



UNIVERSIDAD DEL ISTMO

**ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA LA DETECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DE
FALLAS EN EL GENERADOR DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO
(GIDA) PARA EL DISEÑO DE AEROGENERADORES DE VELOCIDAD
VARIABLE**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA EÓLICA**

PRESENTA

ING. FREDY LÓPEZ MOLINA

DIRECTOR DE TESIS

DR. EMMANUEL HERNÁNDEZ MAYORAL

CO-DIRECTOR DE TESIS

DR. ONOFRE AMADOR MORFÍN GARDUÑO

SANTO DOMINGO TEHUANTEPEC, OAXACA; OCTUBRE 2018.

Agradecimientos

Agradezco a cada una de las personas que de una u otra manera participaron en el desarrollo de este proyecto. Al Dr. Emmanuel H. Mayoral, director de tesis, por su confianza, apoyo y colaboración en todo momento. A todos mis compañeros, maestros y amigos de la UNISTMO que formaron parte de esta experiencia.

También agradezco al Fondo SENER-CONACYT-Sustentabilidad Energética por el apoyo económico recibido para realizar los estudios de Maestría en Ciencias en Energía Eólica en la Universidad del Istmo.

Finalmente, expreso mi especial agradecimiento a mi familia por su gran apoyo.

Resumen

En la última década la energía eólica ha presentado un gran crecimiento y, por lo tanto, el diseño y mantenimiento de los aerogeneradores toma mayor importancia en el desarrollo de los parques eólicos para garantizar la confiabilidad de los mismos y así disminuir los costos de operación y mantenimiento que se verá reflejado en la reducción del costo total de la energía producida buscando que la energía eólica pueda competir con la industria de las energías convencionales. Como parte de este mantenimiento, el monitoreo de condición ha tomado gran importancia dentro del sector eólico debido a que es una herramienta eficiente en la detección de fallas incipientes para minimizar el tiempo de inactividad y maximizar la producción.

En este trabajo se presenta un análisis de vibraciones para el desarrollo de un modelo computacional en la plataforma MATLAB/Simulink que permita detectar las fallas en los rodamientos del Generador de Inducción Doblemente Alimentado (GIDA) en un aerogenerador de baja potencia. El proyecto inicia con la selección de los elementos del sistema de adquisición de datos. Las señales utilizadas para el desarrollo del modelo fueron tomadas de un banco de pruebas donde se simulan diferentes condiciones de fallo. Una parte fundamental del trabajo es el procesamiento de las señales, para esto se implementa la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT). Finalmente, los resultados obtenidos con el algoritmo propuesto son comparados con las frecuencias de fallas teóricas para validar los resultados obtenidos.

Índice general

	Página
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	xii
1. Introducción	1
1.1 Antecedentes	2
1.2 Planteamiento del problema	4
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivos	6
1.5 Generadores eléctricos	7
1.5.1 Generador de Inducción Doblemente Alimentado (GIDA)	8
1.5.2 Análisis de fallas del GIDA en aerogeneradores	10
1.5.3 Fallas en rodamientos del GIDA	11
1.6 Análisis de vibraciones	13
1.6.1 Adquisición de datos y procesamiento de señales	14
1.7 Alcances y limitaciones	15
1.8 Estructura de la tesis	16
1.9 Metodología	17

2. Marco Teórico	18
2.1 Energía eólica	18
2.2 Aerogeneradores	19
2.2.1 Configuraciones de los aerogeneradores	20
2.2.2 Componentes	23
2.3 Mantenimiento en la industria eólica	31
2.3.1 Fallas en rodamientos	33
2.3.2 Monitoreo de condición	39
2.4 Análisis de vibraciones	47
2.4.1 Adquisición de señales	49
2.4.2 Procesamiento de señales	50
3. Metodología experimental para el análisis de vibraciones en el GIDA	65
3.1 Introducción	65
3.2 Diseño del sistema experimental	66
3.2.1 Banco de pruebas	67
3.2.2 Sistema de Adquisición de Datos (SAD)	67
3.3 Implementación del software desarrollado	78
3.3.1 Menú: “Adquisición de datos”	79
3.3.2 Menú: “Procesamiento de la señal”	81
3.4 Propuestas de análisis de fallas	84
3.5 Equipo de medición de vibraciones	86
4. Validación de resultados obtenidos	90
4.1 Análisis de resultados a velocidad constante	91
4.1.1 Análisis de rodamiento sano	92
4.1.2 Análisis de rodamientos con falla en la pista externa	97
4.1.3 Análisis de rodamientos con falla en la jaula	101
4.2 Análisis de resultados a velocidad variable	104
4.2.1 Análisis de rodamiento sano	105
4.2.2 Análisis de rodamiento con falla en pista externa	108

4.2.3 Norma ISO 10816	110
4.3 Análisis térmico	112
Conclusiones	113
Trabajos futuros	115
Referencias	117
Anexos	122
A. Hojas de características del banco de pruebas	123
B. Hojas de características del sensor	125
C. Hojas de características del chasis	127
D. Hojas de características de la tarjeta	130
E. Hojas de características del analizador	133
F. Manual de usuario	137

Índice de figuras

1.1. Clasificación general de los generadores eléctricos.	8
1.2. Configuración del GIDA conectado a la red eléctrica.	9
1.3. Frecuencia de fallas de cada componente del sistema de transmisión.	10
1.4. Fallas típicas en generadores eléctricos.	11
1.5. Distribución de fallas de los componentes del generador.	12
1.6. Principales elementos de un rodamiento de bolas.	13
2.1. Capacidad acumulada de energía eólica instalada.	19
2.2. Configuración del GSIP conectado a la red eléctrica.	22
2.3. Principales componentes de un aerogenerador.	23
2.4. Geometría de un rodamiento de bolas.	35
2.5. Sección transversal y lateral de un rodamiento.	36
2.6. Señales en el dominio tiempo y en el dominio de la frecuencia (espectro). . .	49
2.7. Sistema de adquisición de señales.	50
2.8. Partes básicas de un convertidor analógico-digital (A/D).	53
2.9. Muestreo periódico de una señal analógica.	54
2.10. Representación en el dominio tiempo de las principales ventanas.	62
2.11. Representación en el dominio de la frecuencia de las principales ventanas. . .	62
3.1. Banco de pruebas DAC-203.	68
3.2. Sistema de adquisición interconectado.	68
3.3. Sensor Kistler modelo 8640A5.	70
3.4. Ubicación de los sensores de vibración.	71
3.5. Puntos de medición, Norma ISO 10816.	72

3.6. Montaje de los acelerómetros utilizados.	73
3.7. Chasis NI USB 9162.	74
3.8. Tarjeta de adquisición NI 9234.	75
3.9. Ventana de presentación “MAX”.	76
3.10. Ventana principal del software “MAX”.	77
3.11. SAD conectado al banco de pruebas.	78
3.12. Ventana principal del software “Análisis de vibraciones”.	79
3.13. Ventana principal del menú “Adquisición de datos”.	80
3.14. Ventana emergente para configurar la tarjeta y acelerómetros.	81
3.15. Mensaje de “Error” durante la entrada de parámetros.	81
3.16. Menús de la ventana procesamiento de datos.	82
3.17. Ventana de procesamiento con FFT.	82
3.18. Ventana de procesamiento con STFT.	83
3.19. Rodamiento URB modelo 1621 2RS.	84
3.20. Elementos del analizador de vibraciones Fluke® 810.	87
3.21. Banco de pruebas y aditamentos utilizado en la pruebas experimentales.	89
4.1. Montaje del rodamiento sano.	92
4.2. Análisis de rodamiento sin fallas.	93
4.3. Espectro de frecuencias de un rodamiento sano, dirección vertical.	94
4.4. Espectro en baja frecuencia de un rodamiento sano, dirección vertical.	94
4.5. Espectro obtenido por el analizador de vibraciones Fluke® 810.	95
4.6. Análisis con rodamiento sano, dirección horizontal	96
4.7. Espectro de vibración a baja frecuencia de un rodamiento sano, dirección horizontal.	96
4.8. Montaje del rodamiento con falla en pista externa.	97
4.9. Análisis de falla en pista externa.	97
4.10. Señal en detalle de un rodamiento con falla en pista externa a velocidad cons- tante.	98

4.11. Espectro de frecuencias de un rodamiento con falla en la pista externa, dirección vertical.	99
4.12. Espectro en baja frecuencia de un rodamiento con falla en la pista externa, dirección vertical.	99
4.13. Espectro de vibración obtenido por el analizador de vibraciones Fluke® 810.	100
4.14. Análisis con falla en la jaula.	101
4.15. Señal en detalle de un rodamiento con falla en jaula a velocidad constante.	102
4.16. Espectro de frecuencias de un rodamiento con falla en la jaula, dirección vertical.	103
4.17. Espectro en baja frecuencia de un rodamiento con falla en la jaula, dirección vertical.	103
4.18. Espectro de vibración obtenido por el analizador de vibraciones Fluke® 810.	104
4.19. Análisis de rodamiento sano a velocidad variable.	105
4.20. Señal en detalle de un rodamiento sano a velocidad variable.	106
4.21. Análisis espectrográfico de un rodamiento sano, dirección vertical.	107
4.22. Análisis espectrográfico en detalle de un rodamiento sano, dirección vertical.	107
4.23. Análisis de rodamiento con falla en pista externa.	108
4.24. Señal en detalle de un rodamiento con falla en pista externa a velocidad variable.	109
4.25. Análisis espectrográfico de un rodamiento con falla en pista externa, dirección vertical.	110
4.26. Análisis espectrográfico en detalle de un rodamiento con falla en pista externa, dirección vertical.	110
4.27. Termómetro infrarrojo Fluke® 568 utilizado en las pruebas.	112
A.F.1. Ventana de inicio del software “Análisis de vibraciones”	138
A.F.2. Configuración de la tarjeta de adquisición en software “MAX”	139
A.F.3. Ventana principal del menú “Adquisición de datos”	140
A.F.4. Mensaje de error al ingresar parámetros fuera de rango	141
A.F.5. Parámetros de entrada previo a la adquisición.	141
A.F.6. Barra de menús de la ventana Procesamiento	143

A.F.7. Representación temporal del canal seleccionado 143

A.F.8. Representación en tiempo y frecuencia de señal adquirida 144

Índice de tablas

2.1. <i>Comparación de los tipos de mantenimiento.</i>	33
2.2. <i>Resumen de técnicas de monitoreo de condición.</i>	42
2.3. <i>Parámetros de las principales ventanas.</i>	63
3.1. <i>Opciones de montaje del sensor.</i>	74
3.2. <i>Características del rodamiento 1621 2RS URB.</i>	85
3.3. <i>Frecuencias características de falla en función de f_r.</i>	85
3.4. <i>Principales elementos del analizador de vibraciones.</i>	86
4.1. <i>Frecuencias falla en pista exterior.</i>	99
4.2. <i>Frecuencias falla de un rodamiento con jaula rota.</i>	103
4.3. <i>Severidad de vibraciones mecánicas ISO 10816.</i>	111

Capítulo 1

Introducción

La eficiencia de cualquier proceso industrial está relacionado principalmente con la capacidad que tienen los sistemas mecánicos para operar de manera correcta y, para conseguirlo, uno de los aspectos más importantes a considerar es realizar un adecuado mantenimiento. Por ello en la industria eólica, el mantenimiento de los aerogeneradores es de suma importancia ya que, por lo general, estos equipos se encuentran instalados en lugares remotos de complicado acceso lo que implica incrementos en los costos de mantenimiento, además, estos sistemas se caracterizan por operar bajo condiciones de velocidad variable del viento, lo que representa un mayor desgaste de los elementos rotativos, principalmente en los rodamientos. Para reducir las fallas consecuentes de este desgaste es trascendente la implementación de un sistema de monitoreo de condición que permita la detección y el diagnóstico de forma incipiente de las mismas para reducir los costos de mantenimiento y elevar la confiabilidad del sistema.

Como parte del monitoreo de condición, una de las técnicas más utilizada y aceptada dentro del mantenimiento predictivo para máquinas rotativas es el análisis de vibraciones. Esta técnica aprovecha el hecho de que estas máquinas vibran por naturaleza debido al movimiento rotacional del eje y de la holgura presente en sus componentes. Sin embargo, debido al deterioro del sistema, las vibraciones tienden a aumentar con el tiempo hasta llegar a fallar.

De acuerdo con este comportamiento, el monitoreo de condición permite detectar la falla e identificar el elemento dañado. El análisis propuesto en esta investigación se centra principalmente en técnicas basadas en el dominio tiempo-frecuencia que permiten analizar la información en función del tiempo y de la frecuencia presentando información directa del proceso, además de controlar y prevenir daños en los componentes del aerogenerador para disminuir las fallas inesperadas, posibles accidentes y los costos por reparaciones.

1.1 Antecedentes

El constante aumento en la generación de energía eólica requiere de una operación altamente confiable, por lo tanto, el monitoreo de condición y el diagnóstico de fallas son de vital importancia. A continuación se presenta una revisión bibliográfica de trabajos relacionados con el mantenimiento de los aerogeneradores mediante el monitoreo de condición y posteriormente sobre análisis de vibraciones en generadores eléctricos.

En [1] se presenta una revisión del estado de la técnica de monitoreo de condición en aerogeneradores, describiendo las fallas típicas por sistemas e implementando las diferentes técnicas y métodos de monitoreo de condición reportadas en la literatura. De esta revisión se concluye que para determinar la condición de cada elemento del aerogenerador existen diferentes técnicas y modelos matemáticos que pueden ser aplicados. Sin embargo, los obstáculos más importantes que se presentan en estas técnicas son: selección del número y tipo de sensores; selección de métodos de procesamiento de señales efectivos asociados con los sensores seleccionados; y diseño de un modelo combinado eficaz, es decir, la combinación de sensores y métodos de procesamiento de señales que proporcionan un rendimiento mejorado.

Por otra parte, en [2] se hace una revisión sobre las tendencias de las técnicas de diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas, donde el monitoreo de condición se logra confiando en variables eléctricas o mecánicas de fácil medición tales como voltaje, corriente, campo magnético externo, velocidad y vibraciones. Las primeras técnicas han sido aplicadas en estado estable

en accionamientos de máquinas eléctricas utilizando la FFT para localizar los componentes de frecuencia asociados a diferentes fallas. Esta técnica convencional se sigue utilizando como primer enfoque el diagnóstico, pero las condiciones reales de las aplicaciones industriales son tales que no puede ser el único soporte para el desarrollo de dichas herramientas.

Un aspecto muy importante en el monitoreo de condición es el costo de los equipos implementados en el sistema, principalmente los sensores, por ello en [3] se realiza una revisión de fallas por medio del monitoreo de condición en los aerogeneradores llegando a la conclusión de que el principal problema de estos sistemas son la instalación de numerosos sensores en el aerogenerador, lo que hace que el sistema de control sea complejo y costoso. Se debe considerar que las fallas de sensores representan aproximadamente el 14 % de las fallas totales de los aerogeneradores. En el futuro, se espera que, mediante el uso de sensores de voltaje, corriente y flujo de dispersión en la etapa de generación, se reduzca el número de sensores para la detección de fallas mecánicas y eléctricas en los aerogeneradores.

En [4] se presenta el desarrollo de un sistema para el monitoreo y detección de fallas en máquinas rotativas por medio del análisis de las secuencias sonoras que éstos generan, utilizando algoritmos como la FFT bajo la interfaz gráfica de un software desarrollado en el lenguaje de programación de propósito general Delphi. Aseguran que el sistema de adquisición de datos mediante la percepción de ondas sonoras resulta un buen método, y presenta una buena alternativa para este tipo de análisis y un bajo costo en cuanto a los sensores.

En [5] se aborda el diagnóstico de fallas, específicamente la detección de fallas en los rodamientos de las máquinas síncronas de imanes permanentes, para eso emplean estrategias basadas en seguimiento de orden (OT, por sus siglas en inglés Order Tracking). Los resultados obtenidos mostraron que la técnica de re-muestreo permite identificar correctamente las componentes en el espectro de las vibraciones debidas a la falla puntual aún cuando la velocidad de operación del generador no es constante.

Por otra parte, en [6] revisan las técnicas de análisis de vibraciones y describe sus capacidades, ventajas y desventajas en el monitoreo de condición de los rodamientos de bolas en máquinas rotativas. Entre las técnicas analizadas están la Transformada Rápida de Fourier (FFT), la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT), la Distribución Wigner-Ville (WVD), la Transformada de Hilbert (HT) y la Transformada Wavelet (WT), resaltando que para detectar fallas en los rodamientos es posible mediante la STFT. Sin embargo, el problema con la STFT es que proporciona una resolución constante para todas las frecuencias, ya que utiliza la misma ventana para toda la señal.

Debido al rápido crecimiento de la industria eólica, la tecnología también se ve forzada a mejorar y a madurar en este sector, principalmente las relacionadas con el mantenimiento y operación de los parques eólicos. Es por eso que las técnicas de monitoreo de condición son mejoradas constantemente para optimizar las actividades de mantenimiento reduciendo los tiempos de inactividad de los equipos y maximizando la producción. Sin embargo, la cuantificación de la gravedad de la falla bajo condiciones variables en el tiempo y una evaluación del tiempo que conduce a la ocurrencia de un fallo total sigue siendo un problema abierto de investigación.

1.2 Planteamiento del problema

En la industria de la energía eólica garantizar el continuo funcionamiento de los aerogeneradores es de vital importancia, por ello es necesario contar con técnicas de mantenimiento predictivo que permitan detectar y diagnosticar fallas mecánicas y eléctricas de manera incipiente para conservar la operación del aerogenerador. En el caso de los aerogeneradores basados en un Generador de Inducción Doblemente Alimentado (GIDA) la tasa de fallas más alta se presenta en los rodamientos [7]. Para este tipo de fallas se han desarrollado diferentes técnicas y metodologías para detectarlas y diagnosticarlas de manera prematura. Sin embargo, la mayoría de estas herramientas son relativamente costosas por el uso de sofisticados sensores y técnicas para el procesamiento de las señales de vibración.

De acuerdo con la literatura consultada, existen pocos trabajos que empleen perfiles de velocidad y carga variable, ya que estos tienen la particularidad de contener un alto nivel de ruido y como consecuencia se oculta información relevante para el diagnóstico, lo que hace imposible aplicar las técnicas convencionales en el procesamiento de las señales vibratorias. Además, el monitoreo de condición presenta obstáculos importantes en estas técnicas como son: selección del número y tipo de sensores, selección del método de procesamiento de señal y diseño de un modelo combinado eficaz, es decir, la combinación de sensores y métodos de procesamiento de señales que proporcionan un mejor rendimiento.

Por ello es necesario la implementación de nuevas técnicas o modelos capaces de diagnosticar las condiciones de operación de un aerogenerador de baja potencia y que además, estos sistemas sean de arquitectura abierta para revisar la programación empleada y utilizarlos con fines académicos en materias relacionadas con el mantenimiento y procesamiento de señales de programas de estudio afines.

1.3 Justificación

La generación de energía eólica actualmente está en constante crecimiento y como consecuencia, los aerogeneradores están en continuo desarrollo requiriendo mayores exigencias de operación. Por lo tanto, es de gran importancia mantenerlos en buen estado durante su funcionamiento a partir de la temprana detección y diagnóstico de fallas que permita minimizar el tiempo de paro y el costo del mantenimiento para lograr maximizar la producción.

Sin embargo, debido a las condiciones variables de operación de los GIDA's empleados en los aerogeneradores, estos presentan demasiadas fallas que exigen detener la máquina, y encontrar la causa raíz de estos es un trabajo complicado cuando no se cuenta con las herramientas necesarias. Por tal razón, el monitoreo de condición como parte del mantenimiento predictivo permite detectar anomalías de manera anticipada al fallo mediante el seguimiento de parámetros para posteriormente suspender la operación de la máquina. Una de las técnicas

más utilizadas en el monitoreo de condición es el análisis de las vibraciones debido a su bajo costo comparado con otras técnicas y la posibilidad de efectuarlo sin necesidad de detener el aerogenerador ofreciendo un diagnóstico detallado de fallas en máquinas rotativas.

En este proyecto de tesis se presenta el desarrollo de un algoritmo computacional para la detección de fallas en GIDA's a través del análisis de vibraciones utilizando la Transformada de Fourier de Tiempo Corto en la plataforma de MATLAB/Simulink.

1.4 Objetivos

General

Desarrollar un algoritmo capaz de detectar y diagnosticar fallas de forma anticipada en los rodamientos de un Generador de Inducción Doblemente Alimentado (GIDA) mediante el análisis de vibraciones en la plataforma MATLAB/Simulink como parte del mantenimiento predictivo en aerogeneradores de baja potencia.

Particulares

- Realizar un estudio teórico de las fallas mecánicas y eléctricas más comunes en un GIDA y su comportamiento en condiciones de operación anormal.
- Determinar las frecuencias de fallas de los principales elementos de los rodamientos del GIDA a partir de sus parámetros fundamentales a diferentes frecuencias de giro.
- Diseñar el sistema de adquisición de datos y obtener las señales de vibración de los rodamientos del GIDA con y sin fallas.
- Codificar la interfaz gráfica GUIDE del algoritmo en la plataforma MATLAB/Simulink.
- Explorar y reconocer las características y principio de funcionamiento del banco de pruebas.

- Realizar un análisis de las señales vibratorias utilizando la Transformada de Fourier de Tiempo Corto.
- Validar los resultados obtenidos por el software desarrollado con los resultados experimentales obtenidos en el banco de pruebas del Instituto de Ingeniería y Tecnología (IIT) de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez (UACJ).
- Elaborar un manual de usuario del software.

1.5 Generadores eléctricos

Una máquina eléctrica es un dispositivo que puede convertir energía mecánica en energía eléctrica o energía eléctrica en energía mecánica. Cuando este dispositivo se utiliza para convertir energía mecánica en eléctrica se denomina generador cuya conversión de energía se lleva a cabo a través de la acción de campos magnéticos [8].

El generador eléctrico es el elemento central del sistema eléctrico de los aerogeneradores y el componente a partir del cual se dimensionan los elementos restantes, así como el sistema de control y supervisión. Si bien en principio no hay ninguna restricción para el tipo de generador, se eligen casi exclusivamente máquinas de corriente alterna (CA) no sólo por su relación potencia/peso sino por su capacidad de generar a voltajes más elevados y, sobre todo, porque al no tener colector, presentan menor costo de mantenimiento y mayor disponibilidad que los generadores de corriente directa (CD) [9]. Dentro de los generadores de CA existen dos clases principales: los síncronos y los asíncronos. Los generadores síncronos son aquellos cuya corriente de campo magnético la suministra una fuente de potencia de CA externa, mientras que en los asíncronos la corriente de campo magnético se suministra a sus devanados de campo por medio de inducción magnética (acción transformadora) [8]. En la Figura 1.1 se muestra la clasificación general de los generadores eléctricos, el cual incluye a los dos tipos de generadores más populares en la industria eólica, el Generador Síncrono de Imanes Permanentes (GSIP) y el Generador de Inducción Doblemente Alimentado (GIDA).

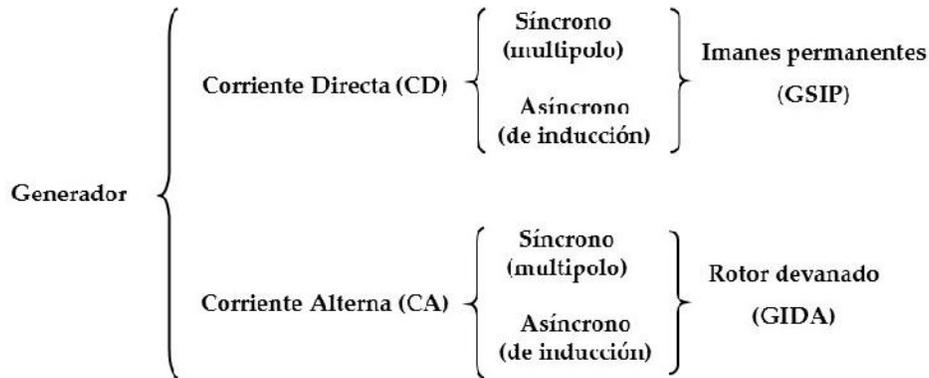


Figura 1.1. Clasificación general de los generadores eléctricos.

Fuente: [10]

1.5.1 Generador de Inducción Doblemente Alimentado (GIDA)

La energía eólica es la fuente renovable que tiene el desarrollo más exitoso en las últimas dos décadas, sin embargo aún presenta diferentes desafíos. Uno de los principales problemas es la variación de la velocidad del viento que puede causar fluctuaciones indeseables en la frecuencia del voltaje de salida. Sin embargo, los generadores de inducción pueden trabajar con entrada de velocidad variable manteniendo la frecuencia de la red constante, y así utilizar de manera eficiente el recurso eólico [11]. El generador de inducción ha sido ampliamente utilizado para aplicaciones eólicas debido a su robustez y simplicidad de funcionamiento que se traduce en pocas tareas de mantenimiento [8].

Los aerogeneradores con GIDA's son la configuración más popular en el sector de la energía eólica y ocupa aproximadamente el 65 % de los aerogeneradores instalados [12]. En la Figura 1.2, se muestra la configuración de un aerogenerador de velocidad variable basado en un GIDA. El rotor eólico está acoplado al eje del generador mediante una caja multiplicadora. El devanado del estator del GIDA está conectado directamente a la red y los devanados del rotor están conectados a la red a través de un convertidor electrónico de potencia parcial por medio de anillos deslizantes. Los GIDA's pueden funcionar a velocidades sub-síncronas y super-síncronas. Si está funcionando a velocidad sub-síncrona, la energía fluye de la red al circuito del rotor, mientras que cuando funciona de forma super-síncrona puede generar

energía del rotor y del estator [13].

De acuerdo con [9, 12, 14, 15] las principales ventajas del GIDA son las siguientes:

- La capacidad de los convertidores electrónicos de potencia para controlar la potencia reactiva (absorción o generación).

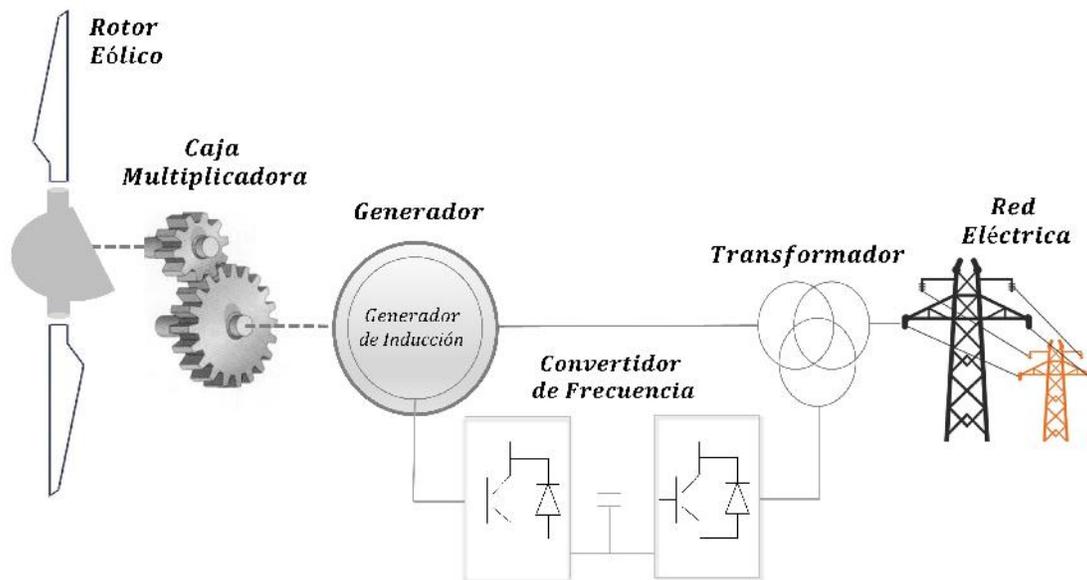


Figura 1.2. Configuración del GIDA conectado a la red eléctrica.

- Los convertidores sólo tienen que manejar una pequeña cantidad (20-30 %) de la potencia total, por lo tanto, se generan menores pérdidas en el circuito electrónico.
- Este tipo de configuración permite la máxima extracción de energía cinética del viento mediante la optimización de la turbina para bajas velocidades de viento, mientras que durante las altas velocidades del viento se reducen las tensiones mecánicas.
- El rango de la velocidad de operación puede llegar hasta el 60 %.
- Existe un mejor control del factor de potencia.
- Mejora la eficiencia del sistema.

- Un GIDA es generalmente simple en construcción y más barato que un Generador Síncrono de Imanes Permanentes (GSIP).

Los inconvenientes del GIDA incluyen la necesidad de esquemas de control complejos, anillos deslizantes y caja multiplicadora las cuales requieren mantenimiento frecuente.

1.5.2 Análisis de fallas del GIDA en aerogeneradores

Como cualquier nueva industria, hay curvas de aprendizaje en casi todos los aspectos, pero la industria eólica está en proceso de maduración y los componentes del aerogenerador aún están expuestos a sufrir fallas durante su vida útil. La Figura 1.3 muestra la frecuencia de falla de cada uno de los componentes del sistema de accionamiento de este aerogenerador. Se observa que las fallas en el sistema electrónico de control es el que presenta mayor índice de fallas seguida de las fallas del rotor. La caja multiplicadora y el generador eléctrico presentan una tasa de fallas menor, sin embargo, son más críticas porque se requiere de mayor tiempo para su mantenimiento.

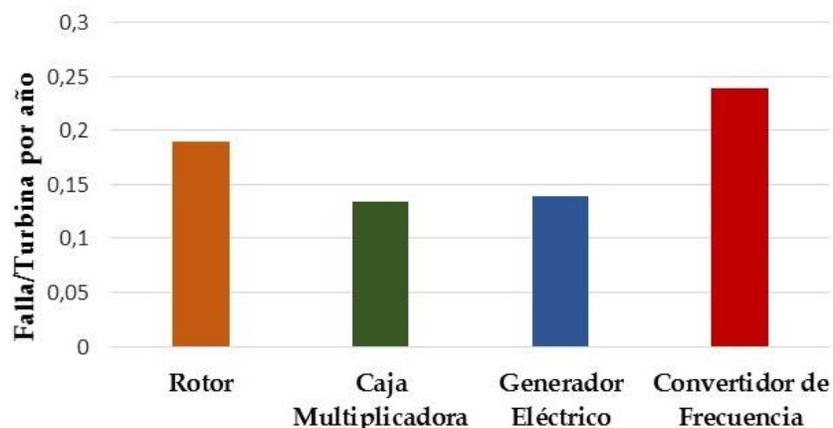


Figura 1.3. Frecuencia de fallas de cada componente del sistema de transmisión.

Fuente: [7, 16].

De las fallas en el generador, muchas fuentes demuestran que las fallas en los rodamientos y la ruptura del aislamiento del estator causan la mayoría de las fallas en este tipo de máquinas.

Para las máquinas de inducción pequeñas, el desgaste del aislamiento del devanado del estator es una de las principales causas de fallas [7, 17, 18, 19].

Dentro de las fallas más comunes en los GIDA's se encuentran: fallas magnéticas del rotor (desmagnetización), fallas mecánicas del rotor (daños en los rodamientos, excentricidad, eje doblado, desalineación) y fallas de uno o más componentes en la electrónica de potencia del sistema [2]. La Figura 1.4 muestra las fallas típicas presentes en el generador eléctrico.



Figura 1.4. Fallas típicas en generadores eléctricos.

Fuente: [5, 20, 21]

1.5.3 Fallas en rodamientos del GIDA

Los rodamientos tipo bola son los elementos mecánicos más utilizados en los equipos rotativos dentro de la industria y deben tener alta precisión tanto en su manufactura como en su montaje. La precisión de movimiento de los dispositivos mecánicos y eléctricos depende de la exactitud y precisión del rodamiento. La superficie dañada en un rodamiento se origina a partir de un defecto del mismo y, generará vibración y ruido siempre que los componentes defectuosos entren en contacto durante la rotación del sistema, esto conducirá a la reducción de la eficiencia de la máquina y también a la posibilidad de que la máquina pueda fallar antes de llegar a su vida útil. De acuerdo con la Figura 1.5, las fallas con mayor frecuencia que se presentan en los subcomponentes del generador desde el punto de vista de monitoreo de

condición son los rodamientos del extremo de accionamiento y del extremo libre (delantero y trasero). Los dos rodamientos pueden sufrir fallos en cada uno de sus elementos (ver Figura 1.6), o presentar modos de fallo relacionados con la dinámica del rotor, por ejemplo holgura mecánica, desbalanceo y desalineación [12].

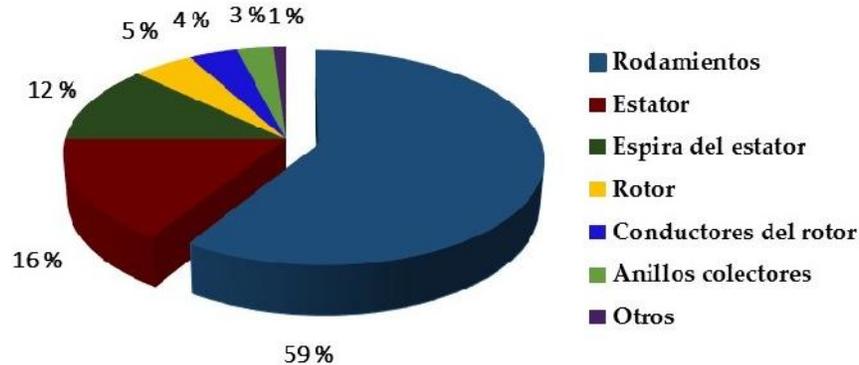


Figura 1.5. Distribución de fallos de los componentes del generador.

Fuente:[16]

Las fallas que se presentan en los rodamientos pueden clasificarse atendiendo el tamaño relativo de la superficie afectada en dos grandes grupos: las fallas generalizadas y las fallas puntuales. El primer grupo se caracteriza porque la zona dañada se extiende sobre una porción considerable del componente afectado del rodamiento, ya sean las pistas o los elementos rodantes. En general este tipo de falla es consecuencia del desgaste normal o en ocasiones se debe a la circulación de altas corrientes a través del rodamiento. Normalmente este último caso se presenta en motores excitados mediante accionamientos de velocidad variable. Por otra parte, las fallas de tipo puntual afectan entornos pequeños de la superficie de rodadura y se originan principalmente por la concentración de esfuerzos internos del rodamiento.

Para aumentar la disponibilidad de los GIDA's es necesario detectar y diagnosticar las fallas en estado incipiente, debido a esto en la industria eólica ha sido implementado el monitoreo de condición del sistema como parte del mantenimiento predictivo obteniendo grandes resultados. Para el caso particular de los rodamientos el parámetro a monitorear más utilizado ha sido las vibraciones, ya que éste presenta mayor información sobre la intensidad y localización de las fallas.

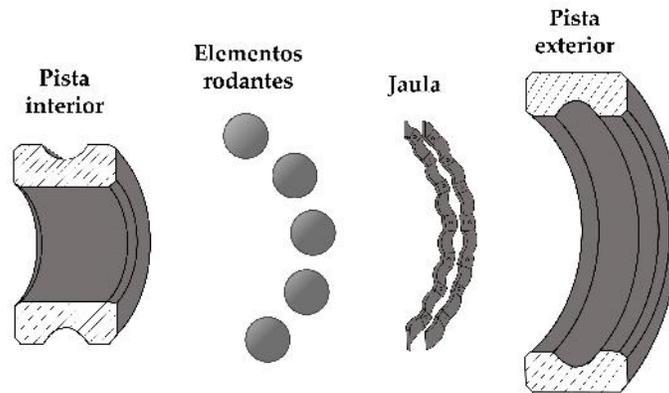


Figura 1.6. Principales elementos de un rodamiento de bolas.

1.6 Análisis de vibraciones

El monitoreo de condición (MC) es la estrategia de mantenimiento más utilizada en la industria eólica para la detección temprana de fallas minimizando el tiempo de inactividad y maximizando la productividad.

Los sistemas de monitoreo de condición comprenden combinaciones de sensores y equipos de procesamiento de señal que proporcionan información continua sobre la condición del componente utilizando técnicas tales como análisis de vibraciones, emisión acústica, análisis de aceite, medición de deformaciones, termografía, entre otros. Este método es muy utilizado en los aerogeneradores con la finalidad de supervisar el estado de sus principales componentes operativos como las palas, la caja multiplicadora, el generador, los rodamientos principales y la torre. La supervisión puede ser en línea (proporcionando una retroalimentación instantánea de la condición) o fuera de línea (los datos se recogen a intervalos regulares de tiempo utilizando sistemas de medición que no están integrados con el equipo).

El análisis de vibraciones mecánicas es la estrategia más utilizada para detectar fallas en aerogeneradores, especialmente para equipos rotatorios. Para esto se requieren de diferentes sensores para cada rango de frecuencia, como son: transductores de posición para bajas frecuencias, sensores de velocidad en el área de media frecuencia, acelerómetros en alta frecuencia y espectro de los sensores de energía emitida para muy altas frecuencias. En cuanto a las aplicaciones, es apropiado para monitorear la caja multiplicadora y los rodamientos [1].

