo fallo de 1mm.....	66
Figura 44. Gráfica análisis FFT Azul = Sano, Rojo = Fallo 5mm k = 1.....	68
Figura 45. Gráfica análisis FFT Azul = Sano, Rojo = Fallo 4mm k = 1.....	68
Figura 46. Gráfica análisis FFT Azul = Sano, Rojo = Fallo 3mm k = 1.....	69
Figura 47. Gráfica análisis FFT Azul = Sano, Rojo = Fallo 2mm k = 1.....	70
Figura 48. Gráfica análisis FFT Azul = Sano, Rojo = Fallo 1mm k = 1.....	70
Figura 49. Gráfica análisis FFT Azul = Sano, Rojo = Fallo 5mm k = 4.....	71
Figura 50. Gráfica análisis FFT Azul = Sano, Rojo = Fallo 4mm k = 4.....	72
Figura 51. Gráfica análisis FFT Azul = Sano, Rojo = Fallo 3mm k = 4.....	73
Figura 52. Gráfica análisis FFT Azul = Sano, Rojo = Fallo 2mm k = 4.....	74
Figura 53. Gráfica análisis FFT Azul = Sano, Rojo = Fallo 1mm k = 4.....	74
Figura 54. Análisis DWT para 5 Hz con variador de frecuencia.....	75
Figura 55. Análisis DWT para 15 Hz con variador de frecuencia.....	76

Figura 56. Análisis DWT de 3 estados de rodamiento exitosos para 15 Hz.....	77
Figura 57. Análisis DWT para 50 Hz con variador de frecuencia.....	77
Figura 58. Análisis DWT de 3 estados de rodamiento exitosos para 50 Hz.....	78
Figura 59 Análisis DWT para 60 Hz con variador de frecuencia.....	79
Figura 60. Análisis DWT de 3 estados de rodamiento exitosos para 60 Hz.....	79
Figura 61. Análisis DWT para 50 Hz con variador de frecuencia.....	80
Figura 62. Análisis PCA para 5Hz con variador de frecuencia.....	82
Figura 63. Acercamiento de Figura 62 en estado sano y fallo 2mm.....	82
Figura 64. Análisis PCA para 15Hz con variador de frecuencia.....	83
Figura 65. Acercamiento de Figura 64 en estado sano y fallo 2mm.....	84
Figura 66. Análisis PCA para 50Hz con variador de frecuencia.....	85
Figura 67. Análisis PCA para 60Hz con variador de frecuencia.....	86
Figura 68. Acercamiento de Figura 67 en estado fallo 3mm y fallo 4mm.....	87
Figura 69. Análisis PCA para 60Hz con arranque directo.....	88

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Tabla de Ecuaciones

Ecuación 1.....	26
Ecuación 2.....	28
Ecuación 3.....	36
Ecuación 4.....	36
Ecuación 5.....	36
Ecuación 6.....	38
Ecuación 7.....	41
Ecuación 8.....	41
Ecuación 9.....	41
Ecuación 10.....	43
Ecuación 11.....	43
Ecuación 12.....	44

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Índice de tablas

Tabla 1 Bandas de frecuencia asociadas a las señales wavelet para $f_s = 5\text{KHz}$...	42
Tabla 2 Matriz de Pruebas Realizadas.....	51
Tabla 3 Frecuencias de interés para realizar el análisis.....	56

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Capítulo 1

1.1 Introducción.

La manufactura en México hoy día es de gran importancia en el desarrollo del país, aportando el 17% del PIB (Producto Interno Bruto) y generando una parte importante del empleo formal, aunque en los últimos años se ha producido una negativa en el crecimiento de la productividad debido al rezago tecnológico constante, por lo cual se vuelve necesaria la implementación de elementos innovadores para mejorar el rendimiento de las líneas de producción (García et al, 2019).

En gran parte de la industria se cuenta con diversos procesos que emplean maquinaria que está conformada por cadenas cinemáticas. De acuerdo con Romero et al (2018) las cadenas cinemáticas son interconexiones de varios eslabones, los cuales facilitan el movimiento para cada uno de sus componentes. Una cadena cinemática suele conformarse principalmente por alguno o varios de los siguientes componentes: motores de inducción, cajas de engranes, ejes de transmisión, bandas, baleros, entre otros. Todos los elementos que componen dichas cadenas son susceptibles a la aparición de fallos que son inherentes a las condiciones de operación y ponen en riesgo el buen funcionamiento de la misma y por ende, los procesos de producción a los cuales se encuentran asociados.

Los principales componentes de las cadenas cinemáticas suelen ser las máquinas eléctricas, como muestra Sosa et al (2015) estas representan el 85% del consumo energético en todo el mundo y puesto que el motor de inducción es la principal forma de conversión de energía eléctrica a mecánica llega a emplear casi el 90% de la energía total consumida en la industria. El motor a su vez tiene sus componentes principales, pero como la mayoría de los estudios ha demostrado el componente que suele ocasionar más fallas es el rodamiento, llegando a provocar hasta el 69% de las fallas totales en un motor (Bonnett et al. 2007). Por esta razón los rodamientos son uno de los componentes que permiten efectuar el movimiento giratorio de un motor, el funcionamiento correcto de los baleros es fundamental para la confiabilidad, durabilidad y eficiencia de los equipos mecánicos a los que se

encuentra integrado el motor. Cualquier falla de un rodamiento ocasionaría grandes efectos negativos que van desde la inactividad de la producción hasta la pérdida de un equipo completo, por esa razón es necesario implementar sistemas que permitan monitorear el estado de los componentes principales, aunque hasta el momento la mayoría de sistemas suelen ser invasivos y necesitan una interacción directa con los componentes (Tyan and Wang, 2020).

Del análisis anterior, surge la necesidad de buscar nuevos métodos para monitorear el estado de los rodamientos sin ser invasivos con el motor y/o el resto de la cadena cinemática. En este sentido, en esta tesis se utilizará como variable de diagnóstico de fallo en rodamientos el flujo magnético de dispersión como un nuevo método (no reportado hasta ahora en la literatura para el diagnóstico oportuno de fallos en los rodamientos), con ayuda de sensores de efecto Hall, para su posterior análisis mediante herramientas de procesamiento de señales basadas en la descomposición tiempo-frecuencia y parámetros estadísticos y no estadísticos adecuados para ello. Como aporte adicional se estudiarán diferentes gradualidades de desgaste de la pista exterior de un rodamiento metálico, induciendo diferentes diámetros en las muestras de rodamientos con fallo, para así determinar el efecto que tienen en el diagnóstico.

La presente tesis se estructura de la siguiente manera: en el primer capítulo, se abordan los antecedentes de los trabajos relacionados, se enuncian los objetivos de la misma, para establecer posteriormente la descripción del problema y la justificación. Por último, en este primer capítulo se da una descripción general del proyecto realizado. El segundo capítulo está compuesto por la fundamentación teórica que incluye todas las herramientas y conceptos teóricos requeridos para el desarrollo de la tesis. En el capítulo tercero se presenta la metodología en la cual se basa este trabajo. Los resultados y su discusión encontrados por el desarrollo del trabajo se encuentran establecidos en el capítulo cuarto. Para finalmente en el capítulo quinto se encuentran las Conclusiones y Prospectivas que en base a los objetivos y resultados arroja la tesis.

1.2 Antecedentes.

Es importante tener en cuenta que las cadenas cinemáticas juegan un papel muy importante en las líneas de producción de la industria, y uno de los principales componentes de éstas son los motores, por lo que resulta fundamental analizar algunos métodos reportados para tener una referencia del estado del arte que abordan el diagnóstico de fallos en motores. Por otro lado, de acuerdo a la literatura se sabe que los rodamientos son los elementos que suelen fallar primero en los motores, por lo que en los últimos años se ha puesto especial énfasis en las fallas relacionadas con éstos y en esta sección se realizará un análisis de dichos métodos.

Como un ejemplo de las técnicas utilizadas para el diagnóstico de fallas sobre las cadenas cinemáticas se presenta el trabajo propuesto por García et al. (2014) donde se empleó el análisis termográfico como técnica para el diagnóstico de fallas con la principal ventaja de no ser invasivo y tener una amplia gama de análisis. El trabajo se basa en la segmentación de imágenes termográficas enfocadas a detectar cualquier aumento de temperatura en la cadena cinemática (conformada por: motor de inducción, ejes, poleas, correas y acoplamientos) para detectar cualquier fallo y determinar la causa que lo ocasiona. Otro trabajo relacionado con análisis en cadenas cinemáticas es el presentado Saucedo (2017) quien propuso una metodología para el diagnóstico de fallas críticas en cadenas cinemáticas compuestas por elementos mecánicos y eléctricos, el análisis se basa en diferentes técnicas de fusión de datos y algoritmos inteligentes con el que se pueden clasificar las múltiples fallas que pudieran llegar a aparecer en dichas cadenas. En dicho trabajo se evaluaron cuatro severidades en una caja de engranes (engrane sano, y engranes con desgaste al 25%, 50% y 75%) y a su vez evalúa seis fallos sobre un motor de inducción (rodamiento sano, rodamiento dañado, barras rotas, desbalance y desalineamiento) el método que propone entrega un diagnóstico de falla de alto rendimiento bajo las diferentes condiciones de operación. Por otra parte, Lin (2017) hizo énfasis en la importancia de las cadenas cinemáticas dentro de la industria, por lo cual propone un modelo de calibración computarizado especializado para los robots de líneas de producción el cual podría

restringir las posiciones finales de cada cadena y así dar mayor eficiencia a los procesos eliminando los errores de posicionamiento en el efector final.

Como ya se mencionó los motores de inducción constituyen el elemento esencial de cualquier cadena cinemática por lo que su buen funcionamiento resulta crítico, ya que cualquier fallo en ellos puede producir un paro inesperado en la producción de la planta o afectación en la cadena cinemática. Por lo anterior se han reportado infinidad de trabajos para la detección de fallos en motores entre los cuales se encuentra el de García et al. (2011) quienes propusieron un nuevo método para la prevención de fallas en los motores, el cual combina un banco finito de filtros de respuesta a impulsos con análisis espectral de alta resolución, que tiene su base en la clasificación de señales múltiples para la identificación precisa de las fallas relacionadas con la frecuencia. Otro trabajo en motores es el desarrollado por Villada et al. (2006) enfocado al comportamiento del motor de inducción ante fallos progresivos con incrementos graduales en su aislamiento, esto con el objetivo de observar las consecuencias ocasionados sobre ellos. Para lo anterior se utilizan señales de vibraciones como principal variable de análisis, la cual es tabulada para identificar las componentes armónicas que presenten mayores variaciones de amplitud para identificar los fallos correspondientes. Giaccone et al. (2014) presentaron un modelo que se encarga de describir al motor de inducción con falla a neutro en las bobinas de una fase, dicho modelo evalúa los efectos que esta falla tiene en la traza del vector de corrientes y en su espectro vectorial. Con lo anterior, se logró mostrar que estas fallas en el estator producen una modificación del vector de la corriente debido a la aparición de una componente de secuencia negativa de frecuencia nominal, la cual se usa como variable principal para el diagnóstico final. Por otro lado, debido a que un motor de inducción es muy susceptible a sufrir algún tipo de falla De Angelo et al. (2017) presentaron una estrategia para el diagnóstico de fallas en los estatores de los motores de inducción mediante la información contenida en las tensiones y corrientes de alimentación. El método se propone la generación de un vector de residuos específicos por medio de un observador de estados que permite detectar la fase dañada y cuantificar el número de espirales que se encuentran en cortocircuito y una ventaja es que es poco sensible a los

cambios de carga o perturbaciones de la red como a los armónicos o desbalances. Zamudio et al. (2020) desarrollaron un algoritmo avanzado basado en la combinación de MUSIC (Multiple Signal Classification, *Clasificación Múltiple de Señales*) y redes neuronales. Con el método propuesto es posible la identificación matemática de los patrones en el dominio tiempo-frecuencia creados por los componentes de falla del flujo parasito en el arranque del motor y se determina el nivel de gravedad de la falla, en este trabajo se consideran dos condiciones: fallas en el rotor y desalineamiento.

Según Bonnett et al. (2007) uno de los elementos más importantes en el motor es el rodamiento, pero también es la principal causa de fallas llegando a ocasionar hasta el 69% de los fallos totales de un motor. Por esta razón, investigó cuales son las principales razones por las que el rodamiento es la constante de falla en los motores, abordando los distintos métodos de alineamiento en los rodamientos y a su vez observar la diferencia de un rodamiento correctamente lubricado y otro lubricado con grasa estándar sin ninguna regulación. El trabajo considera 3 tipos diferentes de motores sometidas a pruebas con rodamientos con falla, el método busca la manera de aumentar la confiabilidad de estos. Otro estudio relacionado con fallos en rodamientos es el desarrollado por Lu et al. (2021) el cual propuso un método capaz de realizar una selección y clasificación de defectos como lo son cualquier tipo de desgaste como: grietas, magulladuras, picaduras, rasgaduras o deformaciones en la pista superior del rodamiento logrando obtener hasta un 99.5% de efectividad. El método empleó un algoritmo de segmentación de imágenes de red multi-neural local (Lc-MNN) con la transformada Wavelet como principal característica de clasificación, la cual se logra extrayendo características de ondulaciones, dividiendo la región multi-neural y por último haciendo la clasificación. Por otro lado, Guoping et al. (2021) determinaron la importancia en el diagnóstico de fallas de los rodamientos, en el trabajo se le aplicó una electrodescarga a los rodamientos para inducir un daño en la pista exterior para que el giro no fuera completamente uniforme y proponen un algoritmo de descomposición en modo variacional para extraer las fallas utilizando la selección adaptativa óptima y el parámetro de control del ancho de banda, evaluando así las señales prácticas de

vibración de manera más sencilla y extrayendo de forma efectiva la señal de los rodamientos. Otra propuesta para detección de fallas en los rodamientos es la de Tuan et al. (2020) quienes emplearon las redes neuronales convolucionales (CNN) y apoyándose del procesamiento de señales de emisión acústica que seleccionan funciones en modo intrínseco. Con lo anterior, obtienen la señal necesaria para analizar el fallo con la transformada de Gabor no estacionaria obteniendo hasta un 99.58% de efectividad para detectar fallas relacionadas con el desgaste de los rodamientos por usarlos en procesos muy demandantes de manera más precisa. Otro estudio relacionado es el propuesto por Hamida et al. (2016) en el cual se presentó un estudio con dos severidades en 2 baleros con perforaciones de 3mm y 6 mm para simular un desgaste por descarga eléctrica, con esto se plantea implementar un método de diagnóstico MUSIC midiendo la corriente y la tensión para usarla como variable de análisis. El objetivo general del trabajo es identificar fisuras progresivas en la pista exterior del rodamiento.

Por otro lado, es de relevancia mencionar que en los últimos años la utilización del flujo magnético disperso se ha vuelto un método importante en la detección del estado de los motores de inducción y fallas que estos pudieran presentar. Esto se debe a la naturaleza del mismo, ya que permite ser una opción no invasiva ganando terreno ante los demás métodos reportados en la literatura, además de ser un método fácil de implementar, procesar y económico. El mantenimiento predictivo es de suma importancia y aún más la técnica con la que se realiza el diagnóstico es lo que establecen Villada et al. (2004) utilizando el flujo magnético de dispersión para el diagnóstico del estado del aislamiento estático en los motores de inducción mediante bobinas diseñadas para adquirir dicha señal; captando ciertas frecuencias características de cada fallo y aumentando los niveles de alarma en la detección según el tipo de máquina y su capacidad. Otra propuesta es la de Anteliz (2009) quien utilizó la caracterización espectral del flujo magnético disperso presente en los motores de inducción bajo diferentes condiciones de operación. Para lo anterior se emplea un sensor de campo magnético y las técnicas de tratamiento digital de señales, obteniendo una clara relación ente el contenido espectral del flujo y las diferentes condiciones de operación evaluadas. Este trabajo

permitió obtener excelentes resultados utilizando el flujo magnético disperso como una herramienta efectiva para la detección de fallas en los motores. Otro trabajo es el de Sintesis (2019) quien empleó técnicas basadas en análisis de flujo magnético de dispersión para la detección de asimetrías en el devanado del rotor en máquinas asíncronas, el trabajo se centra en el arranque de la máquina, induciendo una fuerza electromotriz con una bobina externa para simular diferentes niveles de avería en el rotor por último se procesan las señales con la transformada Wavelet. Zamudio et al. (2020) aplicaron el análisis del flujo parasito en las proximidades del motor para detectar fallas y desalineaciones de las barras del rotor, induciendo una falla de asimetría en el rotor mediante un reóstato y midiéndolo con 3 bobinas posicionadas de tal manera que se midiera el flujo axial y radial para al final procesar las señales mediante la Transformada Discreta de Wavelet, con ello logran descomponer una señal bien definida en varias señales de ondas en rangos de frecuencia específicos para poder llevar acabo su análisis y determinar el fallo.

Como se puede observar en la revisión de los trabajos anteriores las cadenas cinemáticas son una parte fundamental en la industria tomando como elemento principal de dichas cadenas el motor de inducción. El análisis de la literatura también refleja que es común que en el motor se induzcan diferentes tipos de fallas, pero uno de los principales se encuentra en los rodamientos ya que son los elementos que se encuentran en constante movimiento y sometidos a cargas severas dentro del motor. De acuerdo a lo consultado a la fecha se han empleado varios métodos para la detección de estas fallas utilizando variables como corriente, vibraciones, termografía y otras, pero no se reporta el empleo del flujo magnético disperso para estudiar este fallo. En resumen, el estudio de diversas severidades de fallo en la pista exterior de los rodamientos y la utilización del flujo magnético disperso constituyen las áreas principales de oportunidad para este trabajo.

1.3 Objetivos.

1.3.1 Objetivo general.

Inducir diferentes severidades de daño en la pista exterior de un rodamiento metálico, mediante el maquinado artificial de diferentes diámetros de fallo para su detección procesando el flujo magnético de dispersión en un motor de inducción de una cadena cinemática.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Estudiar causas y efectos de los fallos en rodamientos mediante la revisión de la literatura para determinar los efectos que tiene una falla en la pista exterior de un rodamiento.
- Seleccionar las diferentes gradualidades de fallo a inducir en la pista exterior de los rodamientos mediante el estudio de los diámetros y rangos reportados en la literatura para la generación de un banco de pruebas y el establecimiento de la relación gradualidad de fallo con flujo disperso.
- Inducir los fallos de gradualidad de los rodamientos mediante la perforación artificial de la pista exterior para el estudio del efecto sobre el flujo magnético de dispersión en motores de inducción.
- Instalar los equipos propietarios de adquisición de señales, mediante la familiarización y adecuación requerida para obtener los datos de flujo magnético de dispersión en los motores de inducción.
- Realizar la experimentación basada en las gradualidades de fallo seleccionadas en la pista exterior del rodamiento mediante su implementación basado en una cadena cinemática compuesta por motor de inducción y alternador para la obtención de una base de datos del flujo disperso en el motor de inducción.
- Procesar las señales de flujo magnético de dispersión en un motor de inducción de la cadena cinemática mediante el empleo de herramientas matemáticas de descomposición tiempo frecuencia y parámetros

estadísticos y no estadísticos para determinar el efecto de la gradualidad del fallo en el rodamiento.

1.4 Descripción del problema.

Después de realizar la revisión de los Antecedentes relacionados con la investigación se encontraron y destacan las siguientes problemáticas:

- Las fallas principales en las cadenas cinemáticas se deben a las máquinas eléctricas. El elemento donde se presenta uno de los problemas principales en las máquinas eléctricas son en los rodamientos del motor de inducción.
- Los métodos existentes o reportados a la fecha para detección de fallos en rodamientos continúan siendo demasiado invasivos o dependientes de la medición en otros elementos de las máquinas o cadenas cinemáticas.
- Los fallos en rodamientos pueden ocasionar diversos problemas como son: vibraciones, desgaste acelerado de los componentes giratorios, gastos excesivos de corriente, paros en la producción y otros.
- Uno de los fallos que más afecta al rodamiento es el generado en su pista exterior, el cual se denomina erosión eléctrica ocasionando perforaciones en esta región y a la fecha no se reportan métodos efectivos no invasivos para su detección.
- No se reportan estudios con diversas severidades de daño en el diámetro de la perforación en la pista exterior que evalúen la influencia de dicha severidad en la detección del fallo.

1.5 Justificación.

Respondiendo a las problemáticas planteadas en esta sección se presentan los siguientes puntos como respuesta a los nichos de oportunidad o justificación para el desarrollo del presente trabajo:

- Este trabajo aborda una solución para una de las fallas principales en las cadenas cinemáticas, la detección de fallos en los rodamientos del motor de inducción.
- Se desarrolla un método basado en un sistema propietario para la medición de flujo magnético disperso, de tal manera que debido a su ubicación y principio de funcionamiento no resulta invasivo.
- El método propuesto basado en flujo magnético disperso y las herramientas de procesamiento permitirán obtener un diagnóstico del fallo en el rodamiento sin tener que detener la línea de producción, además dicho diagnóstico permitirá tomar acciones correctivas para amortiguar el resto de problemas ocasionados por el fallo en el rodamiento.
- Se utilizan herramientas matemáticas de descomposición tiempo frecuencia y parámetros estadísticos y no estadísticos para detectar el fallo denominado erosión eléctrica que ocasiona las perforaciones en la pista exterior del rodamiento.
- Se inducen diversas gradualidades en el fallo relacionado con la erosión eléctrica que ocasiona las perforaciones en la pista exterior del rodamiento, realizando perforaciones artificiales de 1mm, 2mm, 3mm, 4mm y 5mm; comparando con el estado sano se concluye en este estudio si existe afectación.

1.6 Planteamiento general.

El desarrollo del presente trabajo se muestra a través del esquema mostrado en la Figura 1, donde se determina de manera general la secuencia de la investigación desarrollada y los resultados que se buscan. El primer paso dentro del trabajo fue la selección del rodamiento con el que se experimenta, para posteriormente llevar a cabo la inducción de un fallo sobre la pista exterior del rodamiento. Para ello se realiza a través de un proceso de fresado, la perforación de manera gradual desde 1 mm hasta llegar a 5 mm; en 5 rodamientos y otro más se utiliza como referencia en estado sano. Con lo anterior se realiza el estudio con la intención de observar la detección del fallo mediante flujo con la severidad

inducida en los rodamientos. La experimentación se llevó a cabo sobre una cadena cinemática que contiene un motor de 1 hp, un sistema de transmisión basada en una banda y poleas, y un alternador de uso automotriz como carga. Después se selecciona el nivel de severidad del rodamiento (de 1 a 5 mm) que se instala en la cadena cinemática y se procede a realizar las pruebas. En la cadena cinemática también se instala un sensor propietario de flujo magnético disperso, que en conjunto con su sistema de adquisición se obtienen los datos del flujo correspondiente a cada caso de fallo. Finalmente se realiza el Procesamiento de los datos, empleando técnicas matemáticas de descomposición tiempo frecuencia y parámetros estadísticos y no estadísticos y dar un diagnóstico de fallo o concluir su eficacia en comparación con otros métodos abordados en la literatura.

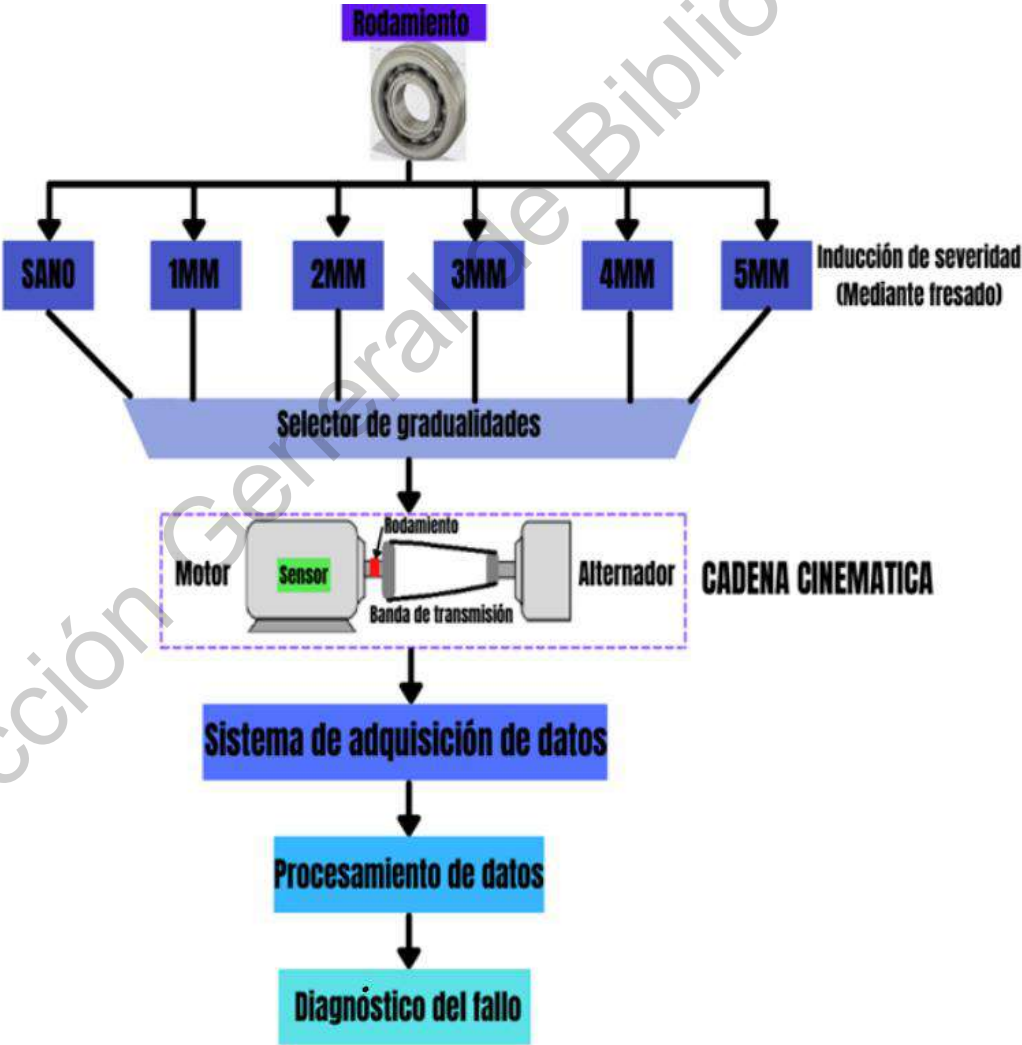


Figura 1. Diagrama de planteamiento general. (Autoría Propia)

Capítulo 2: Fundamentación Teórica.