En particular, el análisis espectral de la aceleración o la velocidad de vibración ha sido empleado para la detección de fallas de tipo puntual. En el espectro de frecuencias de las vibraciones, este tipo de falla se manifiesta por la aparición de componentes a una frecuencia definida y característica de cada elemento del rodamiento (ver Figura 1.6). Dicha frecuencia depende de la geometría del rodamiento y de la velocidad relativa entre la falla y los elementos rodantes [5].

1.6.1 Adquisición de datos y procesamiento de señales

La adquisición de datos implica la medición de las variables requeridas (por ejemplo, corriente, voltaje, temperatura, velocidad) convirtiéndolas en señales electrónicas. Hacerlo de manera efectiva implicará una correcta elección y colocación del tipo y número de sensores adecuados; el acondicionamiento (realizar operaciones básicas incluyendo amplificación, filtrado, linealización y finalmente modulación/demodulación) puede ser necesario para reducir la susceptibilidad de las señales a la interferencia. Las técnicas de optimización pueden emplearse entonces en el procesamiento de las señales por un procesador de señal digital (DSP), implicando no sólo el propio procesamiento, sino también la clasificación y manipulación según sea necesario. La adquisición de datos lo realiza un sistema informático particular que permite el control local y remoto de las funciones de un aerogenerador y la recopilación de datos del parque eólico, todo esto para garantizar un funcionamiento eficiente [2].

Existen diversas técnicas para el procesamiento de señales, entre las más utilizadas en los sistemas eólicos se encuentran:

- La Transformada Rápida de Fourier (FFT), se utiliza para la conversión de una señal digital del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, aplicada principalmente en el monitoreo de los elementos de los rodamientos ya que generan vibraciones a frecuencias específicas (frecuencias de falla) y en la caja multiplicadora.
- El Análisis de Orden (Orden Tracking), se utiliza cuando se requiere un algoritmo

basado en ángulos de rotación, particularmente adecuado para desbalances de rotor y asimetrías aerodinámicas.

- La Transformada Wavelet es una técnica en el dominio tiempo-frecuencia similar a la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT, siglas en inglés), pero más apropiada para señales transitorias, aplicándose en aerogeneradores con el fin de monitorear el nivel de vibración causado por desalineación, rodamientos entre otras fallas.

Independientemente de la técnica utilizada, la capacidad de un sistema de monitoreo de condición depende de dos elementos básicos: el número y el tipo de sensores y los métodos asociados de procesamiento y simplificación de señales utilizados para extraer información importante de las diversas señales.

1.7 Alcances y limitaciones

Dentro de los alcances de la futura tesis es desarrollar un algoritmo computacional bajo la plataforma MATLAB/Simulink donde por medio de una interface mostrará el espectro de frecuencias de las vibraciones de los rodamientos que previamente fueron adquiridos. Como datos de entrada se necesitarán datos técnicos del GIDA, de los rodamientos, la velocidad de giro, entre otras. Como dato de salida será el espectro de frecuencias de los datos adquiridos y la comparación de éste con el de un rodamiento sano (espectro de referencia) para determinar su estado.

Una posible limitación para el desarrollo de este trabajo es el tiempo de espera para que el banco de pruebas que previamente fue solicitado llegue a las instalaciones de la Universidad del Istmo para realizar las pruebas necesarias. Sin embargo, se tiene la oportunidad de utilizar el banco de pruebas con el que el Instituto Tecnológico de Salina Cruz (ITSAL) cuenta en sus instalaciones.

1.8 Estructura de la tesis

Este proyecto de tesis estará estructurado de 5 capítulos que describen el desarrollo del software para el análisis de vibraciones, los cuales se presentan a continuación.

En el capítulo 1, se presentan las razones por las que se aborda el tema, los antecedentes presentes en la literatura. Además, se especifican los objetivos, las aportaciones al término del proyecto y los alcances del proyecto.

En el capítulo 2, se describen los fundamentos teóricos necesarios para la realización de la tesis, desde los conceptos básicos sobre la energía eólica y el mantenimiento de aerogeneradores hasta las herramientas matemáticas utilizadas para la transformación y análisis de las señales del dominio de tiempo al dominio de la frecuencia.

En el capítulo 3, se presenta el desarrollo de la programación del software. Además, se describe detalladamente los aditamentos del banco de pruebas utilizado, el sistema de adquisición y la metodología experimental empleada para alcanzar los objetivos planteados.

En el capítulo 4, se presentan y analizan los resultados obtenidos con el software propuesto. Además, se describen los ensayo con cada elemento dañado de los rodamientos del GIDA y se comparan con las frecuencias de fallas teóricas. Para cada caso de falla, se describen los parámetros utilizados en las pruebas experimentales realizadas en el laboratorio.

En el capítulo 5, a partir de los resultados obtenidos se exponen las conclusiones y los trabajos futuros que se generan a partir de esta.

1.9 Metodología

La metodología general para la detección y diagnóstico de fallas en los principales elementos de los rodamientos de un GIDA de baja potencia se detalla a continuación.

1. Como primera etapa de este trabajo es realizar una investigación bibliográfica exhaustiva sobre las fallas típicas de un GIDA, principalmente en los elementos de los rodamientos, así como el comportamiento dinámico de la máquina bajo la presencia de estas. Además, modelar matemáticamente las fallas de mayor incidencia para determinar las frecuencias teóricas de falla. Por último, revisar el estado del arte sobre las metodologías, técnicas y herramientas utilizadas en el procesamiento y análisis de vibraciones.
2. A continuación se desarrolla el algoritmo computacional (código e interface) en la plataforma MATLAB/Simulink capaz de analizar y procesar señales vibratorias para obtener los parámetros indicadores de fallas mecánicas en un GIDA. La extracción de estos parámetros consiste en una transformación matemática de las señales para conseguir información útil sobre el estado de los componentes.
3. En seguida, a partir de las características del banco de pruebas con el que se cuenta, se diseña la metodología experimental que permita una adquisición de datos representativa de cada una de las condiciones de falla. Entre los aspectos más importantes se encuentran: la selección y ubicación de los sensores, además de establecer los parámetros para muestrear la señal de vibración.
4. Por último, para validar el algoritmo, se comparan las frecuencias presentes en el espectro de vibración obtenidos con la aplicación del software en el banco de pruebas bajo diferentes condiciones de fallas en los elementos de los rodamientos con las frecuencias de falla (estudio teórico) y con los resultados del analizador de vibraciones comercial de la marca Fluke 810 para analizar la relación del espectro de frecuencias con la presencia de fallas.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Energía eólica

Las energías renovables y la mejora de la eficiencia de los sistemas de conversión se han convertido en una prioridad mundial para garantizar el suministro de energía y abordar los desafíos del cambio climático, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la protección de la biodiversidad y el desarrollo de tecnología renovable [22]. Entre todas las fuentes de energía renovable, la energía eólica es el sector de más rápido crecimiento en términos de capacidad instalada y con una tecnología de aprovechamiento casi madura [9]. La generación de energía eólica ha crecido en todo el mundo [3], y de acuerdo con las estadísticas del Consejo Global de Energía Eólica (GWEC, por sus siglas en inglés), la capacidad acumulada de energía eólica instalada alcanzó 487 GW en el 2016 como se observa en la Figura 2.10.

El desarrollo de los parques eólicos para la producción de energía eléctrica, ha dado el paso definitivo hacia su integración en la estructura energética global en aquellas zonas con abundante recurso eólico. Durante la transición de los primeros aerogeneradores a los modernos, los sistemas de conversión de energía eólica se han presentado en diversos tamaños, formas y diseños, para adaptarse a las aplicaciones para los que están diseñados [23].

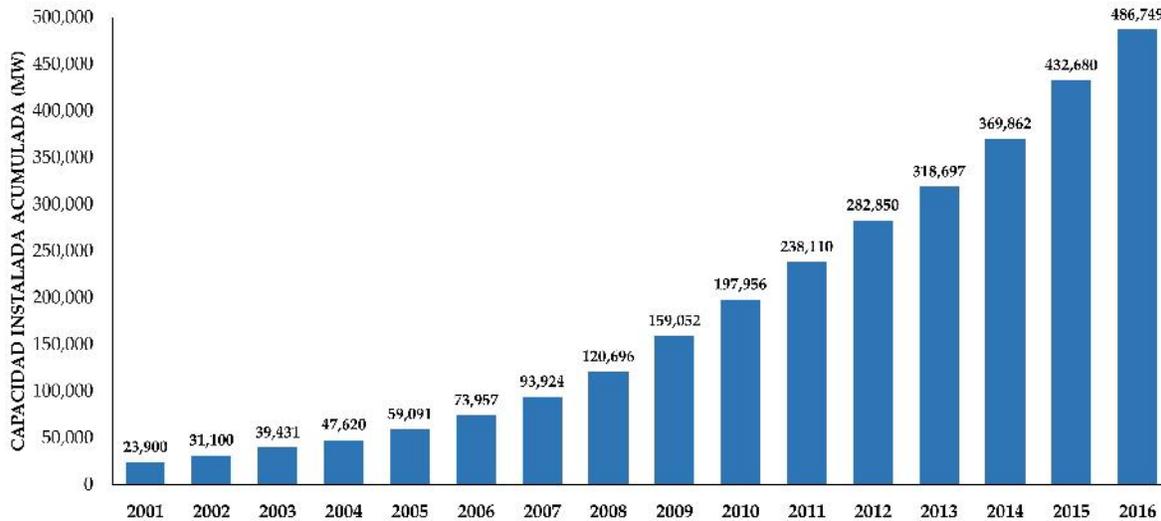


Figura 2.1. Capacidad acumulada de energía eólica instalada.

Fuente: [25]

Sin embargo, este rápido crecimiento en los últimos años también ha traído consigo algunas fallas en los diferentes componentes del aerogenerador que impiden el buen funcionamiento del mismo. Por otra parte, la reducción de los costos de inspección y mantenimiento se han vuelto cada vez más importantes a medida que el tamaño y el número de aerogeneradores instalados ha aumentado. Es sabido que algunos de los componentes del aerogenerador fallan antes de lo esperado y, debido a que el tiempo de inactividad no es programado este puede ser costoso. Por lo tanto, es importante detectar las fallas de manera incipiente para minimizar el tiempo de inactividad y maximizar la productividad [24].

2.2 Aerogeneradores

La transformación de energía eólica a energía eléctrica es por medio de un aerogenerador que es accionado por la fuerza del viento y que se interconecta a la red eléctrica o a sistemas aislados. Los aerogeneradores son sistemas electromecánicos complejos que extraen energía cinética del aire y la convierten en energía eléctrica [3]. La mayoría de los aerogeneradores son unidades de tres palas. Impulsados por el viento, las palas y el rotor transmiten energía a través del eje principal al generador eléctrico mediante la caja multiplicadora, siendo la

velocidad del generador la más cercana a la velocidad óptima para la generación de electricidad [24]. Al aumentar la cantidad de aerogeneradores instalados, se obliga al sector de energía eólica a ser una fuente confiable de energía. Por supuesto, la obtención de una potencia confiable de los aerogeneradores que están sujetos a muchos tipos de fallas, conduce a la necesidad de sistemas de monitoreo de condición de alto rendimiento [3].

Por lo tanto, antes de establecer el monitoreo de condición y los métodos de diagnóstico de fallas en aerogeneradores, se deben analizar los diferentes tipos de fallas, así como sus efectos durante el tiempo de inactividad.

2.2.1 Configuraciones de los aerogeneradores

En los aerogeneradores modernos, el generador eléctrico debe operar con fluctuaciones de potencia de acuerdo con las variaciones de la velocidad del viento. Esta característica hace diferente este componente a los utilizados en los sistemas convencionales de conversión de energía, en los que normalmente mantienen constante la potencia de salida por largos periodos de tiempo. Entre los generadores más empleados en los parques eólicos están los generadores asíncronos y síncronos.

Es posible realizar diferentes configuraciones de aerogeneradores que operen a velocidad fija o variable. Utilizar un generador que trabaja a velocidad variable provee de manera efectiva mayor captura de energía contra uno que trabaja a velocidad fija. En la industria eólica existen cuatro configuraciones predominantes implementadas en los aerogeneradores. A continuación, se presentarán las características principales de las dos configuraciones más utilizadas en la actualidad.

Aerogenerador basado en un Generador de Inducción Doblemente Alimentado (GIDA)

El GIDA mostrado en la Figura 1.2, consta de un generador asíncrono de rotor devanado, que se conecta a un convertidor de frecuencia permitiendo la conexión de la máquina y la red eléctrica. Esta configuración permite una generación a voltaje y frecuencia constante para un rango promedio de $\pm 30\%$ con respecto a la velocidad de sincronismo.

En este esquema, las terminales del estator se conectan directamente a la red, y el rotor se conecta mediante un convertidor de frecuencia a las líneas de la red. El flujo de energía en el convertidor es bidireccional, en el modo subsíncrono la energía fluye hacia el rotor, y en el modo supersíncrono la energía fluye desde el rotor hacia la red. Puesto que el convertidor solo maneja cerca del 30% de la potencia nominal, el tamaño también se aproxima a un tercio de uno de potencia completa y por lo tanto su costo también menor, ésta es la principal ventaja del sistema basado en el GIDA. Esta configuración es la más utilizada actualmente, permite un máximo aprovechamiento del recurso eólico con un mínimo efecto producido por variaciones de la velocidad del viento.

Aerogenerador basado en un Generador Síncrono de Imanes Permanentes (GSIP)

Existen dos variantes principales. La primera, generadores síncronos con un bajo número de polos y caja multiplicadora; la segunda, generadores síncronos multipolo sin caja multiplicadora. La segunda opción se ha difundido ampliamente, debido a sus menores requerimientos de mantenimiento mecánico. En estos generadores se requiere un convertidor de frecuencia como interfaz de conexión a red, mediante el cual además de controlar la potencia, se puede controlar el factor de potencia. Adicionalmente, este tipo de generador, requiere de una excitación de corriente directa en el rotor que se puede lograr de dos maneras: mediante un circuito externo que se alimenta del estator, su ventaja es que dicho circuito puede contribuir a la regulación del factor de potencia. Sin embargo, el consumo de potencia para su operación reduce la eficiencia del sistema; la otra forma de excitación es mediante el uso de imanes permanentes en el rotor, con esto se reducen las pérdidas. Sin embargo, se requieren materiales

magnéticos de alta densidad de flujo, que por lo general son de alto costo. Adicionalmente, el uso de imanes incrementa el tamaño del generador entre 20-40 %.

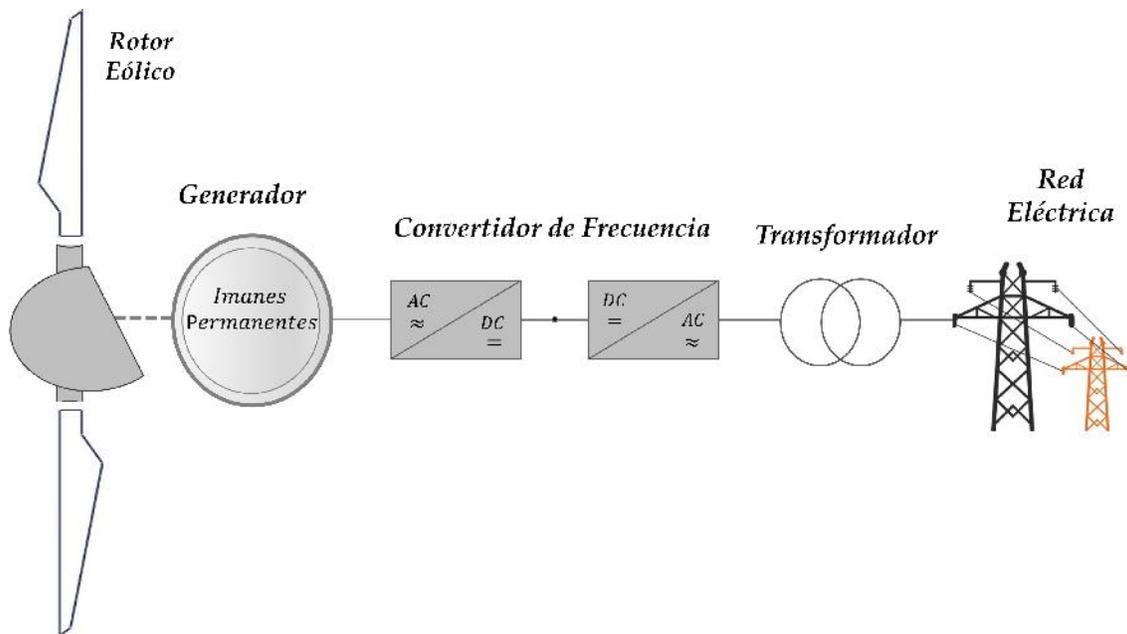


Figura 2.2. Configuración del GSIP conectado a la red eléctrica.

La Figura 2.2 muestra la configuración de un generador de imán permanente, cuya entrada mecánica es directamente el eje de las palas, es decir, no utiliza caja multiplicadora. El diseño básico de esta configuración está caracterizado por devanados en el estator con cables de alto voltaje y con campo magnético permanente en el rotor, acoplamiento directo entre el rotor del generador y el rotor eólico sin caja multiplicadora y un sistema de colectores de corriente continua [14].

Los GSIP's son actualmente una buena opción para la industria eólica, debido al importante desarrollo en los últimos años de las aleaciones de alto magnetismo remanente. La utilización de imanes permanentes presenta como ventaja, la eliminación de los anillos rozantes y elimina las pérdidas en el devanado del rotor, por lo tanto, no es necesario refrigerar estos devanados [26].

Otra gran ventaja de estas máquinas es la reducción significativa en el tamaño de las mismas, lo que posibilita hacer máquinas con un mayor número de polos, a su vez esto significa eliminar la caja multiplicadora.

2.2.2 Componentes

La eficiencia y la practicidad de los aerogeneradores de eje horizontal tripala han resultado en el dominio del mercado y, en casi todas las nuevas instalaciones de parques eólicos, este es el único tipo que se emplea para la generación de energía [27].

Un aerogenerador consiste principalmente en una torre, una góndola y un rotor (un buje y tres palas). Como se observa en la Figura 2.3 las palas están conectadas a un eje central que gira con ellas, formando el conjunto llamado rotor que está mecánicamente aislado del resto del aerogenerador que no gira con el viento. El eje principal se encuentra dentro de la góndola junto con la caja multiplicadora, el generador y todos los demás componentes necesarios, como intercambiadores de calor, refrigeradores y calentadores, otros motores y engranajes, etc.[27].

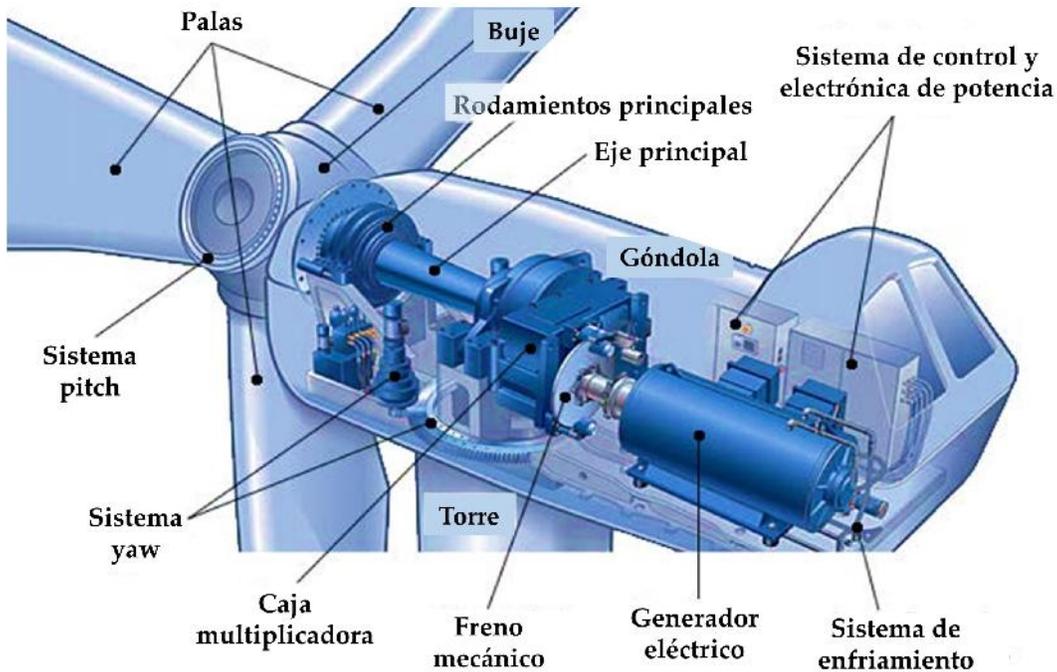


Figura 2.3. Principales componentes de un aerogenerador.

Fuente: [28]

Rotor eólico

El rotor eólico es la parte más importante y prominente de un aerogenerador, este recibe la energía cinética del viento y la transforma en potencia mecánica. Los componentes del rotor de un aerogenerador son las palas, el buje, eje, rodamientos y otras partes internas [23].

Desde el punto de vista de diseño y fabricación, cada uno de estos componentes se puede considerar como elementos independientes. Sin embargo, cuando se estudia su funcionamiento, es muy adecuado incluirlos, como parte del rotor eólico o bien como componentes del tren de potencia [9].

Las palas se fabrican con una variedad de materiales que van desde madera hasta compuestos de carbono. El uso de madera y metal está limitado a unidades de pequeña escala. La mayoría de los sistemas comerciales a gran escala están hechos con láminas de fibra de vidrio de varias capas [23].

Góndola

La parte intermedia entre el rotor y la torre es la góndola. La góndola no gira con el rotor, pero debe girar con respecto a la torre. Este movimiento giratorio, es necesario para dirigir el aerogenerador a la corriente del viento, ya que la dirección predominante del viento no permanece fija.

El eje de salida del rotor eólico va dentro de la góndola. El eje transfiere la energía mecánica a un generador, para transformarlo en energía eléctrica. En la mayoría de los aerogeneradores, esta transferencia no es directa y existe una caja multiplicadora entre el eje principal (salida del rotor) y el eje de alta velocidad. La góndola tiene los siguientes propósitos [27]:

1. Alberga la caja multiplicadora, generador eléctrico, enfriadores y calentadores para el aceite de caja multiplicadora, sistema de frenado, motores y engranajes para el sistema de orientación, los sistemas de dirección de viento y medición de velocidad, el trans-

formador para suministro de energía del aerogenerador y otros equipos basados en el diseño del mismo.

2. Permite la orientación del aerogenerador a la dirección del viento.
3. Proporciona contrapeso para el peso de las palas y el buje.

Sistema de transmisión

El sistema mecánico de transmisión o tren de potencia lo constituyen todos los elementos y componentes del aerogenerador que transmitan par mecánico al eje de giro. Según esta definición, el sistema mecánico de transmisión, en un aerogenerador de eje horizontal, lo componen al menos el rotor eólico y el generador eléctrico. En la mayoría de los diseños, la velocidad de giro del aerogenerador no corresponde a la velocidad de giro del generador, por lo tanto, es necesario incluir una caja multiplicadora. El cuerpo de baja velocidad de este elemento se acopla al rotor eólico a través del eje primario o eje lento y el cuerpo de alta velocidad al generador eléctrico mediante el eje secundario o eje rápido. Además, en el tren de potencia se incluyen los apoyos del sistema de giro con la estructura de la góndola y el freno mecánico, cuya función es bloquear el rotor en operaciones de mantenimiento y eventualmente contribuir a paradas de emergencia.

Las funciones del tren de potencia no se limitan a transmitir la potencia mecánica con el mayor rendimiento posible, sino que sus componentes deben estar diseñados para soportar los esfuerzos de empuje transmitidos por el rotor eólico. Por otra parte, un buen diseño del tren de potencia debe garantizar que todos sus elementos sean de fácil montaje y sustitución en caso de avería [9].

Caja multiplicadora

La caja multiplicadora es un componente importante en los trenes de potencia de un aerogenerador, debido a que la velocidad de rotación del rotor debe coincidir con la del generador eléctrico [27]. Los aerogeneradores se encuentran entre los casos excepcionales en que la velocidad de rotación del elemento de accionamiento (el rotor) es menor que la velocidad del generador. Por lo tanto, una caja multiplicadora debe aumentar la velocidad del rotor para que sea apropiada para el generador [29].

Debido a la fricción entre los engranes, se genera una gran cantidad de calor en la caja multiplicadora. Este calor es inevitable y debe eliminarse, de lo contrario, los engranes se calientan, lo que eventualmente puede provocar un sobrecalentamiento y daños en las piezas. Por esta razón, la caja multiplicadora se llena hasta un cierto nivel con aceite lubricante que tiene la doble función de proteger los engranes de la fricción y refrigerarlos [9].

Torre

La torre es uno de los componentes principales de los aerogeneradores de eje horizontal. Considerada de forma aislada, la torre representa un elemento convencional del aerogenerador, sin embargo, su diseño estructural requiere un conocimiento general del funcionamiento del sistema [9].

Uno de los parámetros de diseño más importantes de la torre es, lógicamente, su altura. Cuanto mayor es la altura de la torre, la producción de energía del aerogenerador aumenta siempre que el perfil vertical de la velocidad del viento en el emplazamiento sea creciente. Sin embargo, un aumento de la altura de la torre implica un aumento del costo del componente y una mayor dificultad para la instalación de equipos. Así, la elección de la altura de la torre responde a una solución de compromiso entre las ventajas e inconvenientes que supone aumentar este parámetro de diseño. Por otra parte, la torre debe presentar una rigidez suficiente para soportar las cargas de empuje transmitidas por el rotor eólico [27].

Mecanismo de orientación

Mecanismo de orientación (“yaw”), es el nombre del sistema utilizado para girar la góndola con respecto a la torre, de tal forma que el viento incidente sea lo más perpendicular posible al plano de giro de las palas. Este sistema de orientación es activo ya que utiliza motores eléctricos o sistemas hidráulicos para efectuar el movimiento del rotor, a diferencia de otros sistemas denominados pasivos, donde las propias fuerzas aerodinámicas realizan las funciones de orientación [29].

Los dispositivos que se utilizan para hacer girar el rotor eólico son básicamente de dos tipos, hidráulicos o eléctricos. Los aerogeneradores modernos emplean de forma mayoritaria dispositivos eléctricos, ya que su costo se ha reducido considerablemente, permite una regulación muy precisa, requiere un menor mantenimiento y ofrece mayor rigidez que los sistemas hidráulicos, lo que favorece el comportamiento dinámico del aerogenerador [9].

Generador eléctrico

Uno de los componentes más importantes en los sistemas de conversión de energía eólica es el generador eléctrico, cuya función principal es la de transformar energía mecánica en energía eléctrica. Para mejorar la eficiencia de los aerogeneradores, el generador eléctrico debe operar con fluctuaciones de voltaje debido a las variaciones de la velocidad del viento. Entre los generadores más empleados en la industria eólica están los generadores asíncronos y los generadores síncronos. A continuación, se presentan las dos grandes familias de generadores, dentro de las cuales existen múltiples variantes.

Generador asíncrono

El generador de inducción o asíncrono es ideal para aplicaciones en la producción de energía eólica, ya que requiere pocos sistemas de control y poco mantenimiento. Por su simplicidad y reducido tamaño, se prefiere a los generadores de inducción para utilizarlos en aerogeneradores de baja potencia.

Es interesante que las máquinas asíncronas de rotor devanado hayan vuelto al mercado como generadores de inducción conectados en aerogeneradores. Estos necesitan más mantenimiento debido a los anillos rozantes y a las escobillas que se incluyen en su diseño. Los generadores de inducción comúnmente utilizados en aerogeneradores de velocidad fija son muy similares a los motores de inducción industriales convencionales [29].

El estator de una máquina de inducción está compuesto por un núcleo laminado de acero (que permite reducir las pérdidas por corrientes parásitas que se inducen en él), el cual tiene ranuras axiales donde se alojan los devanados debidamente aislados. El núcleo del rotor también está compuesto por láminas de acero. El devanado del rotor no tiene alimentación propia y puede ser de tipo:

- Rotor tipo jaula de ardilla

Consiste en una serie de barras axiales de aluminio o cobre (alojadas en las ranuras del rotor) cortocircuitadas en sus extremos por dos anillos conductores. La gran simplicidad en el diseño de este rotor es la que le otorga a la máquina de inducción las ventajas de diseño compacto, costos y pocas actividades de mantenimiento.

- Rotor devanado

Los devanados son similares a los del estator y conservan el mismo número de polos. Las terminales libres de los devanados están conectados a anillos rozantes montados sobre el eje de la máquina. La placa de terminales se conecta con los anillos mediante escobillas o carbones. En general se pierden los atributos de simplicidad y pocas actividades de mantenimiento respecto de la máquina con rotor jaula de ardilla.

La principal ventaja de los generadores de inducción es su simpleza constructiva (en el caso de rotor tipo jaula de ardilla), lo que se traduce en menores costos de inversión y mantenimiento con respecto a otros tipos de generadores. Por otro lado, estos generadores no necesitan de alimentación en corriente continua para el campo. Lo anterior hace que estos generadores sean los más comunes en generación eólica, principalmente en el rango que va entre los 20 *kW* hasta varios *MW* de capacidad.

Para conectar un generador de inducción a la red y permitirle operar con recursos energéticos primarios intermitentes, como el viento, se debe tener especial cuidado en mantener la sincronización de la frecuencia de las variables de salida del generador y de la red eléctrica. Lo anterior se traduce en la necesidad común de desacoplar estas frecuencias mediante la inclusión de un sistema rectificador-inversor para conectarse a la red.

La principal desventaja de estos generadores es que requieren una fuente externa de reactivos, por lo que en sistemas aislados deben funcionar simultáneamente con un generador síncrono o estar acoplados a capacitores en paralelo con sus terminales.

Generador síncrono

Los generadores síncronos son máquinas de corriente alterna que se caracterizan por tener una velocidad del eje dependiente directamente con la frecuencia de las variables eléctricas. Estas máquinas tienen mayor aplicación en alta potencia, particularmente como generadores ya sea a bajas revoluciones en centrales hidroeléctricas, o bien a altas revoluciones en turbinas de vapor o gas. La máquina síncrona como generador se usa prácticamente en toda central generadora.

Cuando la máquina se encuentra conectada a la red, la velocidad de rotación del rotor depende directamente de la frecuencia de las variables eléctricas (voltaje y corriente) y del número de polos. Este hecho da origen a su nombre, ya que se dice que la máquina opera en sincronismo con la red.

Estas máquinas, como las de inducción, se encuentran formadas por dos partes principales, una parte móvil o rotor, y una parte fija o estator. En estas máquinas el estator se encuentra alimentado por corriente alterna, en tanto el rotor tiene alimentación continua ya sea a través de un devanado de campo o bien mediante imanes permanentes.

El estator está compuesto por un núcleo laminado de acero, el cual tiene ranuras axiales donde se alojan los devanados debidamente aislados, mientras que, por otro lado, el rotor puede estar conformado por:

- Rotor de imanes permanentes
- Rotor de polos salientes
- Rotor cilíndrico.

Los rotores de imanes permanentes representan la configuración más simple ya que evita el uso de anillos rozantes para alimentar el rotor. Sin embargo, su aplicación a altas potencias se encuentra limitada ya que las densidades de flujo magnético de los imanes no es, por lo general, alta. Adicionalmente, los imanes permanentes crean un campo magnético fijo no controlable a diferencia de los rotores con devanados de excitación donde se puede controlar la densidad de flujo magnético.

Dentro de los rotores con devanados de excitación se tienen los de tipo cilíndrico y los de polos salientes. los generadores con rotor cilíndrico se emplean en conjunto con turbinas a gas o de vapor de gran velocidad de funcionamiento; en cambio, las turbinas hidráulicas o motores de combustión impulsan generalmente generadores con rotor de polos salientes.

Los generadores síncronos deben operar a velocidad fija para tener frecuencia constante en sus bornes por lo que, en el caso de las energías renovables no convencionales, no pueden alimentar directamente a la red eléctrica ya que sólo se podría conectar el generador cuando la fuente primaria (velocidad del viento, caudal hídrico) hiciera girar al rotor a una velocidad que coincidiera perfectamente con su velocidad síncrona, lo cual pierde sentido al tratarse

de recursos energéticos intermitentes y variables. Debido a esto, la utilización típica de estos generadores incorpora un grupo rectificador-inversor que permite obtener voltaje y corriente de la frecuencia deseada.

2.3 Mantenimiento en la industria eólica

Los aerogeneradores son sistemas electromecánicos complejos que están expuestos a condiciones climáticas muy variables y extremas, que incluyen vientos severos o intensos, calor tropical, descargas atmosféricas, frío, granizo y nieve. Debido a estas variaciones externas, los aerogeneradores se someten a cargas constantemente cambiantes, lo que da como resultado condiciones operativas variables que conducen a un esfuerzo mecánico intenso y su mantenimiento suele ser costoso dependiendo del método implementado [22].

El mantenimiento representa una gran parte del esfuerzo, costo y riesgo de operación y mantenimiento para asegurar que los componentes continúen cumpliendo con las funciones de diseño. El objetivo del mantenimiento es habilitar el rendimiento del componente deseado manteniendo o devolviendo la capacidad del componente para funcionar correctamente desplegando los recursos mínimos. Generalmente, las estrategias de mantenimiento se dividen en correctivo y preventivo. La principal diferencia entre estas dos estrategias es que debe existir una falla en el sistema antes de que se tomen medidas correctivas de mantenimiento, mientras que las tareas preventivas pretenden evitar la aparición de una falla.

El mantenimiento correctivo (también conocido como mantenimiento no programado o basado en fallas) se lleva a cabo después de un colapso o cuando se ha localizado una falla en cualquiera de los componentes. Puede ser necesaria la renovación o reemplazo inmediato de piezas y un tiempo de inactividad no programado. Sin embargo, para las fallas que no tienen ninguna consecuencia en la función integral del sistema, el mantenimiento puede diferirse a tiempo para una ocasión más adecuada. El mantenimiento correctivo es por lo tanto, el más caro de las estrategias y los operadores esperan recurrir a él lo menos posible [24].

Por el contrario, el objetivo principal del mantenimiento preventivo es reparar o reemplazar los componentes antes de que fallen. El mantenimiento preventivo se subdivide en mantenimiento programado y mantenimiento basado en condición.

El mantenimiento programado también conocido como mantenimiento basado en el tiempo (o planificado) implica la reparación o el reemplazo del componente en intervalos de tiempo regulares según lo recomendado por el proveedor y sin importar la condición. Dentro de las actividades programadas de mantenimiento en aerogeneradores incluyen, entre otros, cambios de aceite de lubricación y filtros de aceite, revisión de los anillos rozantes del generador, inspección con respecto a fugas, prueba de sistemas de seguridad, pruebas de resistencia y reapriete de pernos, muestreo y análisis de aceite de la caja multiplicadora e inspección visual de las aspas. Pero la reducción de las fallas tiene el costo de completar las tareas de mantenimiento más frecuente de lo necesario y de no agotar la vida útil de los diversos componentes que ya están en servicio [24].

El mantenimiento basado en la condición, se realiza sobre la base del estado real del componente, por lo tanto requiere sistemas de monitoreo confiables, con monitoreo en línea y/o inspecciones y límites de alarma que pueden programarse o especificarse para alertar si la condición excede los niveles especificados. El análisis en profundidad de los datos monitoreados proporciona un diagnóstico y pronóstico de una falla incipiente y proporciona información para decidir sobre las acciones de mantenimiento. Esto implica la adquisición, el procesamiento, el análisis y la interpretación de los datos y la selección de las acciones óptimas de mantenimiento lográndose mediante sistemas de control. Se ha demostrado que el monitoreo de condición minimiza los costos de mantenimiento, mejora la seguridad operativa y reduce la cantidad y la gravedad de las fallas del sistema en servicio [1]. En resumen, cada tipo de mantenimiento ofrece ventajas e inconvenientes como se observa en la Tabla 2.1. De acuerdo a los tipos de mediciones de los sensores utilizados, las técnicas de monitoreo de condición de los rodamientos de máquinas eléctricas pueden clasificarse en las siguientes categorías: análisis de vibraciones, análisis de aceite, termografía, control de emisiones acústicas, mediciones de señales eléctricas, mediciones de deformación, entre otras.

Tabla 2.1. Comparación de los tipos de mantenimiento.

Tipo	Ventajas	Inconvenientes
Mantenimiento correctivo	<ul style="list-style-type: none"> • Bajos costos de mantenimiento durante el funcionamiento • Los componentes desempeñan su vida útil 	<ul style="list-style-type: none"> • No es posible ninguna planificación del mantenimiento • Es probable esperar largos tiempos para la entrega de piezas • La logística de los repuestos es complicada
Mantenimiento preventivo	<ul style="list-style-type: none"> • Poco tiempo de inactividad • Mantenimiento programado • Fácil logística de repuestos 	<ul style="list-style-type: none"> • Los componentes no alcanzan su vida útil • Altos costos de mantenimiento
Mantenimiento basado en condiciones	<ul style="list-style-type: none"> • Uso completo de la vida útil de los componentes • Poco tiempo de inactividad • Mantenimiento programado • Fácil logística de repuestos 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere información confiable sobre el tiempo de vida restante de los componentes • Se requiere una alta confiabilidad para el hardware y software de monitoreo de condiciones • Altos costos de implementación • Es difícil determinar los valores umbral de la condición apropiada

Fuente: [3]

2.3.1 Fallas en rodamientos

Los generadores eléctricos están propensos a fallas electromecánicas, principalmente concentrada en el estator, rotor y rodamientos. La encuesta realizada por Alewine y Chen (2012) [7] sobre generadores comerciales mostró que las fallas en los rodamientos dominan las fallas totales del generador eléctrico. La fuente dominante de fallas en los generadores de los sistemas de conversión de energía eólica está representada por los rodamientos, en aerogeneradores superiores a 2 MW de potencia, el 58 % de las fallas totales del generador provienen de fallas de estos. Las fallas prematuras en los rodamientos pueden ser causadas por una gran cantidad de factores, los más comunes son: fatiga, desgaste, deformación plástica, corrosión, lubricación deficiente e instalación incorrecta. El deterioro de las superficies de contacto del rodamiento provoca una mayor vibración del rodamiento y una temperatura más alta, que aceleran la velocidad de deterioro, estos fenómenos se usan generalmente para llevar a cabo el monitoreo de condición.

El tipo de rodamiento más popular utilizado en las máquinas rotatorias son los rodamientos tipo bola. Un rodamiento generalmente consiste de cuatro partes: una pista interna, una pista externa, los elementos rodantes (bolas o rodillos) y una jaula. Los elementos rodantes se usan para mantener el movimiento entre la estructura de soporte fijo y el eje rotativo.

Las fallas en los rodamientos constituyen una porción significativa de todas las fallas en los aerogeneradores [30]. Es deseable detectar fallas en los rodamientos y reparar o reemplazar los rodamientos defectuosos a tiempo para prevenir daños catastróficos y reducir el tiempo de inactividad de los aerogeneradores. Esto es posible gracias a que la naturaleza mecánica de una falla en los rodamientos es tal que da como resultado en su espectro de frecuencia grandes amplitudes a unas frecuencias bien definidas. En principio, éstas frecuencias dependen de la geometría del rodamiento (ver Figura 2.4), las condiciones de operación y la ubicación de la falla, donde: D_j es el diámetro de la jaula o retén también conocido como diámetro de paso, D_b es el diámetro del elemento rodante y β es el ángulo de contacto. El ángulo de contacto β se define como el ángulo entre la línea que une los puntos de contacto del elemento rodante y las pistas de rodadura en el plano radial, a lo largo de la cual se transmite la carga de una pista a otra, y una línea perpendicular al eje del rodamiento.

Los rodamientos dañados pueden hacer que la pista exterior gire en la carcasa, destruyendo el asiento del rodamiento o creando cargas de empuje que hacen que la caja multiplicadora se rompa. Los rodamientos desgastados del generador pueden provocar un giro del rotor que eventualmente conduce al contacto de la barra del rotor con el estator o al estrés excesivo en las vueltas finales de los devanados del rotor. Las fallas prematuras del engranaje y los rodamientos conducirán rápidamente a un mal funcionamiento de la máquina, incluso a una falla catastrófica.

Atendiendo al tamaño relativo de la superficie afectada, las fallas en rodamientos pueden clasificarse en dos grandes grupos, las fallas generalizadas y las fallas puntuales. El primer grupo se caracteriza porque la zona dañada se extiende sobre una porción considerable del componente afectado del rodamiento, ya sean las pistas o los elementos rodantes. En general este tipo de falla es consecuencia del desgaste normal o en ocasiones se debe a la circulación

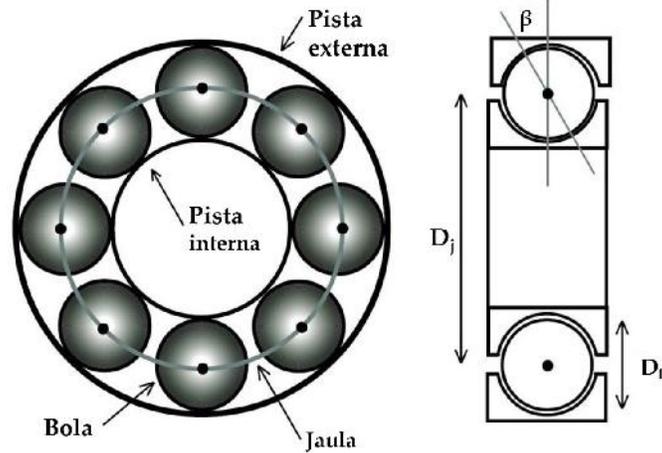


Figura 2.4. Geometría de un rodamiento de bolas.

de corrientes a través del rodamiento. Por otra parte, las fallas de tipo puntual afectan entornos pequeños de la superficie de rodadura y están originadas principalmente por la concentración de esfuerzos internos del rodamiento, por ejemplo, cuando la pista exterior esté defectuosa, a medida que los elementos rodantes se mueven sobre el defecto, se produce un impulso de corta duración de alto nivel que hace vibrar al rodamiento a una frecuencia determinada, que es la velocidad a la que los elementos ruedan sobre el falla [5]. En particular el análisis espectral de la aceleración o la velocidad de vibración ha sido empleado para la detección de fallas de tipo puntual. En el espectro de frecuencias de las vibraciones este tipo de falla se manifiesta por la aparición de componentes a una frecuencia definida y característica de cada elemento del rodamiento. Dicha frecuencia depende de la geometría del rodamiento y de la velocidad relativa entre la falla y los elementos rodantes [5].

Para determinar e interpretar las ecuaciones que permiten calcular la frecuencia que define el defecto localizado en cada elemento del rodamiento, es necesario comprender la relación de velocidades relativas entre los elementos móviles del mismo.

La Figura 2.5 muestra la sección frontal y transversal de la geometría de un rodamiento, donde V_{ex} , V_{cb} y V_{in} representan las velocidades lineales del punto de contacto entre la bola y la pista externa, centro de la bola y punto de contacto entre la bola y la pista interna, respectivamente.

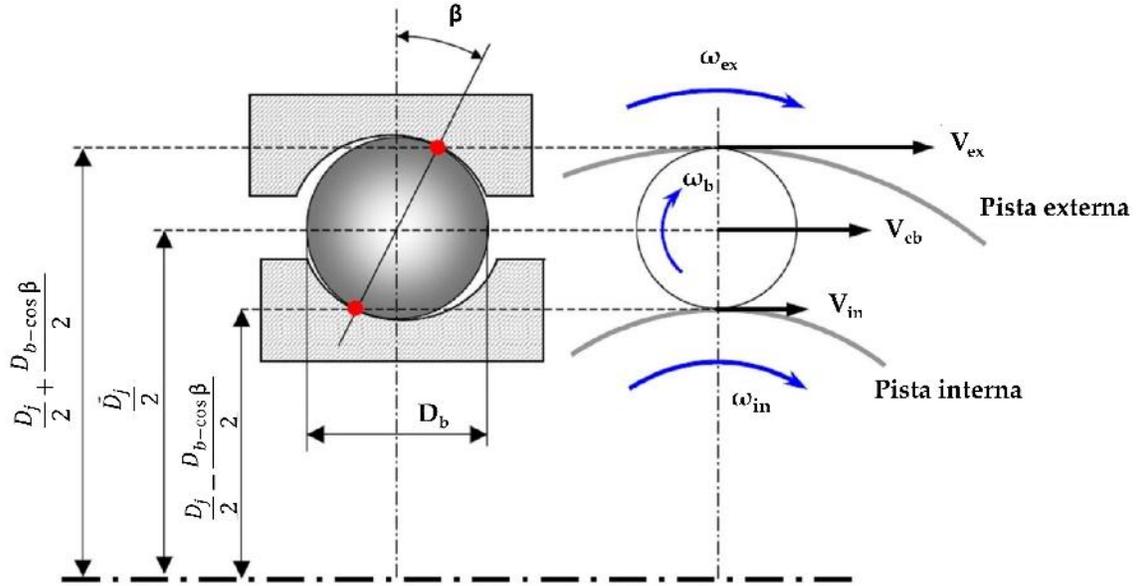


Figura 2.5. Sección transversal y lateral de un rodamiento.

La velocidad lineal del centro de la bola viene dada por la siguiente ecuación:

$$V_{cb} = \frac{V_{ex} + V_{in}}{2}. \quad (2.1)$$

La velocidad angular de la bola respecto al centro del rodamiento o velocidad angular de la jaula ω_b se determina con la siguiente ecuación:

$$\omega_b = \frac{V_{cb}}{D_j/2} = \frac{(V_{ex} + V_{in})/2}{D_j/2} = \frac{V_{ex} + V_{in}}{D_j}. \quad (2.2)$$

Si la pista externa gira con una velocidad angular ω_{ex} , la velocidad lineal del punto de contacto entre la bola y la pista externa, V_{ex} es de:

$$V_{ex} = \omega_{ex} \cdot \left(\frac{D_j}{2} + \frac{D_b \cdot \cos(\beta)}{2} \right). \quad (2.3)$$

Si la pista interna gira con una velocidad angular ω_{in} , la velocidad lineal del punto de contacto entre la bola y la pista interna, V_{in} es de:

$$V_{in} = \omega_{in} \cdot \left(\frac{D_j}{2} - \frac{D_b \cdot \cos(\beta)}{2} \right). \quad (2.4)$$

Sustituyendo las ecuaciones 2.3 y 2.4 en la ecuación 2.2 se obtiene la siguiente expresión:

$$\omega_b = \frac{\omega_{ex} \cdot \left(\frac{D_j}{2} + \frac{D_b \cdot \cos(\beta)}{2} \right) + \omega_{in} \cdot \left(\frac{D_j}{2} - \frac{D_b \cdot \cos(\beta)}{2} \right)}{D_j}. \quad (2.5)$$

Simplificando la expresión anterior se obtiene la frecuencia de falla en la jaula f_{fj} , que representa un daño en la jaula:

$$f_{fj} = \omega_b = \frac{1}{2} \left[\omega_{ex} \cdot \left(1 + \frac{D_b \cdot \cos(\beta)}{D_j} \right) + \omega_{in} \cdot \left(1 - \frac{D_b \cdot \cos(\beta)}{D_j} \right) \right]. \quad (2.6)$$

Por otro lado, la frecuencia de paso de las bolas por un defecto en la pista externa (frecuencia de falla en pista externa, f_{fpe}), puede obtenerse como el producto del número de bolas (n) por la velocidad angular relativa entre la pista externa y la jaula:

$$f_{fpe} = n \cdot (\omega_b - \omega_{ex}). \quad (2.7)$$

La frecuencia de paso de las bolas por un defecto en la pista interna (frecuencia de falla en pista interna, f_{fpi}), puede obtenerse como el producto del número de bolas por la velocidad angular relativa entre la pista externa y la jaula:

$$f_{fpi} = n \cdot (\omega_{in} - \omega_b). \quad (2.8)$$

Por último, la velocidad angular de una bola sobre su propio eje, representa la frecuencia de un defecto localizado en el elemento rodante (frecuencia de falla en bolas, f_{fb}). Considerando el punto de contacto de la bola con la pista interna se obtiene la siguiente expresión:

$$f_{fb} = \frac{(\omega_{in} - \omega_{ex}) \cdot \left[\frac{D_j}{2} - \left(\frac{D_b \cdot \cos(\beta)}{D_j} \right)^2 \right]}{\frac{D_b}{2}}. \quad (2.9)$$

Sustituyendo la ecuación 2.5 en las ecuaciones 2.7 y 2.8 y simplificando la ecuación 2.9 se obtienen las siguientes expresiones [5]:

$$f_{fpe} = \frac{n}{2} \cdot (\omega_{in} - \omega_{ex}) \cdot \left(1 - \frac{D_b \cdot \cos(\beta)}{D_j}\right), \quad (2.10)$$

$$f_{fpi} = \frac{n}{2} \cdot (\omega_{in} - \omega_{ex}) \cdot \left(1 + \frac{D_b \cdot \cos(\beta)}{D_j}\right), \quad (2.11)$$

y

$$f_{fb} = \frac{D_j}{2 \cdot D_b} \cdot (\omega_{in} - \omega_{ex}) \cdot \left[1 - \left(\frac{D_b \cdot \cos(\beta)}{D_j}\right)^2\right] \quad (2.12)$$

Estas ecuaciones son de carácter general, donde las dos pistas se encuentran en movimiento. Generalmente, la pista exterior está estacionaria, siendo $\omega_{ex} = 0$. Simplificando las ecuaciones 2.6 y 2.10 - 2.12 se obtiene:

Frecuencia de falla en pista interna:

$$f_{fpi} = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left[1 + \frac{D_b \cdot \cos(\beta)}{D_j}\right]. \quad (2.13)$$

Frecuencia de falla en pista externa:

$$f_{fpe} = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left[1 - \frac{D_b \cdot \cos(\beta)}{D_j}\right]. \quad (2.14)$$

Frecuencia de falla en jaula:

$$f_{fj} = \frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \left[1 - \frac{D_b \cdot \cos(\beta)}{D_j}\right]. \quad (2.15)$$

Frecuencia de falla en bolas o rodillos:

$$f_{fb} = \frac{D_j}{2D_b} \cdot f_r \cdot \left[1 - \left(\frac{D_b \cdot \cos(\beta)}{D_j}\right)^2\right]. \quad (2.16)$$

donde n es el número de bolas o rodillos y f_r la frecuencia de rotación. Estas ecuaciones de carácter general sirven para identificar de manera teórica las frecuencias de fallas que el rodamiento puede presentar, es decir, que analizando el espectro de las señales de vibración, estas frecuencias tienen la mayor amplitud consecuencia de la falla. Es importante señalar que estas ecuaciones son basadas en condiciones ideales, es decir, que existe un contacto puro de los elementos rodantes y las pistas. Es posible que exista un error al comparar estos valores con los reales debido al desplazamiento de las superficies (pistas) o por la pérdida de contacto del elemento rodante con la pista. Por lo tanto es importante conocer estas frecuencias teóricas para tener una referencia durante el análisis de vibraciones en el dominio de la frecuencia.

2.3.2 Monitoreo de condición

Al aumentar la generación de energía eólica en los sistemas de potencia, la necesidad de una operación confiable se hace evidente. Por lo tanto, la adopción de una estrategia de mantenimiento basado en condición puede contribuir significativamente a minimizar los costos de operación y mantenimiento al reducir el número de visitas de inspección y acciones correctivas [1], entonces el monitoreo de condición y el diagnóstico de fallas son casi obligatorios. Los aerogeneradores se someten a diferentes condiciones de operación, por lo tanto, antes de establecer el monitoreo de condición y los métodos de diagnóstico, es necesario identificar qué tipos de fallas se pueden presentar durante el funcionamiento del mismo. Recientemente, se han introducido varias técnicas de monitoreo de condición y diagnóstico de fallas para minimizar el tiempo de inactividad y el costo de mantenimiento, al tiempo que aumenta la disponibilidad de la energía y el servicio de los parques eólicos [3].

El monitoreo de condición se centra en la medición remota de indicadores críticos de la condición y el rendimiento de los componentes del aerogenerador, con el objetivo de identificar fallas incipientes antes de que ocurra un daño catastrófico y así, minimizar el tiempo de inactividad y maximizar la productividad [1]. Además, permite determinar el punto óptimo entre las estrategias de mantenimiento correctivo y programado [22]. En algunos casos, se pueden planificar medidas correctivas para mitigar el problema, en otros casos, se pueden implemen-

tar medidas para rastrear la progresión de la falla. En el peor de los casos, ante una falla inminente, el monitoreo de condición puede ayudar al personal de mantenimiento en la planificación de la logística para optimizar la mano de obra y el uso del equipo y minimizar el costo de una reparación o reemplazo.

De acuerdo con la norma sueca SS-EN 13306, la monitorización puede definirse como una actividad realizada, ya sea de forma manual o automática, que tiene por objeto observar el estado real de un componente. La función clave de un sistema de monitoreo de condición exitoso debería ser proporcionar una indicación confiable de la presencia de una falla en el aerogenerador e indicar la ubicación y gravedad de ésta. El monitoreo de condición se basa en la adquisición de datos y el procesamiento de señales y se puede implementar utilizando diversos enfoques con diferentes niveles de tecnología [22].

Los sistemas de monitoreo de condición de los aerogeneradores permiten recoger datos de los componentes principales del aerogenerador, como el generador eléctrico, la caja multiplicadora, el rodamiento principal y el sistema de orientación. El propósito es minimizar el tiempo y costo del mantenimiento, al mismo tiempo que aumenta la disponibilidad de energía y la vida útil de los componentes del aerogenerador. Un sistema de monitoreo de condición ideal se emite para monitorear todos los componentes usando un número mínimo de sensores [3].

Las etapas necesarias para conseguir un monitoreo de condición satisfactorio es el siguiente:

- **Detección:** el conocimiento esencial de que existe una condición de falla en un componente de maquinaria e idealmente su ubicación. Sin esto, no se pueden tomar medidas preventivas para evitar posibles fallas del sistema.
- **Diagnóstico:** la determinación de la naturaleza de la falla, incluida su ubicación más precisa. Este conocimiento se puede utilizar para decidir la gravedad de la falla y qué medidas preventivas o correctivas se deben tomar (si las hay).
- **Pronóstico:** la previsión o predicción de la vida restante o el tiempo anterior a la falla. En función de esto, se puede planificar la acción más eficiente y efectiva para eliminar

la falla. El pronóstico tiene la rentabilidad potencial más grande de todas las tecnologías de monitoreo de condición.

- Acción de mantenimiento: acción de reparación o reemplazo para eliminar la causa de la falla.

Los sistemas de supervisión de la condición seleccionan e inspeccionan los parámetros medibles de cualquier aerogenerador que cambiará a medida que cambie el estado o la condición de operación de la máquina. Cuando se detecta un cambio, se proporcionará un análisis detallado de la medición y se realizará el diagnóstico del problema. Los principales sistemas de monitoreo existentes están utilizando el análisis de vibraciones como índice para detectar fallas en el sistema global.

El monitoreo en línea y la detección de fallas son conceptos relativamente nuevos en la industria eólica y están floreciendo a gran escala. Las mediciones se registran desde sensores con diferentes metodologías y se han desarrollado algoritmos para analizar los datos con el objetivo de monitorear el rendimiento del aerogenerador e identificar los indicadores de fallas características.

En los últimos años, se han realizado esfuerzos para desarrollar técnicas de monitoreo de condición eficaces y rentables y métodos de procesamiento de señal para aerogeneradores. Entre estas diferentes técnicas, el análisis de vibración y el análisis del aceite son los más usados para aplicaciones en aerogeneradores debido a sus éxitos en otras industrias. Para conseguir un sistema de monitorización de condiciones preciso y fiable para aerogeneradores, es necesario seleccionar parámetros mensurables, así como elegir un método de procesamiento de señal adecuado. Cada fabricante de aerogeneradores utiliza diferentes parámetros para su sistema de monitoreo de condiciones. En la Tabla 2.2 se presentan las principales técnicas de monitoreo de condición exponiendo ventajas y desventajas, posteriormente se describe en que consiste cada una de estas.

Capítulo 2. Marco teórico

Tabla 2.2. Resumen de técnicas de monitoreo de condición.

Parámetro de detección	Componentes monitoreados	Ventajas	Desventajas
Vibración	<ul style="list-style-type: none"> • Eje • Rodamientos • Caja multiplicadora 	<ul style="list-style-type: none"> • Confiable • Estandarizado (ISO 10816) 	<ul style="list-style-type: none"> • Costoso • Sujeto a fallas del sensor • Limitado para rotación a baja velocidad
Torque	<ul style="list-style-type: none"> • Rotor • Engranaje 	<ul style="list-style-type: none"> • Medición directa de la carga del rotor 	<ul style="list-style-type: none"> • Costoso • Invasivo
Análisis de aceite	<ul style="list-style-type: none"> • Rodamientos 	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterización directa de la condición del rodamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitado a rodamientos con sistema de aceite circuito cerrado • Costoso para la operación en línea
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> • Rodamientos 	<ul style="list-style-type: none"> • Estandarizado (IEEE 841) 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere de un sensor de temperatura • Otros factores pueden causar el mismo aumento de temperatura
Emisión acústica	<ul style="list-style-type: none"> • Rodamientos • Engranaje 	<ul style="list-style-type: none"> • Buena para el funcionamiento a baja velocidad • Capaz de detectar fallas en etapas tempranas • Rango de frecuencia lejos de la perturbación de la carga 	<ul style="list-style-type: none"> • Costoso • Se requiere una tasa de muestreo muy alta
Corriente del estator/Potencia	<ul style="list-style-type: none"> • Rodamientos • Engranaje 	<ul style="list-style-type: none"> • No necesita sensor adicional • Económico • Fácil de implementar 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil de detectar fallas incipientes • A veces, baja relación señal/ruido

Fuente: [21]

Análisis de vibraciones

El análisis de vibraciones es la estrategia más utilizada para el monitoreo de condición en los aerogeneradores, especialmente para equipos rotatorios, principalmente el sistema de transmisión. Para este análisis se requieren diferentes sensores para diferentes frecuencias, es decir, se utilizan transductores de posición para el rango de baja frecuencia, sensores de velocidad en el área de frecuencia media, acelerómetros en alta frecuencia y espectro de los sensores de energía emitida para muy altas frecuencias. En cuanto a las aplicaciones, es apropiado para monitorear la caja multiplicadora, los rodamientos y otros elementos del aerogenerador [24].

El análisis de vibraciones está estandarizado en ISO 10816, que define el posicionamiento y el uso de los sensores. Los métodos de análisis de vibraciones son fáciles de implementar en los equipos existentes y tienen un alto nivel de interpretación, lo que facilita la localización exacta del componente defectuoso. Sin embargo, este enfoque implica el uso de hardware y software adicional, que aumenta los costos en su implementación [22].

Las técnicas de vibración fueron las primeras en usarse en los aerogeneradores como parte del sistema de monitoreo de condición. El principio se basa en dos hechos [31]:

1. Cada componente del sistema de transmisión tiene una frecuencia de vibración natural y su amplitud permanecerá constante en condiciones normales, aunque variará con la velocidad del tren de transmisión,
2. la señal de vibración cambiará si un componente se deteriora y los cambios dependerán del modo de falla.

El tipo de sensores utilizados depende esencialmente del rango de frecuencia de interés y del nivel de señal involucrado. Se han utilizado diversas técnicas, incluidos los acelerómetros de baja frecuencia para los rodamientos principales y los acelerómetros de mayor frecuencia para los rodamientos de la caja multiplicadora y los generadores y, en algunos casos, los

proxímetros. Comúnmente, el transductor más utilizado en la actualidad es el acelerómetro piezoeléctrico, que se aplica a una amplia gama de frecuencias, es económico, robusto y está disponible en una amplia gama de tamaños y configuraciones.

Análisis de aceite

El análisis de aceite se usa para determinar las propiedades químicas y el contenido de partículas metálicas en el aceite lubricante, se ha demostrado que el monitoreo de los residuos del aceite es una técnica de monitoreo de condición viable para la detección temprana y el seguimiento de fallas en los elementos de los rodamientos y de los engranajes. El análisis de aceite se centra en uno de los componentes más críticos del aerogenerador, la caja multiplicadora. El deterioro de los engranajes y rodamientos depende principalmente de la calidad del lubricante, es decir, la contaminación de las partículas y las propiedades del aceite y los aditivos utilizados para mejorar el rendimiento del aceite. Esta técnica se realiza en su mayoría fuera de línea tomando muestras para vigilar la temperatura del aceite, la contaminación y la humedad [24]. En la mayoría de los casos, el aceite se bombea a través del componente en un sistema de bucle cerrado y los restos metálicos de los rodamientos rotos de la caja multiplicadora son atrapados por un filtro. La cantidad y el tipo de desechos metálicos pueden indicar la condición del componente.

El análisis de aceite tiene tres propósitos principales [22]:

- Monitorear el lubricante y revelar si el fluido del sistema es apto para un servicio adicional o requiere un cambio.
- Asegurar la calidad del aceite (por ejemplo, contaminación por partes, humedad).
- Salvaguardar los componentes involucrados (caracterización del componente).

La poca o ninguna vibración puede ser evidente mientras se desarrollan defectos, pero el análisis del aceite puede proporcionar advertencias tempranas. En el caso de contaminación

excesiva del filtro, aceite contaminado o cambio en las propiedades de los componentes, la caracterización de las partículas puede dar una indicación de desgaste excesivo [1]. El uso combinado de análisis de vibración y aceite, para cubrir un rango más amplio de fallas potenciales y aumentar la credibilidad de los resultados del monitoreo de condición, podría ser clave para el monitoreo del sistema de transmisión del aerogenerador.

Monitoreo de la temperatura

El monitoreo de la temperatura del componente observado es uno de los métodos más comunes del monitoreo de condición que ayuda a detectar la presencia de cualquier falla potencial relacionada con los cambios de temperatura en el equipo. En la industria de la energía eólica, el monitoreo de la temperatura se aplica a componentes tales como rodamientos, fluidos (aceite) y devanados de generadores, entre otros. Los pirómetros ópticos, los termómetros resistentes y los termopares son un subconjunto de los sensores utilizados en el monitoreo de la temperatura.

A diferencia de la termografía, el monitoreo de la temperatura proporciona información sobre el proceso de deterioro en el componente debido a una fricción mecánica excesiva en los rodamientos y engranajes defectuosos, lubricación insuficiente y conexiones eléctricas sueltas o en deterioro. El monitoreo de la temperatura es confiable porque cada pieza del equipo tiene una temperatura operativa limitada. Sin embargo, la temperatura se desarrolla lentamente y no es suficiente para la detección temprana y precisa de fallas. Además, la temperatura medida también puede verse influenciada por el entorno. Por lo tanto, el monitoreo de la temperatura rara vez se usa sola, pero a menudo sirve como una fuente secundaria de información. En este caso, la fuente primaria podría ser el análisis de vibraciones.

Emisiones acústicas

Las emisiones acústicas podrían ser útiles para detectar fallas en el sistema de transmisión, en las aspas o en la torre. Se produce una liberación rápida de energía de deformación y se generan ondas elásticas cuando se altera la estructura de un metal, y esto puede analizarse mediante emisiones acústicas. El monitoreo de emisiones acústicas tiene algunas similitudes con el monitoreo de vibraciones, pero también una diferencia principal. Mientras que los sensores de vibración están montados en el componente involucrado, a fin de detectar movimiento, los sensores acústicos se unen al componente mediante pegamento flexible con baja atenuación. Para el análisis de vibración, las frecuencias relacionadas con las velocidades de rotación de los componentes son de interés. Para la emisión acústica se considera un ancho de banda más amplio de frecuencias más altas que puede dar una indicación de los defectos iniciales. Últimamente, estos sensores han ganado mucha más atención para detectar fallas tempranas y se han aplicado con éxito para monitorear los rodamientos y la caja multiplicadora. La emisión acústica se considera más robusta para el funcionamiento de aerogeneradores a baja velocidad en comparación con los métodos clásicos basados en la vibración.

Termografía

La termografía se utiliza a menudo para monitorear componentes electrónicos y eléctricos e identificar fallas por temperatura. La técnica aún se aplica cuando el equipo se encuentra operando y a menudo implica la interpretación visual de los puntos calientes que surgen debido a un mal contacto o a una falla del sistema. Actualmente, la técnica no está particularmente bien establecida para el monitoreo de condición en línea, pero las cámaras infrarrojas y el software de diagnóstico que son adecuados para el monitoreo en línea del proceso están empezando a comercializarse en el mercado. Las cámaras infrarrojas se han utilizado para visualizar variaciones en la temperatura de la superficie de las palas, así como lugares propensos a dañarse. A largo plazo, esto podría ser aplicable a los generadores y a la electrónica de potencia.

Señales eléctricas

Las señales eléctricas se han utilizado ampliamente para el monitoreo de condición de máquinas eléctricas rotativas y sus sistemas de transmisión acoplados. Las mediciones de voltaje, corriente y potencia, que se usan para controlar la velocidad y excitación del generador, representan una fuente de información del monitoreo de condición para los aerogeneradores. La dificultad con estas señales es que son muy ricas en información, que debe entenderse con precisión si el diagnóstico se realiza adecuadamente.

La resistencia eléctrica también se puede utilizar para la evaluación estructural de ciertos componentes del aerogenerador. La resistencia eléctrica varía con la rigidez dieléctrica y estos cambios abruptos se pueden utilizar para detectar grietas, delaminaciones y fatiga. Por lo tanto, la técnica puede aplicarse en aerogeneradores en operación. Mucho se ha investigado sobre estas técnicas por lo cual es un campo ya muy explotado pero existe un potencial significativo para llevarlas con éxito a la práctica [24].

2.4 Análisis de vibraciones

La señal de vibración se ha utilizado durante mucho tiempo para el diagnóstico de desgaste mecánico en maquinaria rotativa, tales como rodamientos y cajas multiplicadoras. Una de las suposiciones elementales del análisis de vibraciones para las fallas mecánicas de la maquinaria rotativa es que la falla en cuestión provoca impulsos en las señales de vibración, que no ocurren en el estado de operación normal. La detección de los impulsos ocultos y el ruido requiere técnicas avanzadas de procesamiento de señal para enfatizar la impulsividad, especialmente cuando la falla es incipiente [32].

En su forma más sencilla, una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de vibración

se llama vibración de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento [33].

El análisis de vibraciones generalmente requiere conocimiento especializado. Casi todos los algoritmos comúnmente utilizados se pueden clasificar en dos categorías: dominios de tiempo y frecuencia. El análisis del dominio del tiempo se centra principalmente en las características estadísticas de la señal de vibración, entre las más utilizadas se encuentran el valor máximo, el valor mínimo, la media, la desviación estándar, el factor de forma, el factor de cresta, el factor de impulso, la relación de energía y la curtosis.

El análisis en el dominio de la frecuencia utiliza métodos de Fourier, generalmente en la forma de un algoritmo de Transformada Rápida de Fourier (FFT), para transformar la señal del dominio del tiempo en el dominio de la frecuencia. Esta es la técnica de procesamiento más popular para el análisis de vibración. Fue precisamente el matemático francés Jean Baptiste Fourier (1768-1830) quien encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas senoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos. Entonces lo que hace un analizador de espectros que trabaja con la Transformada Rápida de Fourier es capturar una señal desde una máquina, luego calcula todas las series de señales senoidales que contiene la señal compleja y por último las muestra en forma individual en el eje x de la frecuencia. En la Figura 2.6 se observa la señal compleja (en color verde), capturada desde una máquina. A dicha señal se le calculan todas las series de señales senoidales en el dominio del tiempo (vistas en azul) y por último se muestra cada una en el dominio de la frecuencia (vistas en rojo) [34].

La ventaja del análisis de dominio de frecuencia a lo largo del tiempo es su capacidad para identificar y aislar fácilmente ciertos componentes de frecuencia de interés. La aplicación del monitoreo de condición basado en la vibración en aerogeneradores presenta algunos desafíos. Los aerogeneradores son sistemas de velocidad y carga variable que operan en condiciones altamente dinámicas. Esto da como resultado señales de monitoreo de condición que dependen no solo de la integridad del componente sino también de las condiciones de funcionamiento. Una limitación del análisis de la FFT convencional es su incapacidad para manejar señales

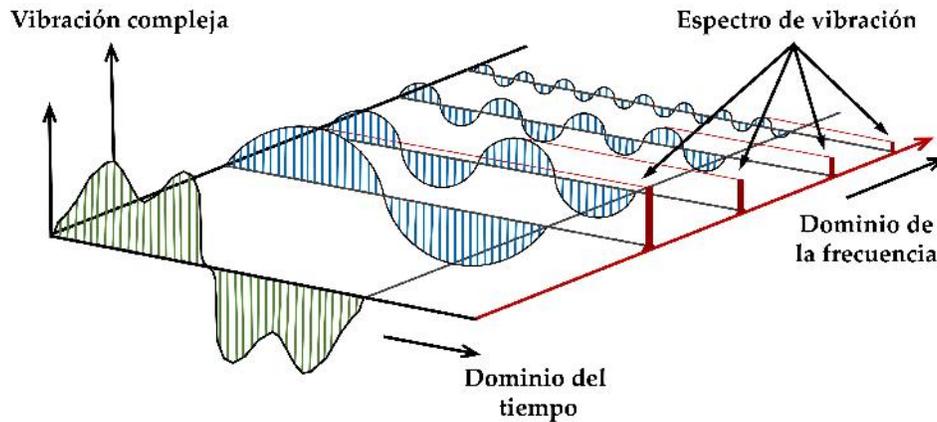


Figura 2.6. Señales en el dominio tiempo y en el dominio de la frecuencia (espectro).

de formas de onda no estacionarias que pueden no proporcionar características de componentes precisas y claras. Para superar los problemas de las técnicas convencionales basadas en la FFT y encontrar soluciones mejoradas para el monitoreo de condición en los aerogeneradores, se han desarrollado una serie de técnicas avanzadas de procesamiento de señales, incluidas la Transformada de Fourier en Tiempo Corto (STFT) y la Transformada Wavelet, que permiten detectar defectos en señales de vibración no estacionaria.

2.4.1 Adquisición de señales

La adquisición de señales implica la medición de las variables requeridas (por ejemplo, corriente, voltaje, temperatura, velocidad) convirtiéndolas en señales electrónicas. Hacerlo de manera efectiva implicará una correcta elección y colocación del tipo y número de sensores adecuados; el acondicionamiento (realizar operaciones básicas incluyendo amplificación, filtrado, linealización y finalmente modulación/demodulación) puede ser necesario para reducir la susceptibilidad de las señales a la interferencia. Las técnicas de optimización pueden emplearse entonces en el procesamiento de las señales por un procesador digital de señales (DSP), implicando no sólo el propio procesamiento, sino también la clasificación y manipulación según sea necesario. La adquisición de datos lo realiza un sistema informático particular que permite el control local y remoto de las funciones de un aerogenerador y la recopilación de datos del parque eólico, y por lo tanto garantizar un funcionamiento eficiente [2].

Los sistemas de adquisición de señales constituyen la interfaz entre la señal analógica y la digital. Las etapas fundamentales de un sistema de adquisición de señales se muestra en la Figura 2.7, entre ellas se encuentran: la etapa transductora, de acondicionamiento, de adquisición y etapa de registro y procesamiento, cada una de estas se describen en el capítulo 3.

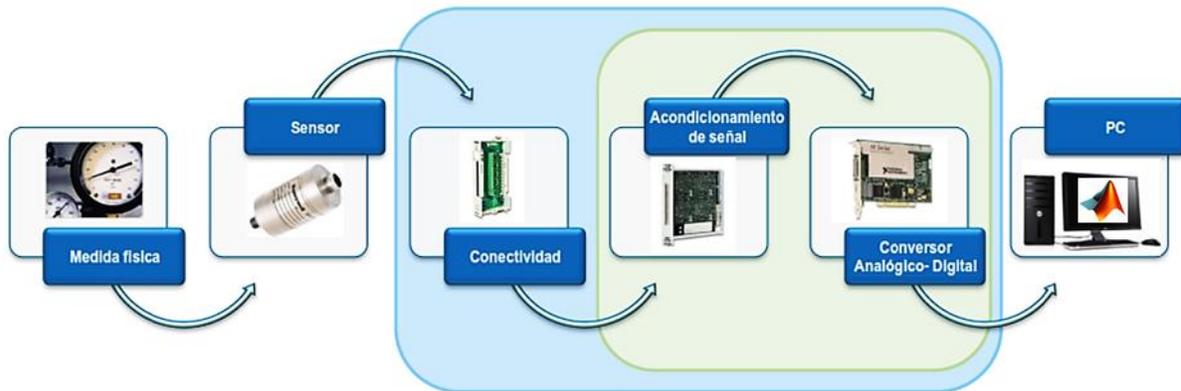


Figura 2.7. Sistema de adquisición de señales.

2.4.2 Procesamiento de señales

El procesamiento de señales vibratorias tiene como finalidad simplificar la información obtenida, manteniendo a su vez aquella que es relevante para discernir si hay presencia o no de un defecto, y de qué tipo es. En los últimos años se han desarrollado diferentes técnicas de procesamiento de señales para el monitoreo de condición de los aerogeneradores. Estas técnicas dependen principalmente de los tipos de señales y componentes estudiados. La creciente capacidad de los circuitos integrados digitales significa que ahora se puede aplicar una amplia gama de operaciones complejas a las señales en tiempo real o se puede aplicar a los datos almacenados. Los entornos de programación como MATLAB entre otros, con paqueterías especializadas, permiten el desarrollo de técnicas de procesamiento de señal digital.