2.1 Cadena Cinemática

2.1.1 Definición y clasificación de las cadenas cinemáticas

Una cadena cinemática se considera como tal, cuando un número de eslabones están conectados unos a los otros por pares elementales, de tal forma que permitan que el movimiento se efectúe en combinación (Castillo, 2005).

Las cadenas cinemáticas pueden clasificarse en dos grupos:

- Cadenas cerradas, cuando todos y cada uno de los miembros se uno a otros dos como se puede apreciar en la Figura 2.

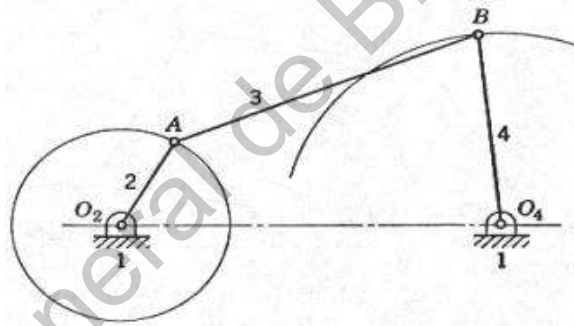


Figura 2. Ejemplo de una cadena cinemática cerrada (Castillo, 2005).

- Cadena abierta, cuando hay algún miembro no unido a otros dos y este se encuentra con mayor movilidad como lo muestra la Figura 3.

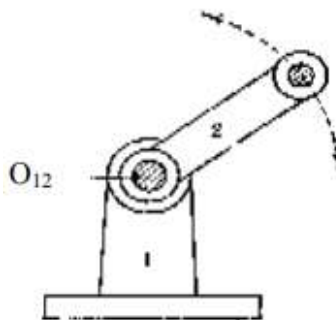


Figura 3. Ejemplo de una cadena cinemática abierta (Castillo, 2005).

2.1.2 Constitución de las cadenas

Una cadena cinemática puede estar constituida por pares superiores, inferiores o ambos simultáneamente. Al mismo tiempo, también puede contener pares de igual o de diferente grado. La cadena cinemática más sencilla contendrá solo dos miembros (un par), siendo necesariamente abierta. Un ejemplo puede constituirlo la cadena formada por un tornillo y su tuerca o un cerrojo de pasador. Las cadenas cinemáticas cerradas más simples pueden formarse con solo tres miembros (Castillo, 2005).

Mecanismo

Un mecanismo es una cadena cinemática a la que se le ha inmovilizado uno de sus miembros, a este eslabón fijo se le llama bastidor. Puede haber una máquina compuesta por varios mecanismos en la que un miembro móvil de uno de ellos sea el bastidor (eslabón fijo) de otro mecanismo. Recordando la definición de mecanismo determinada por Reuleaux es evidente que se necesita tener una cadena cinemática cerrada con un eslabón fijo. Cuando se habla de un eslabón fijo se entiende que se elige como marco de referencia para todos los demás eslabones, es decir, que los movimientos de todos los demás eslabones se medirán con respecto a ese en particular ya que se le considera como fijo (Castillo, 2005).

2.2 Motores de inducción

2.2.1 Definición y clasificación

El motor de inducción recibe este nombre porque, al igual que el transformador opera bajo el principio de inducción electromagnética. Debido a que este tipo de motores no llega a trabajar nunca a su velocidad síncrona, también se conocen como motores asíncronos

La velocidad síncrona, es la velocidad de rotación del campo magnético. La velocidad síncrona de un motor de inducción depende de la frecuencia de alimentación (60 Hz en México) y del número de polos. En la Ecuación 1 se muestra

la fórmula para calcular la velocidad síncrona donde N =Velocidad síncrona, P = Numero de Polos y f = Frecuencia de alimentación (Harper, 2005):

$$N = \frac{120 * f}{P} \quad \text{Ecuación 1}$$

Por el número de fases los motores de inducción se clasifican en general como:

- Trifásicos
- Bifásicos
- Monofásicos

Por el tipo de rotor pueden ser:

- De rotor devanado.
- De rotor jaula de ardilla.

En la Figura 4 se puede observar la clasificación de los motores eléctricos.

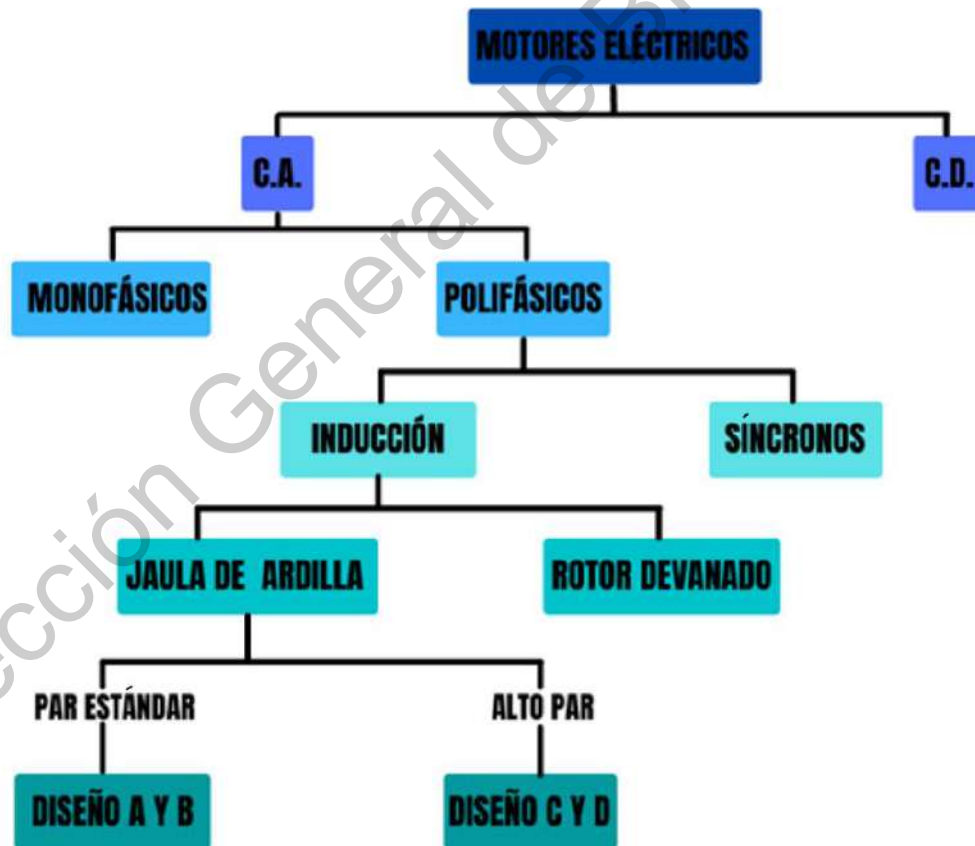


Figura 4. Tipos de motores eléctricos (Autoría Propia)

2.2.2 Elementos que constituyen un motor de inducción

Las máquinas asíncronas tienen un circuito magnético sin polos salientes estando ranurados tanto el estator como el rotor. Ambos órganos de la máquina se fabrican a base de apilar chapas delgadas de acero al silicio para reducir pérdidas electromagnéticas.

El devanado del estator normalmente es trifásico, aunque en máquinas de pequeña potencia también puede ser monofásico o bifásico. El devanado del rotor siempre es polifásico. Ambos devanados tienen el mismo número de polos.

El rotor puede ser de dos tipos: de jaula de ardilla o en cortocircuito y de rotor bobinado o con anillos. El número de fases de este devanado depende de su número de barras.

El bloque de chapas que forma el circuito magnético del rotor tiene un agujero central donde se coloca el eje o árbol de la máquina. En muchas ocasiones se coloca un ventilador en este eje para facilitar la refrigeración de la máquina. La carcasa es la envoltura de la máquina y tiene dos tapas laterales donde se colocan los cojinetes (rodamientos) en los que se apoya el árbol como se muestra en la Figura 5. En la carcasa está la placa de características donde figuran las magnitudes más importantes de la máquina, también se tiene la caja de bornes adónde van a parar los extremos de los bobinados (Rodríguez, 2015).

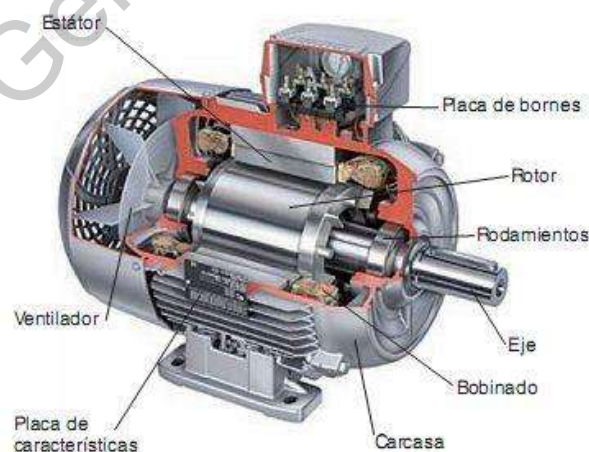


Figura 5. Partes del motor de inducción (Rega, 2011)

2.2.3 Principio de Funcionamiento

En este tipo de máquina el bobinado del estator está recorrido por un sistema equilibrado de corrientes que da lugar a un campo magnético giratorio cuya velocidad es la conocida como velocidad de sincronismo. Cuando esta velocidad se mide en revoluciones por minuto (r.p.m.) se la denomina n_1 y se calcula a partir de la frecuencia del sistema (f_e) y p es el número de polos y se calcula mediante la fórmula expresada en la Ecuación 2:

$$n_1 = \frac{60f_e}{p} \quad \text{Ecuación 2}$$

Como el rotor gira a una velocidad diferente de la del campo magnético del estator, sus bobinas están sometidas a la acción de un flujo magnético variable y se inducen f.e.m.s (Fuerzas electromotrices) de rotación en ellas. El devanado del rotor está en cortocircuito, luego estas f.e.m.s (Fuerzas electromotrices) producen la circulación de corrientes en el rotor que, al interactuar con el campo magnético del estator, originan un par en el eje de la máquina.

Por la Ley de Lenz, este par mecánico intentará reducir las variaciones de flujo magnético en el devanado del rotor y, por lo tanto, tratará de hacerlo girar a la misma velocidad que el campo magnético giratorio (ya que las variaciones de flujo en las bobinas del rotor son debidas al movimiento relativo del campo giratorio con respecto al rotor), pero sin conseguirlo nunca, ya que entonces no habría corrientes en el rotor ni, por consiguiente, par en el eje de la máquina.

La velocidad de esta máquina es, pues, ligeramente distinta de la de sincronismo, de ahí su nombre de asíncronas. Por otra parte, las corrientes que circulan por el rotor aparecen por inducción electromagnética, de ahí su otro nombre de máquinas de inducción (Rodríguez, 2015).

2.2.4 Ventajas y desventajas del motor de inducción

A continuación, se mencionará los motivos por los cuales, el motor de inducción trifásicos es el más utilizados en todos los sectores industriales, a través de sus ventajas, pero también se destacarán cuáles son sus principales inconvenientes destacando sus desventajas.

Ventajas

- La única alimentación eléctrica que recibe se hace a través de la línea trifásica que alimenta al devanado estatórico. No es necesario ningún elemento rozante sometido a fatiga o desgaste, como escobillas de grafito en el caso de motores de corriente continua, motores de corriente alterna de rotor bobinado, generadores síncronos, entre otros.
- Posee gran robustez en el rotor y en la jaula de ardilla.
- La gama es suficientemente amplia en par motor.
- No tiene demasiados problemas de estabilidad frente a cambios de carga. En cambio, como se observa en la Figura 6 su velocidad sí depende de la carga (Gomez, 2020).



Figura 6. Esquema de consecuencia de aumentar carga (Autoría Propia)

Desventajas

- La corriente de arranque es mucho mayor que la corriente de funcionamiento nominal: entre tres y seis veces mayor. En muchos casos es necesario llevar a cabo procedimientos especiales de limitación de la corriente de arranque.
- La variación de su velocidad implica la variación de la frecuencia de la alimentación, por lo que es necesario disponer de un convertidor electrónico que convierta la tensión de red en tensión de frecuencia variable, también conocido como variador de frecuencia la cual se transporta por medio del Bus CC. En la Figura 7 se esquematizan la secuencia empleada para controlar la velocidad del motor (Gomez, 2020).

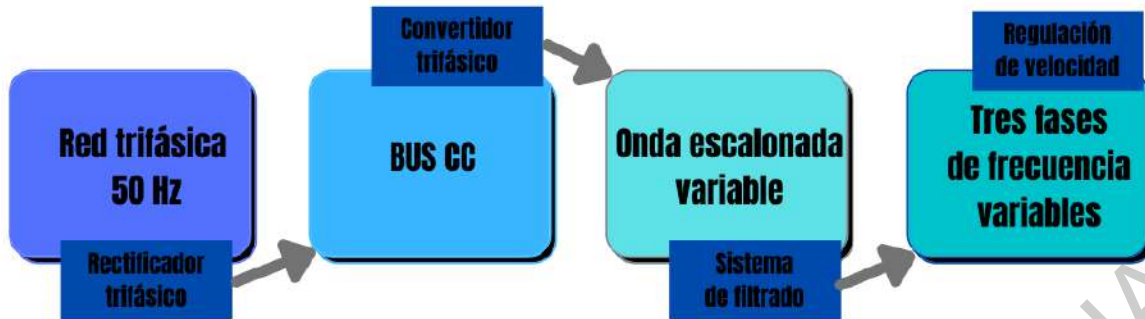


Figura 7. Tránsito desde el suministro energético hasta la salida de tres fases (Autoría Propia)

2.2.5 Principales fallas en los motores

Las diversas fallas que llegan a presentarse en los motores de inducción se pueden agrupar de la siguiente manera:

- 1) Mecánicas
- 2) Bobinados del estator
- 3) Barras de rotor y anillos terminales
- 4) Eje o acoplamientos
- 5) Dispositivos externos

- Fallas Mecánicas

Existen tres principales fallas mecánicas que se presentan en las máquinas eléctricas rotatorias, de las cuales una de ellas es el desequilibrio. Un sistema mecánico giratorio se dice que está equilibrado si durante su funcionamiento la resultante de todas las fuerzas y sus respectivos pares son de magnitud, dirección y sentido constantes. Lograda la constancia en módulo, dirección y sentido de las fuerzas, mediante una perfecta y homogénea distribución de las masas de la parte móvil, la máquina se puede sujetar mediante anclajes que opongan una fuerza y un momento de reacción a la resultante del sistema. Dada la definición anterior de equilibrio, el desequilibrio se puede presentar de dos formas: una debida a una distribución no homogénea de masa que se puede detectar a rotor parado y otra asociada al movimiento del rotor. Otra falla mecánica es el desalineamiento, el cual

se debe a que es imposible que los ejes de la máquina eléctrica rotatoria bajo estudio y la máquina acoplada se encuentren perfectamente alineados en todos los planos. La última falla mecánica es la falla de los rodamientos. Las máquinas rotatorias disponen de rodamientos sobre los que se apoyan los dos extremos del eje que sustenta a la parte móvil. Puesto que estos elementos del sistema están sometidos a una continua fricción y movimiento dan origen a las vibraciones causadas por cualquier defecto de la máquina o agente externo que se les transmite, por lo que son los componentes con un porcentaje de falla más elevado (Flores et al., 2011).

- Fallas de rotor

Las fallas de rotor en máquinas síncronas se encuentran principalmente en máquinas de rotor bobinado, pero también se pueden encontrar en las máquinas de imán permanente. En el caso de un rotor bobinado, un corto entre vueltas puede ocurrir similar a uno del devanado del estator. Sin embargo, al contrario de lo observado en las máquinas de inducción, esta falla del rotor induce una baja corriente de cortocircuito con solo armónicos de la tensión de alimentación. En estado estacionario, la máquina gira a velocidad síncrona y no hay variación de flujo en los devanados del rotor y en las vueltas de este. Por tanto, esta falla puede quedarse en una etapa incipiente sin más degradación. Sin embargo, el corto debilita un polo del circuito y esto puede llegar a disminuir el rendimiento de la máquina y generar vibraciones (Capolino, 2019).

- Bobinados del estator

Las fallas de cortocircuito entre el estator son las más peligrosas porque pueden conducir a un apagado repentino de la máquina. Generalmente, este tipo de falla comienza con una degradación del aislamiento debido a sobrecalentamiento, vibración o a una atmósfera agresiva. Luego, una falla de aislamiento local produce una primera vuelta en cortocircuito y la corriente de cortocircuito genera un sobrecalentamiento adicional que propaga la falla a otros puntos del motor. El punto final ocurre cuando la tierra alcanza el aislamiento. Entonces, la protección diferencial actúa y la máquina se detiene. Por tanto, es muy importante detectar un

cortocircuito entre espiras en la etapa incipiente. Para lograr esto, los métodos basados en la medición de flujo tienen la ventaja de ser más sensible en comparación con el estator porque la corriente de cortocircuito genera su propio efecto magnético que se puede encontrar en el flujo magnético externo (Capolino, 2019).

- Fallas de barras rotas

Las fallas de la barra del rotor de máquinas jaula de ardilla, han sido investigadas mediante el estudio de componentes de frecuencia de corriente tanto en condiciones sanas como defectuosas. En ambas condiciones, el espectro característico de la fuerza electromotriz inducida en el lado del estator es influenciado por la distribución discreta de las mallas del rotor. Entonces, cuando la topología del circuito del rotor inicial se modifica debido a una o más barras rotas en el rotor del estator también se modifica en el espectro. En consecuencia, el efecto de una barra de rotor rota se puede analizar estudiando el correspondiente efecto de fuerza magneto motriz inducida (fmm, fuerza magnetomotriz) en el espacio de aire y teniendo en cuenta la frecuencia suministrada (Capolino, 2019).

- Fallas por dispositivos externos

También es importante considerar otros factores como son la temperatura, partículas que puedan llegar a contaminar el aceite, el uso del aceite correcto para la lubricación o algún mal funcionamiento por parte del operador (Capolino, 2019).

2.3 Rodamientos

2.3.1 Definición y principales fallos de un rodamiento

Los rodamientos son mecanismos utilizados para facilitar el movimiento relativo entre dos componentes de una máquina, estos suelen ser empleados para orientar un eje en una máquina y al mismo tiempo reducir la fricción que este pudiera tener. Las aplicaciones de los rodamientos son muy variadas, estos se pueden encontrar en diferentes tipos de motores eléctricos, turbinas, taladros, entre otros. Los rodamientos son uno de los componentes más importantes del motor suelen ser

encontrados en la mayoría de las máquinas rotativas gracias a su capacidad de carga y confiabilidad se han vuelto una parte vital para el adecuado desempeño de la máquina. Estos se encuentran conformados como se muestra en la Figura 8 (Ramírez, 2019).

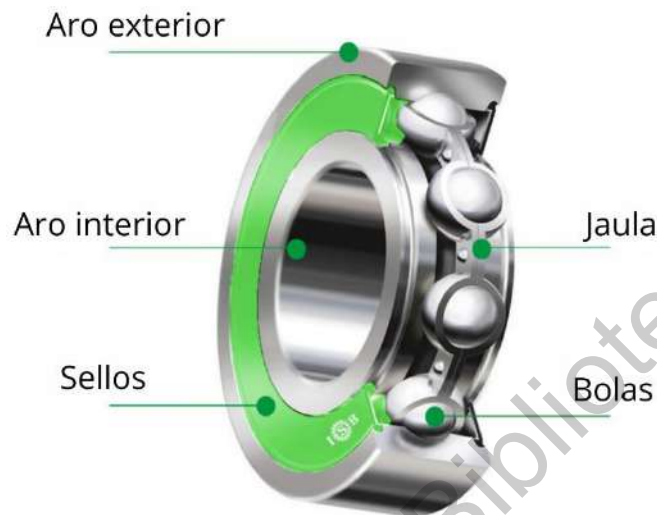


Figura 8. Partes de los rodamientos (Catalogo ISB Sport Bearings).

Todas las máquinas rotativas disponen de rodamientos sobre los que se apoyan los dos extremos del eje que sustenta a la parte móvil. Puesto que estos elementos del sistema están sometidos a una continua fricción y movimiento, y las vibraciones causadas por cualquier defecto de la máquina o agente exterior se les transmiten directamente. Por esta razón, son los componentes con una tasa de fallos más grande y debido a esto se han buscado diferentes técnicas que permitan hacer un diagnóstico de estado de los rodamientos con una buena precisión.

Un rodamiento tiene una vida finita, limitada por la resistencia que este pueda tener a la fatiga; por tanto, el fallo siempre va a estar presente, incluso cuando se trabaje en condiciones ideales. Desgraciadamente muchas instalaciones industriales no ponen sus rodamientos a trabajar en condiciones ideales y el rodamiento falla antes de alcanzar su tiempo de vida útil. La mayor parte de los fallos prematuros pueden atribuirse a las siguientes causas (Fernández, 1998).

- Carga excesiva (sobrecarga) que puede ser tanto carga estática como la debida a desalineación o desequilibrio.
- Lubricación insuficiente o excesiva.
- Contaminación externa.
- Instalación incorrecta del rodamiento.
- Diseño incorrecto o fabricación defectuosa.
- Exposición a vibración mientras el rodamiento no se encuentra rodando.
- Paso de corriente eléctrica a través del rodamiento, bien por descargas estáticas o por fallos de los devanados

En la Figura 9 se pueden apreciar las diferencias entre un espectro de vibraciones de un rodamiento que se encuentra en buen estado contra otro que se encuentra ya dañado.

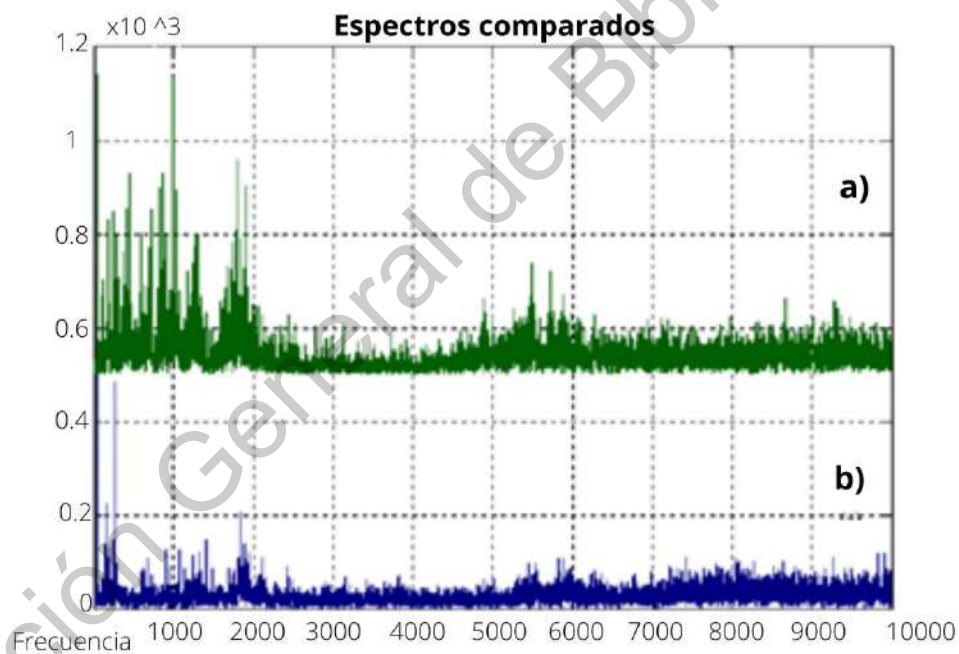


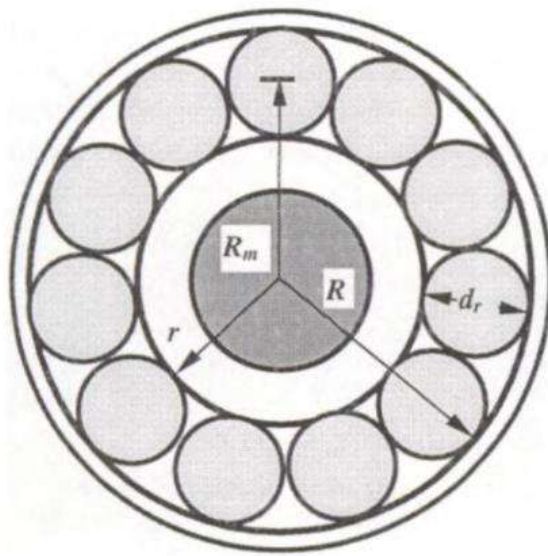
Figura 9. Espectros de vibraciones de cojinetes a) sano b) dañado (Mondaca, 2002).

2.3.2 Estados de fallo en los cojinetes

Existen distintos niveles de fallo que se van presentando a medida que se produce el deterioro del cojinete, existen tres estados diferentes debido a su espectro de vibración: (Fernández, 1998).

- Estado de “pre fallo”
Es el primer estado de la evolución del defecto. El rodamiento desarrolla grietas microscópicas que no son normalmente visibles al ojo humano. Durante este periodo se produce un incremento del nivel de vibración a alta frecuencia, aunque no se producen más cambios en el.
- Estado de fallo
Una vez alcanzado este grado de deterioro se desarrollan grietas que ya son visibles a simple vista. También se empiezan a producir ruido audible y la temperatura se incrementa. En este momento es cuando se considera que es mejor cambiar el rodamiento.
- Estado catastrófico
Cuando el rodamiento entra en este estado el fallo es inminente. El ruido que produce se eleva considerablemente y la temperatura incrementa del mismo modo. Con esto se incrementan las holguras ente los componentes produciendo un movimiento relativo entre el eje y el cojinete.

A continuación, se mencionarán cuáles son las frecuencias características asociadas a la presencia de daños en los distintos elementos del rodamiento y para ello se utilizará un rodamiento genérico con todos sus componentes como se muestra en la Figura 10.



f_r	: Velocidad relativa entre pistas (rev/s)
r	: Radio de la pista interior
R_m	: Radio circunferencia media
d_m	: Diámetro circunferencia media
R	: Radio de la pista exterior
N	: Número de elementos rodantes
d_r	: Diámetro de cada elemento rodante
α	: Ángulo de contacto

Figura 10. Esquema de un rodamiento de elementos rodantes (Fernández, 1998).

En la Ecuación 3 se tiene la fórmula perteneciente a las frecuencias asociadas al deterioro de la pista exterior del rodamiento

$$f(Hz) = \frac{N}{2} * f_r * \left(1 - \frac{d_r}{d_m} * \text{Cos}\alpha\right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

Posteriormente en la Ecuación 4 se presenta la fórmula de frecuencias asociadas al deterioro de la pista interior de rodadura

$$f(Hz) = \frac{N}{2} * f_r * \left(1 + \frac{d_r}{d_m} * \text{Cos}\alpha\right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Por último, en esta sección se muestra en la Ecuación 5 la fórmula de frecuencias asociadas al deterioro de los elementos rodantes.

$$f(Hz) = \frac{N}{2} * f_r * \left[1 - \left(\frac{d_r}{d_m} * \text{Cos}\alpha\right)^2\right] \quad \text{Ecuación 5}$$

Las frecuencias de vibración características de las averías en rodamientos están comprendidas en un rango que va desde los 2kHz a los 20kHz (Fernández, 1998).

2.4 Flujo Magnético

El campo magnético del estator y del rotor en un motor, no se confinan totalmente en sus respectivos circuitos magnéticos, sino que parte de ellos circulan por el

sector externo de sus respectivos circuitos, modificándose entre sí, estos flujos externos se manifiestan esencialmente en la parte externa de la carcasa del estator (flujo disperso estatórico) y el eje del motor (flujo disperso axial), el flujo de dispersión es esencialmente producido por el sistema trifásico de corrientes del estator, mientras que el flujo de dispersión axial en una combinación de los dos campos magnéticos presentes en el motor.

En general, la presencia del flujo de dispersión está relacionada con diversas causas, entre las que se pueden mencionar: la imposibilidad de construir máquinas perfectamente simétricas, asimetrías en los circuitos eléctricos y magnéticos del motor (asimetrías en la disposición de las bobinas y de las ranuras), y anisotropías propias de los materiales con los cuales fue construida la máquina (Anteliz, 2009).

2.4.1 Efecto Hall

El efecto Hall lleva el nombre de Edwin Hall, quien en 1879 descubrió que un potencial de voltaje se desarrolla a través de una placa conductora cuando pasa un campo magnético a través de ella en una dirección perpendicular al plano de la placa, como se ilustra en el panel inferior de la Figura 11 (Shaun, 2009).

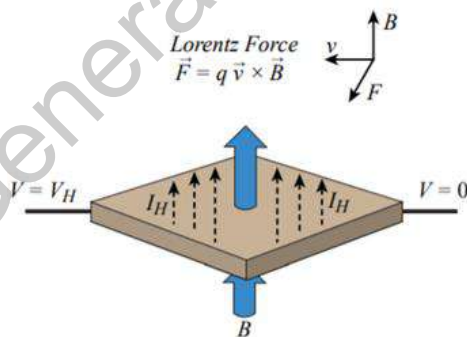


Figura 11. Efecto Hall y Fuerza Lorentz (Shaun, 2009).

Las flechas azules B de la Figura 11 representan un campo magnético que pasa perpendicularmente a través de la placa conductora. El principio físico fundamental detrás del efecto Hall es la fuerza de Lorentz, que se ilustra en el panel superior de Figura. Cuando un electrón se mueve a lo largo de una dirección (v) perpendicular al campo magnético aplicado (B), experimenta una fuerza (F) la cual es la

denominada fuerza de Lorentz. En respuesta a esta fuerza, los electrones se mueven en una curva a lo largo del conductor y como una carga neta, y por lo tanto un voltaje se desarrolla a través de la placa. El voltaje Hall, V_H , obedece a la fórmula siguiente, que muestra en la Ecuación 6 donde V_H es proporcional a la fuerza de campo aplicada, y que la polaridad de V_H está determinado por la dirección, norte o sur, del campo magnético aplicado. Por esta propiedad, el efecto Hall se emplea como sensor magnético (Shaun,2009).

$$V_H = \frac{I * B}{\rho_n * q * t} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

V_H es el voltaje Hall a través de la placa conductora

I es la corriente que pasa por la placa

q es la magnitud de la carga de los portadores de carga

ρ_n es el número de portadores de carga por unidad de volumen

t es el espesor de la placa

2.4.2 Sensor A1324

El sensor de flujo A1324 ofrece alta sensibilidad y un voltaje de salida proporcional a la densidad de flujo magnético, además de que su salida de bajo ruido aumenta la precisión del mismo. El sensor maneja un rango de temperatura bastante amplio que va desde los -40°C hasta los 150°C y a la vez es inmune al estrés mecánico. Estos sensores están diseñados específicamente para obtener medidas de desplazamiento, posición angular y corriente de alta precisión sin sacrificar el tamaño del mismo.

En lo que respecta a su composición interna, todos los elementos activos y pasivos se cultivan dentro del sustrato y los hace inseparables del silicio y realmente los identifica como circuitos integrados monolíticos. La Figura 12 muestra cómo se integra el sensor internamente. Es simplemente un área de silicio dopada que crea

una placa de tipo n que conducirá la corriente. Cuando una corriente circula desde una esquina de la placa hasta la esquina opuesta, un voltaje Hall se desarrolla a través de la otra esquina de la placa cuando se presenta un campo magnético. El voltaje Hall será cero cuando no haya campo aplicado (Allegro, 2020).

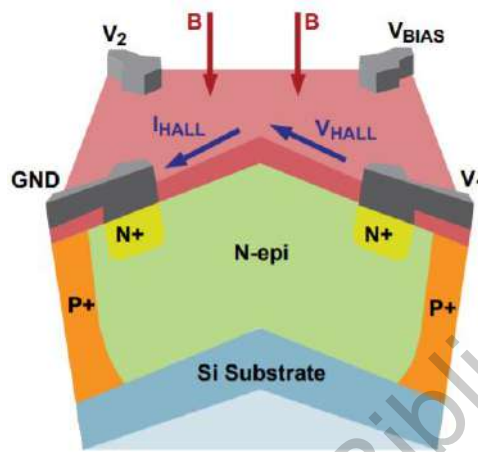


Figura 12. Sección transversal del sensor empleado (Allegro, 2020).

2.4.3 Sistema Propietario para Adquisición de Flujo

El sistema propietario de flujo está integrado por una tarjeta basada en un sensor triaxial propietario y un sistema de adquisición comercial integrado por una tarjeta Texas Instrument microcontroller bran MSP432P401R. El sensor triaxial propietario este compuesto por tres sensores de efecto Hall colocados en ejes perpendiculares entre ellos. Este sensor permite capturar desde un mismo punto las diferentes componentes magnéticas localizadas en el flujo de dispersión., i.e. flujo axial, flujo radial, y flujo axial + radial. En este caso el flujo de mayor interés es el flujo radial ya que es el que más se relaciona con las fallas en los rodamientos. Aparte de los tres sensores él sistema propietario cuenta con amplificadores operacionales que permiten acondicionar la señal obtenida para facilitar su análisis al igual que algunos potenciómetros los cuales permiten realizar una correcta calibración del sensor para ser utilizado en diferentes motores sin tener que modificarla. El esquemático del sistema propietario para detección del flujo magnético se muestra en la Figura 13.

El sistema propietario de flujo magnético utilizado permite capturar señales con una frecuencia de muestreo óptima y se emplean 5000 muestras por segundo. Obteniendo valores de voltaje lo cual permite aplicar diversas técnicas para su posterior análisis.

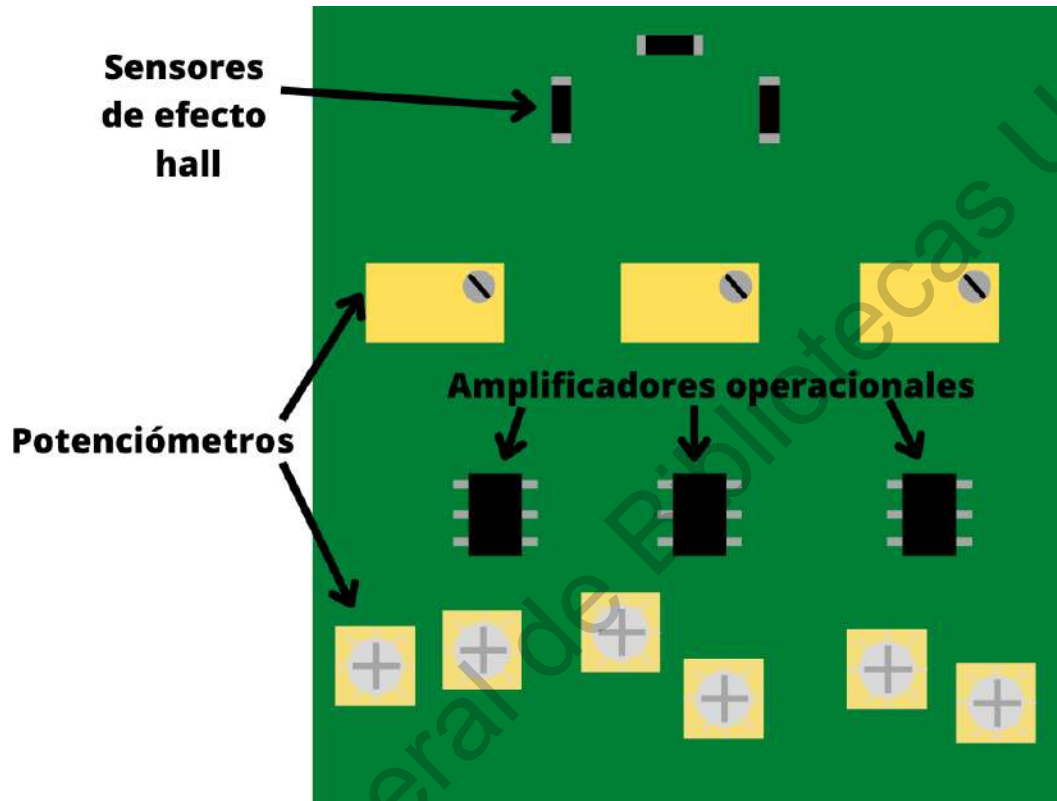


Figura 13. Esquemático del Sensor Propietario de Flujo (Autoría Propia).

2.5 Métodos de Procesamiento

2.5.1 Transformadas de Fourier

Las funciones de Schwartz son aquellas funciones definidas en \mathbb{R} que son infinitamente diferenciables y rápidamente convergentes a cero. Mas formalmente. La función f se llama función de Schwartz si $f \in C^\infty(\mathbb{R})$ y $\lim_{|x| \rightarrow \infty} (1 + x^2)^{-k} f^{(p)}(x) = 0$ para todo par de enteros no negativos k y p . En la notación $f^{(0)} = f$. Equivalentemente, f es una función de Schwartz si $\lim_{|x| \rightarrow \infty} P(x) f^{(n)}(x) = 0$ para todo entero no negativo n y para todo polinomio $P(x)$. El conjunto formado por todas las funciones

de Schwartz se denota por $S(R)$. Evidentemente $S(R) \subset L^1(R) \cap L^2(R)$. Puede probarse fácilmente que $S(R)$ es denso en $L^1(R)$ y en $L^2(R)$.

Para $f, g \in S(R)$, se definen las ecuaciones 7 y 8:

$$f(y) = \int f(x) \exp(-2\pi i n x y) dx \quad \text{Ecuación 7}$$

$$f(x) = \int f(y) \exp(2\pi i n x y) dy \quad \text{Ecuación 8}$$

La Ecuación 7 es llamada la transformada de Fourier de f , y la Ecuación 8 la transformada inversa de Fourier de f . El siguiente teorema resume los resultados más importantes respecto a las transformadas de Fourier (González, 1997).

1. La aplicación $f \rightarrow f^\wedge$ es lineal y directiva de $S(R)$ en si mismo.
2. $f^\wedge = f$, para toda $f \in S(R)$,
3. $\|f\|_2 = \|f^\wedge\|_2$ para toda $f \in S(R)$.

2.5.2 Transformada Discreta Wavelet

Cuando se aplica la transformada Wavelet Discreta (DWT) a una señal muestreada $i(t)$ se va descomponiendo en diferentes subniveles conocidas como señales Wavelet, las cuales son una aproximación de señal a un cierto nivel de descomposición $n(a_n)$ señales (d_j con j que varía de 1 a n). La expresión matemática que caracteriza esta transformada $s(t)$ se muestra en la Ecuación 9, donde α_i^n and β_i^j son coeficientes de escala y de ondícula, $\varphi_i^n(t)$ es la función de escala en el nivel n y $\Psi_i^j(t)$ la función Wavelet en el nivel j respectivamente, y n es el nivel de descomposición:

$$s(t) = \sum_i \alpha_i^n * \varphi_i^n(t) + \sum_{j=1}^n \sum_i \beta_i^j * \Psi_i^j(t) = \alpha_n + d_1 + \dots + d_1$$

Ecuación 9

Cada una de las señales DWT (aproximaciones) tienen una banda de frecuencia asociada, cuyos límites están bien establecidos, una vez que se selecciona la

frecuencia de muestreo (f_s) de la señal analizada original $s(t)$, de acuerdo con un algoritmo enunciado por Mallat (Algoritmo de codificación de sub-banda). Las expresiones que se emplean para calcular los límites de bandas de frecuencia asociadas con cada señal de la ondícula se especifican en la Figura 14. Estos límites de banda de frecuencia para cada señal de ondícula dependen de la frecuencia de muestreo (f_s) así como del nivel de la señal de ondícula correspondiente (Razik, 2020).

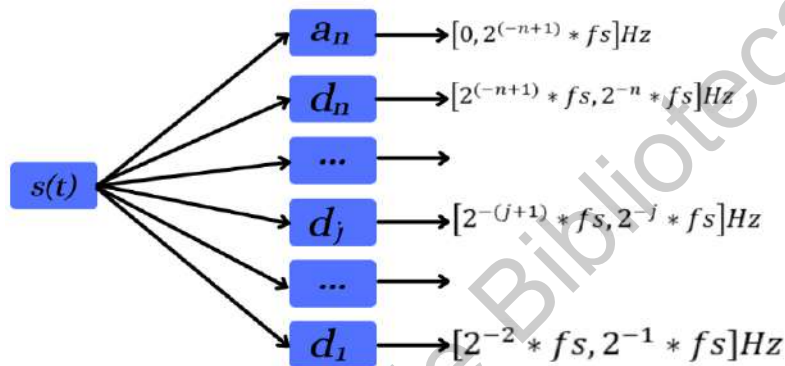


Figura 14. Descomposición de señales wavelet y bandas de frecuencia asociadas (Autoría Propia).

Para este trabajo la frecuencia de muestreo que se utilizará para $s(t)$ es $f_s=5000$ muestras por segundo, la cual se utiliza debido a que con esta frecuencia de muestreo las bandas de interés adyacentes a la fundamental no se ven afectadas y se realizará una descomposición Wavelet en $n= 8$ niveles. Las bandas de frecuencia de cada señal de ondícula son las mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1 Bandas de frecuencia asociadas a las señales wavelet para $f_s= 5\text{KHz}$ y $n=8$

Señal DWT	Banda de frecuencia (Hz)
a8	0-9.78
d8	9.78-19.5
d7	19.5-39.06
d6	39.06-78.12

d5	78.12-156.25
d4	156.25-312.5
d3	312.5-625
d2	625-1250
d1	1250-2500

2.5.3 Indicadores

2.5.3.1 Indicador de Nivel de Descomposición fallo pista exterior

Para saber el nivel de descomposición en el que se basará el análisis de las frecuencias características del fallo de la pista exterior del rodamiento se puede utilizar la Ecuación 10 donde:

f_0 = frecuencia de fallo en pista exterior

f_r = frecuencia de rotación

N_b = Número de bolas

D_b = Diámetro de las bolas

D_p = Distancia entre bolas

ϕ = Ángulo de contacto

$$f_0 = f_r \frac{N_b}{2} \left(1 - \frac{D_b \cdot \cos \phi}{D_p} \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

Después de obtener la frecuencia característica del fallo de la pista exterior se obtiene la frecuencia adicional en la corriente del estator (f_{ecc_or}) causada por el defecto de pista exterior al utilizar la Ecuación 11, donde f_1 es la frecuencia de alimentación, f_0 la frecuencia de fallo obtenida en la ecuación 10 y por último se utiliza una $k = 1, 2, 3$ y 4 para obtener 4 frecuencias de interés para analizar, los cuales son algunos múltiplos de armónicos de frecuencias características de fallos en los rodamientos (Riera et al, 2002).

$$f_{ecc_or} = f_1 + k * f_0 \quad \text{Ecuación 11}$$

2.5.3.2 Indicador de energía en ondoletas

El otro indicador que se propone utilizar en este trabajo es el de energía de ondoletas, el cual muestra que las condiciones de falla modifican las oscilaciones de los componentes de falla y se ven reflejadas en una o varias señales Wavelet. Estas oscilaciones se reflejan en aumentos de energía en las señales involucradas que se pueden utilizar como parámetros para la cuantificación de la severidad de la falla. Una expresión que permite calcular estos parámetros basados en el incremento de la energía de la ondícula se muestra en la Ecuación 12, donde γ_{Wn} es el indicador de energía, i_j es el valor de la muestra actual, $w_n(j)$ es el valor de la señal de ondícula afectada por el fallo, Ns es el número de muestras de la señal hasta que las oscilaciones relacionadas desaparezcan de la señal de la ondícula (al final del estado transitorio) y Nf es el número de muestras entre el origen de la señal y el final de tales oscilaciones (Humbert, 2008).

$$\gamma_{Wn} = 10 * \log \left[\frac{\sum_{j=Nb}^{Ns} i_j^2}{\sum_{j=Nf}^{Ns} [w_n(j)]^2} \right] \quad \text{Ecuación 12}$$

2.5.4 Análisis de componentes principales (PCA)

El análisis de componentes principales (Principal Component Analysis, PCA) es una de las técnicas de aprendizaje no supervisado, las cuales suelen aplicarse como parte del análisis exploratorio de los datos. Un problema central en el análisis de datos multivalentes es la reducción de la dimensionalidad: si es posible describir con precisión los valores de p variables por un pequeño subconjunto $r < p$ de ellas, se habrá reducido la dimensión del problema a costa de una pequeña pérdida de información. Este análisis tiene como objetivo dadas n observaciones de p variables, ejemplificado en la Figura 15, se analiza si es posible representar adecuadamente esta información con un número menor de variables construidas como combinaciones lineales de las originales (Ramírez, 2019).

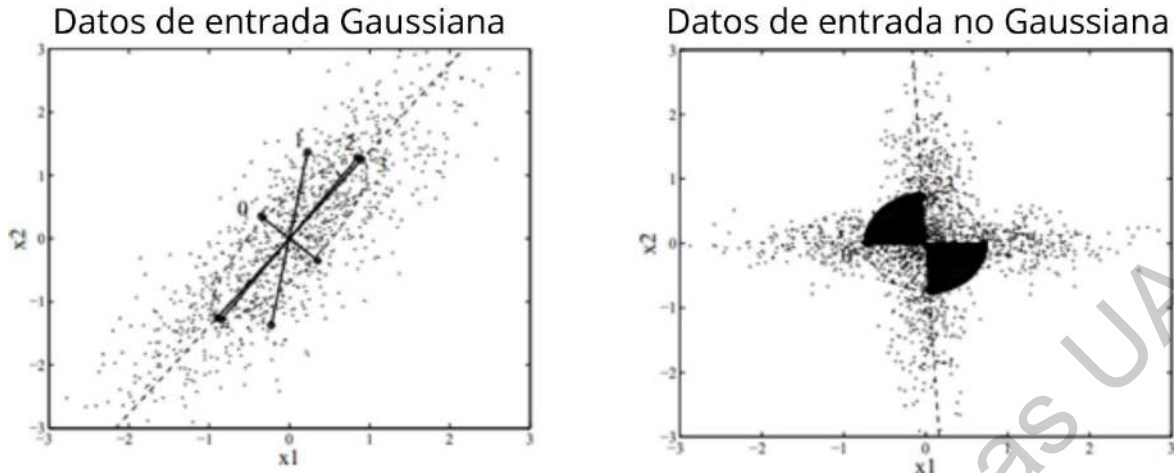


Figura 15. Ejemplo de procesamiento por PCA (Roweis, 1998).

Capítulo 3. Metodología

En este capítulo se presenta el proceso metodológico del trabajo desarrollado el cual propone un método innovador para el monitoreo y el diagnóstico del estado de los rodamientos frente a distintas severidades de falla en los rodamientos reportada en la literatura como “Erosión Eléctrica”. En la Figura 16 se muestra el diagrama a bloques general de la metodología, donde se presentan de manera detallada los pasos necesarios para llevar a cabo este procedimiento. Primero se llevó a cabo la selección de los rodamientos en conjunto con los cortadores que se utilizan para inducir el fallo sobre la pista exterior del rodamiento, después se realizó la manufactura de los fallos la cual consistió en perforar diversas gradualidades de fallo sobre los rodamientos mediante varios diámetros de perforación (1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm). Posteriormente se seleccionó la cadena cinemática sobre la cual se llevó a cabo la experimentación, para ello se planteó una matriz de pruebas para saber la experimentación a realizar con los diferentes estados de fallo. Después se instaló el sensor de flujo propietario sobre la cadena cinemática seleccionada y se procedió a realizar la experimentación para con el sensor propietario adquirir las señales de flujo magnético disperso. Una vez realizada la adquisición de datos se

procesaron las señales obtenidas mediante los 2 métodos propuestos, la transformada de Fourier y la transformada de Wavelet en conjunto con un indicador de energía para finalmente realizar el diagnóstico del nivel de severidad en los rodamientos propuestos.