Entre las diversas técnicas empleadas en el procesamiento de señales para detectar y diagnosticar las fallas en los sistemas eólicos se encuentran [1]:

- La Transformada Rápida de Fourier (FFT), se utiliza para la conversión de una señal digital del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, aplicada principalmente en el monitoreo de los elementos de los rodamientos ya que generan vibraciones a frecuencias específicas (frecuencias de falla) y en la caja multiplicadora. La FFT permite detectar cualquier cambio anormal en las condiciones de trabajo de la máquina, pero su desventaja suele ser, en casos industriales complejos, su incapacidad para identificar la localización del daño en el análisis de señales no estacionarias, como es el caso de los aerogeneradores.
- El Análisis de la Envolvente (Envelope Analysis), es una técnica de procesamiento de señal importante que se utiliza para extraer las características de fallo de las señales de modulación, se puede utilizar para la detección de fallas y el diagnóstico en rodamientos. Sin embargo, las limitaciones de esta técnica son las siguientes: requiere el conocimiento de la frecuencia de resonancia y banda de filtración, lo que requiere cierta experiencia.
- El Análisis del Cepstrum (Cepstrum Analysis) es un enfoque basado en el tiempo definido como la Transformada de Fourier Inversa Logarítmica del espectro de potencia que se puede aplicar en el diagnóstico de rodamientos, sin embargo presenta las siguientes limitaciones: genera muchos picos grandes indeseados cerca del punto cero, lo que hace que la salida sea difícil de interpretar. Además, la frecuencia fundamental en esta técnica se encuentra a la derecha de la gráfica, lo que es opuesto al análisis convencional de encontrar la frecuencia fundamental.
- El Análisis de Orden (Orden Tracking), se utiliza cuando se requiere un algoritmo basado en ángulos de rotación, particularmente adecuado para desbalances de rotor y asimetrías aerodinámicas. La oscilación torsional de la góndola genera una señal que está desfasada con cualquier oscilación transversal, de modo que puede ser separada y analizada individualmente con esta técnica.

- La Transformada Wavelet es una técnica en el dominio tiempo-frecuencia similar a la Transformada de Fourier de tiempo corto (STFT), pero más apropiada para señales transitorias, se aplica en aerogeneradores con el fin de monitorear el nivel de vibración causado por desalineación, rodamientos y otras fallas, y puede ser utilizado como un signo general o indicación de un aerogenerador defectuoso. Sin embargo, presenta las siguientes limitaciones: requiere una pre-selección de la Wavelet madre adecuada y un nivel apropiado de descomposición que contiene la información necesaria para el diagnóstico de fallas.
- La identificación de fallas del rodamiento en aerogeneradores es posible mediante la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT). Sin embargo, el problema con STFT es que proporciona una resolución constante para todas las frecuencias, ya que utiliza la misma ventana para toda la señal. Por lo tanto, una vez que se elige la función de ventana, la resolución de tiempo y frecuencia es fija. Por lo tanto, existe la posibilidad de elegir una función de ventana adecuada entre la resolución de tiempo y la resolución de frecuencia: una ventana más larga dará lugar a una resolución de frecuencia más alta con una frecuencia de tiempo más baja y viceversa. Sin embargo, de acuerdo con la naturaleza de las vibraciones generadas por los rodamientos, esta técnica es factible para el análisis de estas señales porque lo más importante es detectar la presencia de fallas, además, las vibraciones evolucionan gradualmente, por lo tanto, no es esencial una buena resolución en el tiempo.

Independientemente de la técnica utilizada, la capacidad de un sistema de monitoreo de condición depende de dos elementos básicos: el número y el tipo de sensores y los métodos asociados de procesamiento y simplificación de señales utilizados para extraer información importante de las diversas señales.

Para procesar señales analógicas a través de medios digitales, primero es necesario convertirlas a formato digital, es decir, convertirlas en una secuencia de números con una precisión finita. Conceptualmente, en la conversión de una señal analógica a una representación digital es un proceso de tres pasos [35], como se representa en la Figura 2.8:

- **Muestreo.** Este paso consiste en la conversión de una señal continua en el tiempo en una señal discreta en el tiempo obtenida mediante la toma de muestras de la señal continua en el tiempo en instantes discretos de tiempo.
- **Cuantificación.** En este paso se realiza la conversión de una señal de valores continuos tomados en instantes discretos de tiempo en una señal de valores discretos en instantes de tiempo discretos (es decir, es una señal digital). El valor de cada muestra de la señal se representa mediante un valor seleccionado dentro de un conjunto finito de posibles valores. La diferencia entre el valor continuo y su aproximación se le denomina error de cuantificación.
- **Codificación,** consiste en la asignación de una representación usualmente binaria para los valores cuantificados.

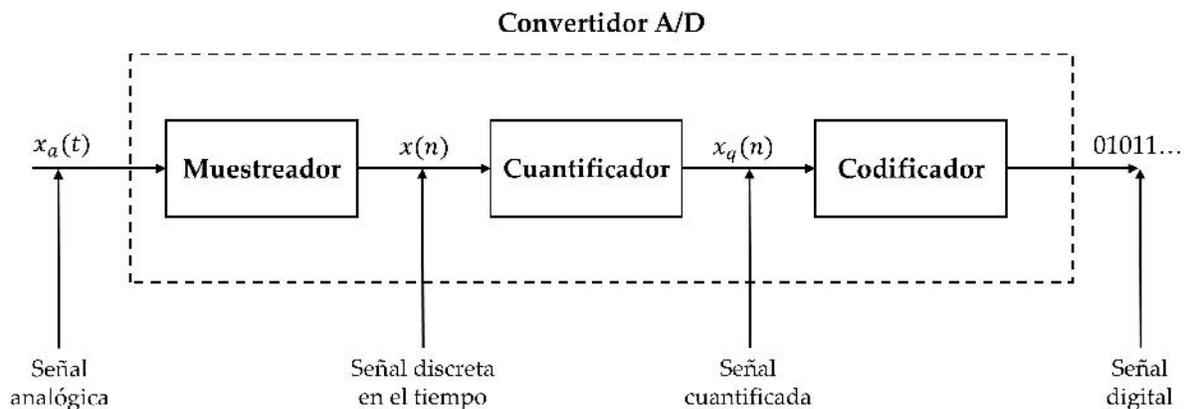


Figura 2.8. Partes básicas de un convertidor analógico-digital (A/D).

Fuente: [35]

Muestreo de señales analógicas

Existen muchas formas de muestrear una señal analógica. En el análisis clásico se utiliza el llamado muestreo periódico o uniforme por las facilidades que este brinda al análisis matemático, lo cual ha hecho que sea el tipo de muestreo más utilizado en aplicaciones reales. En el muestreo periódico la relación entre la señal analógica y la señal de variable discreta está dada por:

$$x(n) = x_a(nT), \quad -\infty < n < \infty \quad (2.17)$$

donde $x(n)$ es la señal discreta en el tiempo obtenida “tomando muestras” de la señal analógica $x_a(t)$ cada T segundos. Este procedimiento se ilustra en la Figura 2.9. El intervalo de tiempo T entre muestras sucesivas es el periodo de muestreo o intervalo de muestreo y su recíproco $1/T = F_s$ se denomina tasa de muestreo (muestras por segundo) o frecuencia de muestreo (Hz).

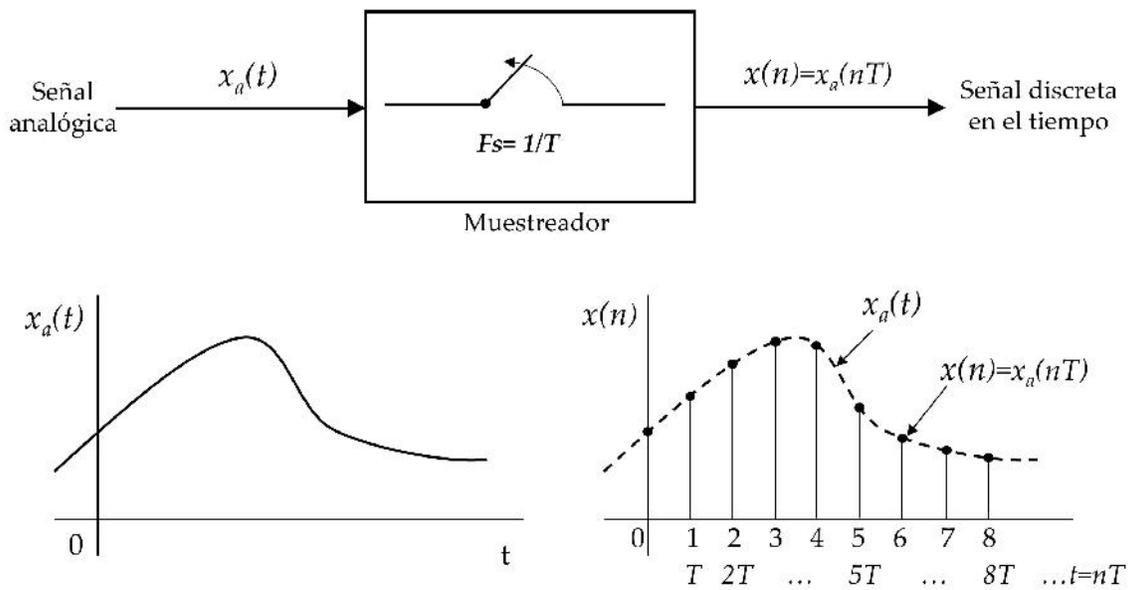


Figura 2.9. Muestreo periódico de una señal analógica.

Fuente:[35]

El muestreo periódico establece una relación entre las variables t y n de las señales continuas y discretas en el tiempo, respectivamente. Estas variables se relacionan linealmente a través del periodo de muestreo T o, de forma equivalente, a través de la tasa de muestreo $F_s = 1/T$, como

$$t = nT = n/F_s \quad (2.18)$$

La relación entre las frecuencias de las señales en los dominios continuo y discreto está dada por

$$\omega = \Omega T \quad (2.19)$$

o lo que es equivalente

$$f = \frac{F}{F_s} \quad (2.20)$$

por lo que a f se le denomina también frecuencia normalizada. Con esto queda claro que la frecuencia f puede corresponder con las unidades de frecuencia de F , si y sólo si se conoce la frecuencia de muestreo F_s .

El muestreo periódico de la señal de variable continua representa entonces un mapeo del rango infinito de frecuencias F a un rango finito de frecuencias f . Puesto que la frecuencia más alta de una señal discreta en el tiempo es $f = \frac{1}{2}$, se deduce que, con una frecuencia de muestreo F_s , los valores máximos correspondientes de F son

$$F_{max} = \frac{F_s}{2} = \frac{1}{2T} \quad (2.21)$$

$$\Omega_{max} = \pi F_s = \frac{\pi}{T} \quad (2.22)$$

Análisis de señales en el dominio de la frecuencia

Durante el monitoreo de vibraciones, a menudo es deseable determinar su contenido espectral en el dominio de la frecuencia para revelar información no aparente en el dominio del tiempo. El análisis espectral es la técnica comúnmente utilizada para el monitoreo de condi-

ción en sistemas de transmisión y máquinas eléctricas, y ha demostrado ser una herramienta valiosa para la detección de fallas y el diagnóstico básico. La representación espectral de una señal de tiempo es, por lo tanto, una colección de componentes en el dominio de frecuencia, cada uno con una frecuencia, amplitud y ángulo de fase específicos.

La representación en el dominio de la frecuencia es ideal para las señales de vibración por su naturaleza misma, es decir, por ser la señal de vibración una suma de senoides con distintas frecuencias y amplitudes. Pero para calcular la densidad espectral de potencia se requiere el uso de transformadas como la FFT, donde la señal resultante, es un conjunto de componentes de frecuencia que comprende un rango desde la frecuencia 0 hasta $F_s/2$, donde F_s es la frecuencia de muestreo de la señal [36]. Lo anterior es definido mediante el teorema de Nyquist, el cual dice que una señal discreta en tiempo será bien representada si la frecuencia de muestreo es igual o superior a la frecuencia máxima del sistema. La Transformada de Fourier es una de las diversas herramientas matemáticas que resulta útil en el análisis de señales en el dominio de la frecuencia. Estas representaciones de señales implican, básicamente, la descomposición de las señales en función de sus componentes senoidales (o exponenciales complejas). Cuando se emplea una descomposición de este tipo, se dice que la señal está representada en el dominio de la frecuencia [35].

La mayor parte de las señales se pueden descomponer en una suma de componentes senoidales. Cuando se trabaja con señales periódicas, tal descomposición se conoce como serie de Fourier. En el caso de señales de energía finita, la descomposición se conoce como Transformada de Fourier.

El motivo fundamental para desarrollar estas herramientas para realizar el análisis en el dominio de la frecuencia es proporcionar una representación matemática y gráfica de las componentes de frecuencias contenidas en una determinada señal. Se emplea el término espectro para hacer referencia al contenido en frecuencia de una señal. El proceso que permite obtener el espectro de una señal utilizando las herramientas matemáticas básicas se conoce como análisis en frecuencia o análisis espectral. Los instrumentos o programas software utilizados para obtener estimaciones espectrales de tales señales son los analizadores de espectros [35].

Transformada de Fourier (FT)

La Transformada de Fourier, o Transformada Integral de Fourier, es una operación matemática que transforma una señal del dominio del tiempo a otra en el dominio de la frecuencia y está dada por la siguiente ecuación:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.23)$$

La ecuación anterior representa la señal $x(t)$ como la suma continua de funciones exponenciales cuyas funciones están en el intervalo $(-\infty, \infty)$. La amplitud relativa de los componentes a cualquier frecuencia f es proporcional a $X(f)$ [37].

En el caso particular de la señal de vibración, las unidades de la señal en el tiempo y la frecuencia están determinadas según el tipo de sensor que se emplee para la medición. Así, para la señal de aceleración se tiene la unidad de gravedades g , para la velocidad mm/seg y para el desplazamiento μm . Aunque el dominio espectral ofrece una buena interpretación de las señales de vibración, solo es útil para régimen permanente, es decir, bajo condiciones de velocidad y carga constante. Por tal motivo es necesario realizar un análisis del comportamiento de la frecuencia a través del tiempo.

Para implementar este procedimiento se requiere conocer la ecuación de la señal, lo cual es imposible para casos reales, debido a que la señal está contaminada con ruido y señales provenientes de otros equipos lo que hace prácticamente inviable que este método sea aplicable en la realidad.

Transformada Discreta de Fourier (DFT)

En el monitoreo de condición, una señal es una medida de una cantidad física que transmite información sobre el comportamiento del sistema. Generalmente, es necesario digitalizar las señales del sensor para su posterior procesamiento en un sistema de monitorización,

los datos adquiridos con la tarjeta de adquisición de datos generalmente se muestrean en el tiempo a una determinada frecuencia de muestreo y, por lo tanto, no son estrictamente continuos en el tiempo. En este caso, se debe usar la Transformada Discreta de Fourier.

La DFT es la discretización de la Transformada de Fourier continua. En aplicaciones de ingeniería y tratamiento de señales, resulta útil considerar el proceso de manera discreta y no continua, debido a que los sistemas de adquisición de datos no pueden obtener ni analizar la totalidad de la información. Es una herramienta fundamental para estudiar datos discretos en computadoras. La Transformada de Fourier de una señal de energía finita discreta en el tiempo $x(n)$ se define como [35]:

$$X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j2\pi n} \quad (2.24)$$

Físicamente $X(f)$ representa el contenido en frecuencia de la señal $x(n)$. En otras palabras, $X(f)$ es una descomposición de $x(n)$ en sus componentes de frecuencia.

Transformada Rápida de Fourier (FFT)

La Transformada Rápida de Fourier es un algoritmo utilizado por los equipos de cálculo, que permite aplicar la DFT de forma eficiente reduciendo el número de operaciones de N^2 a $N \log_2 N$.

La FFT aprovecha la periodicidad y simetría de la Transformada de Fourier, descomponiendo a la DFT de n puntos en transformadas más pequeñas. El objetivo central de este algoritmo es dividir recursivamente a la DFT en dos o más DFT pequeñas, cada una de las cuales pueden computarse en forma individual y combinarse en forma lineal para obtener la DFT de la secuencia de N puntos originales. La rapidez de cálculo del algoritmo, con una complejidad logarítmica es uno de los motivos principales de su uso, esto debido a que la evaluación de la Transformada directamente toma un valor cuadrático de operaciones lo cual no es suficiente para valores de N grandes.

Transformada de Fourier en Tiempo Corto (STFT)

La Transformada de Fourier permite conocer todas las componentes de frecuencia de una señal y su respectivo aporte energético. Lo anterior determina que la TF tenga una gran resolución en el dominio frecuencial pero una resolución en el dominio temporal nula, debido a que la TF requiere, para su cálculo, la utilización de todos los datos temporales de la señal o del tramo de señal considerado, no puede determinar en qué instante de la señal hace presencia una componente de frecuencia concreta. Por lo tanto, la TF es una herramienta bastante exitosa en el análisis de señales estacionarias. Sin embargo, ésta no puede ser aplicada con el fin de obtener información precisa de cuando las diferentes componentes de frecuencia hacen su aparición en la señal, como es el caso de las señales no estacionarias cuyo contenido espectral varía con el tiempo. Para resolver el problema de resolución en tiempo de la Transformada de Fourier, Denis Gabor (1946) adaptó la transformada utilizando un procedimiento llamado STFT o Transformada de Fourier ventaneado. La STFT es el método clásico de análisis tiempo-frecuencia. El concepto principal de esta transformada es multiplicar la señal $x(t)$, a ser analizada, por una ventana de análisis $g(t - \tau)$ trasladada τ veces en el tiempo, y luego se calcula la Transformada de Fourier de la señal ventaneada.

Este procedimiento consiste en dividir una señal $x(t)$ en pequeños segmentos a través del tiempo de forma donde se asume que para cada segmento la señal es estacionaria y así calcular la FT en cada uno de ellos. La forma de dividir la señal se realiza mediante lo que se denomina una ventana temporal $g(t)$, cuyo ancho corresponde a la longitud del segmento o tramo en los que se divide la señal total. Matemáticamente hablando, se multiplica la señal total por la ventana temporal que tiene un valor definido dentro del intervalo de la ventana y un valor nulo fuera de él. Con la ventana temporal se encuadra la señal alrededor de un instante de tiempo τ y se calcula su FT; luego trasladando temporalmente la ventana se cubre un nuevo segmento de la señal al que se le vuelve a calcular la FT. Dicho procedimiento se realiza hasta cubrir la totalidad de la señal. Según lo anterior, se define la STFT para la señal $x(t)$ como

$$X_g(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t - \tau)e^{-j2\pi ft} dt. \quad (2.25)$$

Se puede asumir que la ventana $g(t)$ es bien localizada en el intervalo centrado en el tiempo $t = 0$, y de longitud Δt y su Transformada de Fourier $X_g(\tau, f)$ está también localizada en una banda de frecuencia centrada en $f = 0$ y de ancho Δf . Los valores obtenidos de $X_g(\tau, f)$ representan un esquema del dominio tiempo-frecuencia y muestra la información que contiene la señal en dicho dominio. Finalmente, se puede definir una ventana ideal como aquella que permita determinar unívocamente el contenido frecuencial y la energía total del tramo de señal donde es impuesta. Por tanto, para una eficiente aplicación de la STFT, se ha de determinar la ventana temporal y sus respectivos parámetros que mejor se ajusten al tipo de señal que se pretende analizar.

Ventanas

Al hablar de la resolución en tiempo-frecuencia de la STFT, se requiere hablar de la selección de la ventana temporal. El cálculo de FFT asume que la señal es periódica en cada bloque de datos, es decir, se repite una y otra vez y es idéntica todo el tiempo. Cuando se calcula la FFT de una señal no periódica, el espectro de frecuencia resultante presenta una fuga. La fuga es el resultado del algoritmo de FFT que trata de manejar las discontinuidades en la muestra. La FFT ve las discontinuidades como una frecuencia de modulación, esto produce componentes espectrales donde ninguno realmente existe. La fuga provoca que la energía de la señal se difunda en un amplio rango de frecuencia en la FFT cuando debería estar en un rango de frecuencia estrecho. Como la mayoría de las señales no son periódicas en los períodos de tiempo del bloque de datos muestrados, se debe aplicar una ventana para corregir las fugas. Sin embargo, al seleccionar una ventana, se debe considerar que la ventana reduce la magnitud del espectro en frecuencias que no están cerca de la frecuencia de la señal a expensas de aumentar el ancho de banda del lóbulo principal.

Si la ventana seleccionada es muy estrecha se analizan segmentos de señal pequeños que permiten tener una buena resolución en tiempo, pero una mala resolución en frecuencia ya que sólo se podrán observar las componentes de frecuencias igual y mayores al inverso del tamaño de la ventana. Por otro lado, si la ventana seleccionada es muy ancha se tendrá una buena re-

solución en frecuencia pero una mala resolución en tiempo. Por lo tanto, un defecto de la STFT es el no poder dar una alta resolución tanto en tiempo como en frecuencia de manera simultánea. La raíz de este problema se basa en el principio de incertidumbre de Heisenberg, el cual establece que es imposible conocer una representación exacta tiempo-frecuencia de una señal; es decir, no podemos saber qué valor de frecuencia existe en un instante de tiempo determinado, sólo podemos conocer qué componentes de frecuencia existen dentro de un intervalo de tiempo dado. Las ventanas desplazadas y moduladas $g(t - \tau)e^{-j\omega t}$ de la ecuación 2.25 están bien localizadas en el dominio conjunto tiempo-frecuencia. Cada ventana se localiza en el rectángulo centrado en el punto (τ, f) con dimensión igual a $\Delta t \Delta f$. Por lo anterior, es importante determinar la relación ideal entre el ancho temporal y frecuencial de la ventana en función de la exigencia del análisis que se pretenda realizar.

En la Figura 2.10 se muestran las principales ventanas en el dominio del tiempo. Los niveles del lóbulo lateral y la expansión del ancho del lóbulo principal se observan en la Figura 2.11. El beneficio de conocer el comportamiento de las diferentes ventanas radica en que se puede seleccionar la más idónea para la aplicación de la STFT a la señal a analizar y, así, minimizar los errores que se presentan debido al hecho de no utilizar una ventana ideal. A continuación, se definen los principales parámetros que caracterizan a una ventana temporal y en la Tabla 2.3 se presentan los principales parámetros de las ventanas más utilizadas en el análisis de señales.

Una ventana típica tiene una forma tal que atenúa suavemente el comienzo y el final del bloque de datos y tiene una forma especial en el medio. Esta función luego se multiplica con el bloque de datos de tiempo forzando a que la señal sea periódica. Al alisar los extremos de la onda a cero, no hay discontinuidad alrededor de los extremos. En particular, se recomienda la ventana de Hanning para las señales generadas por sistemas muy amortiguados y la ventana de Hamming se recomienda para el uso con sistemas ligeramente amortiguados.

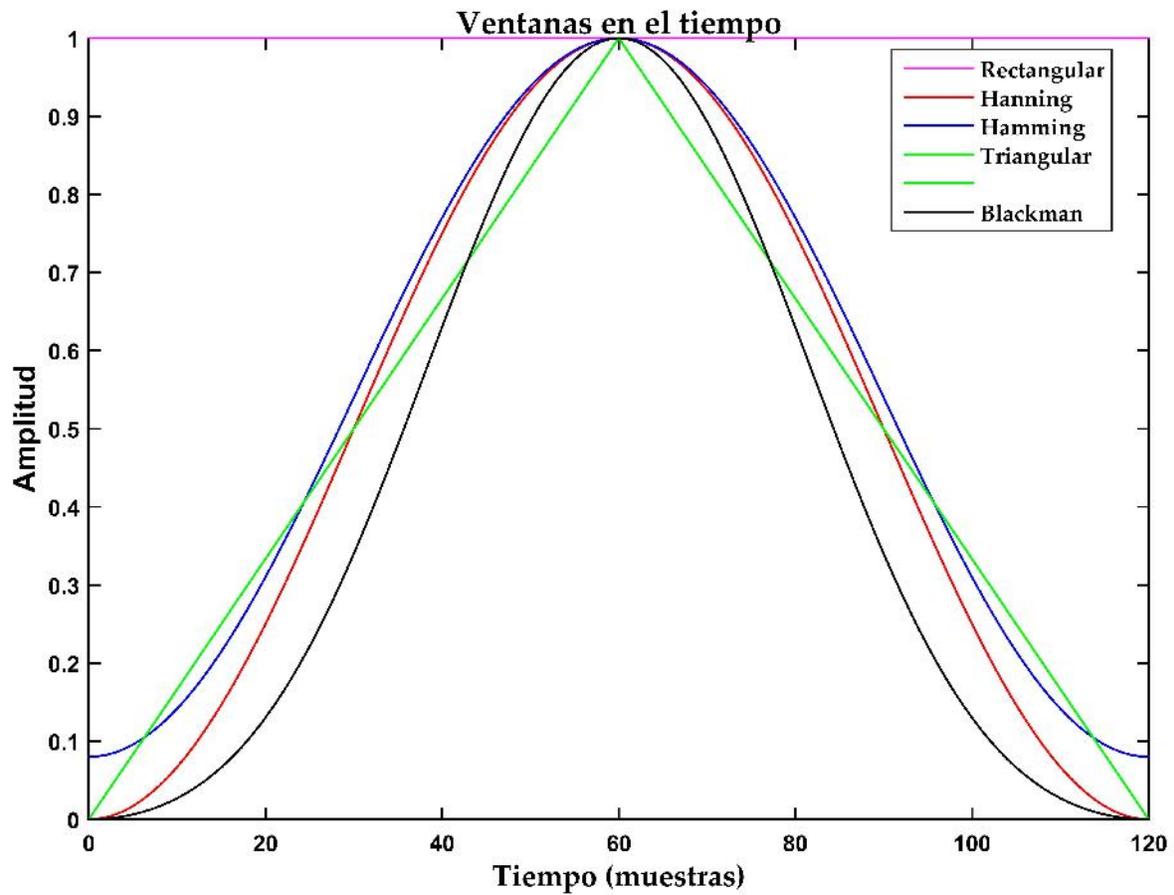


Figura 2.10. Representación en el dominio tiempo de las principales ventanas.

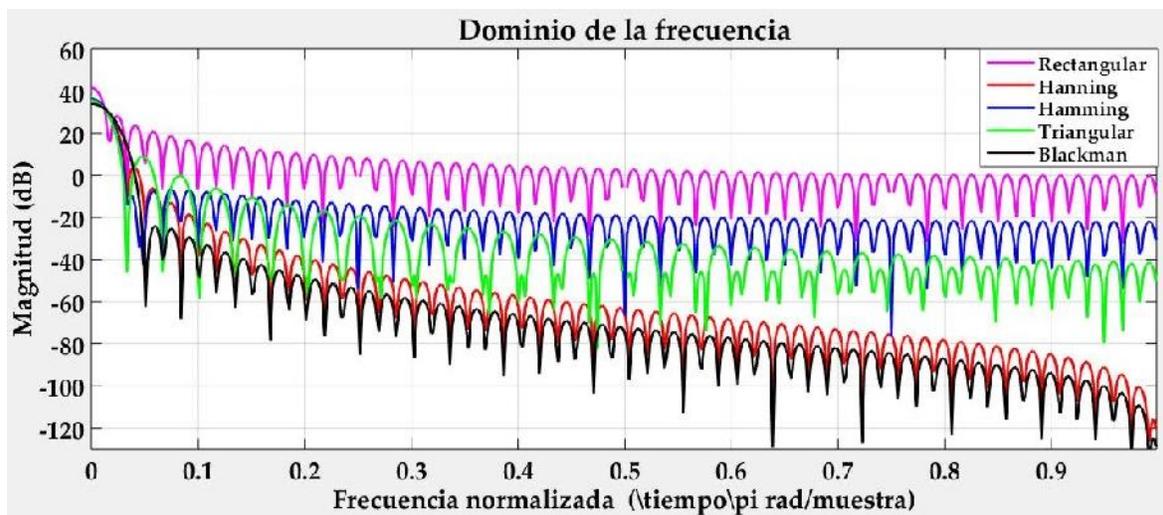


Figura 2.11. Representación en el dominio de la frecuencia de las principales ventanas.

A continuación se describen cada uno de los parámetros mencionados en la Tabla 2.3:

- El ancho de banda a 3 dB es la diferencia entre las frecuencias en las que su atenuación, al aplicar la ventana, se mantiene igual o inferior a 3 dB comparada con la frecuencia central del pico (máximo). Este parámetro da información acerca de la habilidad que tiene la ventana para separar componentes de similar amplitud; por lo tanto, determina la resolución del análisis.
- La selectividad, es un descriptor que indica la habilidad de la ventana para separar componentes de niveles ampliamente diferentes. El parámetro básico para conocer la selectividad es el factor de forma, que se obtiene de la relación entre el ancho de banda a 60 dB y a 3 dB.
- La altura del lóbulo-lateral principal. Los lóbulos laterales de gran magnitud producen efectos de rizado en la respuesta frecuencial del tramo de señal ventaneado.
- La magnitud del rizado en la banda de paso, define como Δf centrada alrededor de la frecuencia central f_0 . Este rizado define la capacidad de la ventana para describir la magnitud real de las componentes frecuenciales.

Tabla 2.3. *Parámetros de las principales ventanas.*

Ventana	Ancho en -3 dB de lóbulo principal	Ancho en -6 dB de lóbulo principal	Máximo nivel del lóbulo lateral (dB)	Tasa de disminución del lóbulo lateral (dB/década)
Rectangular	0.88	1.21	-13	20
Bartlett	1.28	1.74	-27	40
Hanning	1.44	2.00	-32	60
Hamming	1.30	1.81	-43	20
Blackman-Harris	1.62	2.27	-71	20
Exact Blackman	1.61	2.25	-67	20
Blackman	1.64	2.30	-58	20
Flat Top	2.94	3.56	-44	20

Análisis espectrográfico

Puesto que la STFT en general no es del conjunto de los reales, usualmente se usa el espectrograma para visualización o para etapas posteriores de procesamiento. El espectrograma (SPEC) es el cuadrado de la magnitud de la STFT:

$$SPEC(t, f) = \left[\int_{-\infty}^{\infty} x(t)g(t - \tau)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \right]^2. \quad (2.26)$$

El espectrograma pertenece a la clase de Cohen, mientras que la STFT no pertenece, puesto que no cumple con las propiedades de invarianza al desplazamiento en tiempo y frecuencia. Esto se debe a que la fase de la STFT no cumple con estas propiedades, pero su magnitud sí lo hace y por eso el espectrograma es invariante a desplazamientos en tiempo y frecuencia.

Los diferentes espacios de representación de la señal $x(t)$, permiten mostrar la dinámica de la señal bajo diferentes condiciones de operación de la máquina. Así, en régimen permanente es posible utilizar los dominios del tiempo y la frecuencia por separado obteniendo una buena capacidad de interpretación de las señales de vibración, siempre y cuando se asuma que la señal es estacionaria. Por otra parte, si se considera regímenes de carga y velocidad variable resulta de mayor utilidad el espacio tiempo-frecuencia ya que captura la dinámica intrínseca de la señal bajo condiciones de no estacionariedad. Aunque los espacios de representación ofrecen una caracterización de la señal de acuerdo a la amplitud o concentración de energía, este tipo de características son insuficientes para clasificar distintos tipos de fallos satisfactoriamente, por lo que se hace necesario realizar una etapa de estimación de características adicionales que representen de manera más adecuada la dinámica de la señal de vibración.

Capítulo 3

Metodología experimental para el análisis de vibraciones en el GIDA

3.1 Introducción

En el presente capítulo se describe la metodología y el sistema experimental utilizado para adquirir las señales vibratorias de un GIDA, específicamente, en los rodamientos considerando fallas y sin ellas. Adicionalmente, se describe la etapa de adquisición y procesamientos de señales, diagnóstico mediante la Transformada de Fourier de Tiempo Corto y finalmente se analizan los resultados por medio de un banco de pruebas previamente instalado para validar el modelo desarrollado.

La metodología general seguida en esta tesis parte de un sistema mecánico en el que se busca detectar y diagnosticar la condición mecánica de los rodamientos durante la operación del GIDA. La primera etapa consta del diseño de la metodología experimental que permite la adquisición de datos representativos bajo diferentes condiciones de fallas que se buscan analizar. A continuación, con base en el estudio teórico y el análisis de las propias señales obtenidas, se realiza la extracción de parámetros válidos que cambian cuando se modifican las condiciones de operación del sistema y las condiciones físicas de los subsistemas, en este caso, las vibraciones. Finalmente, para validar los resultados experimentales obtenidos

del procesamiento de estas señales se hace una comparación de éstas con las fallas teóricas calculadas y con los resultados obtenidos por el analizador de vibraciones comercial Fluke® 810.

Es importante mencionar que esta metodología desarrollada a partir del análisis de vibraciones de un pequeño generador se puede aplicar potencialmente a los más grandes en la energía eólica y otras industrias.

3.2 Diseño del sistema experimental

Partiendo del sistema mecánico, el primer paso es establecer la metodología experimental para la adquisición de datos. Un aspecto muy importante en esta etapa es la selección de los componentes del sistema de adquisición de datos, principalmente el tipo de sensor, la ubicación y montaje de los mismos así como los parámetros de muestreo de la señal. Adicionalmente, es conveniente automatizar el proceso de adquisición en la medida que sea posible, con el fin de evitar errores.

Entre las consideraciones fundamentales en esta etapa están: determinar las condiciones de la máquina durante la adquisición de las muestras (velocidad, condiciones de carga, etc.), éstas deben de ser representativas del funcionamiento nominal. Durante la adquisición de datos en condiciones de carga y velocidad variable, será conveniente establecer un rango de las mismas, para que sea posible establecer bajo qué condiciones se puede realizar el diagnóstico óptimo.

Las fallas estudiadas en esta tesis son las que se presentan en los componentes de los rodamientos, ya que estas se presentan con mayor frecuencia en este tipo de máquinas. Para esto, es necesario conocer la geometría del rodamiento y determinar el tamaño mínimo de la falla que se puede detectar. Otro aspecto importante a considerar es el número de ensayos a realizar por cada una de las condiciones de fallas que se van a estudiar procurando que el grupo de medidas sea lo más homogéneo posible.

A continuación se presenta el sistema experimental implementado. Primero se presentan los componentes y características del banco de pruebas utilizado, posteriormente se describen los componentes del sistema de adquisición de datos (sensor, chasis, tarjeta de adquisición) y por último se explica las funciones y las técnicas empleadas en el software para el procesamiento de las señales.

3.2.1 Banco de pruebas

El equipo de pruebas utilizado para el desarrollo de este proyecto de tesis consta de una máquina de inducción para estudiar las causas y los efectos de la vibración. El sistema mecánico fue desarrollado por la empresa DAC (Design Assistance Corporation), modelo 203. Este es accionado por un motor de imán permanente de 187 W (1/4 HP), 90 V CC con alta precisión y un control de velocidad variable que conduce al eje mediante un acoplamiento de haz helicoidal [38]. El eje está soportado mediante dos rodamientos de ranura profunda de la marca URB modelo 1621 2RS.

Este banco cuenta con dos rotores mecanizados de 6" de diámetro cada uno que permiten condiciones de equilibrio fácilmente modificable mediante tornillos y arandelas, además los rotores cuentan con 20 agujeros roscados en el borde interno para la adición de contrapesos para casos de estudio de desbalanceo. Cuenta con agujeros roscados en los bloques para la fijación de sensores de vibración a través de espárragos. El banco de pruebas está diseñado con bloques mecanizados que permiten una reconfiguración conveniente y precisa para crear diferentes casos de estudio. Para mayor información consultar la hoja técnica en el Anexo A.

3.2.2 Sistema de Adquisición de Datos (SAD)

La adquisición de datos es parte fundamental de cualquier aplicación de análisis de vibraciones. En su nivel básico, la tarea de un sistema de adquisición de datos, es la medición de señales físicas. Un SAD generalmente consta de una tarjeta de adquisición de señales,



Figura 3.1. Banco de pruebas DAC-203.

acondicionamiento de señal, software para adquirir y manipular los datos en bruto, sensores, y un conjunto de software para analizar, visualizar y almacenar datos.

En esta sección se presenta brevemente la instrumentación utilizada en el sistema de adquisición de datos empleado para adquirir las señales vibratorias del rodamiento. Básicamente, el proceso es el siguiente: las señales captadas por los sensores colocados sobre los soportes de los rodamientos se transmiten a la tarjeta de adquisición NI-9234 que está conectada al chasis CDAQ-9162 como se muestra en la Figura 3.2. La tarjeta de adquisición se conecta a una computadora por medio de un bus USB para registrar, guardar y analizar los datos mediante el software “Análisis de vibraciones”, desarrollado en la plataforma MATLAB/Simulink realizado específicamente para este propósito. A continuación se describen las características de cada uno de estos componentes.



Figura 3.2. Sistema de adquisición interconectado.

Acelerómetro

En un sistema de análisis de vibraciones se utilizan sensores que permiten medir la vibración o la aceleración del movimiento que está experimentando una máquina o estructura, transformándola en una magnitud eléctrica que por medio de un acondicionador refleja la medida de velocidad y desplazamiento [39]. Normalmente son utilizados en el mantenimiento predictivo para detectar fallas de los rodamientos y para la caracterización vibratoria de estructuras.

Entre los sensores utilizados en el análisis de vibraciones se encuentran los de desplazamiento para el rango de baja frecuencia, sensores de velocidad en el área de frecuencia media, acelerómetros en alta frecuencia y sensores de energía para muy altas frecuencias. El tipo de sensores utilizados depende esencialmente del rango de frecuencia de interés y del nivel de señal involucrado. Se han utilizado diversas técnicas, incluidos los acelerómetros de baja frecuencia para los rodamientos principales y los acelerómetros de mayor frecuencia para los rodamientos de la caja multiplicadora y los generadores. Por mucho, actualmente el sensor más utilizado es el acelerómetro piezoeléctrico, que se aplica a una amplia gama de frecuencias, es económico, robusto y está disponible en una amplia gama de tamaños y configuraciones.