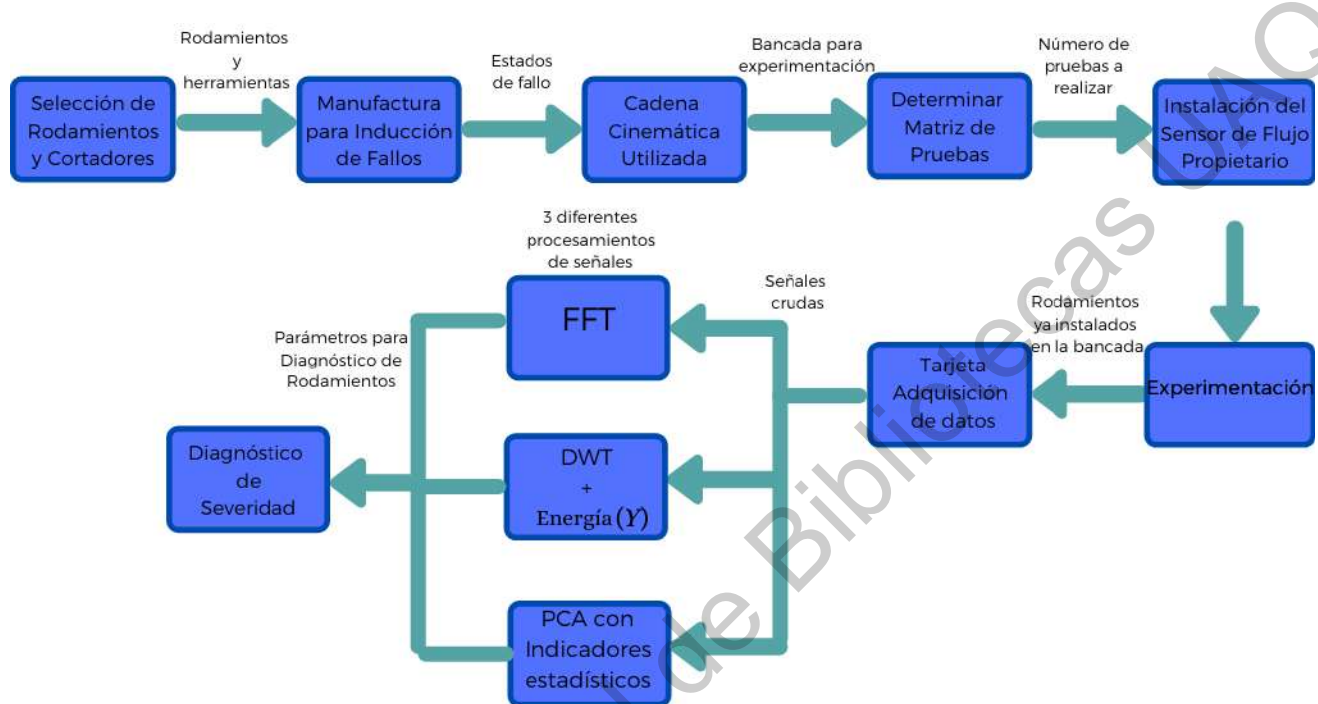


Figura 16. Diagrama general de metodología (Autoría Propia).

3.1 Selección de Rodamientos y Cortadores

3.1.1 Rodamientos

Para llevar a cabo la experimentación primero fue necesario seleccionar los rodamientos que se encuentren con mayor frecuencia presentes en la industria, otro factor que fue considerado para la elección de este rodamiento fue el que es uno de los rodamientos más económicos en el mercado, ya que esto permite tener un panorama más amplio de cómo se comportará el rodamiento y de poder analizar con mayor claridad el fallo a estudiar (Erosión eléctrica).

Por los motivos anteriores, se seleccionó el rodamiento 6203 2RS/C3 como se puede observar en la Figura 17, ya que es un rodamiento comúnmente utilizado en los motores de inducción empleados en la industria. Este es un rodamiento metálico de 40mm de diámetro exterior, 17 mm de diámetro interior, 8 bolas y sellos de hule.



Figura 17. Rodamiento Seleccionado 6203 2RS/C3 (Autoría Propia).

3.1.2 Cortadores

La selección de los cortadores se realizó en función de la máquina que se utilizó para la manufactura de los fallos la cual fue una fresadora de banco y de los rodamientos seleccionados para poder realizar la perforación de los distintos diámetros sin ningún inconveniente.

Los cortadores seleccionados se muestran en la Figura 18, estos son cortadores de carburo H87 "MASTER C", 4g. Este modelo cumplía con las especificaciones necesarias para llevar a cabo la perforación de la pista exterior del rodamiento metálico. Se seleccionaron 5 de ellos que de acuerdo al catálogo de esta marca permitían realizar los orificios de 1mm, 2mm, 3mm, 4mm y 5mm de diámetro en el rodamiento seleccionado.



Figura 18. Cortadores de carburo H87 "MASTER C", 4g empleados para la inducción de la falla (Autoría Propia).

3.2 Manufactura para inducción de fallos

3.2.1 Máquina fresadora

Para la manufactura de los fallos se utilizó una máquina fresadora de banco Bridgeport como la que se puede observar en la Figura 19, ya que se cuenta con ella en el taller de la universidad aparte de que cumplía las características necesarias para llevar a cabo la inducción de los fallos.



Figura 19. Máquina Fresadora Bridgeport (Catalogo Bridgeport SERIES I).

3.2.2 Rodamientos

Posteriormente se procedió a la preparación de los rodamientos para llevar a cabo la manufactura, primero se retiraron los sellos de hule de la parte posterior de los rodamientos y se le limpió en su totalidad la grasa que tenía en su interior con ayuda de algunos solventes para retirar cualquier residuo de grasa como se muestra en la Figura 20.



Figura 20. Rodamiento listo para la inducción del fallo (Autoría Propia).

Luego con ayuda de los de clamps se sujetó cada rodamiento a la bancada de la fresadora para realizar la perforación en la cara exterior del rodamiento desde 1mm de diámetro hasta los 5mm de diámetro que se requerían para estudiar la gradualidad del fallo como se observa en la Figura 21.



Figura 21. Manufactura de los fallos sobre el rodamiento (Autoría Propia).

Una vez que se finalizó la perforación de los distintos diámetros sobre los rodamientos, se realizó una limpieza exhaustiva de éstos, sopleteando el interior de los rodamientos y se les aplicaron algunos solventes para evitar cualquier tipo de rebaba que evitara su correcto funcionamiento. Finalmente, se les aplicó la grasa “BAT 3” la cual es un lubricante adhesivo y liso de bentona de alta calidad diseñado para el mantenimiento de baleros operando en presencia de altas temperaturas y se colocaron los sellos de hule.

3.3 Selección de Cadena Cinemática

Para llevar a cabo la experimentación se seleccionó una cadena cinemática mostrada en la Figura 22 de las que se cuenta en el laboratorio de Eléctrica, que consta de un motor trifásico marca WEG de 1hp 220V alimentado por un variador de frecuencia WEG modelo WCF08 usando como carga un alternador convencional de uso automotriz el cual representa el 30% de la carga nominal del motor de operación, uniendo el motor y el alternador mediante una banda de hule y un sistema de poleas.

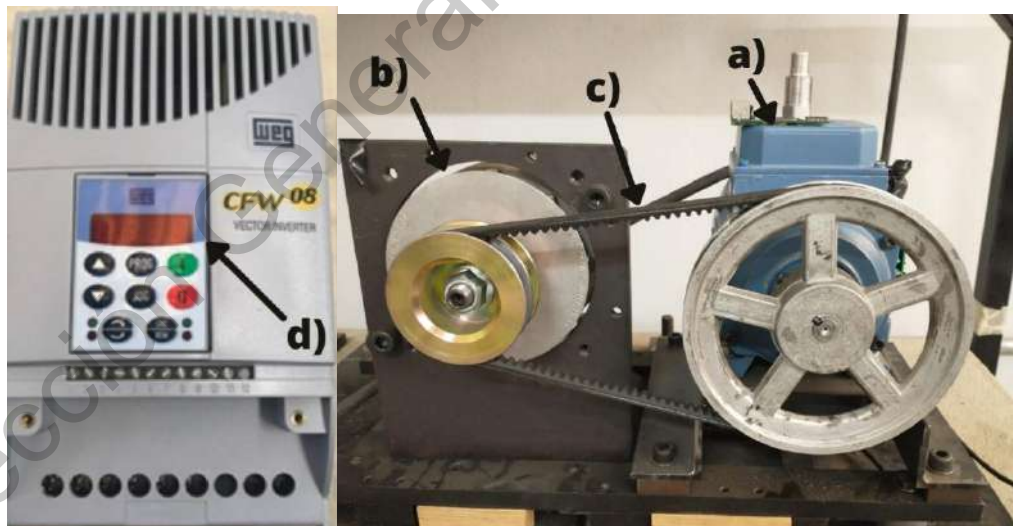


Figura 22. Cadena cinemática a) Motor de inducción b) Alternador c) Banda de transmisión d) Variador de frecuencia (Autoría Propia).

3.4 Determinación de la Matriz de Pruebas

En esta sección por medio de la tabla 2 se determinaron el número de pruebas que se debían realizar para obtener un estudio que sea confiable ya que se realizaron siete repeticiones por cada frecuencia de análisis que se propone, obteniendo en total 210 pruebas a realizarse para así eliminar algún factor de error absoluto gracias a la repetibilidad de las pruebas realizadas.

Tabla 2 Matriz de Pruebas Realizadas

Estado del Rodamiento	Frecuencias	Repeticiones	No. De Pruebas
Sano	5 Hz con Variador	7	35
	15 Hz con Variador	7	
	50 Hz con Variador	7	
	60 Hz con Variador	7	
	60 Hz Arranque Directo	7	
1mm	5 Hz con Variador	7	35
	15 Hz con Variador	7	
	50 Hz con Variador	7	
	60 Hz con Variador	7	
	60 Hz Arranque Directo	7	
2mm	5 Hz con Variador	7	35
	15 Hz con Variador	7	
	50 Hz con Variador	7	
	60 Hz con Variador	7	
	61 Hz Arranque Directo	7	
3mm	5 Hz con Variador	7	35
	15 Hz con Variador	7	
	50 Hz con Variador	7	
	60 Hz con Variador	7	
	61 Hz Arranque Directo	7	
4mm	5 Hz con Variador	7	35
	15 Hz con Variador	7	
	50 Hz con Variador	7	
	60 Hz con Variador	7	
	62 Hz Arranque Directo	7	
5mm	5 Hz con Variador	7	35
	15 Hz con Variador	7	

	50 Hz con Variador	7	
	60 Hz con Variador	7	
	61 Hz Arranque Directo	7	
			Total:210 Pruebas

3.5 Instalación de Sensor Propietario de Flujo

Como se explica en el capítulo 2, se cuenta con un sensor de flujo triaxial, el cual cuenta con 3 sensores de efecto hall que permiten captar el flujo axial, radial y el axial/radial. Dicho sensor, se colocó de manera perpendicular en la parte lateral del motor de inducción sobre la placa de datos del motor como muestra la Figura 23 ya que en esta zona es donde se tiene una mayor presencia del flujo magnético disperso.

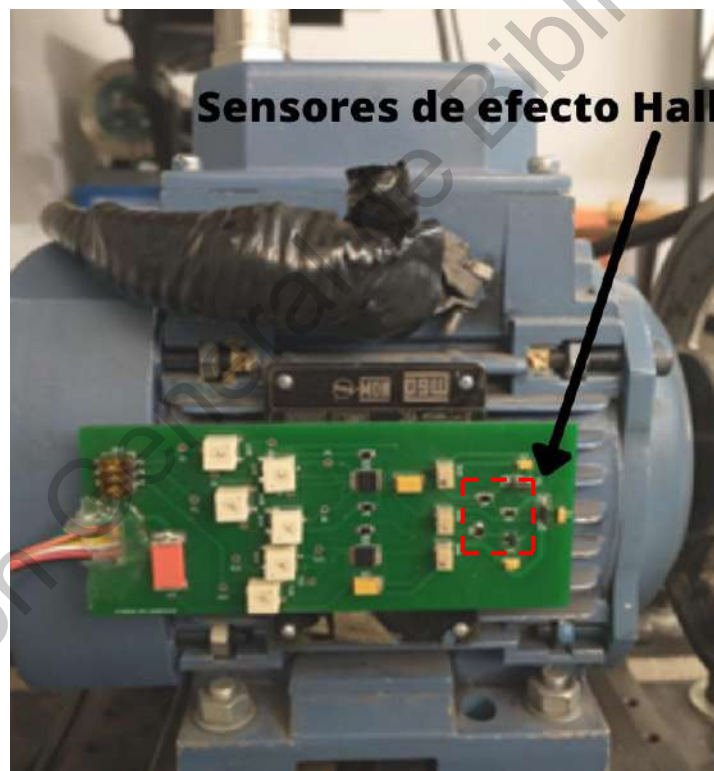


Figura 23. Instalación de la tarjeta en la parte lateral del motor de inducción (Autoría Propia).

3.6 Experimentación

Para la experimentación se desmontó el eje del motor donde se encuentra el rodamiento, se accedió a éste desmontando la tapa trasera junto con el ventilador como se observa en la Figura 24 a) y en la Figura 24 b).

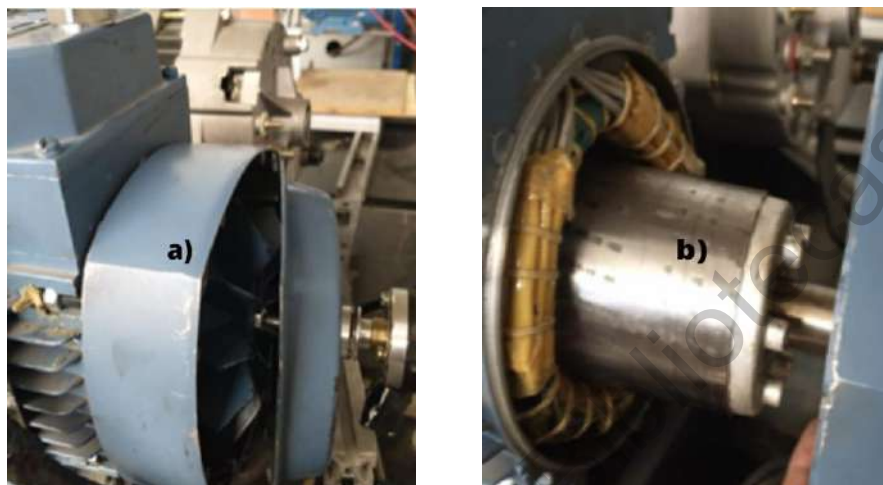


Figura 24. Proceso de desensamblado del motor a) Carcasa b) Rotor (Autoría Propia).

Posteriormente se procedió a extraer el rodamiento que se tenía en el motor para colocar cada uno de los rodamientos de fallo de acuerdo a como se indica en la matriz de pruebas, esto se realiza con ayuda de un extractor mecánico mostrado en la Figura 25.



Figura 25. Extracción del rodamiento sobre el eje (Autoría Propia).

Para colocar el rodamiento que se utilizó en cada prueba, se emplea un gato hidráulico de banco como en la Figura 26 el cual ejerce presión sobre el rodamiento de tal manera que se desliza sobre el eje hasta su posición adecuada, por último, se introduce el eje al motor de tal manera que la perforación inducida del fallo quede en posición vertical para tener una mejor adquisición de los datos y se vuelve a ensamblar el ventilador y la tapa trasera de éste. Este mismo procedimiento se llevará acabo con cada uno de los estados de rodamiento que se tienen, repitiéndolo 6 veces para colocar el rodamiento sano y los rodamientos con la perforación inducida de fallo de 1mm hasta 5mm.



Figura 26. Inserción del rodamiento sobre el eje (Autoría Propia).

Una vez que el motor este ensamblado y con el rodamiento seleccionado para analizar, se alimenta el motor mediante el variador de frecuencia modificando las frecuencias de 5Hz,15 Hz,50Hz,60 Hz y alimentación directo de la línea (60 Hz).

Después de ello, se realizan los experimentos mostrados en la matriz de pruebas establecida en la sección 3.4.

3.7 Tarjeta de Adquisición de datos

Para la adquisición de datos se empleó una tarjeta comercial de adquisición de datos de modelo Texas instruments MSP432P401R la cual es capaz de devolver valores que se pueden analizar mediante una computadora empleando Matlab (Figura 27c), igualmente en la Figura 27b) se muestra la tarjeta utilizada para la adquisición de datos para su posterior análisis.

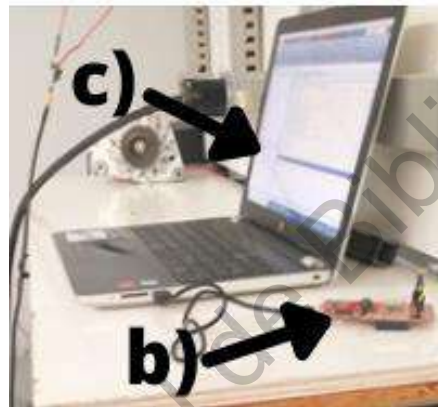


Figura 27. Sistema de adquisición de datos (Autoría Propia).

3.8 Procesamiento de Señales de Flujo

Debido a que el uso de flujo magnético disperso no se ha utilizado con anterioridad para la detección de gradualidad en los fallos de los rodamientos, se utilizaron 3 métodos de procesamiento para analizar el comportamiento de dichas señales y obtener los mejores resultados de la detección del fallo. Los tres métodos utilizados fueron la FFT, DWT y los indicadores estadísticos.

Para estos 3 procesamientos se utiliza la tabla 3 calculada reemplazando las incógnitas de las ecuaciones 10 y 11 con las medidas del rodamiento que se utilizó, obteniendo los valores que indican las frecuencias características del nivel de descomposición de fallo de la pista exterior de los rodamientos.

Tabla 3 Frecuencias de interés para realizar el análisis

Frecuencia de alimentación	f_0	$f_{ecc_or\ para\ k=1}$	$f_{ecc_or\ para\ k=2}$	$f_{ecc_or\ para\ k=3}$	$f_{ecc_or\ para\ k=4}$
5Hz	4.5983	9.89	14.78	19.67	24.56
15 Hz	13.936	28.936	42.872	56.808	70.744
50 Hz	46.773	96.773	143.546	190.31	237.092
60 Hz	55.95	105.95	161.9	217.85	273.8

3.8.1 Procesamiento de flujo para gradualidad mediante FFT

Mediante un programa desarrollado en Matlab se llevó a cabo el procesamiento de las señales de flujo adquiridas mediante la experimentación siguiendo los pasos mostrados en el diagrama de flujo de la Figura 28 donde primero se seleccionan los rodamientos que se analizarán (un estado de fallo y uno sano), posteriormente se selecciona la frecuencia de muestreo que en el caso de este trabajo es de 5000 Hz, luego se indicara donde empezara a procesar el programa (estado estacionario= 10 segundos después del inicio de la prueba), después se selecciona el sensor que se analizara, en este caso se utiliza el sensor 1 el cual contiene el flujo radial, posteriormente se indica el número de datos que tendrá la ventana de FFT, ya teniendo todos estos datos se procede a aplicar la función FFT obteniendo una gráfica donde se analizarán las frecuencias de f_{ecc_or} para las $k=1, 2, 3, 4$ obtenidas en la tabla 3.

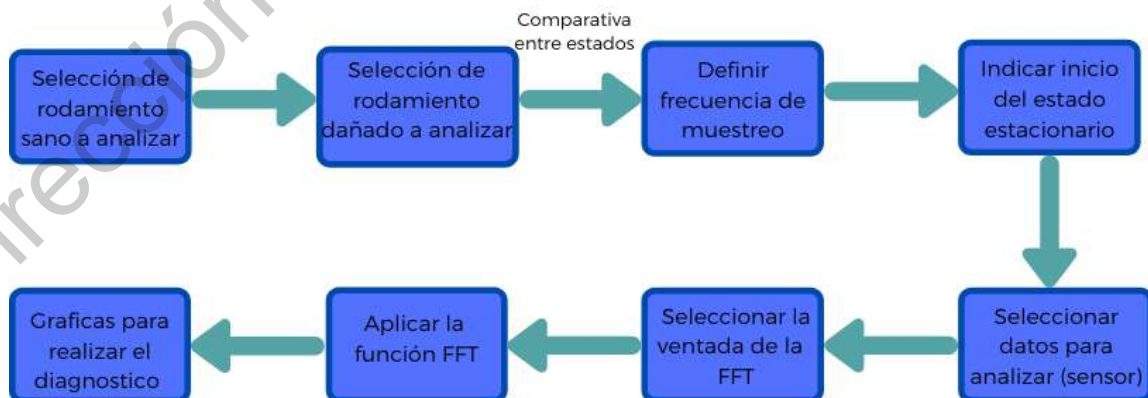


Figura 28. Pasos para aplicar FFT (Autoría Propia).

3.8.2 Procesamiento de flujo para gradualidad mediante DWT + Energía

Los pasos para el siguiente procesamiento son mostrados en la Figura 29 donde para la DWT (Transformada de Wavelet) y el indicador de energía propuesto, es necesario ingresar a el programa de Matlab una pequeña matriz donde se indican los 6 estados de rodamiento a analizar (uno de cada estado: Sano, 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm), después se define que coeficiente de detalle se utilizara variando entre “d” o “a”, posteriormente se selecciona el nivel del coeficiente seleccionado (teniendo como opción del 1 al 8), luego se selecciona la frecuencia de muestreo (5000 Hz), posteriormente se indica el inicio del estado estacionario el cual es 10 segundos después de comenzada la prueba debido a el perfil de arranque inducido, al igual se define un corte para el filtro pasabajas utilizado (el cual se define en “1250”), después se define la familia de ondoleta que se utilizara para el análisis (en este caso se utiliza la ondoleta “db44”), también se debe indicar el tiempo en segundos que durara el procesamiento (30 segundo para este trabajo) y por último se procede a aplicar las funciones propuestas con ayuda de las frecuencias de f_{ecc_or} mostradas en la tabla 3.

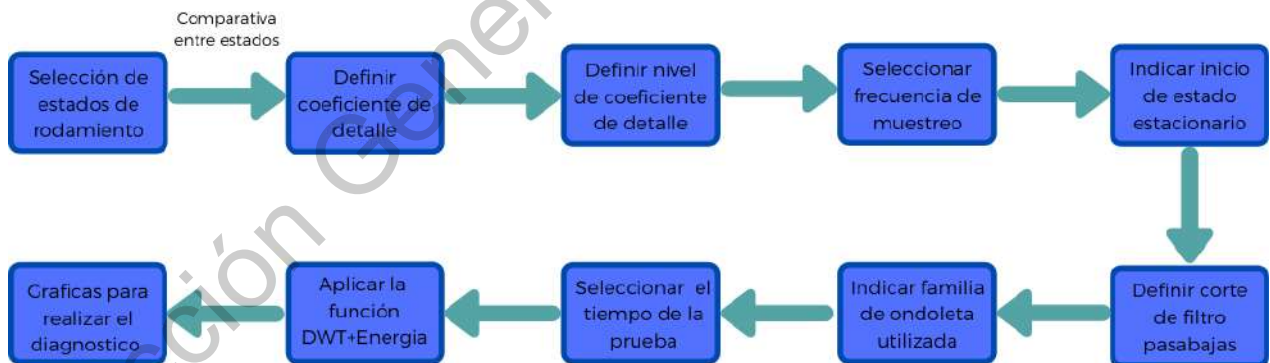


Figura 29. Pasos para aplicar DWT (Autoría Propia).

3.8.3 Procesamiento de flujo para gradualidad mediante Indicadores estadísticos y PCA

Mediante una serie de programas en MATLAB se llevó a cabo el procesamiento de las señales de flujo magnético mediante 15 indicadores estadísticos asistidos mediante PCA mostrando los pasos en la Figura 30. Primero se leyeron todas las muestras de flujo obtenidas mediante la experimentación para posteriormente aplicarles los indicadores estadísticos (Media, máximo, RMS, SMR, Desviación estándar, Varianza, Factor de forma RMS, factor de forma SMR, Factor de crecimiento, factor de latitud, factor de impulso, oblicuidad, Kurtosis, quinto y sexto momento) obteniendo así 15 gráficas individuales a las cuales se les aplicó un procesamiento para descomponerlas en vectores ordenándolos en orden descendente y reorganizándolos en vectores propios en consecuencia, luego se normalizaron dichos vectores obtenidos de las gráficas y se procedió a aplicar PCA definiendo el número de condiciones que se analizan, indicando los niveles de condición que se clasificarían y por último seleccionando la reducción de dimensionalidad de esta herramienta para al final obtener una sola gráfica donde se muestre la clasificación de los 6 estados de rodamiento que se tienen.

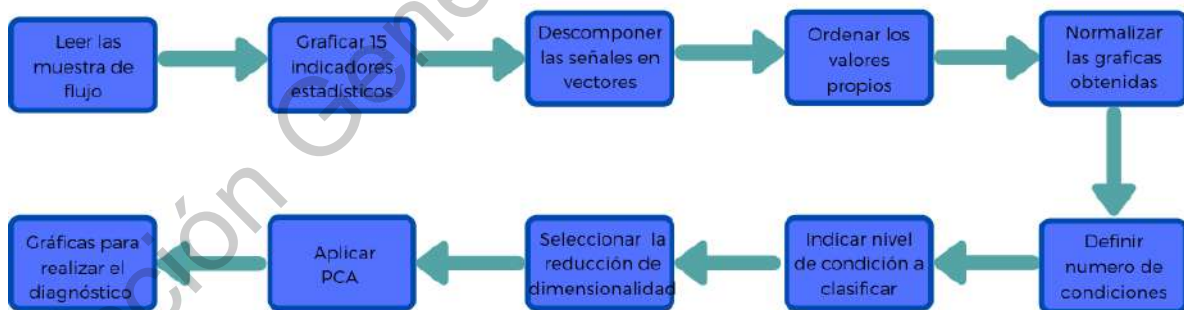


Figura 30. Pasos para aplicar PCA (Autoría Propia).

Capítulo 4. Resultados

En este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos del proceso de la manufactura de inducción de fallos, los cuales fueron empleados para llevar a cabo la experimentación de este trabajo, también se encontrarán los resultados de cada uno de los análisis realizados a las señales adquiridas durante la experimentación, las cuales fueron analizadas con ayuda de las transformadas seleccionadas en el capítulo anterior (FFT Y DWT) así como la descripción de cada estado analizado.

4.1 Resultado de Inducción de Fallos

En la Figura 31 se muestran los rodamientos con la inducción de la falla que se estudió a lo largo de este trabajo. Iniciando con el rodamiento sano mostrado en el inciso a), luego el fallo de 1mm en el inciso b), el inciso c) muestra la falla de 2mm, posteriormente se observa el fallo de 3mm en d), en seguida se tiene el inciso e) con la falla de 4mm y por último en el inciso f) se observa la falla con mayor diámetro que se maneja el de 5mm. Como se puede observar en la Figura 30 cada que va aumentando el diámetro de la perforación el fallo se vuelve más notable, lo cual en un elemento físico empleado en la industria representa que una vez que el rodamiento empieza a tener pequeñas grietas debido a descargas eléctricas estas grietas se van convirtiendo en perforaciones sobre la pista exterior y a medida que el rodamiento sigue recibiendo dichas perforaciones este diámetro de fallo tiende a elevarse. Por ello la importancia de detectar y discriminar los estados de fallos propuestos en nuestro trabajo ya que como la literatura lo reporta anteriormente solo se ha logrado observar este fenómeno en diámetro de gran tamaño (mayores a 6mm) (Hamida et al. 2016), lo cual no es de mucha ayuda ya que un rodamiento en ese estado está al borde del fallo total. Este proceso de análisis se vuelve muy difícil debido a que los valores obtenidos con las herramientas de procesamiento dan como resultado valores muy pequeños difíciles de interpretar.

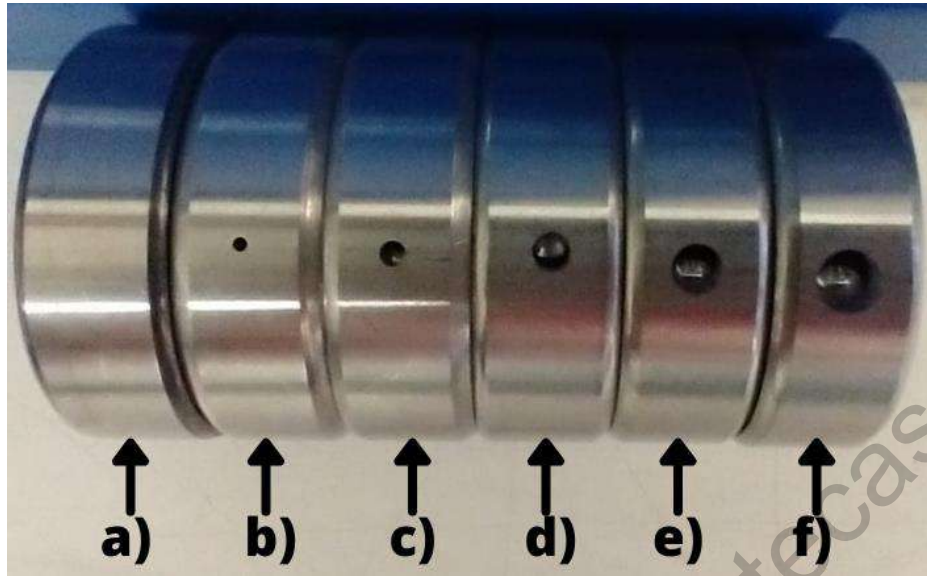


Figura 31. Resultado de inducción de fallo en los rodamientos (Autoría Propia).

4.2 Adquisición de datos sin procesamiento

En esta sección se ejemplificará con algunas graficas obtenidas las señales que se adquirieron directamente del sensor de flujo sin ningún tipo de procesamiento donde no es posible apreciar ninguna diferencia perceptible la cual permitiera discriminar los diferentes estados de los rodamientos para lograr así la clasificación de estos. Se mostrarán las gráficas correspondientes a la alimentación de 50 Hz mediante variador de frecuencia y a 60 Hz Directo de la red eléctrica.

4.2.1 Señales adquiridas para 50 Hz con variador

En la Figura 32 se observa la señal adquirida para la alimentación de 50 Hz con un rodamiento sano colocado en el motor para la adquisición de datos y posteriormente se muestra la Figura 33 donde se muestra el estado más severo de fallo inducido en el rodamiento y como se puede percibir en la comparativa de estados dos imágenes la amplitud de estas señales es prácticamente la misma ondulado entre 0.4 a 0.6 pero sin poder observar alguna diferencia significativa para realizar alguna clasificación.

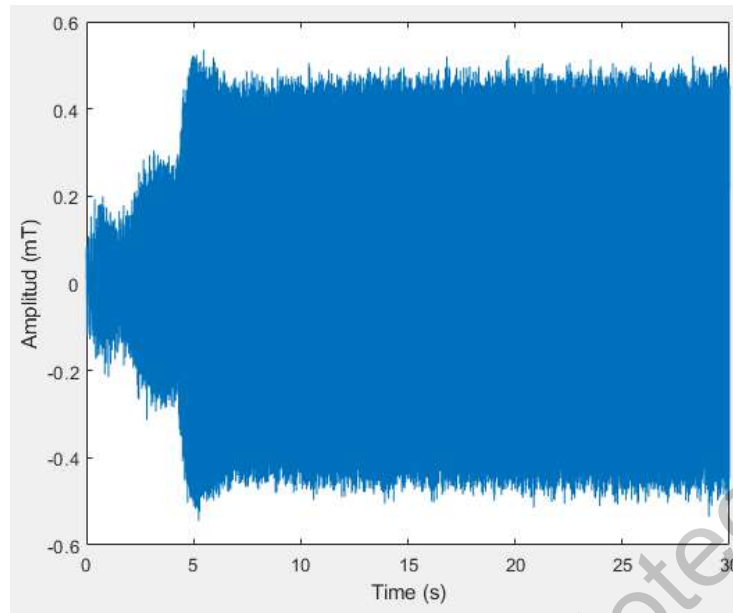


Figura 32. Señal adquirida para 50 Hz Sano (*Autoría Propia*).

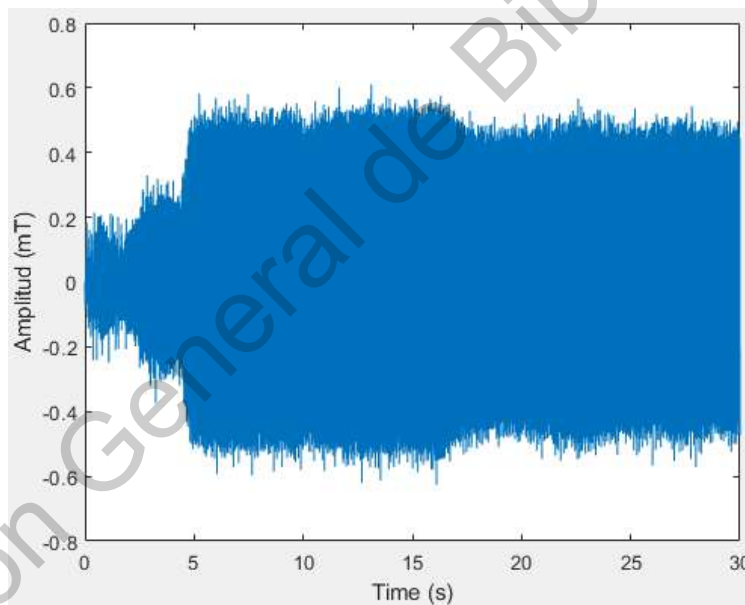


Figura 33. Señal adquirida para 50 Hz 5mm de fallo (*Autoría Propia*).

Después en la Figura 34 se puede observar la señal adquirida de la misma alimentación, pero para un estado de fallo de 4mm obteniendo un resultado muy similar a la Figura 35, donde se tiene la señal adquirida para un diámetro de fallo de 3mm sin poder observar diferencia alguna con ninguno de las gráficas presentadas hasta el momento.

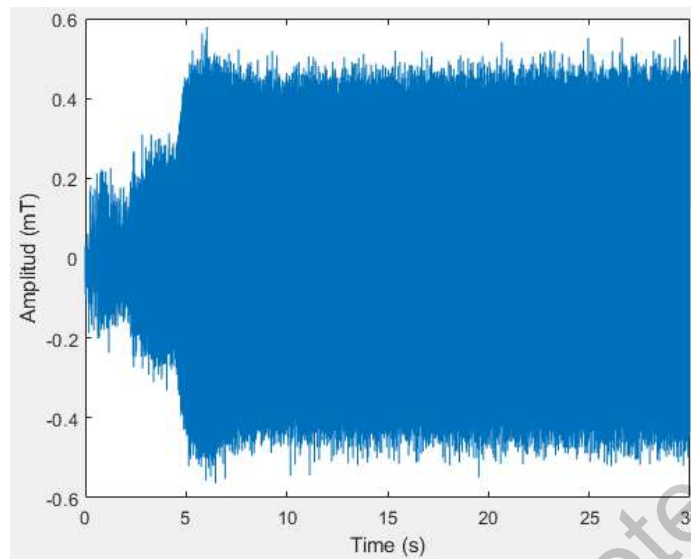


Figura 34. Señal adquirida para 50 Hz 4mm de fallo (*Autoría Propia*).

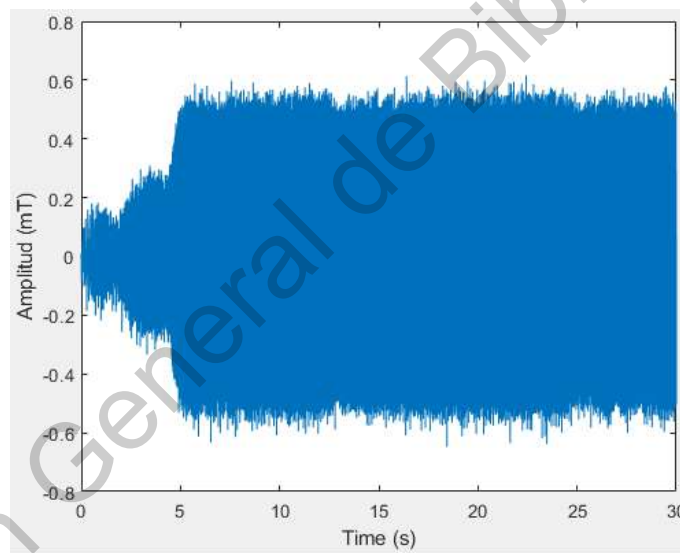


Figura 35. Señal adquirida para 50 Hz 3mm de fallo (*Autoría Propia*).

Por último, se presentan las Figuras 36 y 37 las cuales muestran señales de fallo correspondientes a 2mm y 1mm, obteniendo el mismo resultado que en las gráficas mostradas a lo largo de este subcapítulo una amplitud entre 0.4 a 0.6 que no se modifica al cambiar el nivel de fallo que se está estudiando, lo cual indica que para lograr una clasificación es necesario aplicar algunas técnicas de procesamientos.

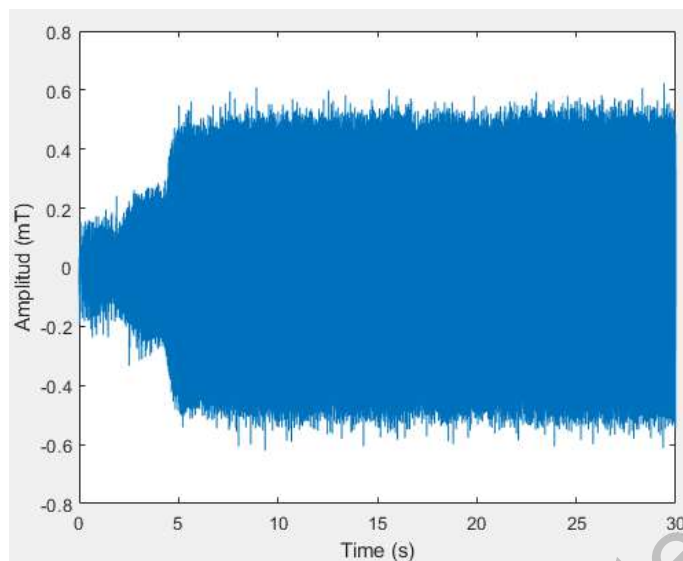


Figura 36. Señal adquirida para 50 Hz 2mm de fallo (*Autoría Propia*).

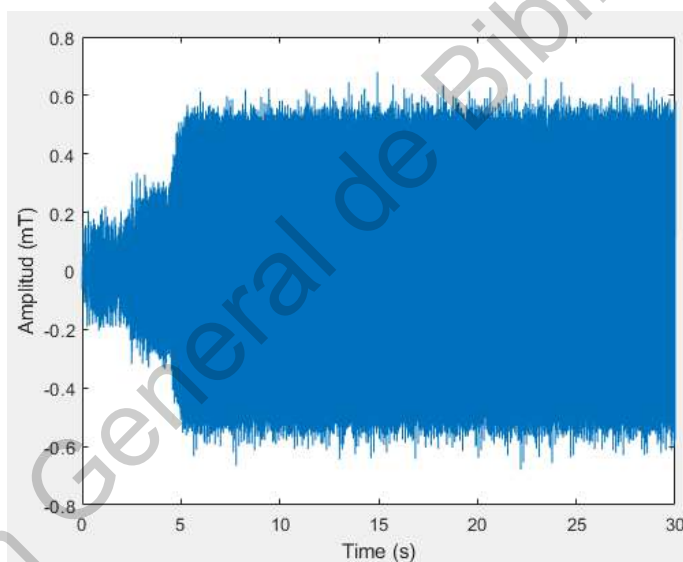


Figura 37. Señal adquirida para 50 Hz 1mm de fallo (*Autoría Propia*).

4.2.1 Señales adquiridas para 60 Hz Directo

También se presenta un caso con arranque sin variador como se muestra en la Figura 38, las gráficas obtenidas de la adquisición corresponden al motor directamente conectado a la alimentación eléctrica, la cual tiene una frecuencia de 60 Hz y se prueba con un rodamiento sano. Posteriormente la gráfica de la Figura

39 corresponde a un fallo de 5mm de diámetro también con arranque directo del motor.

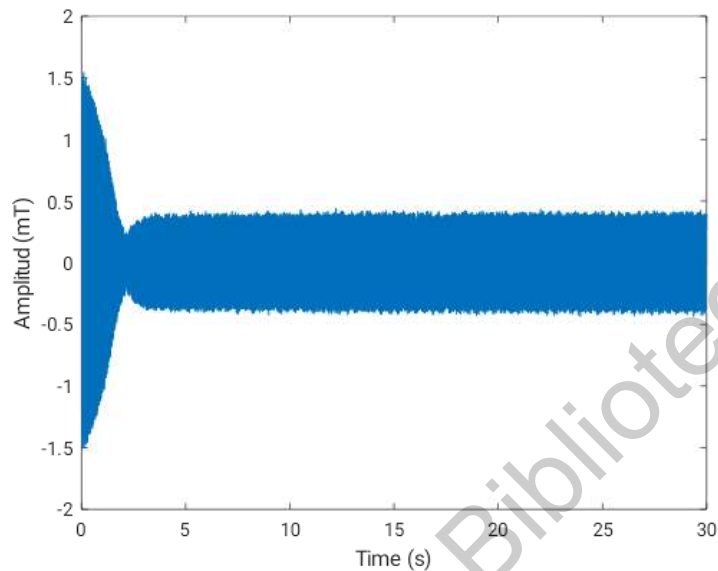


Figura 38. Señal adquirida para 60 Hz directo Sano (Autoría Propia).

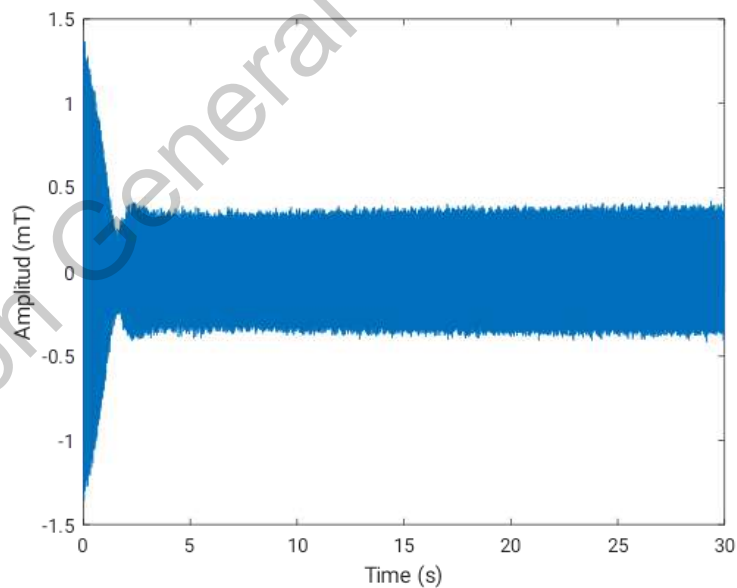


Figura 39. Señal adquirida para 60 Hz directo fallo de 5mm (Autoría Propia).

En la Figura 40 se muestra la señal correspondiente a 4mm de fallo para 60 Hz y en la Figura 41 se muestra la señal de 3mm de diámetro de fallo para poder

observar de mejor manera la similitud existente entre ellas ya que al igual que las gráficas anteriores mostradas en esta sección se tiene una amplitud de 0.4 mT en su estado permanente.

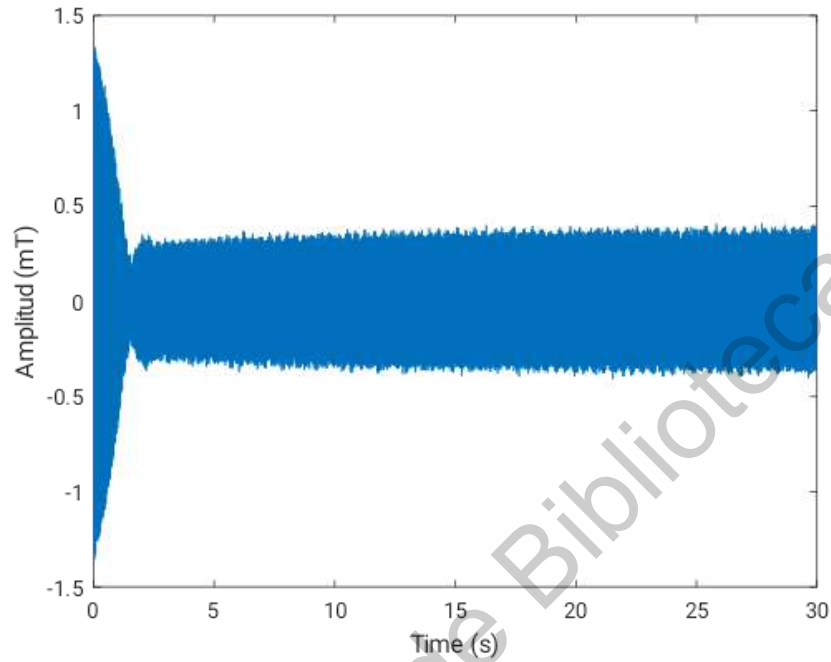


Figura 40. Señal adquirida para 60 Hz directo fallo de 4mm (Autoría Propia).

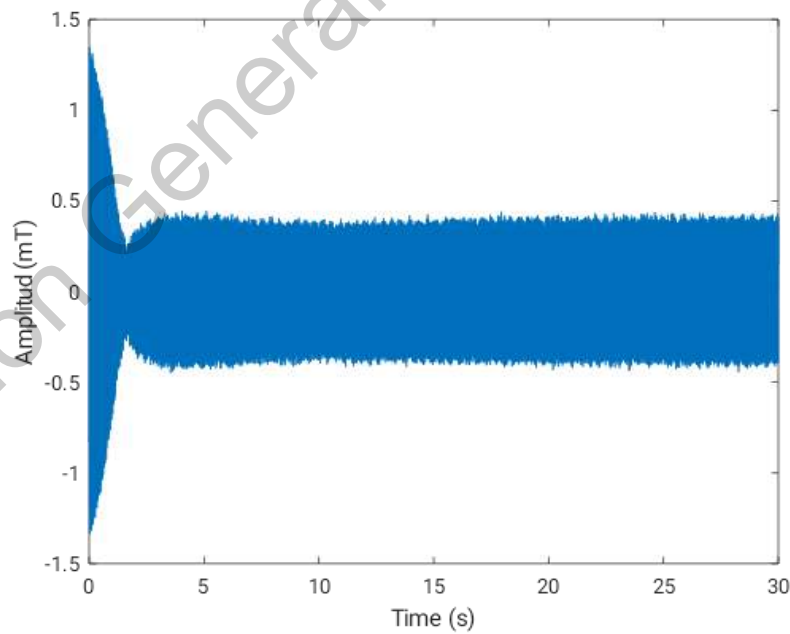


Figura 41. Señal adquirida para 60 Hz directo fallo de 3mm (Autoría Propia).

Para finalizar se muestran la gráfica de 2mm de fallo en la Figura 42 para la misma frecuencia directa y la gráfica de la Figura 43 donde se tiene el resultado de la adquisición del rodamiento con un 1mm de fallo. Como se muestran en las gráficas anteriores se presentan las mismas amplitudes con lo cual se llega a la conclusión de que no es posible llevar a cabo ninguna clasificación respecto a los estados inducidos en los rodamientos con solo las señales adquiridas directamente.

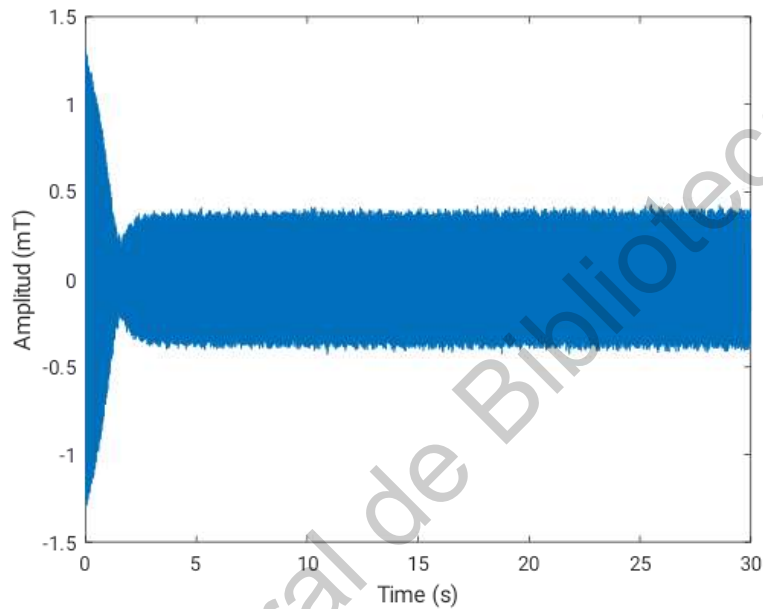


Figura 42. Señal adquirida para 60 Hz directo fallo de 2mm (Autoría Propia).

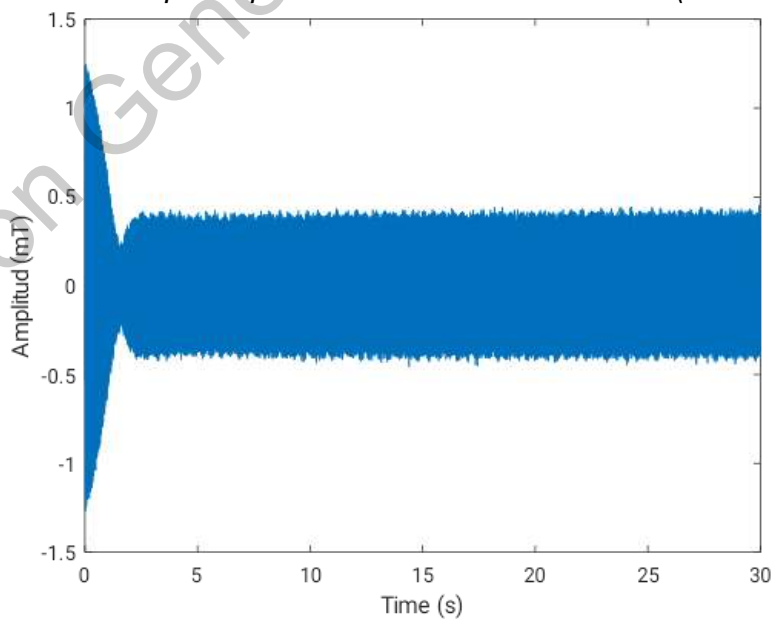


Figura 43. Señal adquirida para 60 Hz directo fallo de 1mm (Autoría Propia).

4.3 Procesamiento de señales mediante FFT

Al aplicar la FFT con ayuda de Matlab se obtienen 5 gráficas por cada K que se analiza, en cada gráfica se compara el estado sano contra cada uno de los fallos inducidos en los rodamientos. Se analizaron todas las frecuencias de alimentación propuestas en la tabla 3 para cada frecuencia de análisis y no fue posible observar una diferencia que permitiera discriminar cada estado de fallo para dar un diagnóstico más que para la frecuencia de 50 Hz por esa razón se enfocó el resto del análisis en dicha frecuencia.