Por otra parte, es importante definir la variable de trabajo en función de la magnitud del desplazamiento del cuerpo en estudio y de su frecuencia de vibración, por ejemplo, si se trata de analizar la vibración de un sólido que vibra con una frecuencia muy baja y un desplazamiento muy pequeño, la forma de trabajo más adecuada consistirá en el estudio del desplazamiento, ya que la velocidad y la aceleración aparecerán multiplicadas por la pulsación angular que es proporcional a la frecuencia. Sin embargo, si la frecuencia del movimiento es muy elevada, el parámetro más adecuado para el análisis de vibraciones es el estudio de las aceleraciones.

En general, se puede decir que la experiencia ha demostrado que la medida de la velocidad de vibración en el rango de 10 Hz a 1 kHz proporciona la mejor indicación de la severidad de las vibraciones. Cuando se realiza un análisis de la vibración en un amplio rango de frecuencias,

la elección del desplazamiento, velocidad o aceleración sólo determinará la atenuación que sufran las diferentes componentes de la vibración en función de su frecuencia. Por tanto, será más ventajoso elegir la función que dé el espectro de frecuencias más plano, para poder utilizar de una forma óptima la gama dinámica (diferencia entre valores máximos y mínimos que se pueden medir) de la instrumentación.

Aunque la variable que mejor cumple la condición anterior es la velocidad de vibración, en casos como la detección de fallos en los rodamientos, donde aparecen señales armónicas de pequeña amplitud y alta frecuencia se utiliza la aceleración, ya que aumenta la resolución de la medida. Para el desarrollo de las pruebas experimentales de este proyecto se seleccionaron acelerómetros piezoeléctricos de eje único por su amplio rango de frecuencia, su tamaño ideal para espacios limitados, peso ligero y buena resistencia a la temperatura.

Características específicas

Los sensores seleccionados son acelerómetros piezoeléctricos de eje único con electrónica integrada (IEPE) de la marca Kistler modelo 8640A5, con una sensibilidad ($\pm 10\%$): $1\,000\text{ mV/g}$, un rango de frecuencia entre $0,5 - 3\,000\text{ Hz}$ y un rango de medición de $\pm 5\text{ g}$ como se muestra en la Figura 3.3. Estos sensores se pueden colocar en varios puntos del generador y no requieren ningún acondicionamiento de señal adicional además de sus amplificadores de carga estándar [40], como se muestra en la Figura 3.4.



Figura 3.3. Sensor Kistler modelo 8640A5.

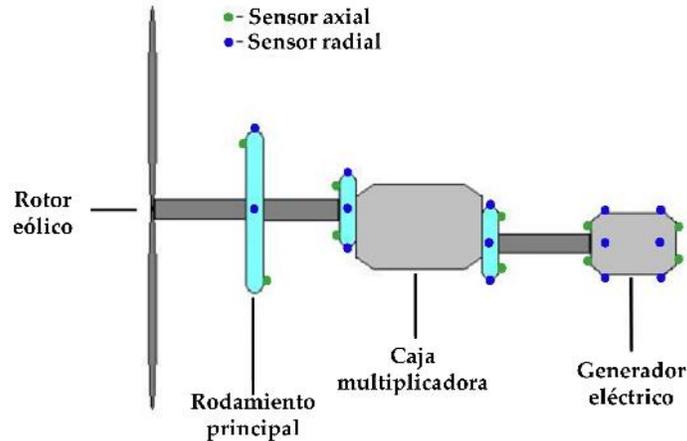


Figura 3.4. Ubicación de los sensores de vibración.

Fuente: [3]

El acelerómetro miniatura PiezoBeam® fue desarrollado específicamente para mediciones de análisis modal y aplicaciones de análisis de vibración. Además, este acelerómetro está sellado herméticamente para proporcionar confiabilidad a largo plazo incluso en entornos hostiles, y su peso liviano (3,5 g) minimiza efectivamente los efectos de carga masiva. Los datos técnicos de los acelerómetros utilizados se encuentran en el Anexo B.

Ubicación y montaje

Un aspecto importante en la implementación de un sistema de monitoreo de vibración para detectar y diagnosticar con precisión las fallas en los rodamientos es la ubicación y el tipo de montaje de los sensores, ya que una correcta recolección de los datos permitirá conocer la condición real del componente. Es importante conocer que los acelerómetros son sensibles al montaje, y pueden generar demasiado ruido debido a las altas frecuencias involucradas, por lo tanto, deben colocarse lo más cerca posible de la zona de carga de la pista exterior.

La norma ISO 10816 en el análisis de vibraciones mecánicas recomienda la medición en tres direcciones: axial, radial y horizontal, como se muestra en la Figura 3.5, para un punto de interés.

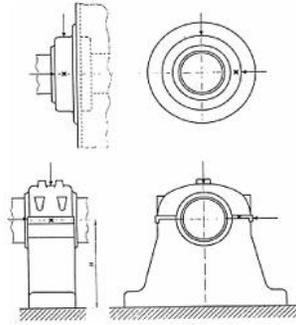


Figura 3.5. Puntos de medición, Norma ISO 10816.

Fuente: [41].

Sin embargo, se deben de tomar en cuenta algunos factores y limitantes que se presentan debido a las características únicas del equipo donde se instalará, entre las cuales están:

1. Los acelerómetros se deben colocar de manera que queden de forma radial con respecto a los ejes de los equipos a los cuales se les va a realizar la medición.
2. Los acelerómetros ubicados de forma vertical y horizontal se deben colocar de manera que queden a 90° uno con respecto al otro.
3. Los acelerómetros se deben colocar en una superficie robusta, de tal manera que se evite la interferencia de elementos que puedan impedir una adecuada obtención de los datos.

Los acelerómetros utilizados se colocaron como se muestra en la Figura 3.6. Los resultados muestran que la mejor ubicación le pertenece al acelerómetro que está sobre el bloque que cubre al rodamiento. Debido a la configuración del banco de prueba no se pudo colocar un acelerómetro por debajo de la carcasa del rodamiento, que sin duda es el lugar que genera mayor potencia en la señal porque es la ubicación más cercana a la zona de carga del rodamiento.

La instalación de acelerómetros requiere un montaje rígido. Estos dispositivos están diseñados para ser montados de forma temporal con adhesivos o imanes y de forma permanente con pernos roscados. En el montaje de estos dispositivos, es importante la sujeción mecánica

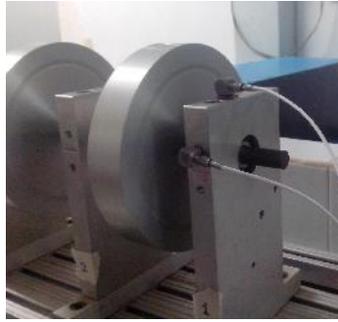


Figura 3.6. Montaje de los acelerómetros utilizados.

de los mismos, así como una buena disposición, embridado y protección de los cables para evitar daños. También hay que tener en cuenta el correcto par de apriete para asegurar buenas conexiones de los bornes. Por último, se recomienda la limpieza de las superficies donde se instale el equipo de instrumentación para evitar lecturas erróneas [42].

De acuerdo con la configuración del acelerómetro seleccionado, el sensor podrá adherirse a la superficie de prueba usando cualquier lado disponible con cera, adhesivo o cinta en función de la frecuencia a medir buscando un montaje rígido. La superficie de montaje principal también tiene un agujero roscado que es compatible con los accesorios de montaje: una base de montaje adhesiva y una base de montaje magnética.

En este caso, para montar los acelerómetros utilizados se usó cera, ya que el montaje con base magnética fue descartado porque los bloques que soportan los rodamientos fueron maquinados en aluminio, además el montaje con adhesivo es un medio simple y efectivo para montar sensores de vibración con sensibilidad de alta frecuencia limitada (2.5 a 4 kHz) como se muestra en la Tabla 3.1.

Chasis cDAQ-9162

El dispositivo cDAQ-9162 es un chasis USB CompactDAQ de National Instruments (NI) alimentado por bus USB, de una ranura, diseñado para medición de sistemas portátiles con pequeños sensores. Este chasis es compatible con más de 50 módulos específicos de medición NI de la serie C (entre ellos NI 9234) para crear salidas analógicas, entrada/salida (E/S) digital

Tabla 3.1. Opciones de montaje del sensor.

Método	Límite de frecuencia (Hz)
Portátil	500
Imantado	2,000
Adhesivo	2,500 - 4,000
Resina	5,000
Permanente (perno)	6,000 - 10,000

o un sistema de medición de contador/temporizador como se observa en la Figura 3.7. Todos los módulos son automáticamente detectados y sincronizados por el reloj de hardware en el plano posterior del chasis [43], en el Anexo C se presentan las características técnicas correspondientes a este dispositivo.

El chasis CompactDAQ controla el tiempo, la sincronización y la transferencia de datos entre los módulos de la Serie C y un host externo. Cada módulo de la Serie C contiene un acondicionamiento de señal específico de medición para conectarse directamente a una serie de sensores y señales con opciones de aislamiento y soporte para amplios rangos de temperatura para satisfacer una variedad de aplicaciones y necesidades ambientales.



Figura 3.7. Chasis NI USB 9162.

Tarjeta de adquisición de señales (Módulo NI-9234)

La tarjeta de adquisición actúa como interfaz entre la computadora y las señales vibratorias del experimento. Se digitaliza las señales análogas de entrada para que la computadora pueda interpretarlas y procesarlas. Los componentes principales de un dispositivo de adquisición de señales utilizados son los circuitos de acondicionamiento de señal, conversión analógica-digital (ADC) y bus de la computadora.

El módulo NI 9234, es un dispositivo de adquisición de señal dinámica con cuatro canales de la Serie C para hacer mediciones con sensores IEPE (Piezoeléctrico Electrónico Integrado) de alta precisión. Este módulo ofrece 102 dB de rango dinámico e incorpora el acondicionamiento de señal IEPE a una corriente constante de 2 mA para acelerómetros y micrófonos. Los cuatro canales de entrada operan simultáneamente a velocidades de hasta 51.2 kS/s (kilomuestras/segundo) con una resolución de 24 bits. Estas muestras se transfieren a una computadora a través de un bus en el que la señal original se reconstruye a partir de las muestras en el software [44]. El bus de la computadora sirve como interfaz de comunicación entre la tarjeta de adquisición y la misma computadora para declarar instrucciones y transferir los datos medidos como se observa en la Figura 3.8.

Además, el módulo incluye filtros antialiasing que se ajustan automáticamente a la tasa de muestreo. Este módulo es compatible con el chasis USB de un solo módulo y hardware NI CompactDAQ. El NI 9234 es ideal para una amplia variedad de aplicaciones portátiles, los datos técnicos de este módulo se encuentran en el Anexo D.



Figura 3.8. Tarjeta de adquisición NI 9234.

Configuración de la tarjeta de adquisición

Antes de utilizar una tarjeta de adquisición de datos, debe confirmar que el software puede comunicarse con el tablero mediante la configuración de los dispositivos. Measurement & Automation Explorer (MAX) es un explorador que permite tener acceso al software y a la configuración de dispositivos de National Instruments (NI) que se encuentran conectados. Entre las principales funciones de MAX se encuentran [45]:

- Configurar el hardware y software de NI.
- Crear y editar canales, tareas, interfaces, escalas e instrumentos virtuales.
- Ejecutar el diagnóstico del sistema.
- Detectar los dispositivos e instrumentos conectados al sistema.
- Actualizar el software de NI.

Con la instalación del software MAX, también se instala el driver de la tarjeta a utilizar. Además de las herramientas estándar, MAX puede exponer herramientas específicas para configurar, diagnosticar o probar el sistema, según los productos de NI que se instalen. La ventana de bienvenida de este software se presenta en la Figura 3.9.



Figura 3.9. Ventana de presentación “MAX”.

Después de conectar la tarjeta y ejecutar el software MAX, en la sección “Devices and Interfaces” se desplegarán los dispositivos que se han guardado con anterioridad y los que se

encuentran conectados en ese momento. Si la instalación de la tarjeta a utilizar fue exitosa aparecerá un ícono en verde con el modelo de la tarjeta y seguido del nombre que el programa le ha asignado automáticamente (por lo general, “Dev#”). Este nombre puede ser modificado y es muy importante considerarlo porque será el identificador de la tarjeta para cualquier programa que busque acceder a ella. Para este caso, la tarjeta fue nombrada como “Acel”. En la Figura 3.10 se presenta la ventana que ayuda hacer los ajustes necesarios y que además proporciona las características de la tarjeta seleccionada.

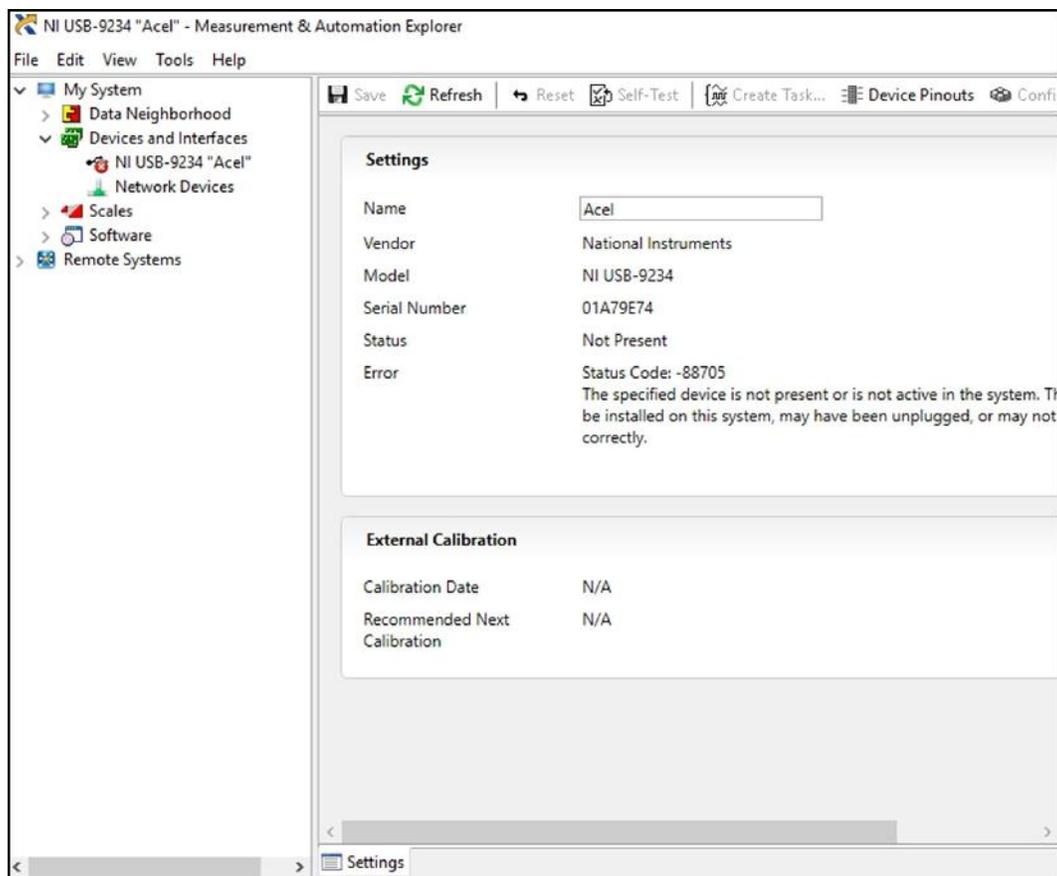


Figura 3.10. Ventana principal del software “MAX”.

Finalmente, en la Figura 3.11 se observa el conexionado completo del sistema de adquisición, en donde se aprecian los acelerómetros montados en el banco de pruebas. Esta configuración se ha utilizado en pruebas experimentales realizadas.



Figura 3.11. SAD conectado al banco de pruebas.

3.3 Implementación del software desarrollado

En esta sección se dará una explicación del software desarrollado en MATLAB/Simulink para el análisis de vibraciones describiendo cada uno de los bloques y funciones que lo componen. Este software permite realizar un completo análisis de vibraciones, como se observa en la Figura 3.12, cuenta principalmente con tres opciones:

1. Adquisición de datos, permite la configuración de la tarjeta de adquisición, los acelerómetros y parámetros de muestreo.
2. Procesamiento de datos, en esta sección se procesan los datos adquiridos previamente mediante la Transformada de Fourier de Tiempo Corto.
3. Diagnóstico, en este apartado se evalúa la severidad de las fallas en los rodamientos de acuerdo con los grados de severidad de la Norma ISO 10816.

Para cada una de las opciones disponibles se generan ventanas emergentes en que las que el usuario puede interactuar fácilmente con el software para ingresar los valores de entrada y visualizar los resultados de manera gráfica. Para el correcto manejo del software se dispone de información de ayuda en cada una de las ventanas emergentes, además de un manual de usuario. A continuación, se describen de manera detallada las principales secciones del software.



Figura 3.12. Ventana principal del software “Análisis de vibraciones”.

3.3.1 Menú: “Adquisición de datos”

Para realizar el análisis de vibraciones y conocer la condición de los componentes es imprescindible contar con bases de datos de señales de vibración adquiridas durante el funcionamiento de la máquina de interés. Por ello, la opción “Adquisición de datos” del software desarrollado (ver Figura 3.12), se encarga de esta etapa. En la Figura 3.13 se presenta la ventana principal de este bloque, en esta ventana se visualiza los canales disponibles para la adquisición de las señales, en este caso sólo aparecen 4 canales debido a que la tarjeta utilizada solo cuenta con 4 entradas, también se observan los ejes en donde se podrán visualizar las señales en el dominio del tiempo. En la parte inferior izquierda se presentan opciones para guardar las bases de datos adquiridas. La opción “INFO” describe de manera breve las características del componentes del sistema de adquisición de datos utilizados. Para un buen funcionamiento de este bloque, la tarjeta debe estar activa y configurada con el software MAX como se describió en la sección 3.2.2. La opción “Configuración” solicita los parámetros de entrada para configurar la tarjeta de adquisición y los acelerómetros como se muestra en la Figura 3.14.

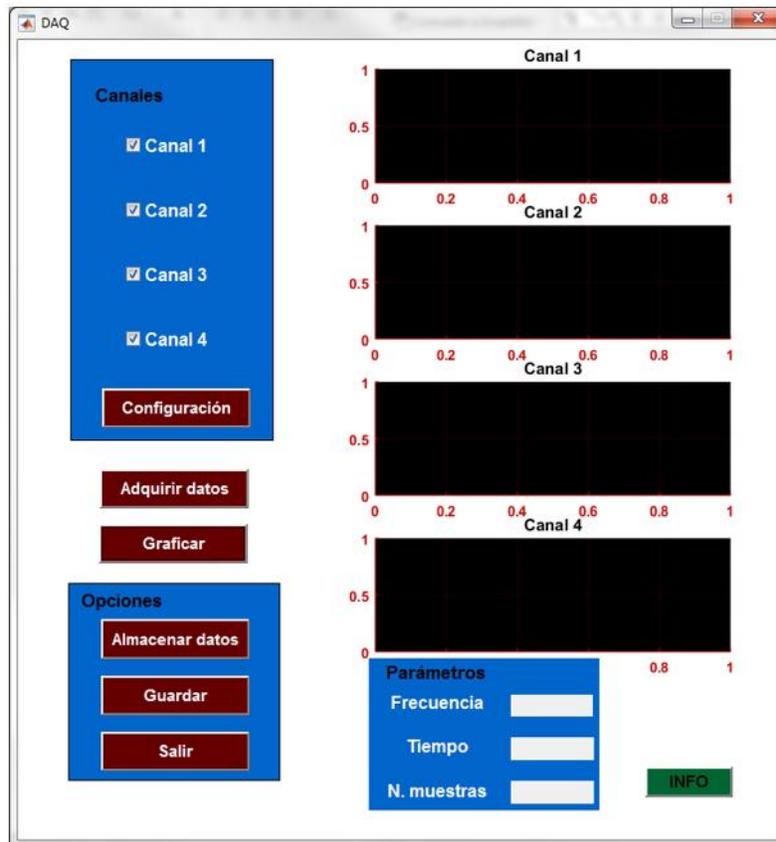


Figura 3.13. Ventana principal del menú “Adquisición de datos”.

De acuerdo con el número de canales ingresado se activarán cuadros para capturar la sensibilidad de los acelerómetros instalados, esta información se encuentra en la hoja técnica del acelerómetro. Otros datos de entrada son la tasa de muestreo (muestras/s) y el tiempo de muestreo (en segundos), estos dependen del número de muestras que se necesiten adquirir para el posterior análisis. Después de detectar y configurar la tarjeta de adquisición y los acelerómetros, el sistema está preparado para iniciar la adquisición de los datos y almacenarlos temporalmente, o en otro caso guardarlos en formato .txt para utilizarlos en una sesión posterior.

Para una mejor interacción entre el software y el usuario, en las diferentes ventanas emergentes aparecen mensajes de advertencia o avisos cuando los parámetros ingresados están fuera del rango válido o los datos no son válidos, por ejemplo en la Figura 3.15 se presenta un mensaje de error al momento de configurar 5 sensores siendo el máximo de 4 los que se pueden conectar a la tarjeta.

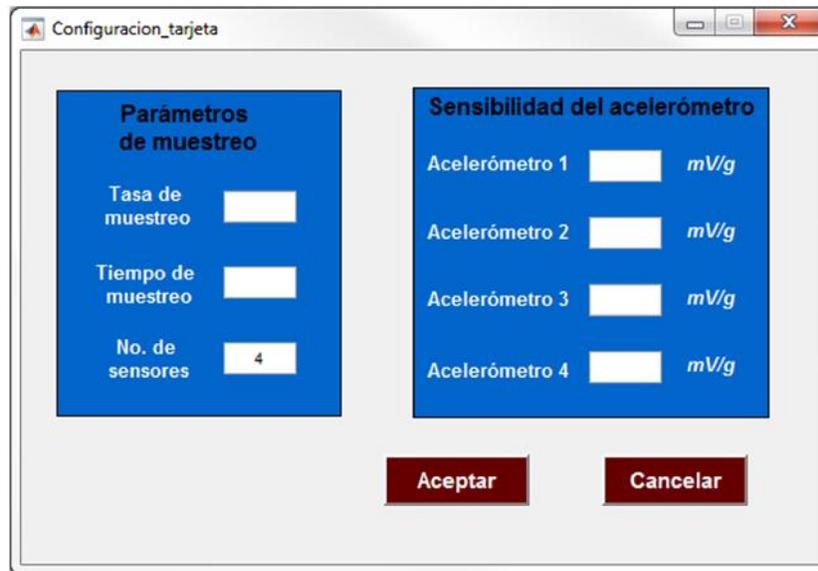


Figura 3.14. Ventana emergente para configurar la tarjeta y acelerómetros.



Figura 3.15. Mensaje de “Error” durante la entrada de parámetros.

3.3.2 Menú: “Procesamiento de la señal”

La adquisición de datos siempre ha sido la parte fundamental del análisis de vibraciones. Sin embargo, no es suficiente con sólo recoger datos. Los datos adquiridos tienen que ser procesados, analizados e interpretados para conocer la condición real de los componentes analizados. El software diseñado contiene una sección específicamente para esta función llamada “Procesamiento” como se observa en la Figura 3.12. Al seleccionar esta opción emerge una nueva ventana con dos menús que permiten cargar bases de datos y seleccionar la técnica de procesamiento como se muestra en la Figura 3.16.



Figura 3.16. Menús de la ventana procesamiento de datos.

Para el procesamiento de los datos, el software cuenta con dos técnicas, la Transformada Rápida de Fourier (FFT) y la Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT). En la Figura 3.17, se observa la ventana para el procesamiento con la FFT. Este apartado servirá cuando se analicen datos adquiridos de una máquina trabajando a velocidad constante, solo bastará cargar los datos y seleccionar el canal que se desea analizar (sólo uno). Después de cargar los datos al seleccionar el botón “Calcular FFT” se ejecutará un algoritmo que permite calcular el espectro de frecuencia de la señal.

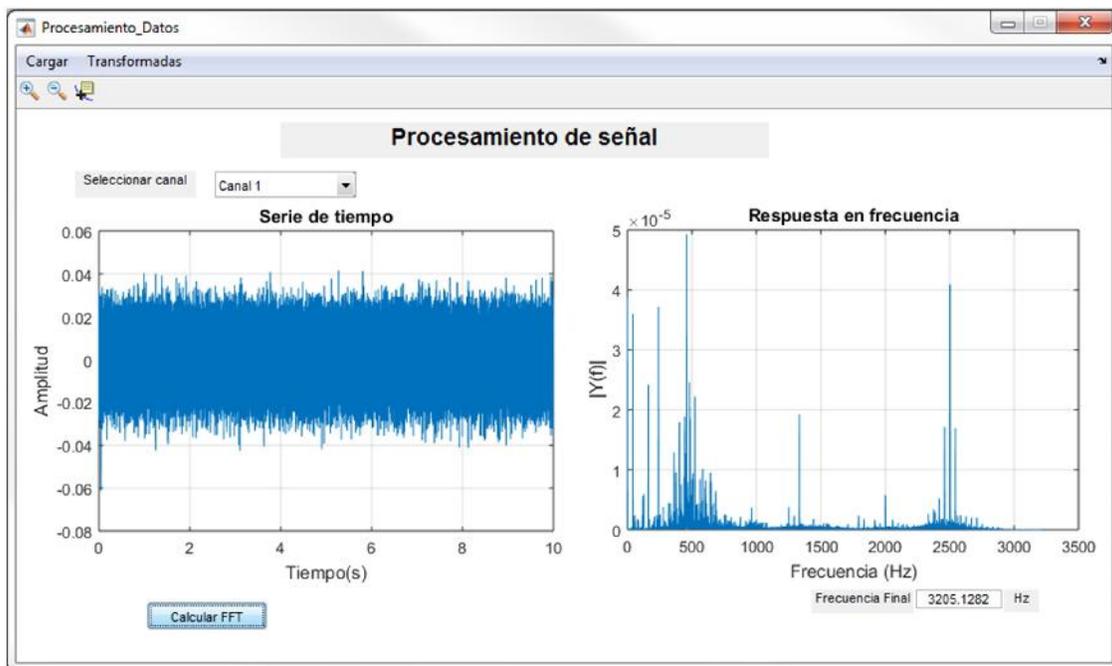


Figura 3.17. Ventana de procesamiento con FFT.

Cuando se selecciona la técnica de la Transformada de Fourier de Tiempo Corto para dar información de la señal en el dominio tiempo-frecuencia por medio de espectrogramas, por lo tanto, es necesario ingresar parámetros como son: el tamaño y el tipo de ventana a utilizar (rectangular, triangular, Hanning, Hamming y Blackman) como se mencionó en la sección

2.4.2, el traslape de las ventanas, la frecuencia de muestreo, entre otros, que el mismo software solicitará al usuario durante el proceso como se muestra en la Figura 3.18.

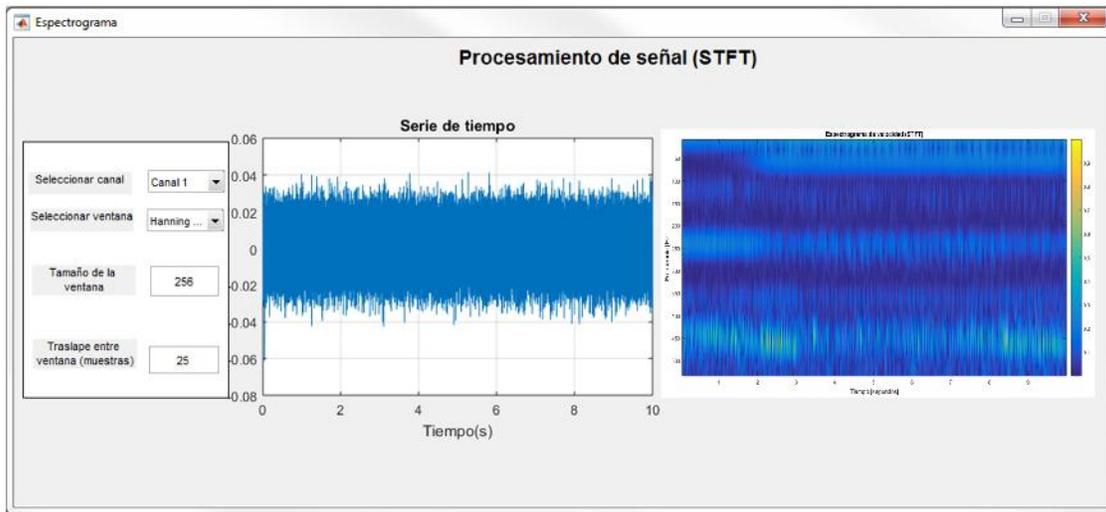


Figura 3.18. Ventana de procesamiento con STFT.

Además, es importante mencionar que esta técnica realmente aplica el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier en pequeños segmentos de la señal discreta, por lo tanto implica dos relaciones importantes.

1. La primera relación vincula la frecuencia más alta que puede ser analizada (F_{max}) y la frecuencia de muestreo (f_s) conocido como teorema de Nyquist.
2. La segunda relación vincula la resolución de frecuencia (Δf) al tiempo total de adquisición, que está relacionada con la frecuencia de muestreo (f_s) y el número de muestras en la FFT (N)

$$\Delta f = \frac{f_s}{N}. \quad (3.1)$$

Los datos adquiridos en las pruebas de las diferentes condiciones de falla fueron procesados con los siguientes parámetros:

- Frecuencia de muestreo = 6 000 muestras por segundo
- Tiempo = 10 s

- Ventana: Hanning
- Tamaño de la ventana = 256 muestras
- Traslape = 10 % (del tamaño de la ventana)

3.4 Propuestas de análisis de fallas

En este trabajo se consideraron las fallas mecánicas en los elementos de rodamientos por ser las más frecuentes y críticas. Para generar este tipo de fallas, se produjeron daños con diferentes grados de severidad en varios rodamientos. Las pruebas se realizaron con los siguientes defectos:

- Rodamiento con falla puntual en la pista externa
- Rodamiento con falla puntual en la pista interna
- Rodamiento con falla puntual en el elemento rodante
- Rodamiento con falla puntual en la jaula

Para realizar el análisis de vibraciones en el banco de pruebas se utilizaron rodamientos de ranura profunda de la marca URB modelo 1621 2RS como se muestra en la Figura 3.19.



Figura 3.19. Rodamiento URB modelo 1621 2RS.

En la Tabla 3.2 se presentan las principales características de los rodamientos utilizados, entre estos se encuentran las principales dimensiones geométricas y otros parámetros mecánicos.

Tabla 3.2. *Características del rodamiento 1621 2RS URB.*

Parámetro	Magnitud
D_j	34,925 mm
D_b	5,556 mm
β	0 °
Número de elementos rodantes (n)	7
Masa	0,049 kg
Capacidad de carga dinámica básica	7,64 kN
Capacidad de carga estática	3,72 kN

Para este rodamiento en particular, a partir de los datos de la Tabla 3.2 y de las ecuaciones 2.13 - 2.16 se calculan las frecuencias de falla características de cada elemento del rodamiento. En la Tabla 3.3 se presentan las frecuencias de fallas y sus múltiplos (4 primeros) expresadas en función de la frecuencia de rotación de la máquina (f_r). Estas frecuencias de falla teóricas son de gran referencia porque indican el número de veces que un elemento rodante pasa por un punto de de la pista interior o exterior.

Tabla 3.3. *Frecuencias características de falla en función de f_r .*

k	Magnitud			
	f_{fpe}	f_{fpi}	f_{fj}	f_{fb}
1	3,023	3,977	0,431	0,067
2	6,046	7,954	0,862	0,134
3	9,069	11,931	1,293	0,201
4	12,092	15,908	1,724	0,268
5	15,115	19,885	2,155	0,335

3.5 Equipo de medición de vibraciones

Para validar experimentalmente los resultados obtenidos con el software desarrollado, se utilizó el analizador de vibraciones Fluke 810 desarrollado por la marca comercial Fluke®, esta herramienta de diagnóstico ayuda a identificar problemas mecánicos mediante el análisis de vibraciones para tomar decisiones durante el mantenimiento. Además, permite identificar y comprender las principales causas de fallas. El analizador muestra el diagnóstico obtenido en cada prueba, la gravedad de la falla y algunas recomendaciones de reparación. En esta tesis el analizador servirá para comparar y validar los resultados obtenidos al aplicar la metodología propuesta. Para mayor información consultar las especificaciones técnicas en el Anexo E.

En la Tabla 3.4 se enlista los principales aditamentos del analizador de vibraciones Fluke 810 (ver Figura 3.20) utilizados en las pruebas realizadas. El Viewer Software permite realizar funciones básicas desde una computadora, entre los cuales destacan:

- Importar y exportar la configuración de máquinas
- Ver gráficos de picos de referencia, espectros de vibraciones y formas de la señal en el tiempo.

Tabla 3.4. *Principales elementos del analizador de vibraciones.*

No	Elemento
1	Analizador de vibraciones
2	Sensor triaxial
3	Montaje con imán del sensor
4	Cable de conexión del sensor
5	Tacómetro
6	Cable mini USB
7	CD-ROM del Viewer Software



Figura 3.20. Elementos del analizador de vibraciones Fluke® 810.

De manera general, el análisis de cualquier máquina con el analizador de vibraciones se divide en tres etapas fundamentales:

- Configuración de la máquina. Para obtener el análisis y diagnóstico de la máquina es necesario proveer información del diseño y de los componentes de esta. Entre los principales parámetros a introducir están los siguientes:
 - Tipo de motor y régimen de velocidad
 - Tipo de rodamientos
 - Tipo de acoplamiento y transmisión
 - Tipo y características de la máquina accionada

- **Medición.** Después de configurar la máquina y antes de iniciar las mediciones es necesario configurar los puntos de medición lo más cercano a los rodamientos. Posteriormente se realizan las mediciones en cada uno de los puntos.
- **Diagnóstico.** Después de realizar las mediciones, el analizador genera un informe del diagnóstico identificando las condiciones anormales y las fallas mecánicas identificadas. En este informe se indica la gravedad de la falla basada en la intensidad de la vibración en el momento de la medición. En general, la escala puede interpretarse de la siguiente manera:
 - **Baja,** no se recomienda ninguna acción de reparación. Monitorice la máquina y vuelva a hacer pruebas después del mantenimiento regular para verificar que éste se llevó a cabo correctamente.
 - **Moderada,** (meses, incluso hasta un año): No es necesaria ninguna acción de reparación inmediata. Aumente la frecuencia de las mediciones y revise la disponibilidad de piezas de repuesto.
 - **Grave,** (semanas): es posible que se necesite una acción de reparación antes del siguiente tiempo de parada planificado. Es posible que haya otras evidencias físicas de la falla en términos de ruido o temperaturas más altas de los rodamientos. vuelva a probar la máquina dentro de un período de tiempo corto para confirmar los hallazgos.
 - **Extrema,** (días): es necesario una acción de reparación inmediata. Probablemente hay otras evidencias físicas de la falla en términos de ruido o temperatura de los rodamientos más altas.

Además de indicar la gravedad de la falla, el analizador identifica el tipo de fallo y recomienda posibles reparaciones. Las fallas se identifican comparando los datos de vibración medidos con un conjunto de normas. Adicionalmente, el analizador guarda los datos medidos de la vibración y los presenta en el dominio del tiempo. Después el analizador los transforma en un gráfico en el dominio de la frecuencia (espectro) en el

que se representa gráficamente la amplitud de la señal de vibración con la frecuencia o las revoluciones por minuto de la máquina.

Las fallas mecánicas se detectan a determinadas velocidades de funcionamiento o frecuencias del espectro. Los algoritmos identifican o “referencian” los picos con una amplitud de vibración anormal (picos de referencia) en el espectro de vibraciones y después diagnostican la falla mecánica y la gravedad. En máquinas en las que el analizador no detecte fallas, se mostrará los datos de espectro pero sin picos de referencia.

Finalmente, en la Figura 3.21 se presenta el montaje y la conexión completa del banco de pruebas y sus respectivos aditamentos. Además, se observan el analizador de vibraciones Fluke® 810 que sirvió para validar los resultados, un medidor de aislamiento y una pistola termográfica ambos de la marca Fluke®. El medidor de aislamiento es un equipo que permite conocer la condición del aislamiento de los devanados de las máquinas eléctricas, es una de las pruebas previas a un análisis completo, ya que si el aislamiento está desgastado o dañado, el requerirá de mantenimiento a corto plazo. Por su parte, el monitoreo de la temperatura de los rodamientos o de la máquina sirve como complemento para determinar el diagnóstico del análisis de vibraciones, como bien se sabe, la temperatura de los rodamientos aumenta con la presencia de fallas en alguno de sus elementos.



Figura 3.21. Banco de pruebas y aditamentos utilizado en la pruebas experimentales.