4.3.1 Procesamiento de 50 Hz para $K=1$

Aunque no se obtuvieron resultados favorables para $k=2$ y $k=3$ debido a que las frecuencias que se analizaron están relacionadas con algunas frecuencias características de fallo del motor que no son variables como podrían ser algunos armónicos o picos debidos a desalineamiento o algún otro tipo de fallo específico que no es el caso de estudio de este trabajo. En el caso de $K=1$ si es posible observar una diferencia perceptible en cada estado de rodamiento ya que al incrementar el diámetro del fallo se va incrementando la amplitud de la señal proporcionalmente. En la Figura 44 se muestra una de las pruebas de 50Hz de alimentación con el variador para una $K=1$ y un daño de 5mm (el fallo mayor que se indujo) donde se observa que el punto más alto de amplitud de fallo se encuentra en $Y = 0.005429$ y en la amplitud más alta de estado sano se tiene en $Y = 0.0008907$ dándonos una diferencia de amplitud de 4.5383×10^{-3} la cual es bastante perceptible en la gráfica mostrada.

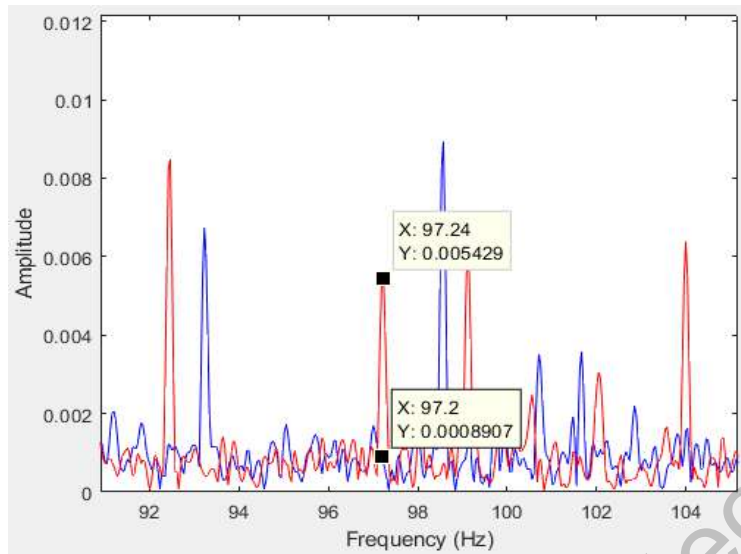


Figura 44. Gráfica análisis FFT Azul=Sano, Rojo=Fallo 5mm k=1 (Autoría Propia).

En la siguiente Figura 45 se pueden observar las señales obtenidas del diámetro de fallo de 4mm para la misma k=1 donde se aprecia que la amplitud de fallo disminuye un poco llegando a Y=0.005037 mientras que la amplitud del estado sano se mantiene en valores más pequeños en este caso Y=0.0006273 obteniendo una amplitud de 4.4097×10^{-3} . Con el análisis anterior es posible tener una diferencia del estado de fallo anterior.

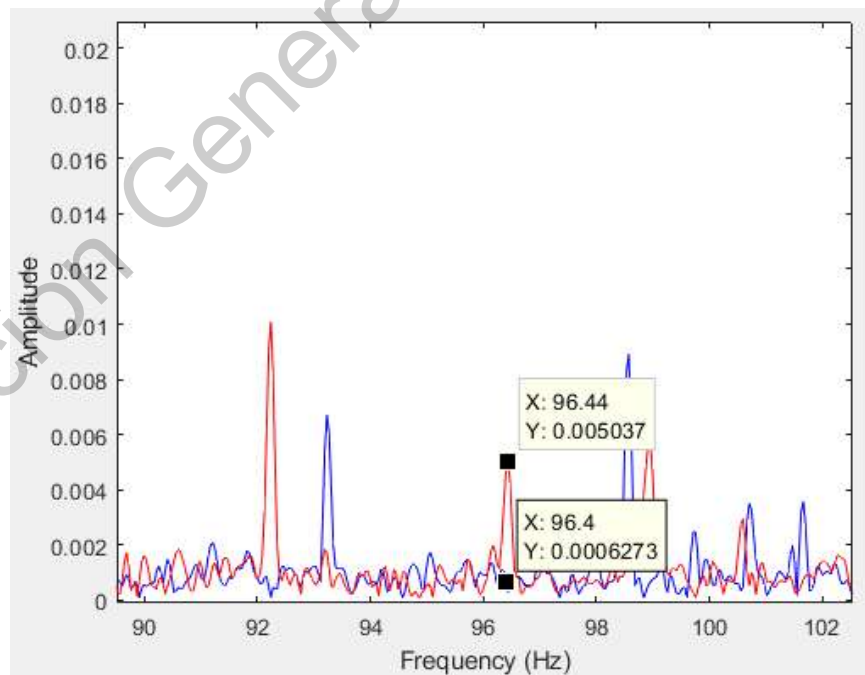


Figura 45. Gráfica análisis FFT:Azul=Sano, Rojo=Fallo 4mm k=1 (Autoría Propia).

Luego en la Figura 46 se puede observar las gráficas de la comparación entre el estado de fallo de 3mm contra el sano en el cual se aprecia una disminución de la amplitud del estado anterior dando como resultado una amplitud de 3.1843×10^{-3} entre el estado de fallo contra el de sano.

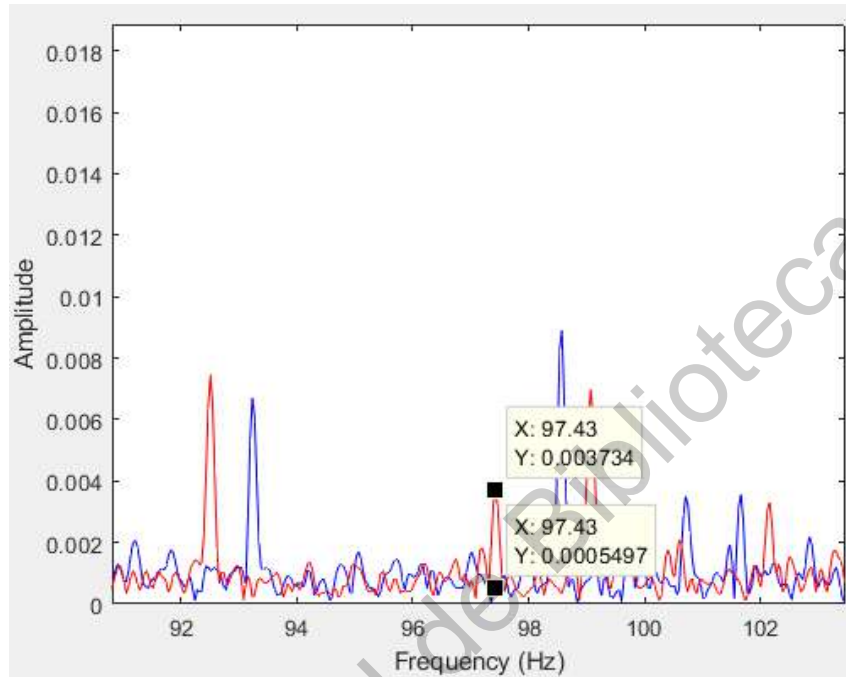


Figura 46. Gráfica análisis FFT: Azul=Sano, Rojo=Fallo 3mm k=1 (Autoría Propia).

Posteriormente en la Figura 47 se tienen las señales de la señal de fallo de 2mm, la cual es la única que no corresponde al decrecimiento que se venía observando en los casos anteriores ya que en este estado la amplitud de fallo se eleva más que todas llegando hasta 0.005671. Lo anterior indica que en este estado ocurre algún fenómeno que no permite monitorear de una manera precisa este fallo.

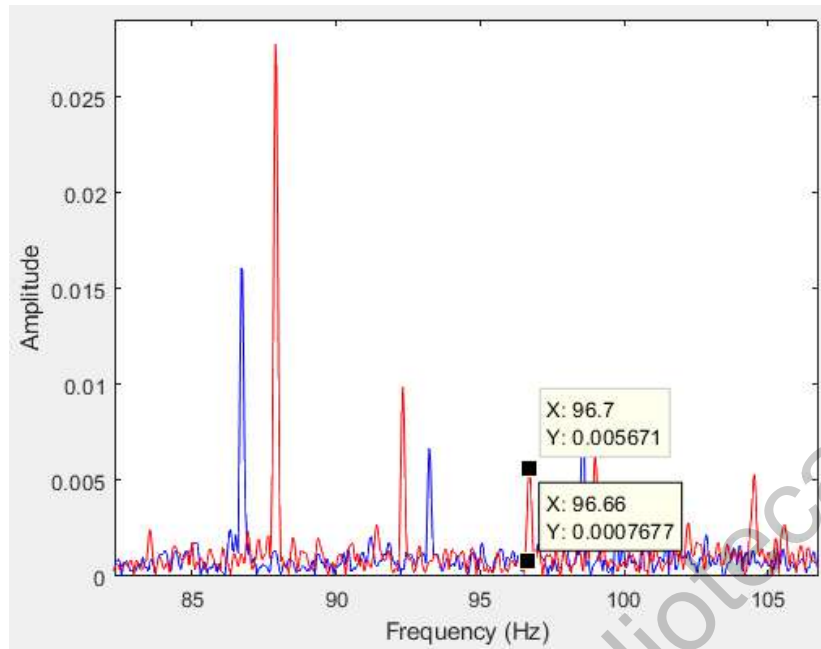


Figura 47. Gráfica análisis FFT Azul=Sano, Rojo=Fallo 2mm k=1 (Autoría Propia).

Por último, en la Figura 48 se observa que la diferencia entre el estado sano y el estado de dallo de 1mm es prácticamente mínimo, aunque también es posible apreciarlo a través de la gráfica y se obtiene una amplitud de diferencia entre los estados de 9.843×10^{-4} .

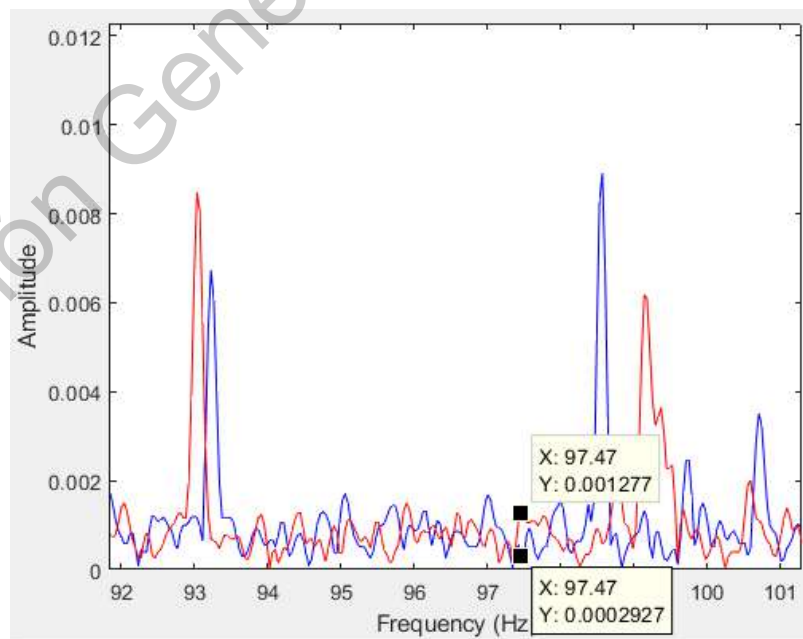


Figura 48. Gráfica análisis FFT Azul=Sano, Rojo=Fallo 1mm k=1 (Autoría Propia).

4.3.2 Procesamiento de 50 Hz para K=4

Para la misma alimentación de 50 Hz con variador de frecuencia se analizó la $k = 4$ y los resultados de la falla 5mm se muestran en la Figura 49 donde se puede observar una diferencia clara entre el estado de fallo el cual tiene una amplitud de $Y = 0.006269$ mientras que el estado sano tiene una amplitud de $Y = 0.001826$ dando como resultado una diferencia de amplitudes de 4.443×10^{-3} .

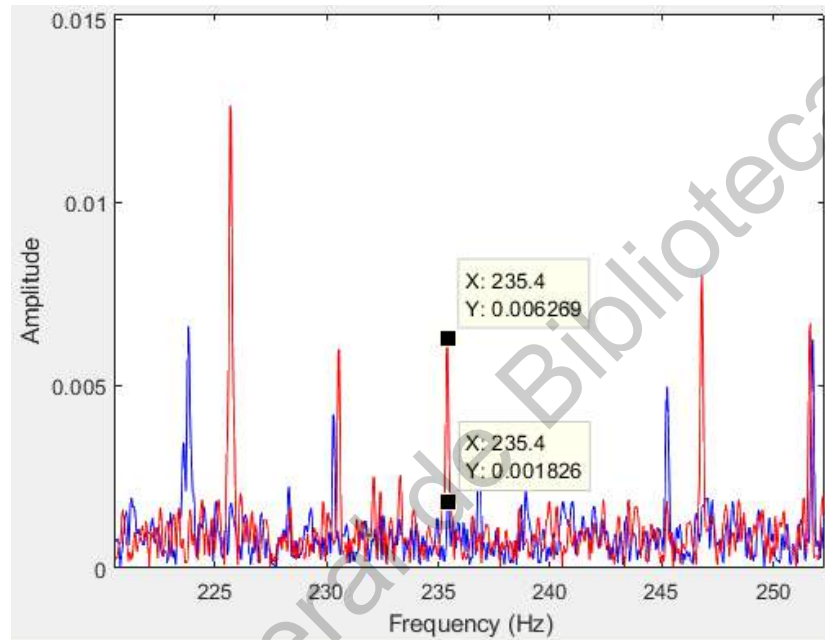


Figura 49. Gráfica análisis FFT Azul=Sano, Rojo=Fallo 5mm $k=4$ (Autoría Propia).

Igualmente, para $k = 4$ se obtuvieron las señales mostradas en la gráfica 50 donde se puede apreciar un decrecimiento entre en estado de fallo anterior a este estado de 4mm al obtenerse una diferencia de amplitudes de 4.555×10^{-3} , pudiendo diferenciarse el estado sano del fallo.

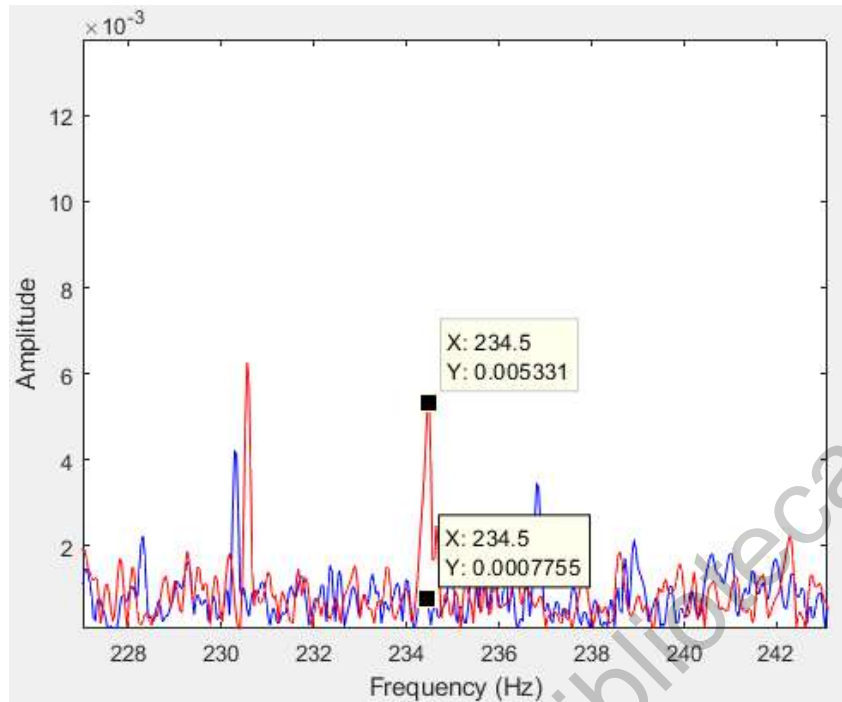


Figura 50. Gráfica análisis FFT Azul=Sano, Rojo=Fallo 4mm k=4 (Autoría Propia).

Después se tiene la Figura 51 donde se muestran las diferencias de amplitudes entre los distintos estados teniendo una amplitud de 0.004016 para el estado de fallo y una amplitud de 0.0002202 para el sano, obteniendo como resultado una diferencia de 3.7958×10^{-3} de amplitud. Permitiendo observar una disminución de la amplitud proporcional al fallo que se está analizando.

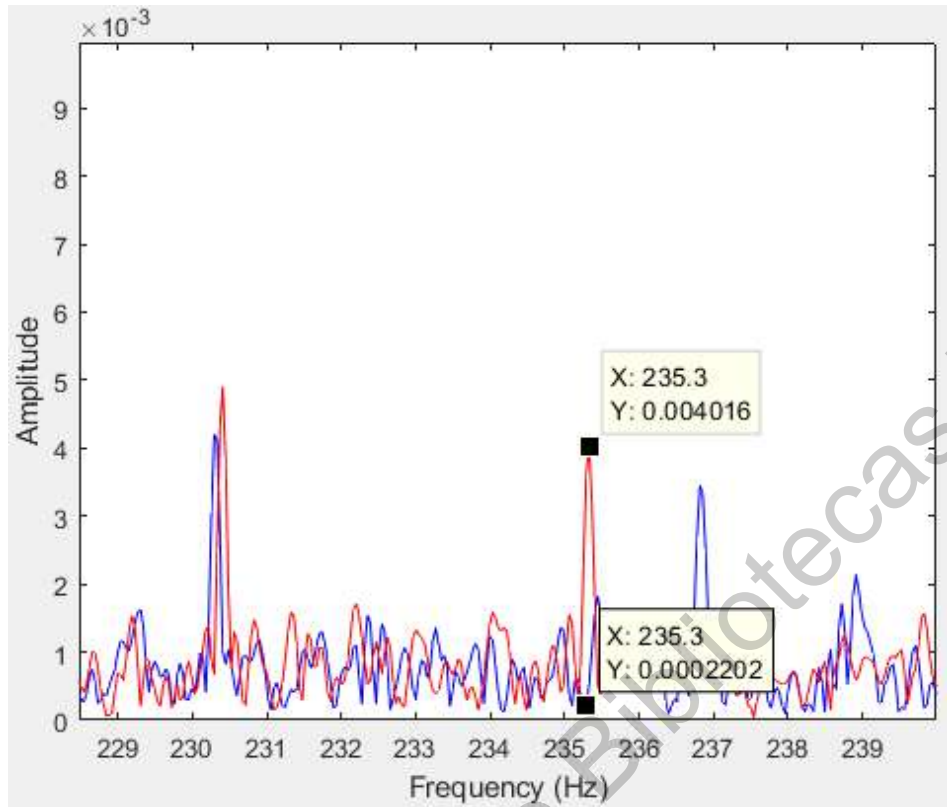


Figura 51. Gráfica análisis FFT Azul=Sano, Rojo=Fallo 3mm $k=4$ (Autoría Propia).

Al igual que en el caso anterior para $K = 1$ y para el estado de fallo de 2mm en este análisis de $k = 4$ es posible observar la diferencia entre el estado de fallo y el estado sano, sin embargo, el decrecimiento que se venía presentando en los estados anteriores no se observa en este caso en particular, ya que la amplitud del estado de fallo se eleva hasta valores de 0.006446 como se puede apreciar en la Figura 52. La amplitud de este fallo de 2mm es aún mayor que la observada en el estado de fallo de 5mm lo cual indica que en este estado se siguen presentados problemas para su correcto monitoreo y apreciación del fallo.

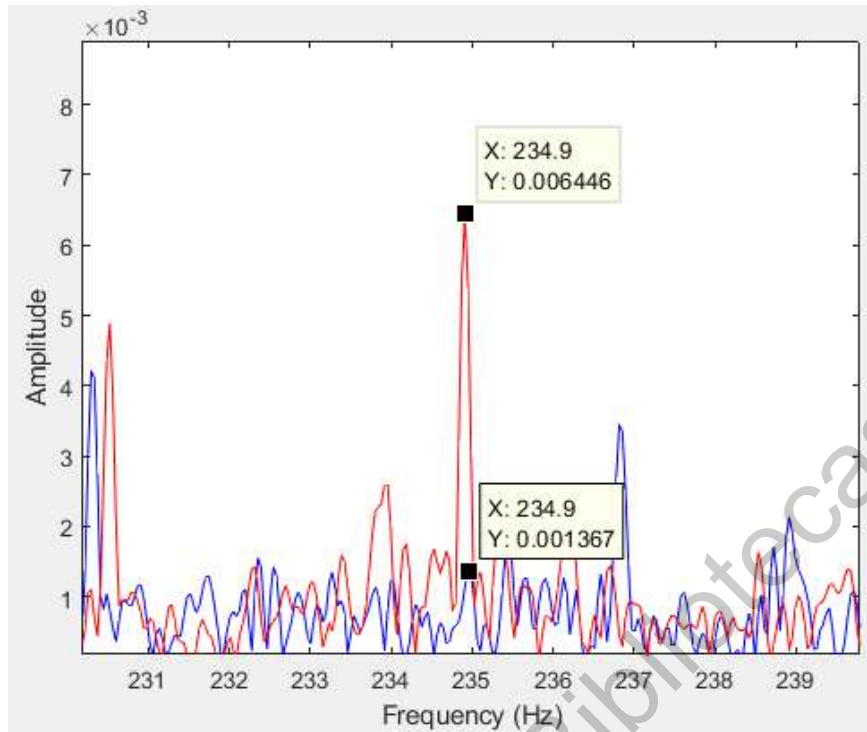


Figura 52. Gráfica análisis FFT Azul=Sano, Rojo=Fallo 2mm k=4 (Autoría Propia).

Por último, en la Figura 53 se observa una mínima diferencia entre el estado de fallo y el sano, ya que es el menor diámetro de fallo inducido (1mm) se tiene una amplitud más pequeña para el fallo obteniendo un valor de 0.01564 contra una amplitud de 0.00126 en sano. Dando como resultado una diferencia de amplitudes de 3.04×10^{-3} menor a todas las obtenidas en los estados anteriores.

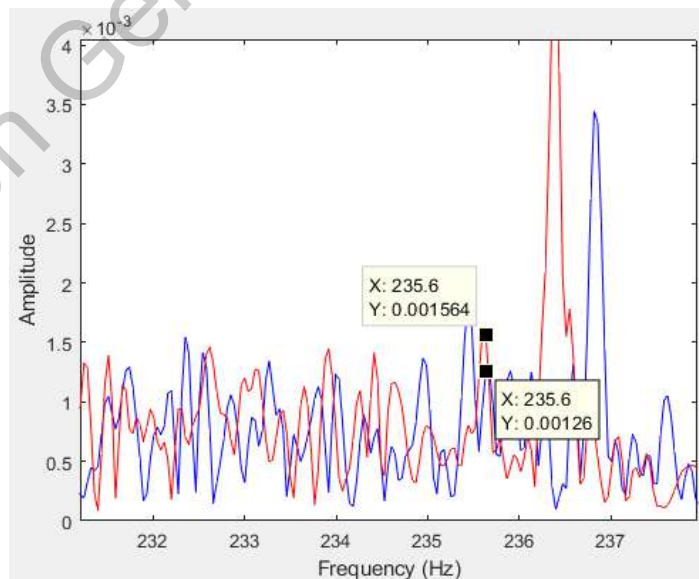


Figura 53. Gráfica análisis FFT Azul=Sano, Rojo=Fallo 1mm k=4 (Autoría Propia).

4.4 Procesamiento de señales mediante DWT + Energía

Otra herramienta que se seleccionó para el procesamiento de las señales obtenidas fue la Transformada de Wavelet (DWT) y la detección de energía de la Ondoleta, obteniendo algunos resultados positivos en algunas frecuencias específicas logrando identificar 3 distintos estados del rodamiento (Sano, 3mm y 5mm), mostrando los resultados obtenidos en los siguientes subcapítulos.

4.4.1 Procesamiento DWT para 5Hz con variador de frecuencia

En la Figura 54 se tiene la gráfica correspondiente a la frecuencia de alimentación de 5Hz con variador de frecuencia donde se muestra que no es posible diferenciar los estados de fallo inducidos en el rodamiento ya que las energías son aleatorias en cuanto a su magnitud, es decir, que los estados no tienen una relación de crecimiento o decrecimiento respecto al estado sano, por estas razones se concluye que no es posible utilizar esta frecuencia para realizar alguna clasificación de los estados de los rodamientos.

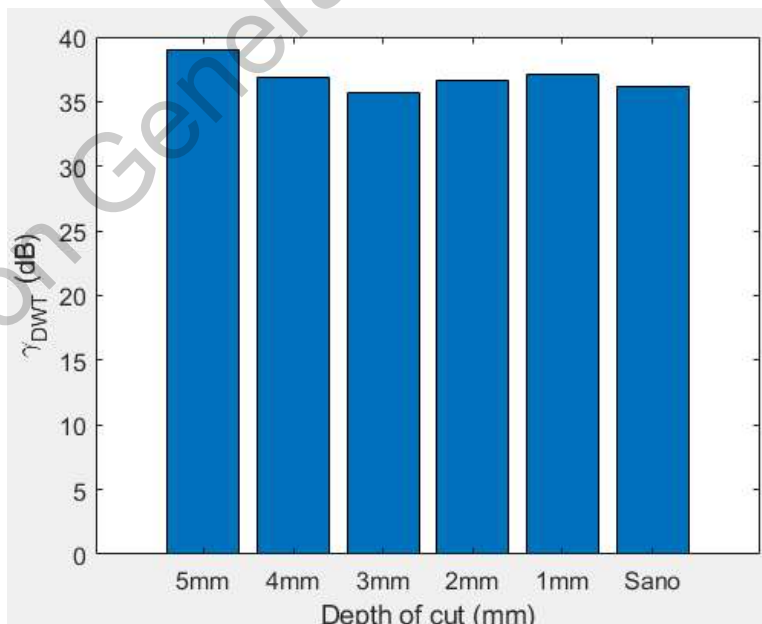


Figura 54. Análisis DWT para 5 Hz con variador de frecuencia (Autoría Propia).

4.4.2 Procesamiento DWT para 15Hz con variador de frecuencia

En la Figura 55 se observa la gráfica de la frecuencia de 15 Hz donde se puede apreciar que, aunque no todos los estados de falla tienen un crecimiento constante respecto al estado de 5mm que debería de ser el de valor más pequeño, si es posible discriminar 3 estados de rodamiento; ya que como se puede observar los estados de 4mm, 2mm y 1mm no corresponden a la secuencia que debería de verse en la gráfica.

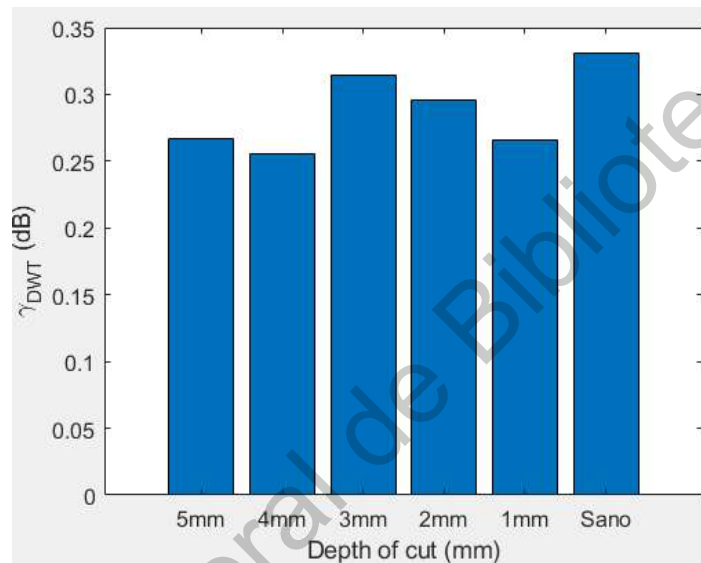


Figura 55. Análisis DWT para 15 Hz con variador de frecuencia (Autoría Propia).

Los 3 estados de rodamiento que se clasificaron correctamente fueron los de 5mm de fallo, 3mm de fallo y el estado sano como se muestran en la Figura 56 ya que tienen un crecimiento constante esperado.

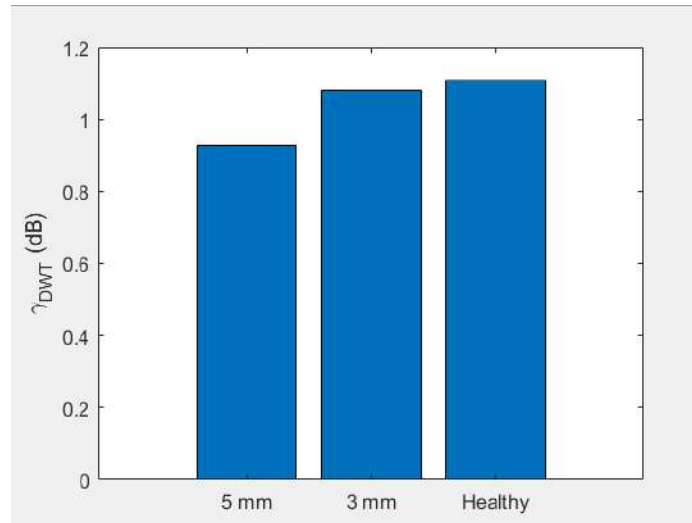


Figura 56. Análisis DWT de 3 estados de rodamiento exitosos para 15 Hz (Autoría Propia).

4.4.3 Procesamiento DWT para 50Hz con variador de frecuencia

Para la frecuencia de 50 Hz alimentado con variador de frecuencia se obtuvo la Figura 57, misma en la que es posible observar que en este caso disminuyen los estados que no corresponden al crecimiento uniforme de los valores de decibeles que indican el fallo siendo el estado de 2mm de fallo y de 1mm los que no permiten realizar una clasificación gradual.

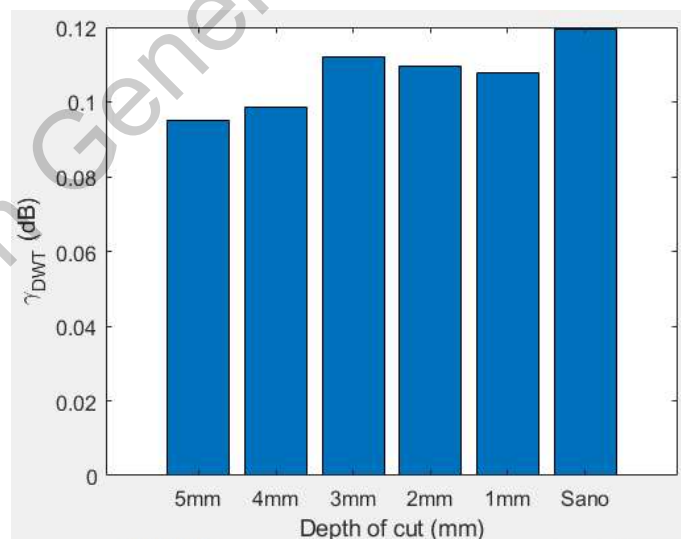


Figura 57. Análisis DWT para 50 Hz con variador de frecuencia (Autoría Propia).

Aunque en este caso fue posible identificar 4 estados de los rodamientos para estandarizar los resultados, respecto a lo que se obtiene en la mayoría de las

frecuencias solo se tomaron los estados de 5mm, 3mm y el estado sano como en el caso anterior y se muestra en la Figura 58, ya que incrementan de manera constante permitiendo su clasificación.

4.4.4 Procesamiento DWT para 60Hz con variador de frecuencia

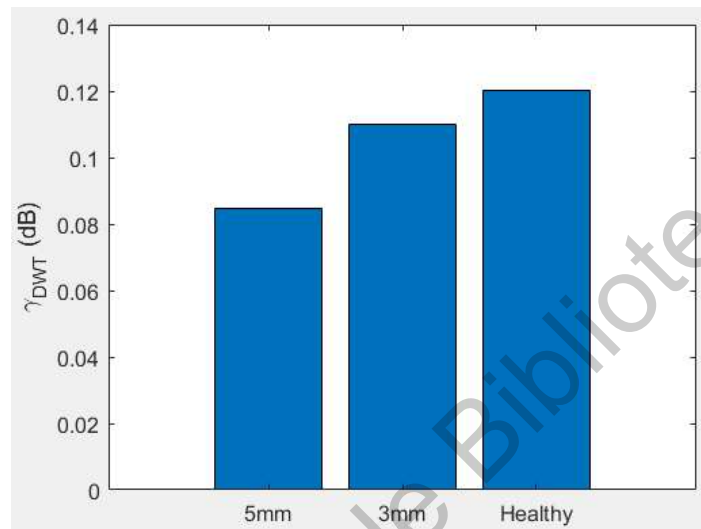


Figura 58. Análisis DWT de 3 estados de rodamiento exitosos para 50 Hz (Autoría Propia).

En la Figura 59 se puede percibir que al igual que en los casos anteriores no todas las barras mostraron el comportamiento esperado incrementando gradualmente empezando desde un estado sano hasta llegar al caso más grave que es el de 5mm, en este caso la prueba de 4mm y 2 mm fueron los que no presentan una secuencia para realizar un buen diagnóstico.

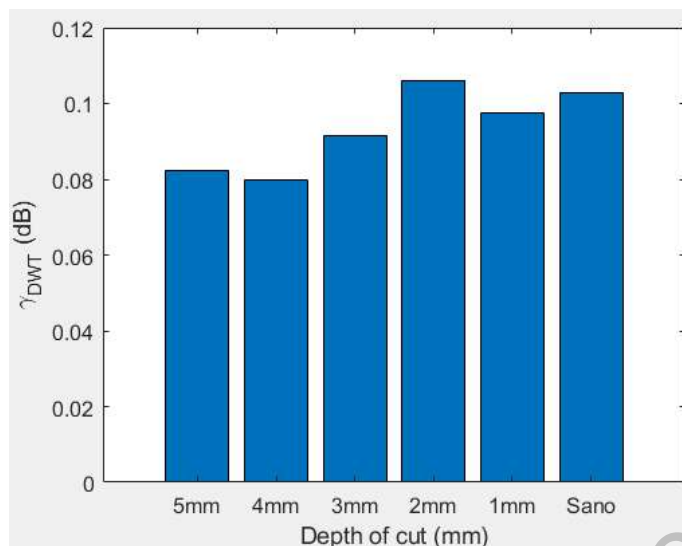


Figura 59. Análisis DWT para 60 Hz con variador de frecuencia (Autoría Propia).

Los casos exitosos para esta frecuencia fueron las pruebas de 5mm, 3mm, 1mm y el estado sano. Pero al igual que en los análisis pasados para uniformar resultados, sólo se utilizan solo 3 estados los cuales fueron 5mm, 3mm y el sano mostrados en la Figura 60 para así tener el mismo diagnóstico de estos tres estados para 3 diferentes frecuencias (15Hz, 50Hz, 60Hz).

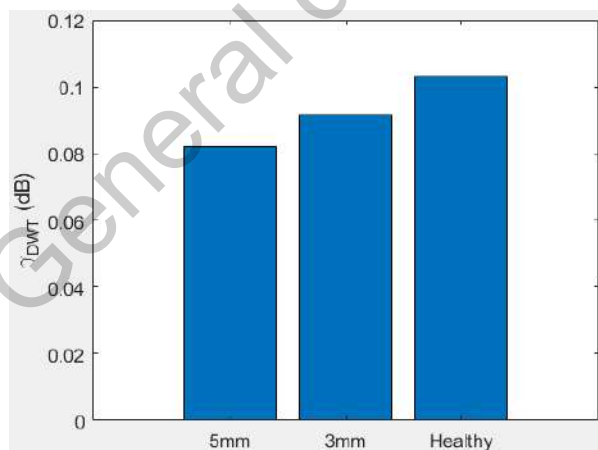


Figura 60. Análisis DWT de 3 estados de rodamiento exitosos para 60 Hz (Autoría Propia).

4.4.5 Procesamiento DWT para 60Hz con arranque directo

Para analizar esta frecuencia se obtuvo la Figura 61 donde se muestran los resultados para la DWT con arranque directo de 60 Hz, en la cual se puede observar que la mayoría de los datos obtenidos tienen ninguna secuencia que permita

discriminar la diferencia entre ellos, únicamente se ve un aumento proporcional entre el estado de 5mm y el sano lo cual no es suficiente para realizar un diagnóstico, por esto se concluyó que en este caso no se puede utilizar esta frecuencia para lograr el diagnóstico de fallo en los rodamientos.

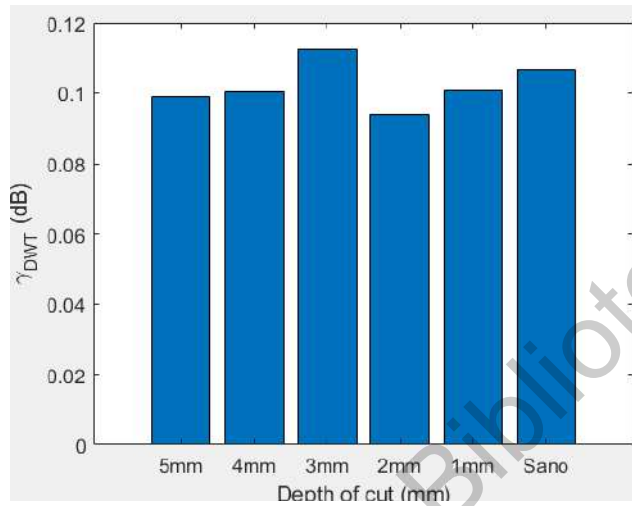


Figura 61. Análisis DWT para 60 Hz directo (Autoría Propia).

4.5 Procesamiento de señales mediante PCA con Indicadores Estadísticos

La última herramienta que se utilizó para llevar a cabo el procesamiento de las señales de flujo fue aplicar 15 indicadores estadísticos individuales generando las gráficas correspondientes de cada indicador para posteriormente mediante otro programa de MATLAB combinar las gráficas obtenidas mediante PCA obteniendo los mejores resultados de este trabajo logrando discriminar los 6 estados que se propusieron (Sano, fallos de 5mm, 4mm, 3mm, 2mm y 1mm) al igual que se logró clasificar los 6 estados del rodamiento para las 5 frecuencias que se utilizaron para lleva a cabo la experimentación (5Hz con variador de frecuencia, 15Hz con variador de frecuencia, 50Hz con variador de frecuencia, 60Hz con variador de frecuencia y 60 con arranque directo).

4.5.1 Procesamiento PCA para 5Hz con variador de frecuencia

A continuación se muestran en la Figura 62 los resultados obtenidos del procesamiento PCA para una frecuencia de 5Hz mediante variador de frecuencia, en la cual se puede observar claramente que este método es capaz de clasificar exitosamente los estados de rodamiento de 1mm de fallo en verde, 5mm en color rosa, de 4mm en negro, de 3mm en amarillo y aparentemente los estados de 2mm y el estado sano se llegan a cruzar pero para poder observar de mejor manera se hará un acercamiento para llegar a una respuesta más concluyente.

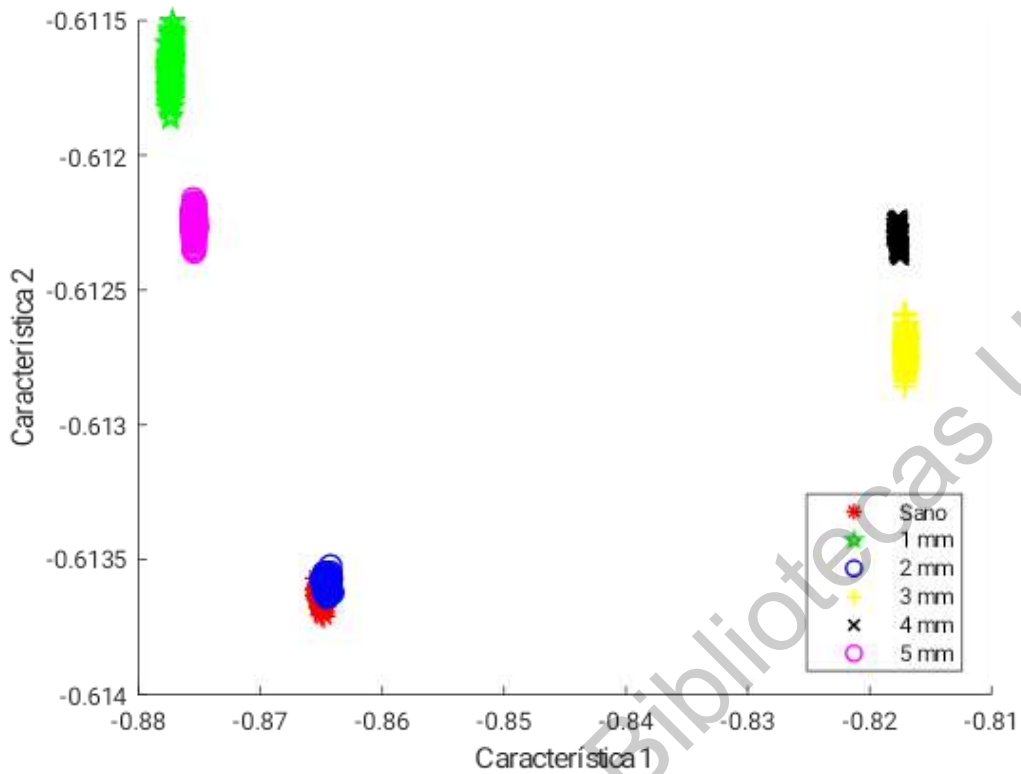


Figura 62. Análisis PCA para 5Hz con variador de frecuencia (Autoría Propia).

Como se puede observar en la Figura 63 las muestras que llegan a sobreponer/traslapar entre ellas son mínimas permitiendo llevar a cabo una clasificación exitosa para los 6 estados de rodamiento que se presentan.

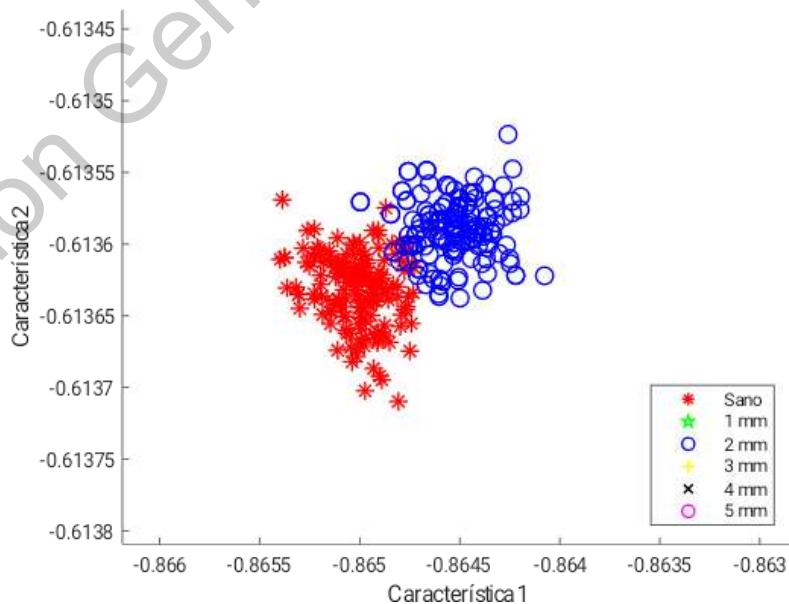


Figura 63. Acercamiento de Figura 62 en estado sano y fallo 2mm (Autoría Propia).

4.5.2 Procesamiento PCA para 15Hz con variador de frecuencia

En la Figura 64 se muestran los resultados obtenidos de este mismo procesamiento para la frecuencia de análisis de 15 Hz alimentado con variador de frecuencia en la cual se logra apreciar que se tienen 4 estados de rodamiento discriminados de manera clara los cuales son el estado de fallo de 1mm en color verde, de 3mm, de 4mm en color negro y por último el de 5mm en color rosa y al igual que en la frecuencia anterior se tienen dos estados que ha simple vista parecen estar encimados por lo cual no sería posible discriminar estos dos estados con el 100% de efectividad así que se le realiza un acercamiento a la imagen 64 para obtener mejores resultados.

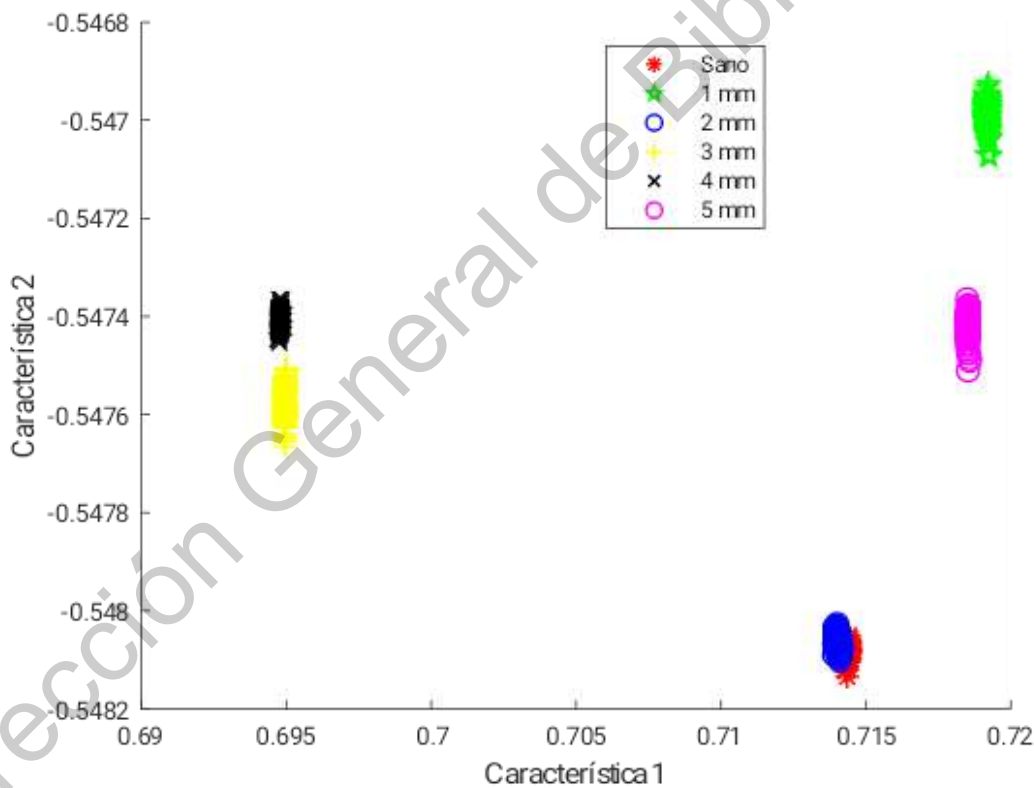


Figura 64. Análisis PCA para 15Hz con variador de frecuencia (Autoría Propia).

Al realizar el acercamiento mostrado en la Figura 65 se puede apreciar claramente que los 2 estados de rodamiento (sano en color rojo y el estado de fallo de 2mm en azul) no se cruzan lo cual indica que se pueden clasificar sin ningún problema todas las muestras en su totalidad. Obteniendo una correcta clasificación para los 6 estados de rodamiento propuestos.

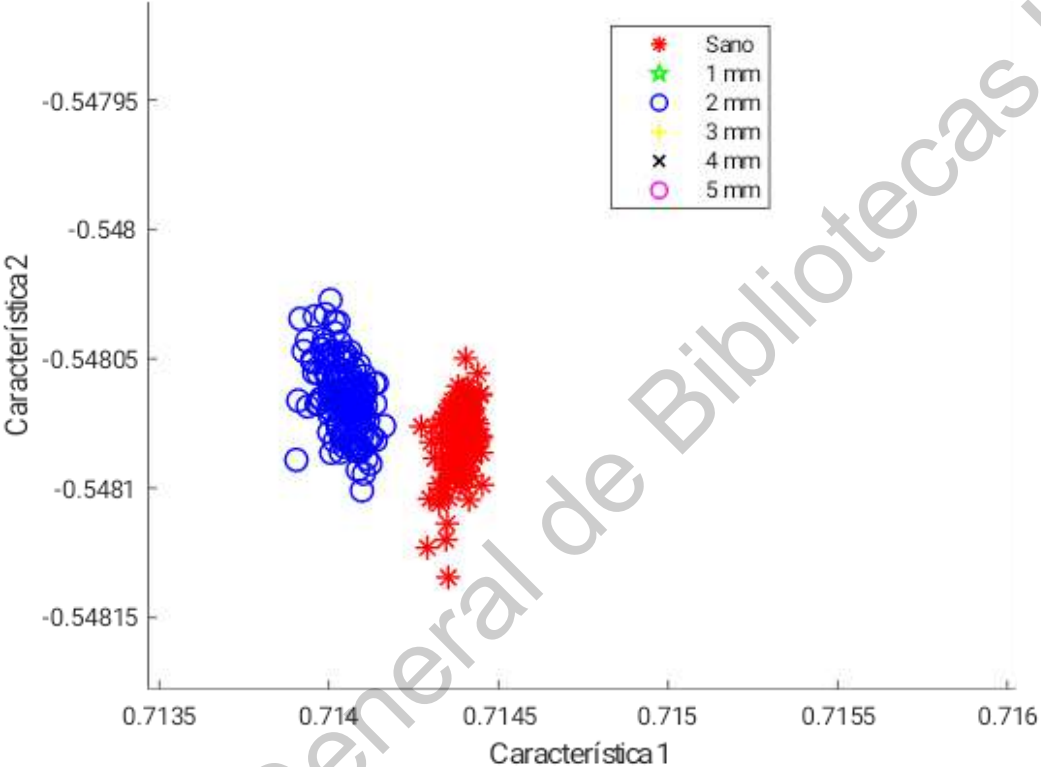


Figura 65. Acercamiento de Figura 64 en estado sano y fallo 2mm (Autoría Propia).

4.5.3 Procesamiento PCA para 50Hz con variador de frecuencia

La siguiente frecuencia que se analizó fue la de 50Hz con variador de frecuencia para la cual se tuvieron resultados completamente satisfactorios ya que se puede observar de manera concisa que se discriminan los 6 estados de rodamiento propuestos para el análisis permitiendo tener una correcta clasificación de éstos, teniendo en estado sano en color rojo, el estado de fallo de 1mm en color verde, de 2mm en color azul, de 3mm el amarillo, de 4mm en color negro y por último el de 5 mm en rosa como se muestra en la Figura 66.