Capítulo 4

Validación de resultados obtenidos

Es importante que toda investigación tenga aplicación en el mundo real ya que se corre el riesgo de que la investigación avance por un camino que diverja con el seguido por la realidad práctica, lo que podría dificultar la aplicación de los resultados y conclusión obtenidas en el proyecto. Por tal motivo éste trabajo de investigación es sometido a pruebas de laboratorio para validar los resultados de las simulaciones. En este capítulo se presenta la validación de los resultados obtenidos con el software “Análisis de vibraciones” en los diferentes casos de estudio. Primeramente, se presentan los resultados de las pruebas a velocidad de operación constante donde se implementa la Transformada Rápida de Fourier. Enseguida, se presentan los resultados del análisis espectrográfico de las pruebas a velocidad variable por medio de la Transformada de Fourier de Tiempo Corto. Por último, los resultados se validan con los resultados obtenidos por el analizador vibraciones comercial de la marca Fluke[®] 810.

Para la validación del software se proponen los siguientes casos de estudio (con velocidad constante y variable), de los cuales el análisis del rodamiento sano servirá como referencia para comparar los resultados de los rodamientos con fallas.

- Rodamiento sano
- Rodamiento con falla en la pista externa
- Rodamiento con falla en la jaula

Para cada caso de estudio, se produjeron fallas específicas en los componentes del rodamiento. El rodamiento con falla fue ubicado únicamente en el soporte del extremo libre del banco de prueba. Las mediciones se realizaron en las orientaciones radial y tangencial del eje del banco de pruebas que corresponde a la posición vertical y horizontal respectivamente, de los acelerómetros montados sobre en el bloque que cubre el rodamiento. Algo importante de hacer notar es que la adquisición de las muestras (datos) tiene que iniciarse previamente al arranque del banco de pruebas ya que es necesario evitar el desfase existente entre el inicio de la adquisición de datos por parte del programa y el inicio de la ejecución por parte del banco de pruebas, puesto que ambos hay que iniciarlos de forma manual. Por tanto, se puede programar la frecuencia de muestreo y el tiempo de muestreo desde el software en la sección de configuración, para adaptarse y muestrear perfectamente la señal durante cada prueba realizada.

Además, se debe señalar de que antes de tomar cualquier medida, durante un cierto tiempo, se ha mantenido la máquina funcionando a una velocidad aproximada de 50 Hz (3000 rpm) con el fin de que todos los elementos del banco de pruebas se encuentren en condiciones óptimas de funcionamiento.

4.1 Análisis de resultados a velocidad constante

Después de adquirir las señales a velocidad constante, los datos se analizaron en el dominio de la frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier por ser la técnica convencional para señales estacionarias. En las siguientes secciones se presenta el análisis de los resultados para cada caso de estudio. En cada caso, se compararon los resultados obtenidos en el dominio del tiempo y de la frecuencia, en ocasiones fue necesario detallar estos gráficos para apreciar de forma clara y el comportamiento de las gráficas bajo los efectos de la falla. También presenta la frecuencia de falla y sus primeros 4 armónicas para determinar el estado del rodamiento de acuerdo con el espectro de frecuencias. De manera general, se puede concluir que, cuando el rodamiento está sano, la única frecuencia significativa en la señal

es la de la velocidad de giro, es decir, la 1x. Cuando aparece una falla, la amplitud de esta frecuencia aumenta, y además se hacen significativos las armónicas de la velocidad de giro. El aumento de estas frecuencias adquiere mayor importancia cuanto mayor es el tamaño del defecto. Estos resultados confirman que la energía de ciertas armónicas de la velocidad de giro aumentan con la presencia de un defecto.

4.1.1 Análisis de rodamiento sano

Los rodamientos en buen estado generan vibración aleatoria, producto de la interacción entre sus partes constituyentes, esta prueba sirve por lo tanto, para tener una referencia de los niveles de vibración que se pueden esperar de un rodamiento sano. Las mediciones fueron realizadas en la dirección vertical y horizontal a una velocidad de giro de 3200 rpm. En la Figura 4.1 se observa el montaje del rodamiento sano en el lado libre del banco de pruebas, posterior a esto se mantuvo en operación durante 20 minutos para que todos los elementos del banco se reajustaran.

Como parte de los resultados obtenidos, en la Figura 4.2 se presenta el comportamiento de la señal en el dominio del tiempo, en esta gráfica se observa el carácter aleatorio predominante, sin variaciones considerables en la amplitud de la señal como respuesta de la velocidad constante y de la ausencia de fallas.

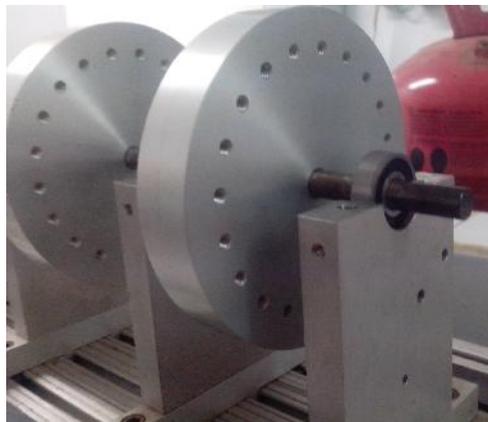
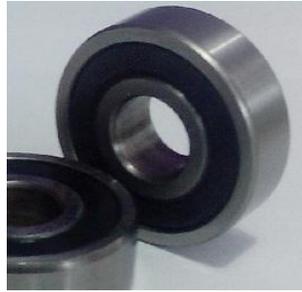
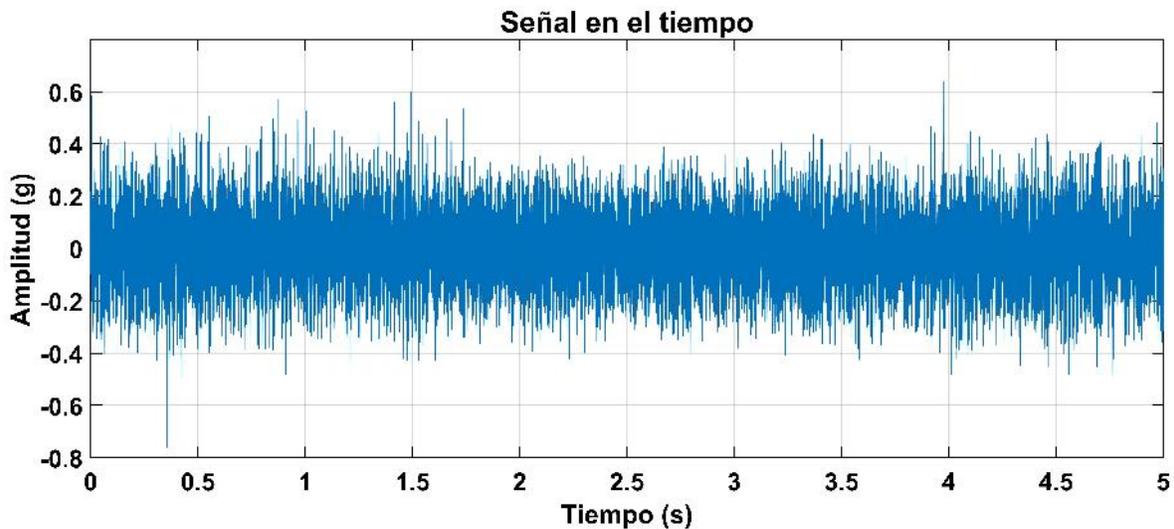


Figura 4.1. Montaje del rodamiento sano.



(a) Rodamiento sano 1621 2RS URB.



(b) Señal en el tiempo, dirección vertical.

Figura 4.2. Análisis de rodamiento sin fallas.

En el espectro de vibración que se muestra en la Figura 4.3, se puede observar que a pesar de que el rodamiento se encuentra en óptimas condiciones, genera un cierto nivel de vibración con picos en algunas frecuencias (incluso en frecuencias de falla), en algunos casos esto puede ser producto de las imperfecciones de diseño, manufactura y variación de la rigidez del sistema cuando pasan los elementos rodantes por la zona de carga. Sin embargo, la amplitud máxima se encuentra por debajo de 1 mm/s , que de acuerdo con la norma ISO 10816, los rodamientos no presentan ningún tipo de daño y la máquina puede seguir operando. En condiciones reales, al monitorear los aerogeneradores estos tipos de espectros puede ser resultado de del ruido que contiene la señal o de alguna variación en la operación del sistema que produzca alguna perturbación.

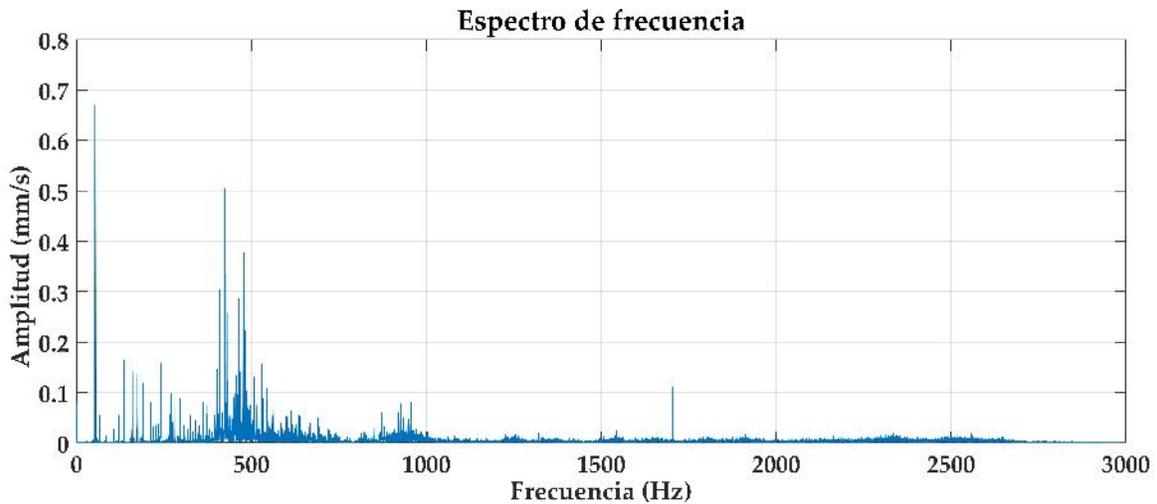


Figura 4.3. Espectro de frecuencias de un rodamiento sano, dirección vertical.

Además, se puede observar que en la zona de alta frecuencia está ausente de bandas espectrales. En la Figura 4.4 se observa con detalle el espectro de vibración a bajas frecuencias (por debajo de los 500 Hz) con amplitudes menores a la unidad.

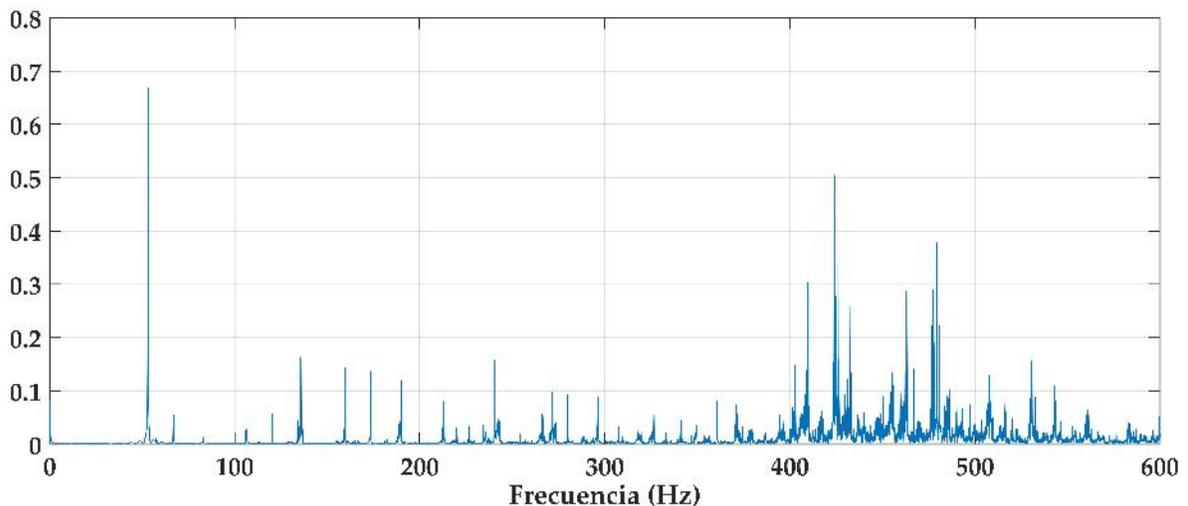


Figura 4.4. Espectro en baja frecuencia de un rodamiento sano, dirección vertical.

En la Figura 4.5 se presentan los espectros de frecuencias obtenidos con el analizador comercial, cada fila corresponde a una orientación del acelerómetro triaxial que utiliza el analizador, de forma descendente se presenta las gráficas del eje axial, luego el tangencial y por último el radial cada uno con espectro en alta y baja frecuencia. Para nuestro caso, el eje vertical corresponde al eje radial y el horizontal al tangencial. Claramente se observa que todas las

gráficas presentan picos de baja amplitud al igual que el espectro obtenido con el software “Analizador de vibraciones” y de igual manera el analizador genera un índice de gravedad de 10/100, que corresponde a un estado normal dentro de su escala de gravedad.

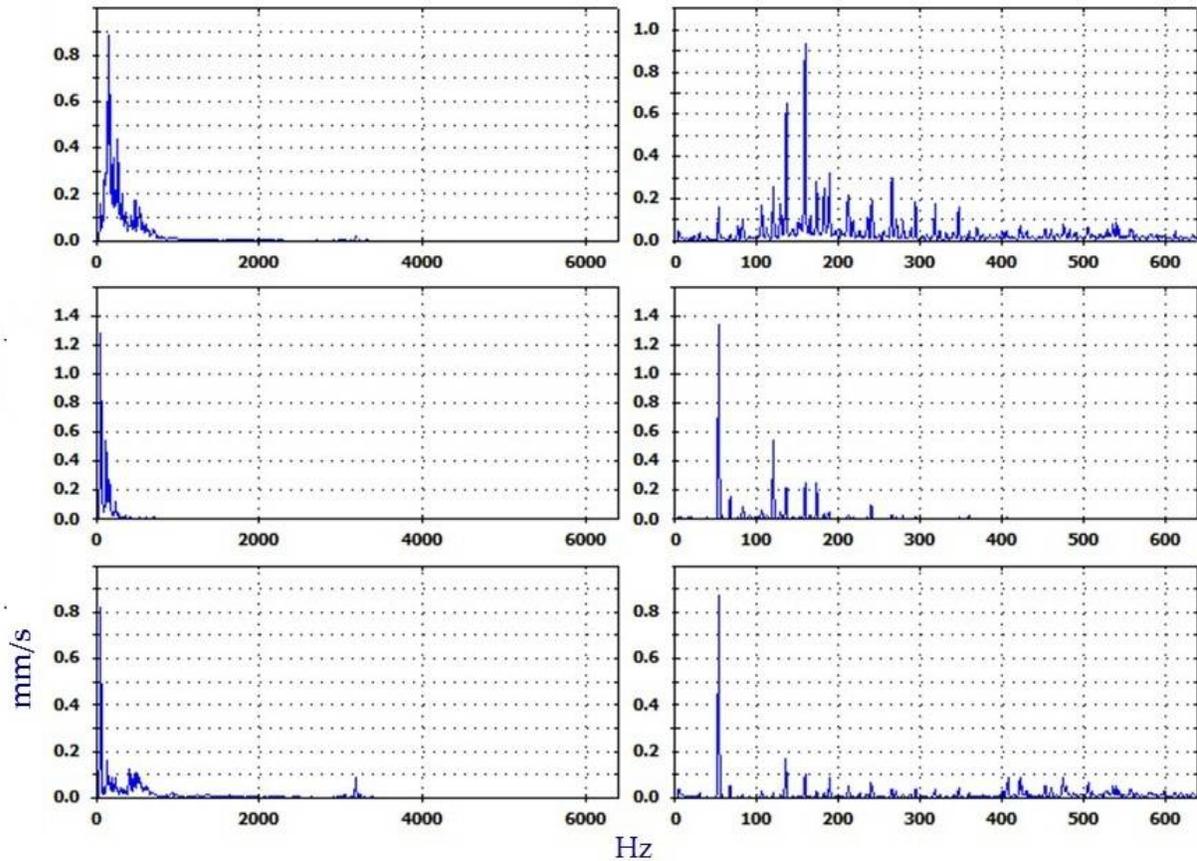
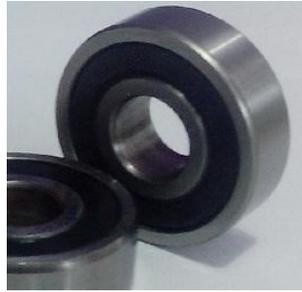
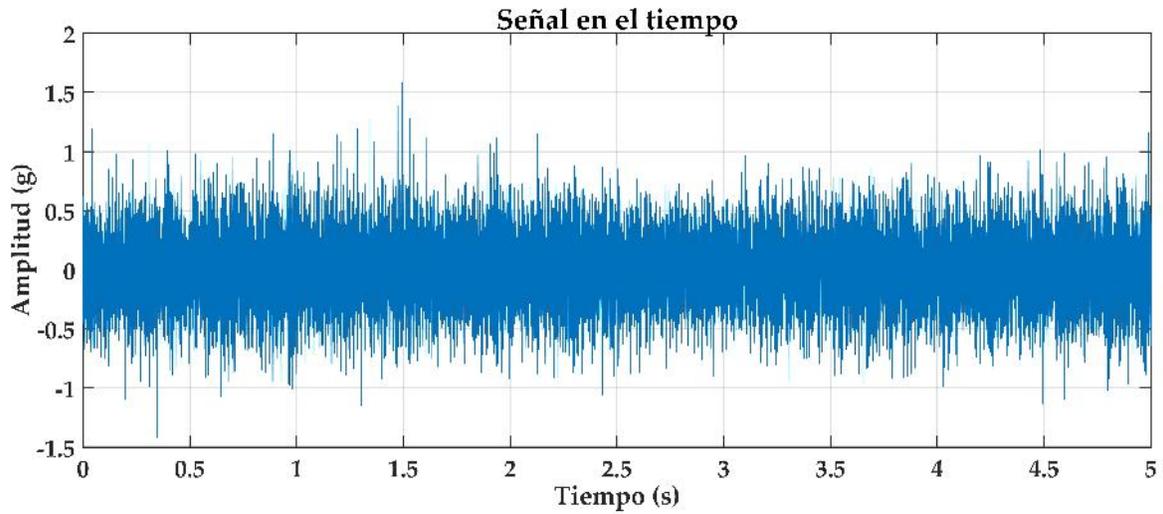


Figura 4.5. Espectro obtenido por el analizador de vibraciones Fluke® 810.

Con respecto a la medición horizontal, en general se puede observar lo mismo, excepto por una pequeña componente periódica como se observa en la Figura 4.6. En cuanto al espectro es muy similar al de la dirección vertical, por tanto sólo se muestra el espectro de vibración a bajas frecuencias (ver Figura 4.7) en el que se observa que tiene menos componentes que en la dirección vertical.



(a) Rodamiento sano



(b) Señal en el tiempo, dirección horizontal

Figura 4.6. Análisis con rodamiento sano, dirección horizontal

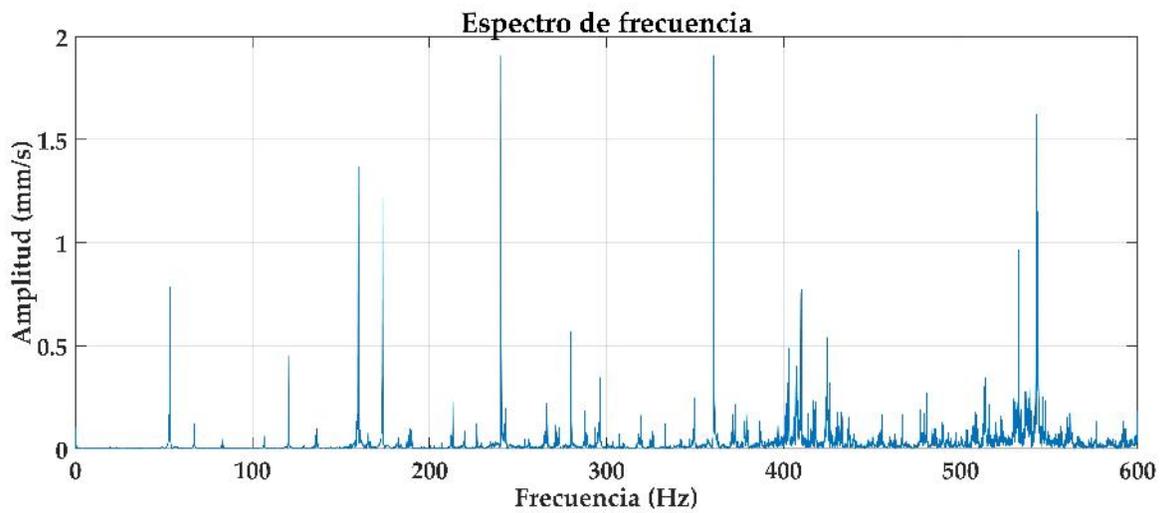


Figura 4.7. Espectro de vibración a baja frecuencia de un rodamiento sano, dirección horizontal.

4.1.2 Análisis de rodamientos con falla en la pista externa

Para el caso del análisis de un rodamiento con falla en la pista externa, se montó un rodamiento con un agujero en la pista externa como se muestra en la Figura 4.8, posteriormente se adquirieron los datos con una frecuencia de muestreo de 6000 muestras/segundo (este parámetro se utilizó en todas las pruebas) a una frecuencia de rotación de 3200 rpm obteniendo la forma de onda mostrada en la Figura 4.9).

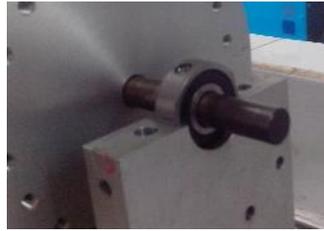
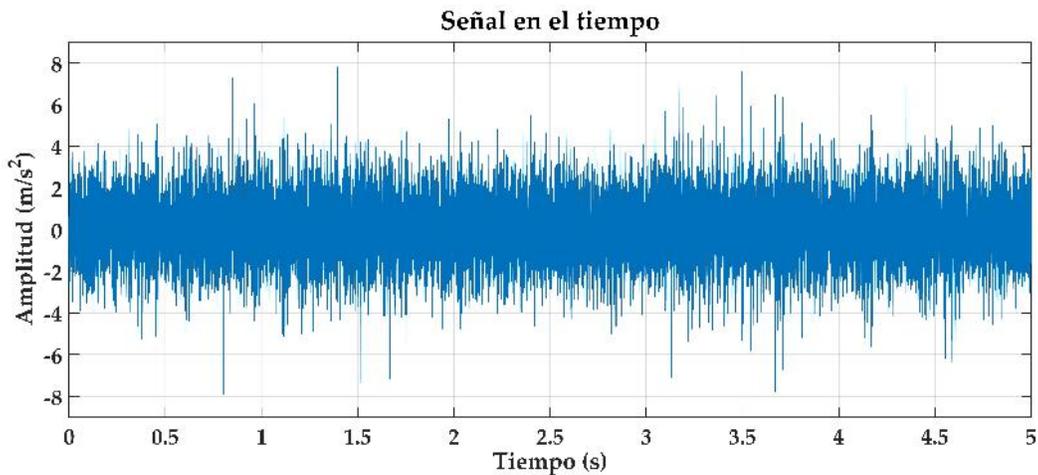


Figura 4.8. Montaje del rodamiento con falla en pista externa.



(a) Rodamiento 1621 2RS
URB con falla

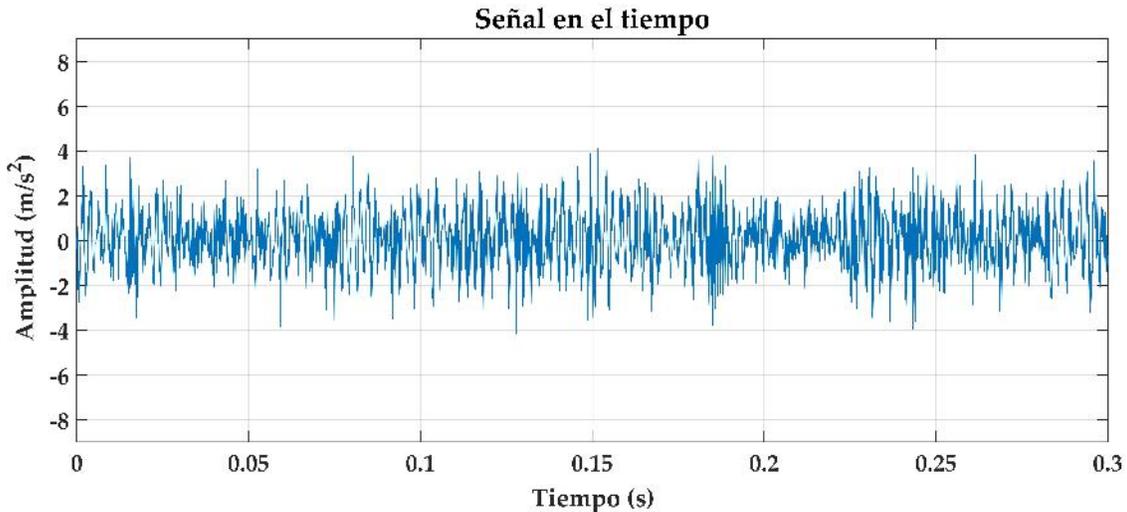


(b) Señal en el tiempo, dirección vertical.

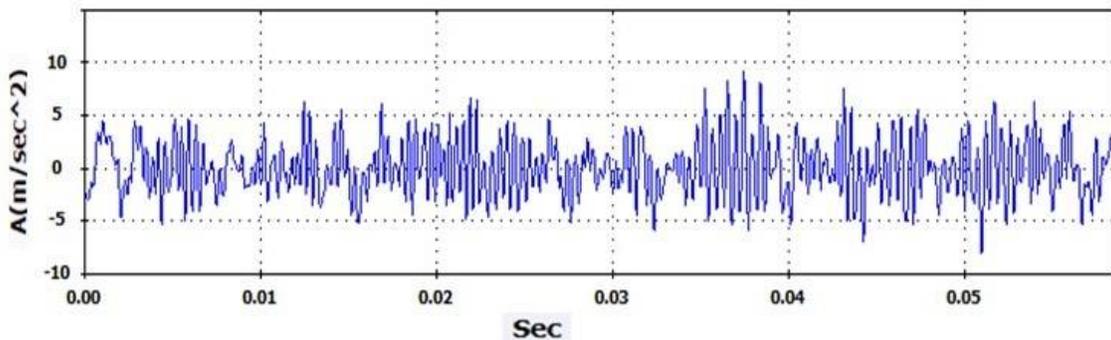
Figura 4.9. Análisis de falla en pista externa.

Capítulo 4. Validación de resultados obtenidos

Al observar en detalle la señal vibratoria del rodamiento con falla en la pista exterior en el dominio del tiempo mostrada en la Figura 4.10, se puede ver que ambas gráficas tienen el mismo comportamiento con impulsos de amplitud similar consecuencia de la falla, también se puede ver que guardan cierta periodicidad.



(a) Obtenido con el software “Analizador de vibraciones”.



(b) Obtenido con el analizador comercial.

Figura 4.10. Señal en detalle de un rodamiento con falla en pista externa a velocidad constante.

Del análisis de la frecuencia se obtiene el espectro mostrado en la Figura 4.11 y 4.12 para un rodamiento con falla en la pista exterior, comparado con un rodamiento sano este presenta picos con el doble de amplitud en bajas frecuencias como consecuencia de la falla en la pista exterior que de acuerdo con la norma ISO 10816 con valores cercanos a los $2 mm/s$ de amplitud señala que la severidad del daño es intermedia y la máquina no puede operar por un tiempo prolongado, por lo tanto, en el caso de los aerogeneradores es el momento de planificar las actividades de mantenimiento.

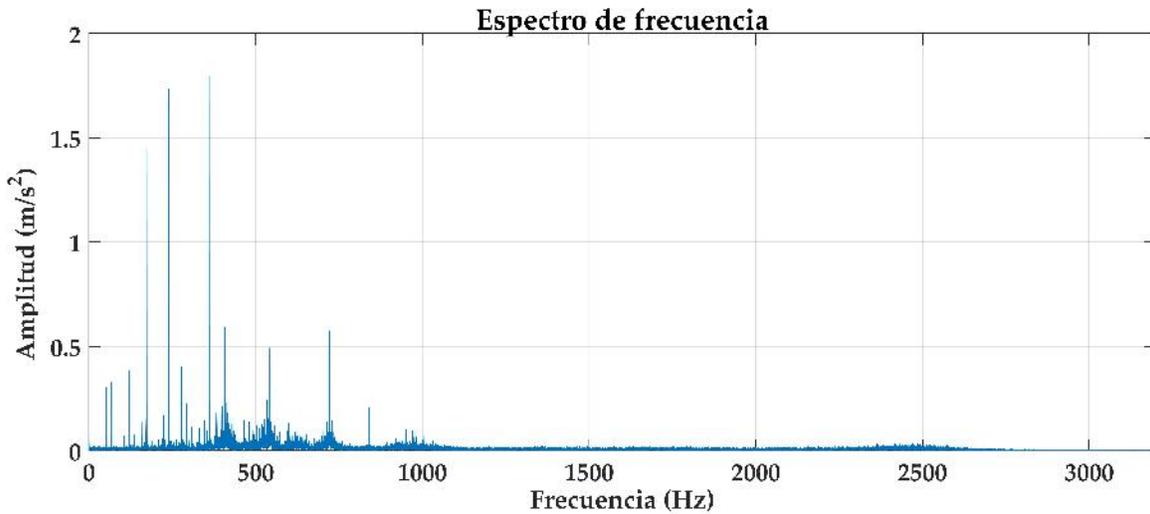


Figura 4.11. Espectro de frecuencias de un rodamiento con falla en la pista externa, dirección vertical.

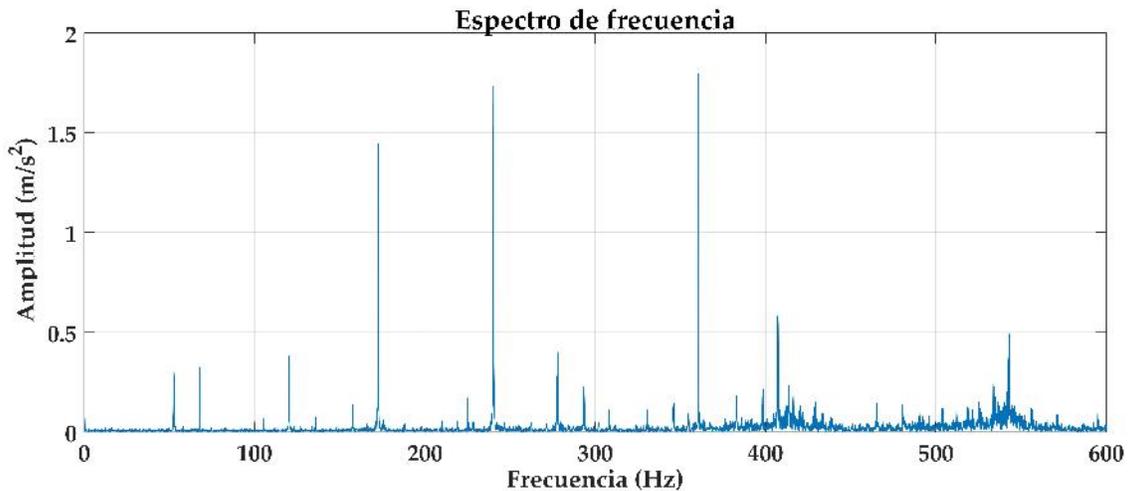


Figura 4.12. Espectro en baja frecuencia de un rodamiento con falla en la pista externa, dirección vertical.

Para confirmar la parte teórica, en la Tabla 4.1 se presenta la frecuencia de falla teórica en la pista exterior y sus armónicas (4 primeras) calculadas a partir de la frecuencia de rotación y de los parámetros del rodamiento presentados en la Tabla 3.2

Tabla 4.1. Frecuencias falla en pista exterior.

Armónicas (Hz)				
f_{fpe}	$2x f_{fpe}$	$3x f_{fpe}$	$4x f_{fpe}$	$5x f_{fpe}$
156.96	313.92	470.88	627.84	784.8

Capítulo 4. Validación de resultados obtenidos

En la Figura 4.13 se presenta el espectro de frecuencias obtenido con el analizador comercial donde se observa picos de con amplitud cercano a los 2 mm/s , algunos de estos corresponden con las frecuencias de fallas teóricas. En la dirección radial se presentan bandas espectrales alrededor de los 3 kHz .

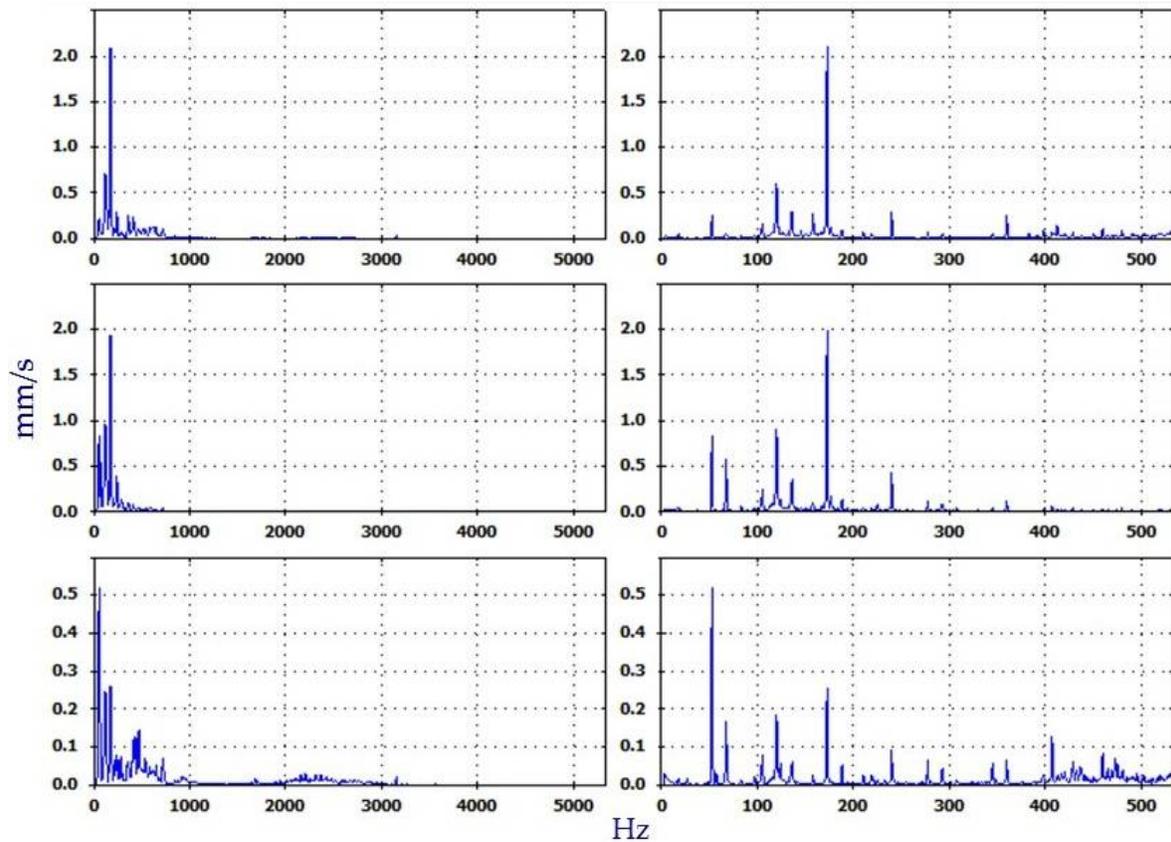


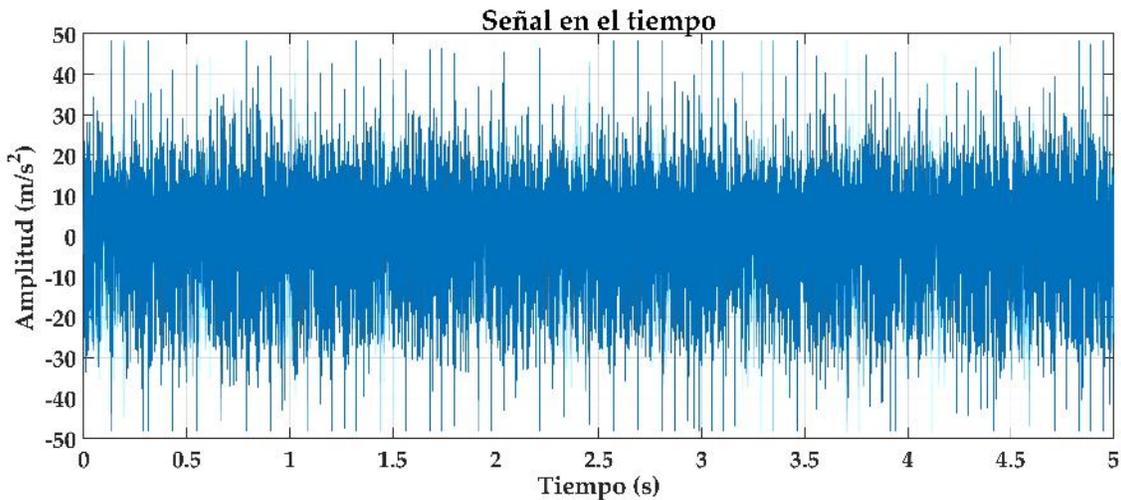
Figura 4.13. Espectro de vibración obtenido por el analizador de vibraciones Fluke® 810.

4.1.3 Análisis de rodamientos con falla en la jaula

Para esta prueba se utilizó un rodamiento con la jaula totalmente rota, obteniendo la forma de onda como se observa en la Figura 4.14. Del gráfico se puede observar que la señal perdió su uniformidad y se observa que la magnitud de energía crece los elementos rodantes se impactan en la falla de la jaula.



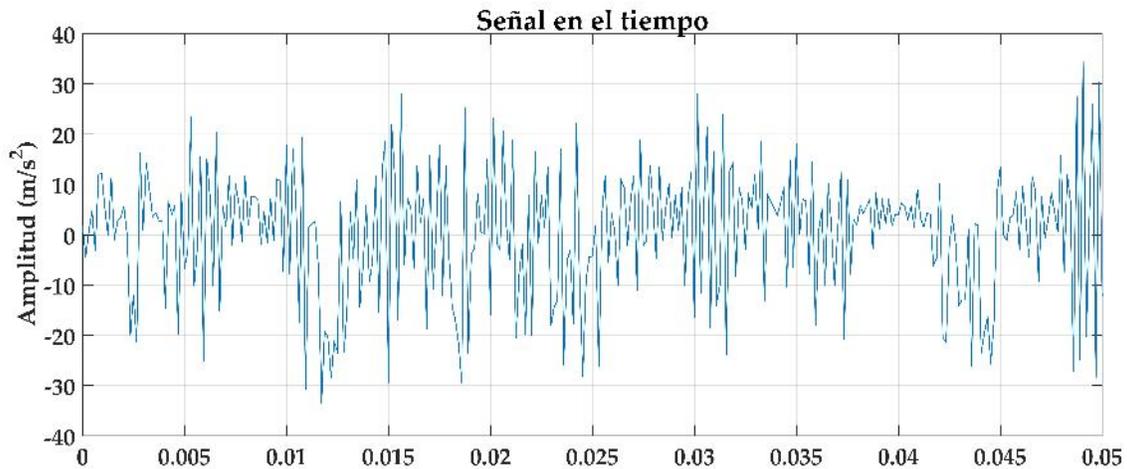
(a) Rodamiento 1621 2RS URB con falla.



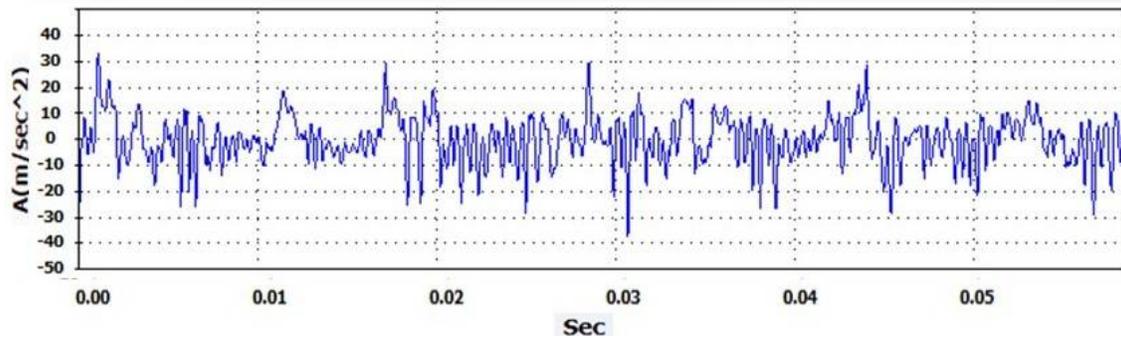
(b) Señal en el tiempo, dirección vertical.

Figura 4.14. Análisis con falla en la jaula.

Al comparar la señal en el dominio del tiempo obtenido con ambas herramientas se puede observar la similitud de las gráficas, muy parecidas en amplitud y en el comportamiento, aunque con un ligero desfase eso corresponde a que todas las pruebas utilizando ambas herramientas fueron de forma manual lo que favorece que en muchas ocasiones una medición empiece antes que otra como se observa en la Figura 4.15.



(a) Obtenido con el software “Analizador de vibraciones”.



(b) Obtenido con el analizador comercial.

Figura 4.15. Señal en detalle de un rodamiento con falla en jaula a velocidad constante.

Luego de hacer el análisis en el dominio de la frecuencia se obtuvo el espectro mostrado en la Figura 4.16, en donde se observan picos con amplitud cerca a los $3 mm/s$, que representa que la máquina no puede seguir operando por mucho tiempo, y es de entenderse ya que una vez que la jaula se ha quebrado, se empieza a desprender material metálico que impide que los elementos rodantes se deslicen libremente aumentando la temperatura del mismo.

Por otra parte, en la Tabla 4.2 se presenta la frecuencia de falla teórica en la pista exterior y sus armónicas (4 primeras) calculadas a partir de la frecuencia de rotación (2 800 rpm) y de los parámetros del rodamiento presentados en la Tabla 3.2

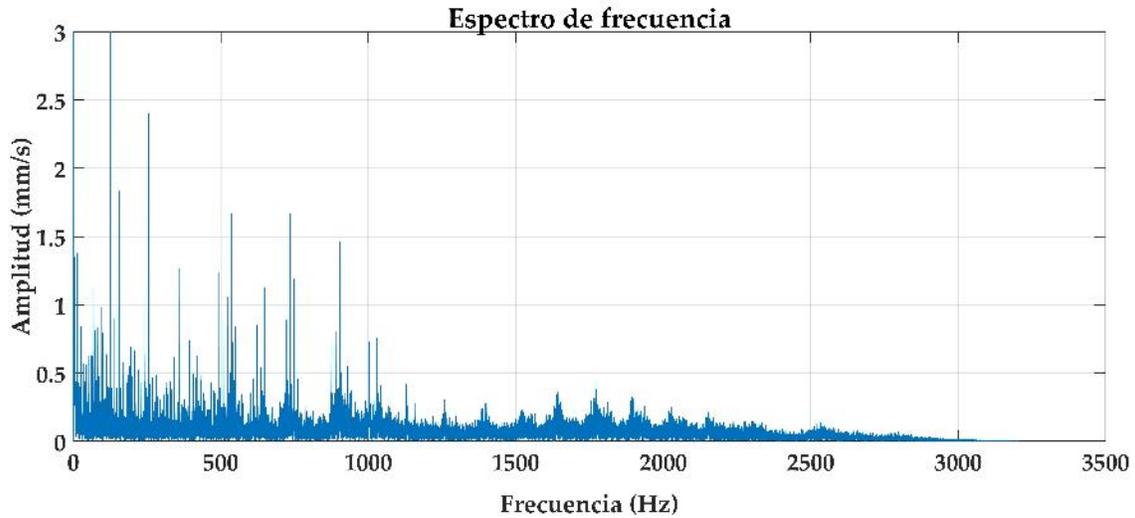


Figura 4.16. Espectro de frecuencias de un rodamiento con falla en la jaula, dirección vertical.

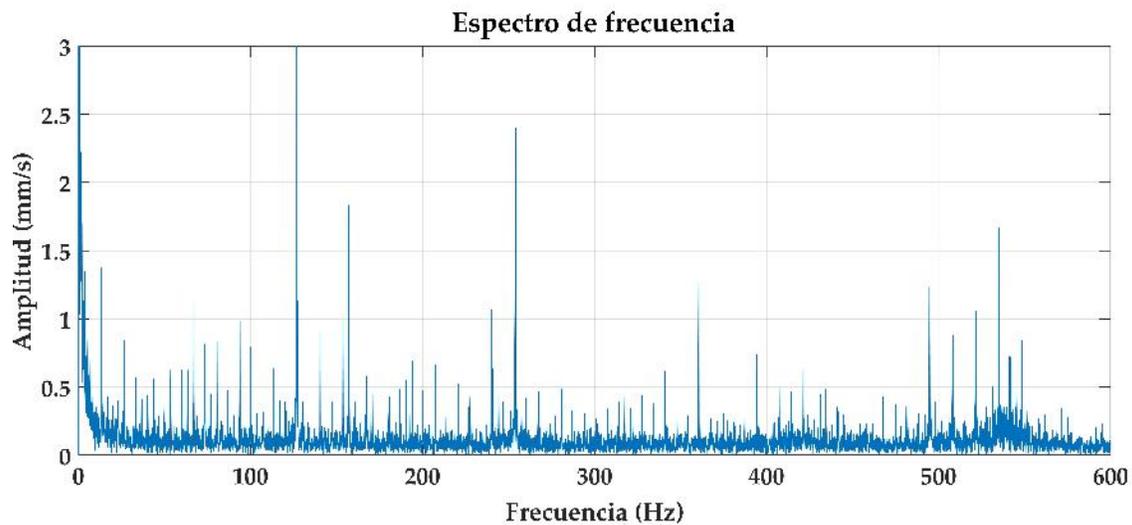


Figura 4.17. Espectro en baja frecuencia de un rodamiento con falla en la jaula, dirección vertical.

Tabla 4.2. Frecuencias falla de un rodamiento con jaula rota.

Armónicas (Hz)				
f_{fj}	$2x f_{fj}$	$3x f_{fj}$	$4x f_{fj}$	$5x f_{fj}$
19.76	39.52	59.28	79.04	98.8

En la Figura 4.18 se presenta el espectro de frecuencias obtenido con el analizador comercial confirma los espectros obtenidos con el software “Analizador de vibraciones”presentando comportamiento similares en el eje axial.

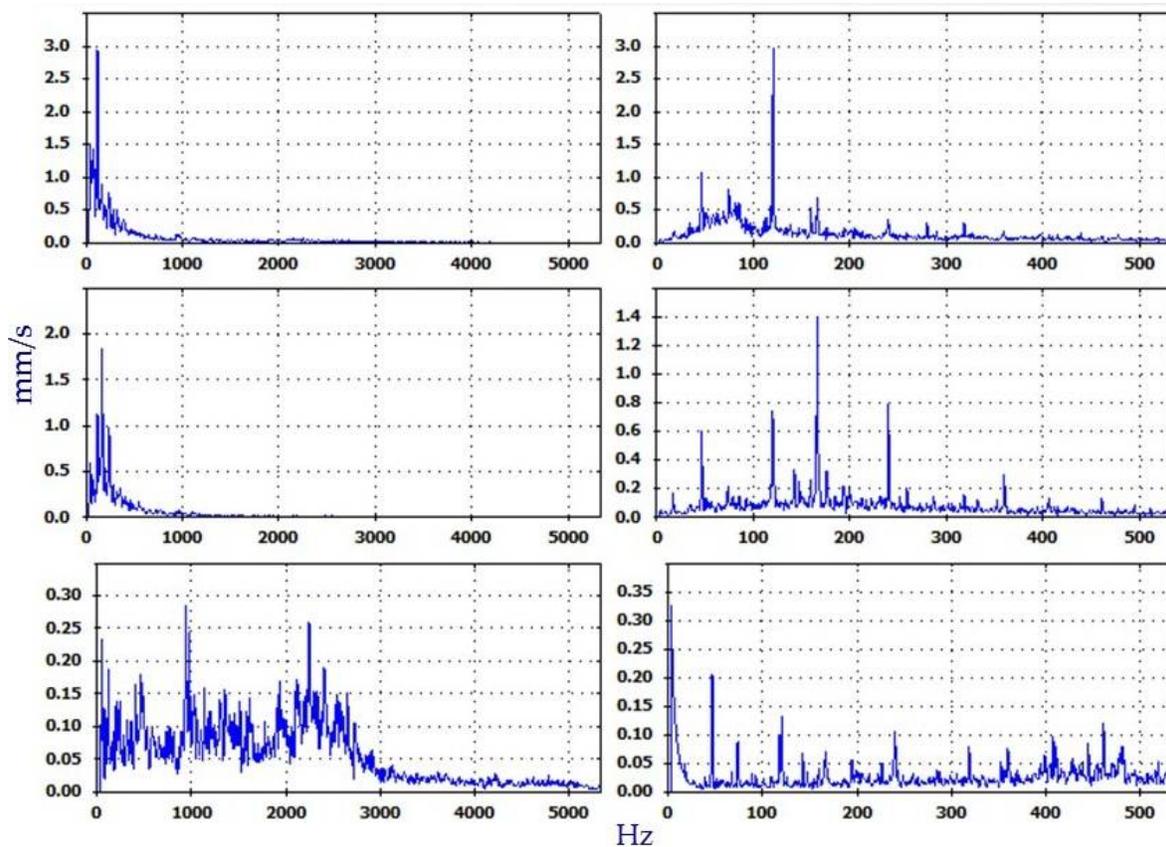


Figura 4.18. Espectro de vibración obtenido por el analizador de vibraciones Fluke® 810.

4.2 Análisis de resultados a velocidad variable

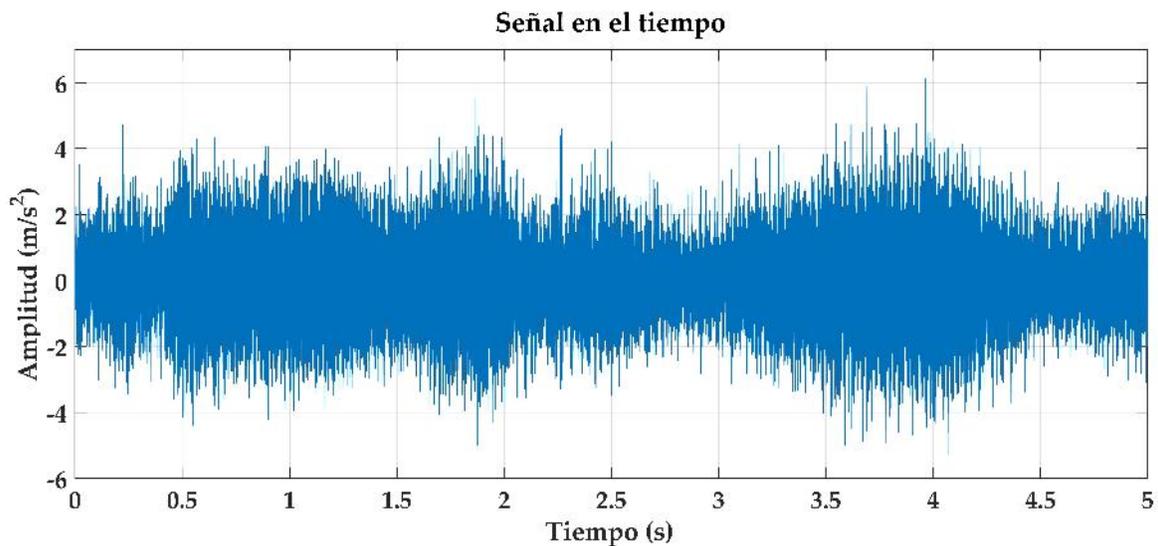
El otro dominio de análisis es el de tiempo-frecuencia, el cual es analizado debido a que la señal de vibración puede experimentar ligeros cambios en sus componentes frecuenciales a través del tiempo, ya sea por regímenes de carga variable o por cambios de velocidad que experimenta la máquina. Para este análisis se utiliza el espectrograma con una ventana de Hanning de varias longitudes, debido a que no existe un criterio para seleccionar el tamaño de la ventana, todo depende de la resolución que se desea obtener.

4.2.1 Análisis de rodamiento sano

En la Figura 4.19 se observa la señal de vibración en el dominio del tiempo, se puede ver que la señal pierde su estacionariedad como consecuencia de la variación de velocidad a pesar de ser un rodamiento sano. Por lo tanto, esta señal se puede confundir con la de un rodamiento con fallas (como se presentó en la sección anterior).



(a) Rodamiento sano 1621 2RS URB.

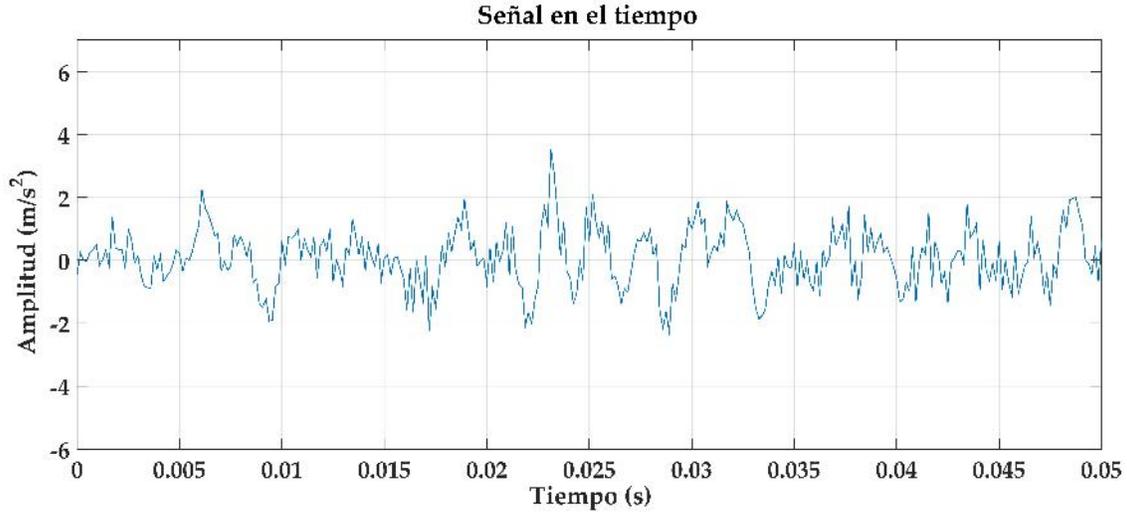


(b) Señal en el tiempo, dirección vertical.

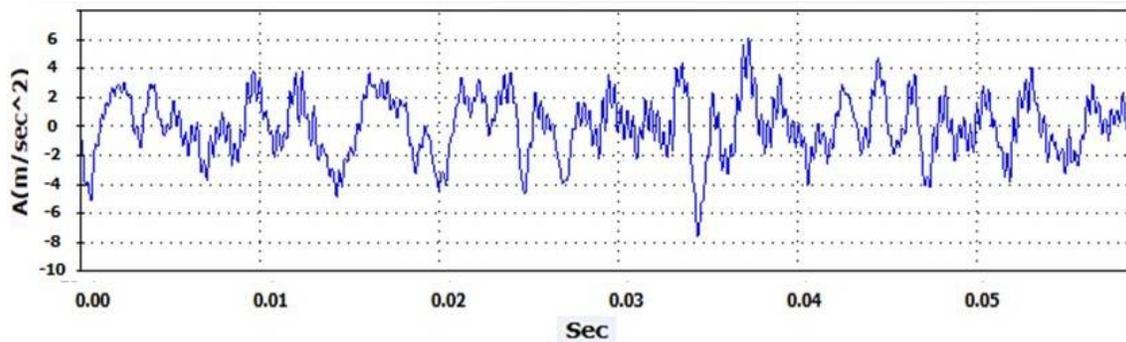
Figura 4.19. Análisis de rodamiento sano a velocidad variable.

Al comparar la señal en el dominio del tiempo obtenido con ambas herramientas se puede ver la similitud de las gráficas, muy parecidas en amplitud y en el comportamiento, aunque con un ligero desfase eso corresponde a que todas las pruebas utilizando ambas herramientas fueron de forma manual lo que favorece que en muchas ocasiones una medición empiece antes que

la otra como se observa en la Figura 4.20.



(a) Obtenido con el software “Analizador de vibraciones”.



(b) Obtenido con el analizador comercial Fluke® 810.

Figura 4.20. Señal en detalle de un rodamiento sano a velocidad variable.

A través del análisis espectrográfico mostrado en la Figura 4.21 y 4.22 se puede observar como la energía es distribuida en el dominio tiempo-frecuencia. La intensidad del color muestra la potencia de la señal en el tiempo y frecuencia correspondiente. La variación de la intensidad en altas frecuencias que se observa en el gráfico es producto de la variación de velocidad. Al tratarse de un rodamiento sano, en el espectrograma se presenta una distribución de la energía de poca intensidad. Es posible observar que a medida que cambia la velocidad de máquina, las armónicas y los componentes frecuenciales también van cambiando a razón de la velocidad. Por el tamaño de la ventana relativamente grande no se puede observar gran resolución en el dominio del tiempo pero si una buena resolución en el dominio de la frecuencia.

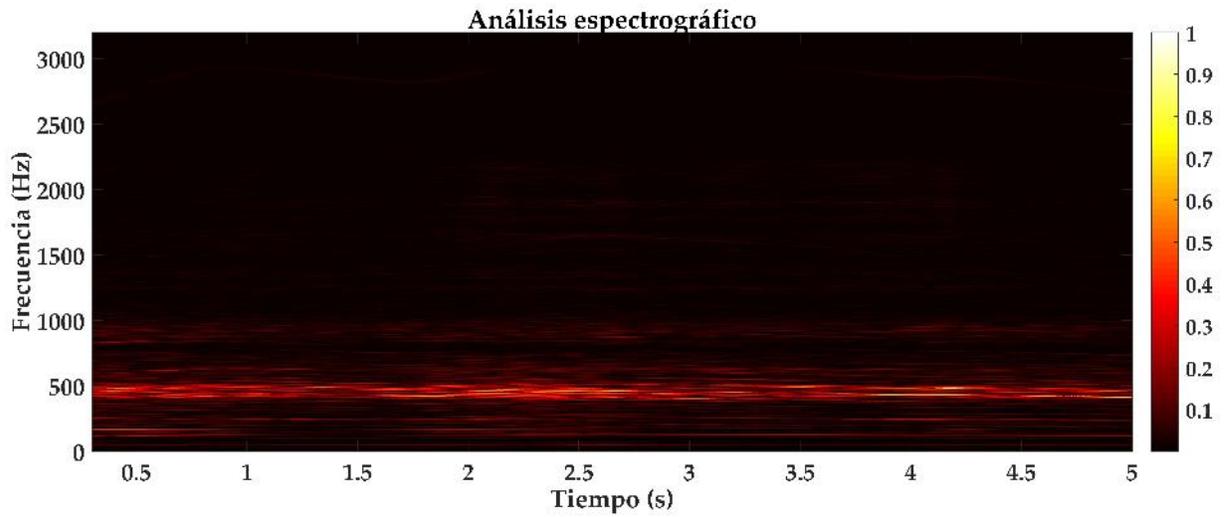


Figura 4.21. Análisis espectrográfico de un rodamiento sano, dirección vertical.

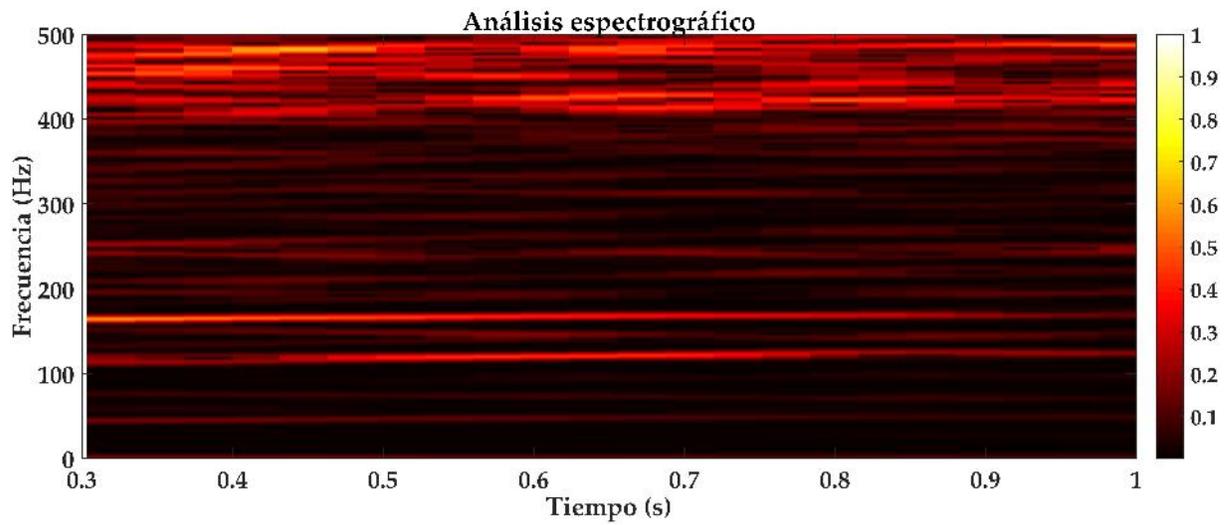


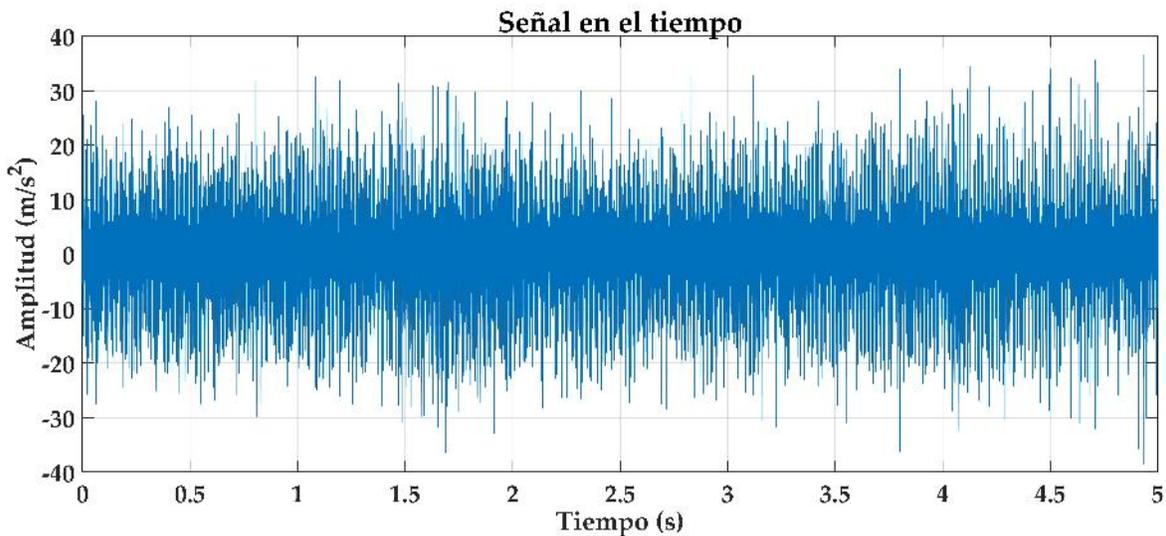
Figura 4.22. Análisis espectrográfico en detalle de un rodamiento sano, dirección vertical.

4.2.2 Análisis de rodamiento con falla en pista externa

En la Figura 4.23 se observa la señal de vibración en el dominio del tiempo, se puede ver que la señal pierde su estacionariedad como consecuencia de la variación de velocidad a pesar de ser un rodamiento sano. Por lo tanto, esta señal se puede confundir con la de un rodamiento con fallas (como se presentó en la sección anterior).



(a) Rodamiento sano 1621 2RS URB.

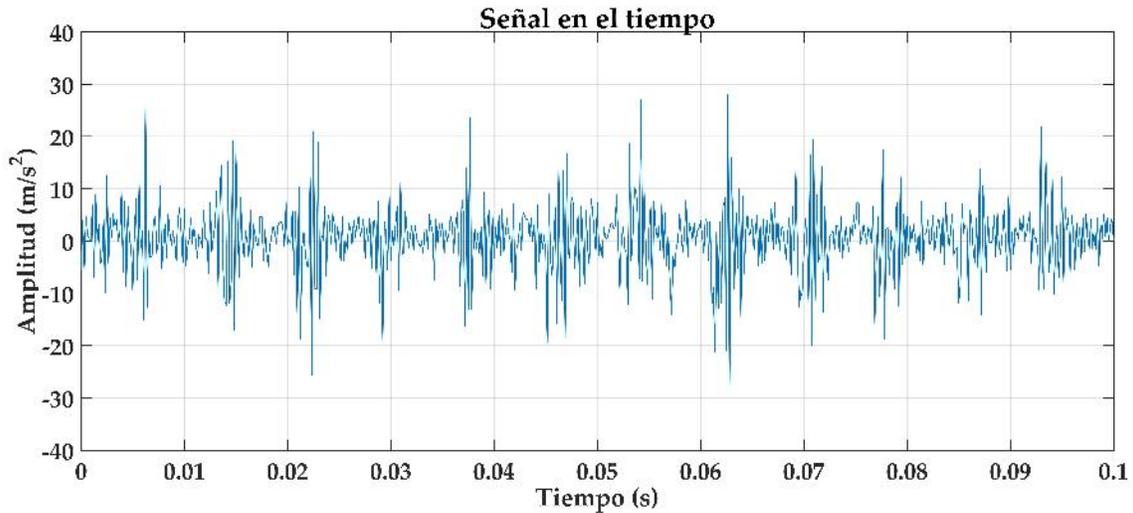


(b) Señal en el tiempo, dirección vertical.

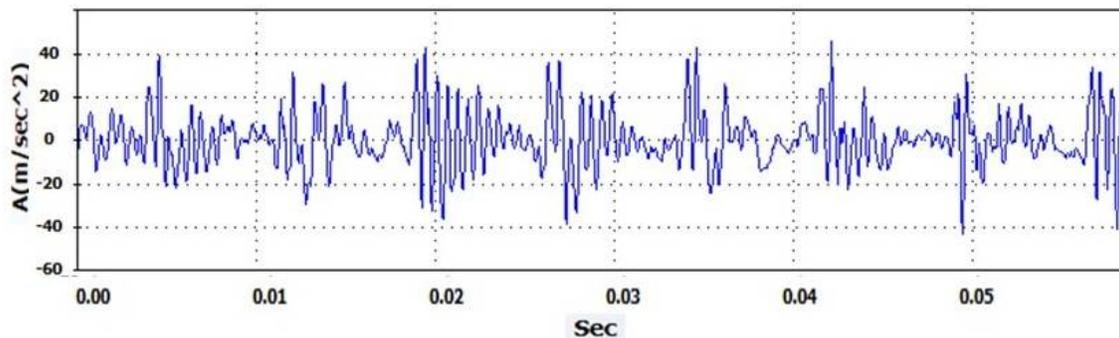
Figura 4.23. Análisis de rodamiento con falla en pista externa.

Al comparar la señal en el dominio del tiempo obtenido con ambas herramienta se puede la similitud de las gráficas, muy parecidos en amplitud y en el comportamiento, aunque con un ligero desfase eso corresponde a que todas las pruebas utilizando ambas herramientas fueron de forma manual lo que favorece que en muchas ocasiones una medición empiece antes que la

otra como se presenta en la Figura 4.24. Además, se observa que la magnitud de la amplitud varía continuamente y el periodo no está bien definido.



(a) Obtenido con el software “Analizador de vibraciones”.



(b) Obtenido con el analizador comercial.

Figura 4.24. Señal en detalle de un rodamiento con falla en pista externa a velocidad variable.

A través del análisis espectrográfico mostrado en la Figura 4.25 se puede observar como la energía es distribuida en el dominio tiempo-frecuencia. En el espectrograma se observa la presencia de diversas componentes frecuenciales con mayor intensidad por debajo de los 500 HZ y mayor a los 2000 HZ . En la Figura 4.26 se observa el comportamiento a bajas frecuencias, estas no se mantienen continuas debido a la variación de la velocidad.

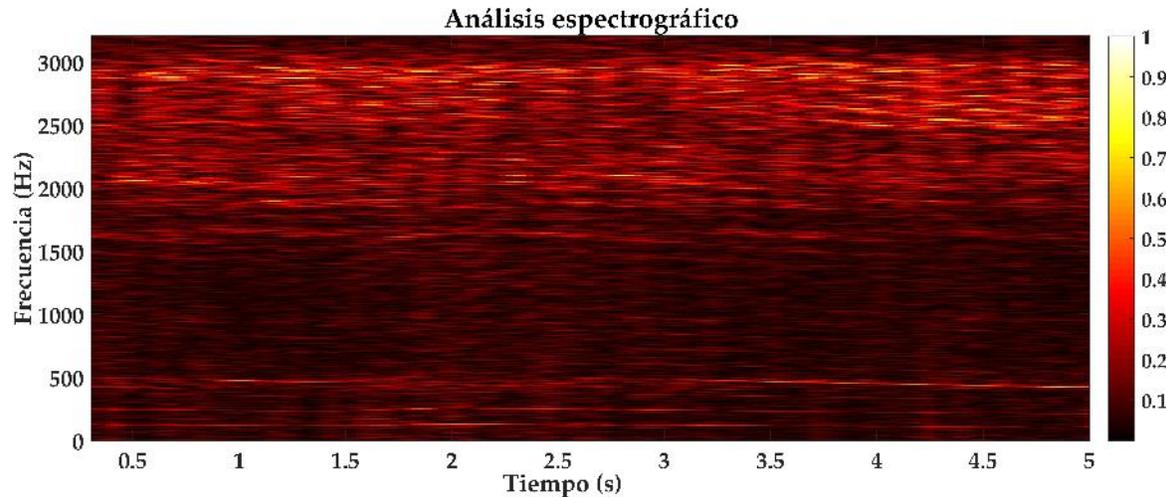


Figura 4.25. Análisis espectrográfico de un rodamiento con falla en pista externa, dirección vertical.

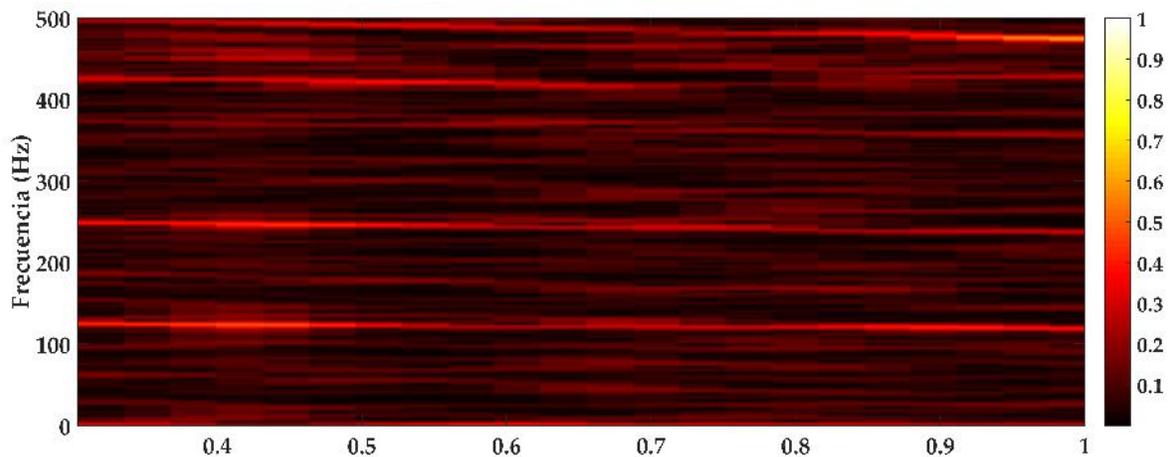


Figura 4.26. Análisis espectrográfico en detalle de un rodamiento con falla en pista externa, dirección vertical.

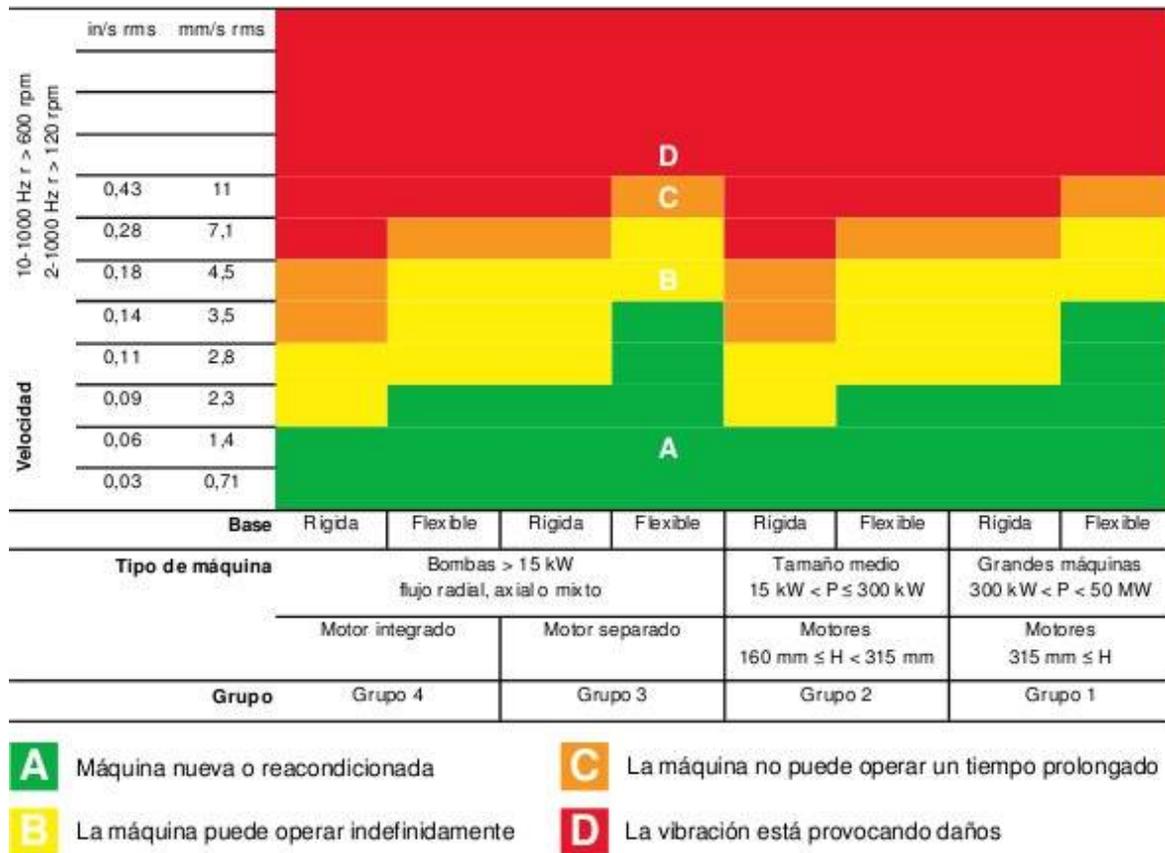
4.2.3 Norma ISO 10816

Esta norma establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas, para las pruebas realizadas fueron tomadas sobre el bloque que cubre el rodamiento, ya que es el lugar más cercano y al origen de las vibraciones. El criterio general de

evaluación se basa tanto en la monitorización operacional como en pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con objeto de garantizar un funcionamiento confiable de la máquina a largo plazo.