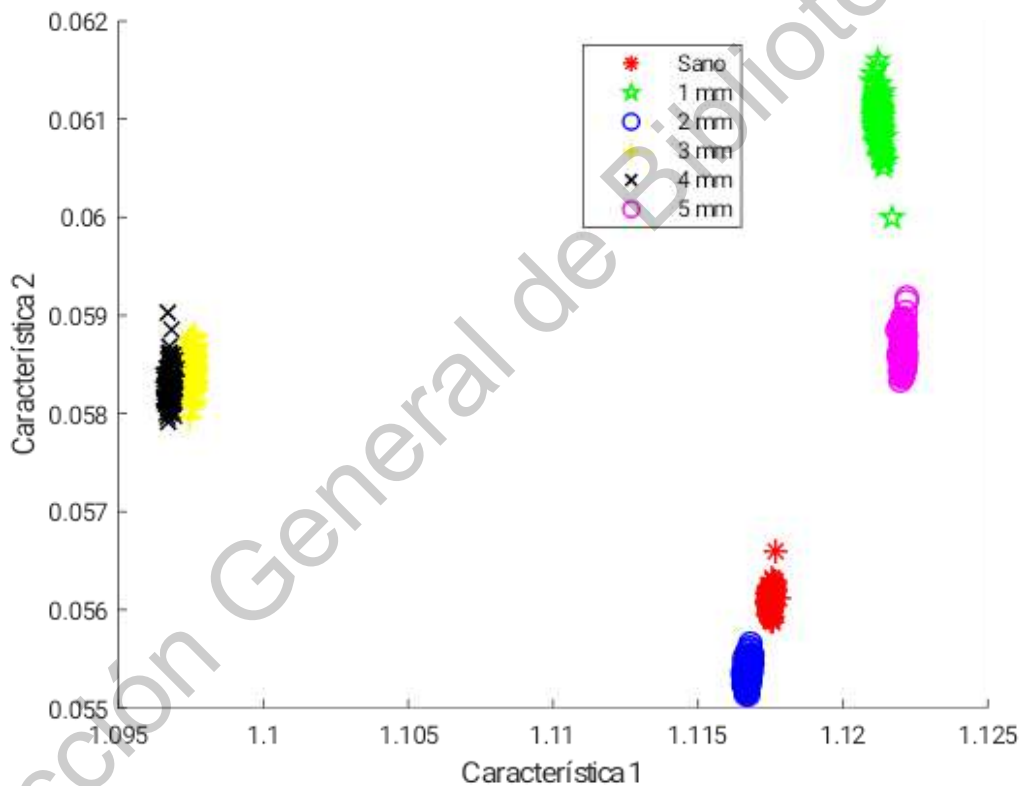


Figura 66. Análisis PCA para 50Hz con variador de frecuencia (Autoría Propia).

4.5.4 Procesamiento PCA para 60Hz con variador de frecuencia

En la Figura 67 se muestran los resultados del procesamiento mediante PCA en la frecuencia de 60Hz con variador de frecuencia la cual permite observar que se tienen 4 estados del rodamiento perfectamente discriminados uno del otro teniendo el estado sano en color rojo, el estado de fallo de 1mm en color verde, de 2mm en color azul y de 5mm en color rosa; al igual se pueden observar los estados de fallo de 3mm y 4mm en color amarillo y negro respectivamente un poco juntos por lo cual se aplicó un acercamiento a la Figura 67 para observar de mejor manera el comportamiento de los mismos y determinar si están lo suficientemente discriminados para poder llevar a cabo la clasificación.

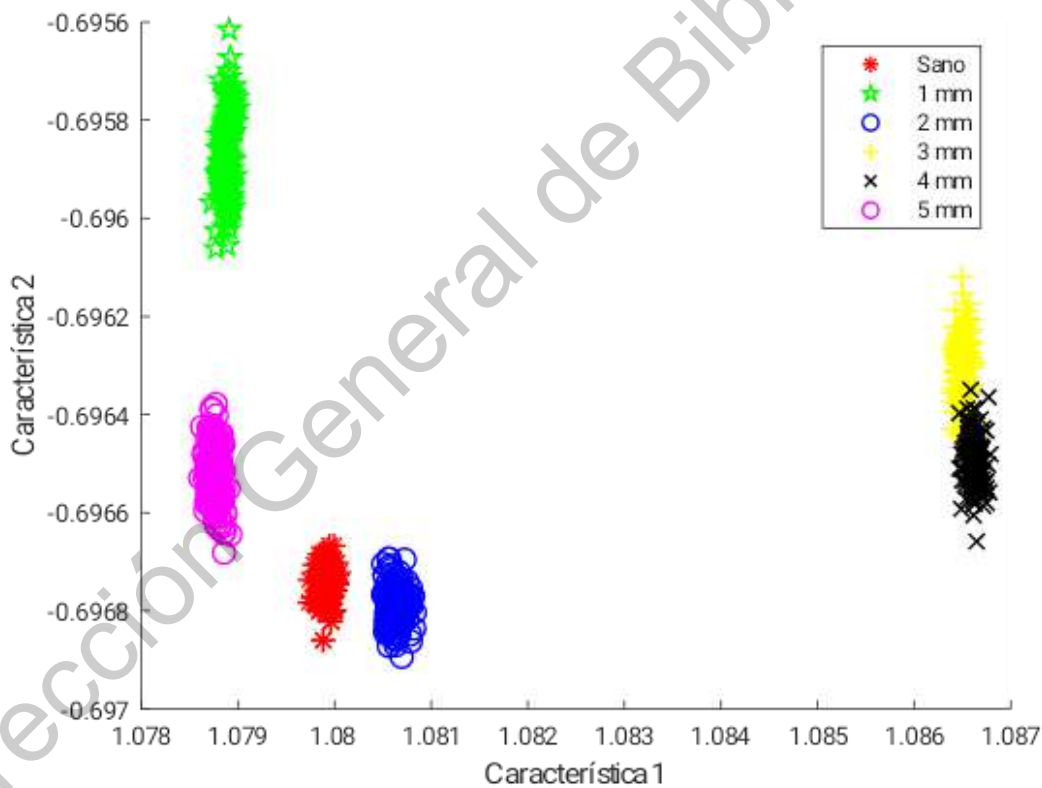


Figura 67. Análisis PCA para 60Hz con variador de frecuencia (Autoría Propia).

El acercamiento que se le aplicó a la Figura anterior se puede apreciar en la Figura 68 en la cual se puede observar que, aunque los dos estados de fallo de 3mm y de 4mm están un poco cerca, sin embargo, no se mezclan las pruebas por lo cual es posible realizar una correcta clasificación obteniendo como resultado otra frecuencia para la cual es posible clasificar los 6 estados de rodamientos propuestos para su análisis.

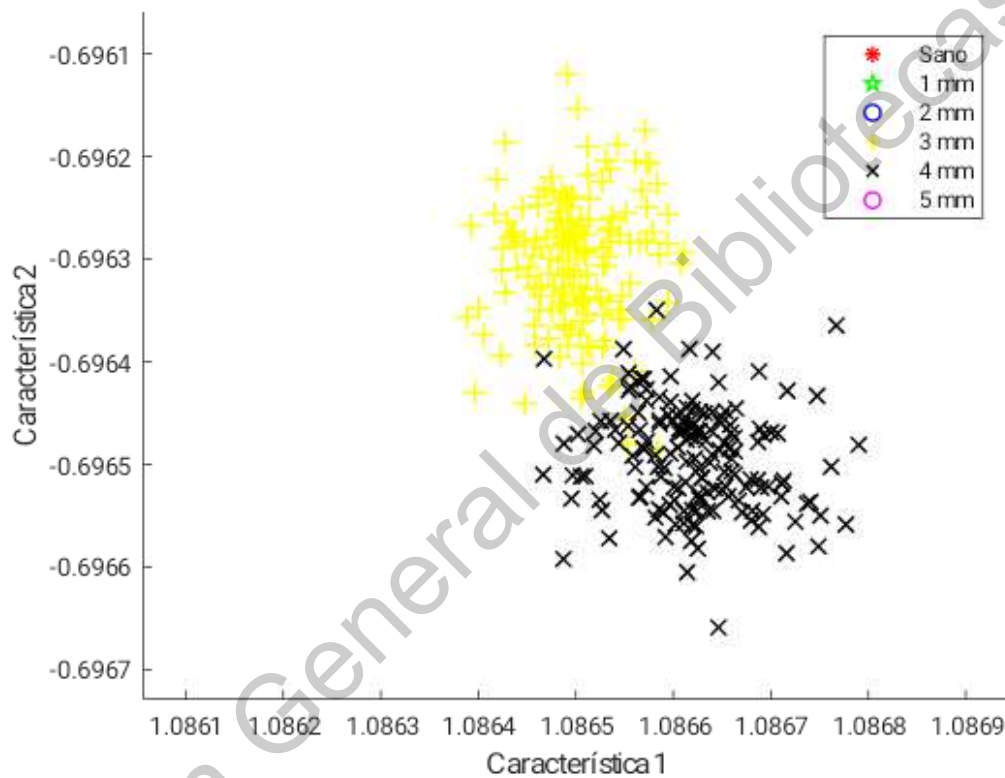


Figura 68. Acercamiento de Figura 67 en estado fallo 3mm y fallo 4mm (Autoría Propia).

4.5.5 Procesamiento PCA para 60Hz con arranque directo

La última frecuencia que se analizó fue la de 60 Hz con arranque directo para la cual también se obtuvieron resultados favorables ya que como se puede apreciar en la Figura 69 se pueden discriminar a simple vista los estados de rodamiento propuestos permitiendo llevar a cabo su correcta clasificación teniendo en estado sano el color rojo, el estado de fallo de 1mm en color verde, el fallo de 2mm en color azul, de 3mm en color amarillo, de 4mm en negro y por último el fallo de 5mm en color rosa.

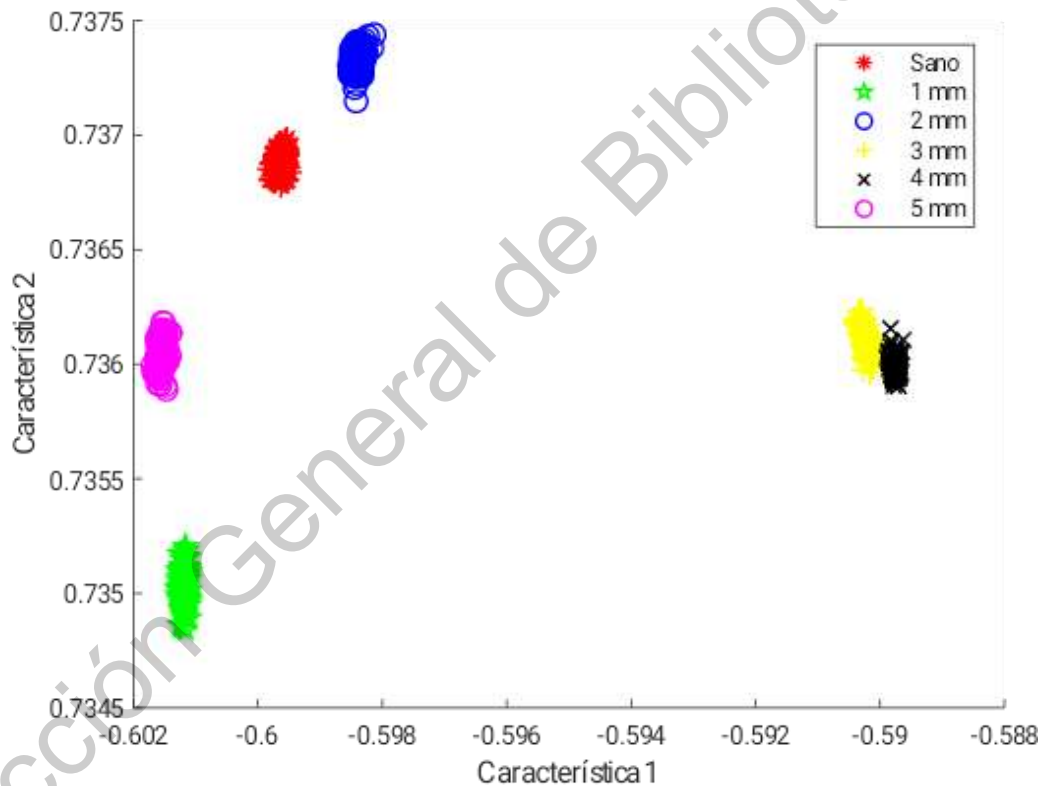


Figura 69. Análisis PCA para 60Hz con arranque directo (Autoría Propia).

Capítulo 5: Conclusiones y Prospectivas

5.1 Conclusiones

Después de analizar todo el procesamiento que se realizó a las pruebas obtenidas mediante la experimentación se llegó a las siguientes conclusiones.

Que el flujo magnético es una herramienta muy útil para realizar el diagnóstico de daño en los rodamientos de los motores de inducción ya que permite monitorear a los rodamientos en todo momento sin la necesidad de detener el motor y de forma no invasiva además de ser un método innovador y más económico a las alternativas que se han reportado hasta hoy en día en la literatura.

Además, debido principalmente a que las unidades de magnitud de flujo magnético son muy pequeñas, es difícil lograr una diferenciación en cada uno de los estados de los rodamientos con las herramientas y técnicas convencionales, por esta razón fue necesario implementar 3 distintos procesamientos para obtener resultados favorables (FFT, DWT+ Indicador de energía e Indicadores estadísticos con PCA), ya que en los primeros análisis y procesamientos fue posible solo realizar algunas clasificaciones de los estados de rodamiento propuestos o solo para algunas frecuencias específicas, dificultando así la correcta clasificación de todas las severidades estudiadas en el presente trabajo.

Se observó que a través del último procesamiento (Indicadores estadísticos con PCA) es posible discriminar los 6 estados de rodamiento (sano, fallos de 5mm, 4mm, 3mm, 2mm y 1mm) propuestos en este trabajo, logrando llevar a cabo la correcta clasificación de éstos para las 5 frecuencias de experimentación (5 Hz con variador de frecuencia, 15 Hz con variador de frecuencia, 50 Hz con variador de frecuencia, 60 Hz con variador de frecuencia, 60 Hz con arranque directo).

Como conclusión, se puede mencionar que todos los objetivos propuestos en este trabajo fueron cubiertos en su totalidad aportando información importante en este rubro tan importante para la industria y para trabajos ya realizados con anterioridad.

5.2 Prospectivas

Como se puede apreciar en los resultados de este trabajo, el flujo magnético es una herramienta útil para la detección de gradualidad de fallos en los rodamientos por lo cual se podría llevar a cabo un estudio en el cual se trate de detectar otro tipo de fallas que afecten al motor de inducción.

El análisis del flujo magnético de dispersión también podría ser utilizado, en conjunto con variables que ya se utilizan para el monitoreo de fallos en los motores de inducción (como lo son vibraciones y corriente), con el propósito de generar un monitoreo más certero capaz de diagnosticar una gran variedad de fallos.

De igual manera, como trabajo a futuro, es posible desarrollar un estudio en el cual se le induzcan varias fallas de manera simultánea un motor de inducción, de tal manera que con la ayuda de señales de flujo magnético de dispersión sea posible diagnosticar y discriminar cada tipo de fallo de manera precisa, siendo esto muy útil ya que se podría llegar a emplear el flujo magnético para cualquier monitoreo sobre el motor de inducción previniendo cualquier contratiempo en el mismo.

Referencias

Alexi Anteliz Jaimes Antonio, 2009, El Flujo De Dispersión Magnético Como Herramienta De Análisis Para Detección De Fallas En Motores De Inducción Mediante Técnicas De Análisis Espectral, Gerenc. Tecnol. Inform. | Vol. 8 | N° 20 | Ene - Abr | Anteliz, Pp.47-54.

Allende H., C. Moraga, R. Salas, 2002, Artificial Neural Networks in Time Series Forecasting: A Comparative Analysis". Kybernetika, Volume 38, number 6, pages 685-707. ISI ISSN: 0023-5954

Allegro Microsystems, 2020, Low-Noise Linear Hall-Effect Sensor ICs with Analog Output A1324, A1325, and A1326, pp.13

Anteliz Jaimes Antonio Alexi, 2009, EL FLUJO DE DISPERSIÓN MAGNÉTICO COMO HERRAMIENTA DE ANÁLISIS PARA DETECCIÓN DE FALLAS EN MOTORES DE INDUCCIÓN MEDIANTE TÉCNICAS DE ANÁLISIS ESPECTRAL, Gerenc. Tecnol. Inform. Vol. 8 N° 20, pp 47-54

BONNETT AUSTIN H., CHUCK YUNG, 2008, INCREASED EFFICIENCY VERSUS INCREASED REALIABILITY, IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE JAN, 1077-2618/08

Capolino Gérard-André, Raphael Romary, Humberto Hénao, Remus Pusca, 2019, State of the Art on Stray Flux Analysis in Faulted Electrical Machines, IEEE, pp.181-187

Castillo Ramírez Arturo, Cinemática de las máquinas, 2005, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Edición 2, pp. 234 22

De Angelo Cristian H., Guillermo R. Bossio, Santiago J. Giaccone, Jorge A. Solsona, María I. Valla, Guillermo O. García, 2007, UNA ESTRATEGIA BASADA EN MODELOS PARA EL DIAGNOSTICO DE FALLAS EN EL ´ ESTATOR DEL MOTOR DE INDUCCION, ISSN: 1697-7912. Vol. 4, Núm. 3, pp.107-11510

Duda Richard O, Peter E. Hart, David G. Stork, 2000, Clasificación de patrones, Segunda Edición, ISBN: 978-0-471-05669-0, pp. 688.

Fernández Cabanas Manes, Manuel García Melero, Gonzalo Alonso Orcajo, José Manuel Cano Rodríguez, Juan Solares Sariego, 1998, Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas, Impreso en España, Primera Edición, pp.162

Flores Roberto, Tomás I. Asiaín, 2011, Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotatorias Utilizando la Técnica de Espectros de Frecuencia de Bandas Laterales, Departamento de Ingeniería Eléctrica, SEPI-ESIME-IPN, Vol. 22(4), 73-84 (2011).

Flórez López Raquel, Fernandez M. J; Fernández F. M. J; 2008, Las Redes Neuronales Artificiales, Gesbilo S. L; España

Garcia-Perez Arturo, Rene de Jesus Romero-Troncoso, Eduardo Cabal-Yopez, Roque Alfredo Osornio-Rios, 2011, The Application of High-Resolution Spectral Analysis for Identifying Multiple Combined Faults in Induction Motors, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 58, NO. 5 Pag: 2002-2010

Garcia-Ramirez Armando Guadalupe, Luis Alberto Morales-Hernandez, Roque Alfredo Osornio-Rios, Juan Primo Benitez-Rangel, Arturo Garcia-Perez, Rene de Jesus Romero-Troncoso, 2014, Fault detection in induction motors and the impact on the kinematic chain through thermographic analysis, Electric Power Systems Research 114, 1-9

García Rodríguez José Félix, Aida Armenta Ramírez, Lenin Martínez Pérez, Jorge Rebollo Meza, Rafael Rentería Ramos, 2019, RELACIÓN ENTRE LA INNOVACIÓN Y LA PRODUCTIVIDAD LABORAL EN LA INDUSTRIA MANUFACTURERA DE MÉXICO, VOL. 40 , NO. 2, 249-254, 2019

Giaccone Santiago J., Guillermo Ruben Bossio, Guillermo Oscar García, 2004, Análisis de las corrientes del motor de inducción con falla en el estator, Conference: XIX Congreso Argentino de Control Automático AADECA

Gómez Suárez Iván, 2020, Mantenimiento electromecánico de motores eléctricos, Primera Edición, España, ISBN:978-84-283-4271-1, PP. 311

González Genaro, 1997, Series de Fourier, Transformadas de Fourier y Aplicaciones, Divulgaciones Matemáticas v. 5, No. 1/2 (1997), 43-60

Guoping An, Qingbin Tong, Yanan Zhang, Ruifang Liu, Weili Li, Junci Cao, Yuyi Lin, 2021, An Improved Variational Mode Decomposition and Its Application on Fault Feature Extraction of Rolling Element Bearing, *Energies* 2021, 14, 1079.

Harper Gilberto Enrique, 2005, *Transformadores y Motores de Inducción*, Cuarta Edición Mexico, ISBN:968-18-5993-6.

Hamida Boudinar Ahmed, Nouredine Benouzza, Azeddine Bendiabdellah, Mohammed-El-Amine Khodja, 2016, Induction Motor Bearing Fault Analysis Using a Root-MUSIC Method, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. 52, NO. 5

Humbert S; "Detection of electrical discharges in bearings", SKF Maintenance Products, November 2008, pp 1-9.

Manhuai Lu , Chin-Ling Chen, 2021, Detection and Classification of Bearing Surface Defects Based on Machine Vision, *Machine Vision. MDPI Appl. Sci*, 11, 1825

Milano Shaun, 2013, Allegro Hall-Effect Sensor ICs, Product Information, pp. 5

Minh Tuan Pham, Jong-Myon Kim, Cheol Hong Kim, 2020, Deep Learning-Based Bearing Fault Diagnosis Method for Embedded Systems, *Sensors* 2020, 20, 6886; doi:10.3390/s20236886

Mondaca Marino M. C., 2002, *Estudio de Fallas Comunes en Rodamientos Rígidos de un Hilera de Bolas Mediante Análisis en el Dominio del Tiempo y de la Frecuencia*, Tesis Universidad Austral de Chile

Qiaoping Tian, Honglei Wang, 2019, An Ensemble Learning and RUL Prediction Method Based on Bearings Degradation Indicator Construction, *MDPI applied sciences*, *Appl. Sci.* 2020, 10, 346

Ramirez Chavez Mayra, 2019, *Sensor inteligente basado en técnicas de tiempo-frecuencia para supervisión de fallas en cojinetes cerámicos y metálicos*, Tesis de maestría, pp 88.

Rega Pablo, 2011, "Motores Eléctricos", Escuela de Educación Técnica N°279, Editorial Sunchales

Riera M., A. Daviu, M. Pineda, R. Puche, J. Perez “A General Approach for the Transient Detection of Slip-Dependent Fault Components Based on the Discrete Wavelet Transform”, IEEE 2002, pp 4167-4180.

Rodríguez Pozueta Miguel Ángel, 2015, Maquinas Electricas 1-G862 , Universidad de Cantabria, Commons, PO Box 1866, Mountain View, pp.92.

Romero Ramirez Luis Alejandro, Luis Morales Velazquez, Roque A. Osornio Rios, René de Jesús Romero Troncoso, Daniel Moríñigo Sotelo, 2018, DETECCIÓN DE FALLA DE RODAMIENTO EN UNA CADENA CINEMÁTICA VÍA EMISIÓN ACÚSTICA, Pistas Educativas Vol. 39 - ISSN: 2448-847X

Roweis S; 1998, Avances en sistemas de procesamiento de información neuronal, Citeseer

Saucedo Dorantes Juan José, 2017, Metodologías para mejorar la confiabilidad del diagnóstico de fallas en cadenas cinemáticas basado en algoritmos inteligentes y fusión de datos, Tesis de Doctorado, UAQ

Sintesis Fernandez Jorge, 2019, APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS DEL FLUJO MAGNÉTICO DE DISPERSIÓN PARA LA DETECCIÓN DE ASIMETRÍAS ROTÓRICAS EN MÁQUINAS DE INDUCCIÓN DE ROTOR BOBINADO Escuela Politécnica de Valencia

Sosa Vázquez Marco Antonio, Ricardo Álvarez Salas, Francisco Javier Villalobos Piña, Mario Arturo González García, Víctor Manuel Cárdenas Galindo, Héctor Méndez Azúa, 2015, Detección de Fallas Mecánicas en el Motor de Inducción Trifásico, CENIDET Pag:245 – 250.

Soualhi A., H. Razik, “Electrical Systems 2 From Diagnosis to Prognosis”, ISTE WILEY, 2002, pp 1-203.

Villada Duque Fernando, Diego Parra, Guillermo Ocampo, 2006, Estudio del comportamiento de motores de inducción ante fallas estatóricas, Revista Facultad de Ingeniería N.º 40. pp. 76-94

Villada, Fernando; A. Valencia, Diego; Muñoz, Nicolás, 2004, Diagnóstico del aislamiento estatórico en motores de inducción mediante la medición del flujo axial de dispersión Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, núm. 32, diciembre, pp. 102-113

Xanthopoulos P., Robust Data Mining, 2013, Linear Discriminant Analysis, DOI 10.1007/978-1-4419-9878-1 4, pp. 27-33

Yang Lin, Huan Zhao, Congcong Ye, Han Ding, 2017, A Computationally Efficient and Robust Kinematic Calibration Model for Industrial Robots with Kinematic Parallelogram, IEEE 978-1-5386-3742-5/17

Zamudio-Ramirez Israel, Jose Alfonso Antonino-Daviu, Roque A. Osornio-Rios, Rene de Jesus Romero-Troncoso, Hubert Razik, 2020, Detection of Winding Asymmetries in Wound-Rotor Induction Motors via Transient Analysis of the External Magnetic Field, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 67, NO. 6, pp. 5050-5059

Zamudio-Ramírez Israel, Juan Angel Ramirez-Núñez, Jose Antonino-Daviu, Roque A. Osornio-Rios, Alfredo Quijano-Lopez, Hubert Razik, Rene de Jesus Romero-Troncoso, 2020, Automatic Diagnosis of Electromechanical Faults in Induction Motors Based on the Transient Analysis of the Stray Flux via MUSIC Methods, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 56, NO. 4, pp 3604-3613

Dirección General de Bibliotecas UAQ