Entonces, para conocer la condición o grado de severidad de las fallas presentes en los rodamientos, la norma ISO 10816 establece los valores de referencia de la amplitud de la vibración de acuerdo con el tipo de máquina, la potencia y la flexibilidad de la máquina. Esta norma establece 4 grados de severidad como se muestra en la Tabla 4.3

Tabla 4.3. Severidad de vibraciones mecánicas ISO 10816.



4.3 Análisis térmico

Para complementar los resultados obtenidos con el software, se optó por realizar un análisis térmico de los rodamientos estudiados. En cada una de las pruebas se realizaron mediciones de la temperatura de los rodamientos y, tomando como referencia la temperatura del rodamiento sano se fueron comparando los valores. Y como era de esperarse, con la presencia de la alguna falla en los rodamientos, la temperatura tiende a incrementar incluso en el caso de la prueba con un rodamiento con la pista externa rota, la pista interna no giró en conjunto con el eje (debido a los restos de material desprendido durante la generación de la falla) generando un ruido intenso y un aumento de la temperatura.



Figura 4.27. Termómetro infrarrojo Fluke® 568 utilizado en las pruebas.

Conclusiones

En esta tesis se realizó una revisión actual de las técnicas de monitoreo de condición con mayor implementación en el sector eólico buscando las limitaciones y desafíos de los actuales sistemas de monitoreo de condición para aerogeneradores. Esto ha demostrado que, aunque todos los nuevos aerogeneradores están equipados con algún tipo de sistema de monitoreo de condición, por razones de certificación, muy pocos operadores utilizan la información disponible para fines de mantenimiento debido al volumen y la complejidad de los datos relacionados con la operación a velocidad variable de los aerogeneradores. Para utilizar la información del sistema de monitoreo de condición con éxito, y ofrecer recomendaciones viables en la operación y mantenimiento, se necesitan sistemas que puedan analizar e interpretar automáticamente grandes volúmenes de datos.

Por lo tanto, se ha conseguido desarrollar una interfaz gráfica externa que permita la adquisición, almacenamiento, procesamiento y monitorización de señales para la detección de fallos mecánicos en los rodamientos de un GIDA. El diseño del software “Análisis de vibraciones” posee una arquitectura abierta permitiendo la fácil comprensión de los detalles que componen la programación, dando así la posibilidad de variar su diseño, introduciendo o suprimiendo herramientas. Al ser un software de acceso libre, lo convierte en un material adecuado para fines didácticos aplicable en las materias relacionadas con el mantenimiento de aerogeneradores que se imparten en la Maestría en Ciencias en Energía Eólica en la Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec, con la finalidad de realizar diagnósticos y dar una interpretación confiable bajo diferentes perspectivas que permitan enriquecer el conocimiento y la discusión académica que gira alrededor del análisis de vibraciones.

Conclusiones

El algoritmo desarrollado en MATLAB/Simulink se validó en un banco de prueba a pequeña escala, esto permitió llevar a cabo pruebas con fallas provocadas bajo condiciones controladas. Los casos de estudio analizados en este proyecto de tesis fueron fallas en los componentes de los rodamientos del generador. En cada caso, las frecuencias de fallas características se han identificado e investigado mediante el uso de espectros de frecuencias y análisis espectral obtenidos con la Transformada Rápida Fourier y la Transformada de Fourier de Tiempo Corto de señales vibratorias bajo condiciones de velocidad constante y velocidad variable, respectivamente. Los resultados experimentales indicaron una fuerte relación entre la magnitud de la amplitud de las señales adquiridas con la presencia de fallas en los rodamientos analizados, siendo este un parámetro importante para monitorear la condición de los rodamientos.

Los resultados presentados en esta tesis demuestran que la metodología y el software desarrollado puede proporcionar la evaluación del desempeño de los componentes del aerogenerador y la identificación temprana de fallas, dando así el tiempo suficiente para tomar decisiones con respecto al mantenimiento de los aerogeneradores. Además, se concluye que las frecuencias características de las fallas de los componentes del rodamiento que se identificaron en el espectro de frecuencias y en el espectrograma, tienen una gran relación con las frecuencias de fallas teóricas, específicamente las frecuencias de falla del elemento rodante y de la jaula siempre se encuentran por debajo de la frecuencia de rotación y las frecuencias de falla en ambas pistas se encuentran por encima de la frecuencia de rotación. Sin embargo, estas frecuencias y sus armónicas no son múltiplos de la frecuencia fundamental lo que obedece a un análisis inter-armónico o sub-armónico.

Trabajos futuros

Es evidente que a partir de este trabajo, el análisis vibraciones aplicando la Transformada de Fourier de Tiempo Corto ofrece resultados prometedores para el monitoreo de condiciones y la detección de fallas en máquinas rotatorias. Sin embargo, el modelo propuesto parte de una plataforma básica el cual sólo analiza las fallas en los rodamientos del generador. Por lo tanto, en esta sección se describen posibles trabajos futuros para mejorar el desempeño del software “Análisis de vibraciones” en el monitoreo de condición y el diagnóstico de fallas en aerogeneradores. Las sugerencias son las siguientes:

- Mejora del equipo de prueba. Un prototipo a pequeña escala de un aerogenerador de baja potencia podría ser mejor para diseñar e introducir fallas adicionales. Incluso el enfoque de la investigación podría ampliarse para incluir el monitoreo de condición de otros componentes del aerogenerador, principalmente los modos de falla de la caja multiplicadora. Además, se sugiere implementar mecanismos en el banco de pruebas para generar casos de estudios con desbalances de carga en el sistema, es decir, casos de estudios con diferentes fuerzas de empuje que experimenta el rotor eólico y que se transmite hacia toda la estructura del aerogenerador.
- Implementar otras técnicas de monitoreo de condición. Utilizar parámetros distintos a la vibración para monitorear el estado de los componentes del aerogenerador y comparar los resultados, estos podrían incluir señales de emisión acústica, señales eléctricas, termografía, entre otras. La eficiencia de estas técnicas se puede comparar con la técnica de análisis de vibraciones e incluso se pueden combinar para obtener mejores resultados.

- Implementar otras técnicas de procesamiento de señales para el monitoreo de condición de aerogeneradores. La técnica de la Transformada de Fourier de Tiempo Corto se puede combinar con otras técnicas como el análisis de la envolvente o el análisis del Cepstrum para determinar la presencia de fallas incipientes y luego clasificarlas según el tipo y la gravedad.
- Por otra parte, es necesario diseñar o seleccionar un filtro pasa bajos que remueva completamente todas las frecuencias de la señal que son más altas que la entrada del ancho de banda de la tarjeta utilizada.
- Programar un sistema de alertas para evitar posibles situaciones de peligro. Es decir, que avise al usuario que controla el proceso de adquisición de datos en los rodamientos cuando los valores capturados estén fuera de los límites establecidos por la matriz de criticidad.
- Optimizar el software para conseguir que el sistema de adquisición de datos y representación en tiempo real se realice a una mayor velocidad para detectar variaciones rápidamente. Además, sería muy interesante analizar defectos más pequeños para encontrar cuál es el defecto más pequeño que puede ser detectado con fiabilidad por el software.
- La metodología propuesta presenta un buen rendimiento para las bases de datos consideradas. Sin embargo, la validación de esta con otro tipo de señales permitiría determinar la capacidad de la metodología para extrapolar su funcionamiento a otras configuraciones de máquinas rotativas. Además, es indispensable mostrar, que aunque las normas para análisis de vibraciones son muy claras, las condiciones bajo las cuales se cumplen son muy estrictas. Por lo tanto, se recomienda el estudio de fallas eléctricas a través del análisis de vibraciones y de parámetros eléctricos.

Referencias

- [1] García Márquez F.P., Tobias A.M., Pinar Pérez J.M., Papaelias M., Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods, *Renewable Energy*, vol. 46, pp. 169-178, March 2012.
- [2] Henao H., Capolino G.-A., Fernandez-Cabanias M., et al. Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques, *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp. 31-42, June 2014.
- [3] Daneshi-Far Z., Capolino G.-A., Henao H. Review of failures and condition monitoring in wind turbine generators, XIX Internacional Conference on Electrical Machine-ICEM 2010 Rome.
- [4] Bojórquez D.G., Rivera M. J., Chacón M. M., Carillo R. M., Diseño de un sistema para análisis de las vibraciones mecánicas como método de mantenimiento predictivo en máquinas rotativas, RIEE&C, Revista de ingeniería eléctrica, el 24 electrónica y computación, Vol. 2 No. 1, Diciembre 2006.
- [5] Pezzani C. M., Bossio J. M., Castellino A. M., Bossio G. R., De Angelo C. H., Bearing fault detection in wind turbines with permanent magnet synchronous machines, *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 12, No. 7, pp. 1199-1205, October 2014.
- [6] Boudiaf A., Djebala A., Bendjma H., Balaska A. and Dahane A. A summary of vibration analysis techniques for fault detection and diagnosis in bearing. 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), IEEE, pp. 37-42, Algeria, November 2016.

Referencias

- [7] Alewine, K. and Chen, W. A review of electrical winding failures in wind turbine generators. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 28, No. 4, August 2012.
- [8] Chapman S. J., Máquinas Eléctricas, Quinta ed., México, D.F., Mc Graw Hill, 2012.
- [9] Rodríguez A. J., Burgos D. J., Gómez S., Sistemas eólicos de producción de energía eléctrica, Madrid, España: Rueda S.L., 2003.
- [10] Fitzgerald A. E., Kingsley C. Jr., Umans S. D., Máquinas Eléctricas, Sexta ed., Mc Graw Hill, 2009.
- [11] Shilpa G. and Shajilal A.S. State of art of doubly fed induction generator in a wind energy conversion system. *Internacional Journal of Advanced Engineering, Management and Science (IJAEMS)*, Vol. 2, No. 6, pp. 842-845, June 2016.
- [12] Skrimpas G. A., Sweeney C. W., Jensen B. B., Mijatovic N. and Holboll J. Analysis of generator bearing vibration data for diagnosing rotor circuit malfunction in DFIG's. 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 1746-1751, Berlin, 2014.
- [13] Ibrahim, A. O., Nguyen, T. H., Lee, D. C. and Kim, S. C. A fault ride-through technique of DFIG wind turbine systems using dynamic voltage restorers. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 26, No. 3, pp. 871-882, September 2011.
- [14] Gimenez A. J.M., Gómez T. J.C., Wind generation using different generators considering their impact on power system, *Dyna*, año 78, No. 169, pp. 95-104. Medellín, Octubre, 2011. ISSN 0012-7353.
- [15] Muller S., Deicke M.,and De Doncker R. W., Doubly fed induction generator systems for wind turbines, *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 8, No. 3, pp. 26-33, May 2009.
- [16] Shipurkar U., Ma K., Polinder H., Blaabjerg F., and Ferreira J. A. A review of failure mechanisms in wind turbine generator systems. 2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe), IEEE. pp. 1-10, Geneva, September 2015.

- [17] Djurovic S., Crabtree C. J., Tavner P. J. and Smith A. C. Condition monitoring of wind turbine induction generators with rotor electrical asymmetry. *IET Renewable Power Generation*, Vol. 6, No.4, pp. 207-216 July 2012.
- [18] Popa L. M., Jensen B. B., Ritchie E. and Boldea I. Condition Monitoring of Wind Generators. 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications, IEEE, Vol. 3, pp. 1839-1846). October 2003.
- [19] Spinato F., Tavner P. J., Van Bussel G. J. W., and Koutoulakos E. Reliability of wind turbine subassemblies. *IET Renewable Power Generation*, Vol. 3, No. 4, pp. 387-401, December 2009.
- [20] Carroll J., McDonald A., McMillan D., Reliability comparison of wind turbines with DFIG and PMG drive trains, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 30 No. 2, pp. 663-670, June 2015.
- [21] Lu B., Li Y., Wu X., and Yang Z., A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis, *IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications*, pp. 1-7, 2009.
- [22] Tchakoua, P., Wamkeue, R., Ouhrouche, M., Slaoui-Hasnaoui, F., Tameghe, T. A., & Ekemb, G. Wind turbine condition monitoring: State-of-the-art review, new trends, and future challenges. *Energies*, Vol.7, Num. 4, pp. 2595-2630, 2014.
- [23] Mathew, S. Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics. Vol. 1. Heidelberg: Springer, 2006.
- [24] López Molina F., Hernández Mayoral E., Dueñas Reyes E., and Parra Velasco L.Y. Revisión del Estado Actual para el Análisis de Vibraciones para la Detección y Diagnóstico de Fallas en Aerogeneradores basado en el Generador de Inducción de Doble Alimentación. *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*. 2017.
- [25] Global wind statistics 2016. Global Wind Energy Council (GWEC).February 2017.

Referencias

- [26] Bossio J., Ruschetti C., Bossio G., De Angelo C., Verucchi C., Detección y diagnóstico de problemas de desmagnetización y desbalance mecánico en máquinas síncronas de imanes permanentes, *IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, pp. 680-685, May 2014.
- [27] Hemami, A. Wind turbine technology. Cengage Learning, 2012.
- [28] <http://www.windpowermonthly.com>
- [29] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., and Bossanyi, E. Wind energy handbook. John Wiley & Sons, 2011.
- [30] Gong, X., & Qiao, W. Bearing fault diagnosis for direct-drive wind turbines via current-demodulated signals. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, Num. 8, pp. 3419-3428, 2013.
- [31] Randall, R. B. Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications. John Wiley & Sons, 2011.
- [32] Jin, C., Ompusunggu, A. P., Liu, Z., Ardakani, H. D., Petré, F., & Lee, J. A Vibration-Based Approach for Stator Winding Fault Diagnosis of Induction Motors: Application of Envelope Analysis. Center for Intelligent Maintenance Systems Cincinnati United States, 2014.
- [33] Rao S.S., Vibraciones mecánicas, Quinta edición, PEARSON EDUCACIÓN, México 2012, ISBN: 978-607-32-0952-6.
- [34] A-MAQ S.A. Análisis de maquinaria, Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico, Enero, 2005.
- [35] Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. Tratamiento Digital de Señales, Cuarta Edición, Pearson Educación S.A. Madrid, 2007.
- [36] Cardona Morales, O. Análisis tiempo-frecuencia de señales de vibraciones mecánicas para la detección de fallos en máquinas rotativas. Colombia 2011.

- [37] Gómez García, M. J. Metodología de selección de indicadores óptimo para el análisis y diagnóstico del estado de la máquina: aplicación a elementos mecánicos rotativos. Tesis doctoral. Abrli, 2014.
- [38] DAC (2018). DAC - 203D - Vibration Analysis Demonstrator, Downsized. [En línea]. Disponible en: <http://dacworldwide.com/product/detail/881>. [Último acceso, 6 Jul. 2018].
- [39] Sensing (2018). [En línea]. Disponible en: http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/MEDIDA-DE-VIBRACIONES_151/Sensores-de-vibrac%C3%B3n_290/. [Último acceso, 6 Jul. 2018].
- [40] Kistler (2018). Acelerómetro modal PiezoBeam, 5...50 g. [En línea]. Disponible en: <https://www.kistler.com/es/producto/type-8640a/>. [Último acceso, 6 Jul. 2018].
- [41] ISO 10816-3. ?Mechanical Vibration - Evaluation of Machine Vibration by Measurements on NonRotating Parts?. ISO. Switzerland. 1998
- [42] Cl.omega (2018). Acelerómetro - Introducción y tipos. [En línea] Disponible en: <https://cl.omega.com/prodinfo/acelerometro.html> [Último acceso, 6 Jul. 2018].
- [43] NI (2018). CompactDAQ Chassis - National Instruments. [En línea] Disponible en: <http://www.ni.com/es-mx/shop/select/compactdaq-chassis> [Último acceso, 6 Jul. 2018].
- [44] NI (2018). C Series Sound and Vibration Input Module - National Instruments. [En línea] Disponible en: <http://www.ni.com/es-mx/shop/select/c-series-sound-and-vibration-input-module?modelId=122186> [Último acceso, 6 Jul. 2018].
- [45] Measurement & Automation Explorer. ©2004?2017 National Instruments. All rights reserved. ni.com
- [46] Fluke (2018). Analizador de vibraciones manual Fluke 810. [En línea] Disponible en: <http://www.fluke.com/fluke/mxes/medidores-de-vibracion-y-herramientas-de-alineacion-laser/fluke-810.htm?pid=56137> [Último acceso, 6 Jul. 2018].

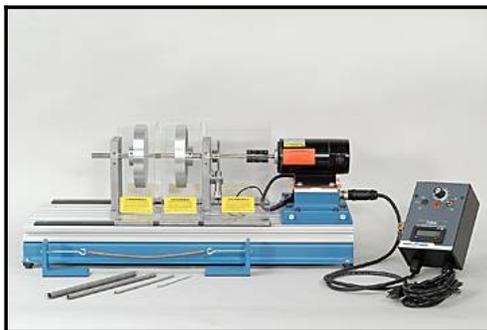
Anexos

Anexo A

Hojas de características del banco de pruebas



203D Vibration Analysis Demonstrator, Downsized



Product Dimensions
(W x L x H)
13-1/2" x 30" x 13" (343 x 762 x 330 mm)
60lbs. (27 kg)

Shipping Dimensions
(W x L x H)
15" x 34" x 24" (381 x 864 x 610 mm)
80lbs (36 kg)

FEATURES AND SPECIFICATIONS

- 1/4 HP, DC permanent magnet motor, standard.
- SCR speed control.
- Digital RPM indicator with magnetic pick-up.

GENERAL DESCRIPTION

An economical, yet versatile, precision-machined device for demonstration of the causes and effects of vibration in industrial rotating machinery. With the addition of optional or user-supplied diagnostic devices, the device allows for isolation of individual, vibration-causing variables in order to demonstrate their individual signatures. A permanent magnet DC motor with RPM pick-up and digital display is included. A system of indexing pins and CNC-machined pillow blocks, coupled with a t-slotted mounting surface, allows for convenient and accurate reconfiguration. The device and its associated course/exercise guide allows for introductory training in vibration cause/effect, balancing and data collection. Optional equipment can expand the training aid's usefulness, in demonstrating expanded applications.

The device allows for observation and measurement related to the effects of mechanical looseness, critical speed, imbalance, bearing faults, and misalignment.

OPTIONS

- [#203-003 - Vibration Meter, Basic](#)
- [#203-010 - Bearing Fault Kit](#)
- [#203-015 - Supplemental Coupling Kit](#)
- [#203-017 - AC Drive Accessory Upgrade](#)
- [#203-019 - Mechanical Rub Kit](#)
- [#208-001 - Shaft Alignment Tool Kit](#)
- [#208-003 - Standard Shim Kit](#)
- [#208-015 - Magnetic Base/Dial Indicator Set](#)
- [#570-000 - IPT Rotating Equipment Training Manual](#)
- [#570-001 - IPT Rotating Equipment Handbook](#)
- [#902 - Electromechanical Workstation](#)

Anexo A. Hojas de características del banco de pruebas



ABOUT US PRODUCTS NEWSLETTER NEWS CUSTOMERS CONTACT

MECHANICAL ELECTRICAL FLUID POWER INSTRUMENTATION CONTROL BASIC SKILLS
SYNERGY e-LEARNING ENGINEERING LAB EQUIPMENT WORKSTATIONS, FURNITURE & ACCESSORIES

- Two precision-machined, aluminum split pillow blocks allowing for bearing removal, and shaft repositioning
- Two 6" precision-machined rotors, allowing for single plane, dual plane and overhung balancing.
- Provision for creating rotor imbalance using set screws/washers or clay on inner rotor rim.
- Two, ½" diameter, precision-ground shafts (allows for re-configuration).
- Precision, helical beam coupling (other coupling types available as options).
- Provision for attachment of vibration pick-ups via 1/4-28 threaded studs.
- Modular, polycarbonate rotor and coupling guards.
- Steel, top-surface mounting bars allowing for magnetic attachment of accessories, and modular guards.
- Instructor key lock switch.
- Motor mounting sub-base with tapered alignment pins, allowing for ease of alignment/mis-alignment.
- T-slotted aluminum mounting surface allowing for convenient reconfiguration, and attachment of optional accessories.
- Motor jacking bolts.
- High-durability powder-coated and anodized surfaces throughout.
- Packaging for shipment via motor freight.

SERVICE REQUIREMENTS

110/220/VAC Single Phase

COURSE CONTENT

An introductory course for the maintenance technician including: vibration fundamentals, vibration measurement, vibration causes, data collection, and balancing.

Exercises include:

* Effects of frequency and displacement. * Illustrating resonance. * Understanding critical speed. * Proper pickup mounting. * Understanding imbalance. * Understanding vibration caused by misalignment. * Witnessing vibration from bearing faults. * Witnessing the effects of looseness. * Calculating imbalance. * Single plane balancing, the four-run method.

Warning!! Vibration in rotating equipment can cause dangerous results.

These devices have been designed for professionals for use under controlled circumstances for training only. DAC assumes no liability for injury resulting from the use or misuse of this product.

In accordance with DAC's established policy of continuous improvement, these specifications and product descriptions are subject to change without notice. This information is the latest technical information as of the time of viewing or printing.

- #203-002 - Gear/Belt Drive Accessory
- #203-003E - Vibration meter, expanded (metrix, acceleration, velocity, displacement).
- #203-011 - Eccentric/Cocked Rotor Kit
- #203-012 - Resonance Demonstration Kit
- #203-013 - Replacement Bent Shaft Kit
- #203-014 - Journal Bearing Kit
- #203-016 - Replacement Thomas Flexible Disk Coupling (No Helical Supplied)
- #203-018 - Supplemental Rotor Kit, 2-Piece
- #203-021 - Crack Demonstrator Kit
- #203-023 - Fan Demonstrator Set
- #203-024 - Motor Fault Kit
- #203-025 - Load/Brake Device Accessory, Mechanical
- #203-500 - Use/Exercise Guide (Additional)
- #203-D01 - Heavy-Duty, Foam-lined Reusable Packing Container
- #203D-PAC - Vibration Analysis Demonstrator, Quick-Start Package (Includes: #203D, #203-003, #203-010, #203-015, #203-019)
- #208-002 - Economy Shim Kit (plastic)

RELATED ITEMS

- [#202 - Fan Balancing Demonstrator](#)
- [#203 - Vibration Analysis Demonstrator](#)
- [#203E - Vibration Analysis Demonstrator, Extended](#)
- [#208 - Coupling/Shaft Alignment Trainer](#)

STANDARD ACCESSORIES

* Allen wrench set * Combination wrench set. * Weight/washer set. * Two replacement bearings with plastic races. * Clay * Vibration isolating feet. * Resonance demonstration kit, basic. * Spring/weight demonstration kit. * Balancing phase target. * Shim stock. * IPT Rotating Equipment Manual (textbook). * Use/exercise guide.

Design Assistance Corporation • 3 Killdeer Court, Suite 3 301 • PO Box 215 • Swedesboro, NJ USA 08085

TF (800) 652-5677 • PH (856) 241-9500 • FX (856) 241-9545 • sales@dac-3d.com • © Copyright 2012 Design Assistance Corporation. All Rights Reserved

Anexo B

Hojas de características del sensor

Miniature PiezoBeam® Accelerometer

Light Weight IEPE TEDS Accelerometer

The 8640A... is a high sensitivity single axis accelerometer. The sensor is designed primarily for modal analysis applications and has selective use as a general purpose vibration sensor.

- IEPE, ± 5 g, ± 10 g, and ± 50 g ranges
- Smallest PiezoBeam single axis accelerometer with lowest mass
- High sensitivity, low noise and high dynamic range
- Choice of ranges and sensitivities
- Ground Isolated Mounts
- TEDS Option
- Conforming to CE

Description

Type 8640A... is a miniature and lightweight single axis accelerometer which reduces mass loading on thin-walled structures important to multichannel modal applications or general vibration measurements.

Internal of the PiezoBeam accelerometer is a unique sensing element consisting of a ceramic beam supported by a center post that when bending occurs as a result of being subjected to vibration, the cantilevered beam element yields an electrical charge. The charge signal is converted by the internal low noise charge amplifier to a proportional high level voltage signal at an output impedance of less than 500 ohms. Patented methods are used to thermally compensate the sensing element.

Type 8640A... single axis accelerometer, has an integral 10-32 connector and is designed for easy installation in confined areas. Type 8640A... has a welded titanium housing and is ground isolated when mounted with the mounting clip or adhesive mounting adapter. The sensing element design provides outstanding amplitude and phase response over a wide frequency range.

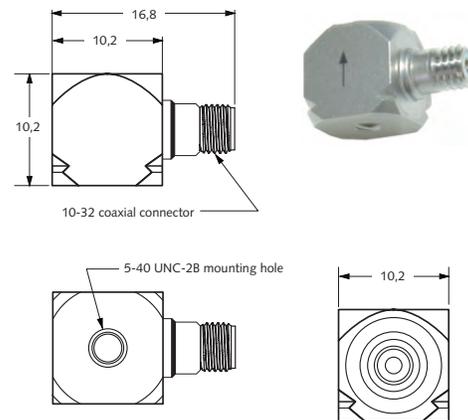
The accelerometer operates directly from the internal power source found in most FFT analyzers, from several Kistler Piezotron® power supply couplers or any industry standard IEPE (Integrated Electronic Piezo Electric) compatible power source.

KISTLER

measure. analyze. innovate

Type 8640A...

World Patent: W0/2007/062532
European Patent: 2006790940
U.S. Patent: 12088325



Application

This miniature and light weight, single axis accelerometer series is ideally suited for multiple channel modal analysis on small components or subsystems and well as full vehicle testing for aviation, space, automotive as well as a wide range of general test structures.

Accessing TEDS Data

Accelerometers with a "T" suffix are variants of the standard version incorporating the "Smart Sensor" design (PiezoSmart®). Viewing an accelerometer's data sheet requires an Interface/Coupler such as Kistler's Type 5134B... or Type 5000M04 with TEDS Editor software. The Interface provides negative current excitation (reverse polarity) altering the operating mode of the PiezoSmart sensor allowing the program editor software to read or add information contained in the memory chip.

Anexo B. Hojas de características del sensor

Miniature PiezoBeam® Accelerometer – Light Weight IEPE TEDS Accelerometer, Type 8640A...

KISTLER

measure. analyze. innovate.

Technical Data

Specification	Unit	Type 8640A5 Type 8640A5T	Type 8640A10 Type 8640A10T	Type 8640A50 Type 8640A50T
Acceleration range	g	±5	±10	±50
Acceleration limit	gpk	±8	±16	±80
Threshold (1 ... 10 kHz)	grms	0,00014	0,00016	0,00036
Sensitivity (±10 %)	mV/g	1 000	500	100
Resonant frequency mounted, nom.	kHz	17	17	25
Frequency response (±5 %)	Hz	0,5 ... 3 000	0,5 ... 3 000	0,5 ... 5 000
Phase shift <5°	Hz	2 ... 3 000	2 ... 3 000	2 ... 5 000
Amplitude non-linearity	%FSO	±1	±1	±1
Time constant nom.	s	1,1	1,1	1,1
Transverse sensitivity typ. (max. 3 %)	%	1,5	1,5	1,5
Environmental				
Base strain sensitivity @ 250 µε	g/µε	0,004	0,004	0,004
Random vibration max.	grms	50	50	100
Shock limit (1 ms pulse)	gpk	7 000	7 000	10 000
Temperature coeff. of sensitivity	%/°C	0,12	0,16	0,16
Operating temperature range	°C	-40 ... 55	-40 ... 65	-40 ... 65
Output				
Bias nom.	VDC	13	13	13
Impedance	Ω	≤100	≤100	≤100
Voltage Full Scale	V	±5	±5	±5
Power Supply				
Voltage	VDC	22 ... 30	22 ... 30	22 ... 30
Constant current	mA	2 ... 20	2 ... 20	2 ... 20
Construction				
Sensing element	Type	PiezoBeam	PiezoBeam	PiezoBeam
Housing/base	material	Titanium	Titanium	Titanium
Sealing housing/ connector (EN 60529)	Type	IP 68	IP 68	IP 68
Connector	Type	10-32 coaxial	10-32 coaxial	10-32 coaxial
Ground isolated		with accessory	with accessory	with accessory
Mass	grams	3,5	3,5	3,5
Mounting	Type	wax, adhesive, Clip, magnet, stud (5-40 UNC-2B)	wax, adhesive, Clip, magnet, stud (5-40 UNC-2B)	wax, adhesive, Clip, magnet, stud (5-40 UNC-2B)
Mounting torque, stud	N·m	0,7	0,7	0,7

1 g = 9,80665 m/s², 1 Inch = 25,4 mm, 1 Gramm = 0,03527 oz, 1 lbf-in = 0,113 N·m

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2011 ... 2011, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG

Anexo C

Hojas de características del chasis

NI cDAQTM -9171



NI CompactDAQ One-Slot Bus-Powered USB Chassis

These specifications are for the NI cDAQ-9171 chassis only. These specifications are typical at 25 °C unless otherwise noted. For the C Series module specifications, refer to the documentation for the C Series module you are using.

Analog Input

Input FIFO size	127 samples
Maximum sample rate ¹	Determined by the C Series module
Timing accuracy ²	50 ppm of sample rate
Timing resolution ²	12.5 ns
Number of channels supported	Determined by the C Series module

Analog Output

Number of channels supported	
Hardware-timed task	
Onboard regeneration	16
Non-regeneration	Determined by the C Series module
Non-hardware-timed task	
Determined by the C Series module	
Maximum update rate	
Onboard regeneration	1.6 MS/s (multi-channel, aggregate)
Non-regeneration	Determined by the C Series module

¹ Performance dependent on type of installed C Series module and number of channels in the task.

² Does not include group delay. For more information, refer to the documentation for each C Series module.

Anexo C. Hojas de características del chasis

Timing accuracy	50 ppm of sample rate
Timing resolution	12.5 ns
Output FIFO size	
Onboard regeneration	8,191 samples shared among channels used
Non-regeneration	127 samples
AO waveform modes	Non-periodic waveform, periodic waveform regeneration mode from onboard memory, periodic waveform regeneration from host buffer including dynamic update

Digital Waveform Characteristics

Waveform acquisition (DI) FIFO	
Parallel modules	511 samples
Serial modules	63 samples
Waveform generation (DO) FIFO	
Parallel modules	2,047 samples
Serial modules	63 samples
Digital input sample clock frequency	
Streaming to application memory	System-dependent
Finite	0 MHz to 10 MHz
Digital output sample clock frequency	
Streaming from application memory	System-dependent
Regeneration from FIFO	0 MHz to 10 MHz
Finite	0 MHz to 10 MHz
Timing accuracy	50 ppm

General-Purpose Counters/Timers

Number of counters/timers	4
Resolution	32 bits
Counter measurements	Edge counting, pulse, semi-period, period, two-edge separation, pulse width
Position measurements	X1, X2, X4 quadrature encoding with Channel Z reloading; two-pulse encoding
Output applications	Pulse, pulse train with dynamic updates, frequency division, equivalent time sampling
Internal base clocks	80 MHz, 20 MHz, 100 kHz
External base clock frequency	0 MHz to 20 MHz
Base clock accuracy	50 ppm
Output frequency	0 MHz to 20 MHz
Inputs	Gate, Source, HW_Arm, Aux, A, B, Z, Up_Down
Routing options for inputs	Any module PFI, analog trigger, many internal signals
FIFO	Dedicated 127-sample FIFO

Frequency Generator

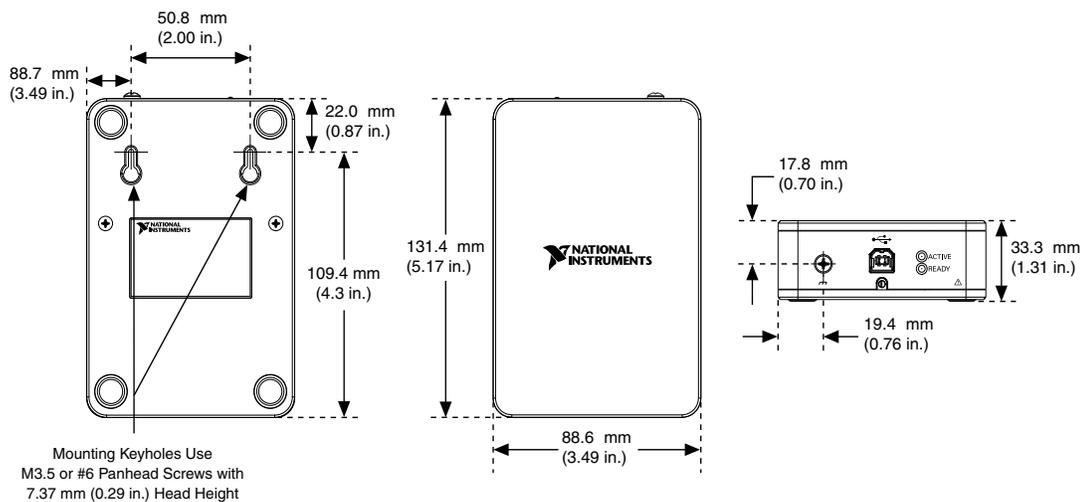
Number of channels	1
Base clocks	20 MHz, 10 MHz, 100 kHz
Divisors	1 to 16 (integers)
Base clock accuracy	50 ppm
Output	Any module PFI terminal

Physical Characteristics

Weight (unloaded)	353 g (12.5 oz)
Dimensions (unloaded)	131.4 mm × 88.6 mm × 33.3 mm (5.17 in. × 3.49 in. × 1.31 in.) Refer to the following figure.
USB connector securement	
USB securement type	Jackscrew provided on locking USB cable (part number 198506-01 or 780534-01)
Torque for jackscrew	0.41 N · m (3.6 lb · in.)
Chassis ground	
Gauge	1.31 mm ² (16 AWG) or larger wire
Torque for ground screw	0.76 N · m (6.7 lb · in.)

If you need to clean the chassis, wipe it with a dry towel.

Figure 1. NI cDAQ-9171 Dimensions



Anexo D

Hojas de características de la tarjeta

NI 9234



4 AI, ± 5 V, 24 Bit, 51.2 kS/s/ch Simultaneous, AC/DC Coupling, IEPEAC Coupling



- Software-selectable AC/DC coupling (AC coupled at 0.5 Hz)
- Software-selectable IEPE signal conditioning with AC coupling (2 mA)
- -40 °C to 70 °C operating, 5 g vibration, 50 g shock
- 24-bit resolution
- Anti-aliasing filters
- 102 dB dynamic range
- Smart TEDS sensor compatibility

NI 9234 Specifications

The following specifications are typical for the range -40 °C to 70 °C unless otherwise noted.

Input Characteristics

Number of channels	4 analog input channels
ADC resolution	24 bits
Type of ADC	Delta-Sigma (with analog prefiltering)
Sampling mode	Simultaneous
Type of TEDS supported	IEEE 1451.4 TEDS Class I

Internal master timebase (f_M)	
Frequency	13.1072 MHz
Accuracy	±50 ppm maximum
Data rate range (f_S)	
Using internal master timebase	
Minimum	1.652 kS/s
Maximum	51.2 kS/s
Using external master timebase	
Minimum	0.391 kS/s
Maximum	52.734 kS/s
Data rates ¹ (f_S)	$(f_M \div 256)/n, n = 1, 2, \dots, 31$
Input coupling	AC/DC (software-selectable)
AC cutoff frequency	
-3 dB	0.5 Hz
-0.1 dB	4.6 Hz maximum
Input range	±5 V
AC voltage full-scale range	
Minimum	±5 Vpk
Typical	±5.1 Vpk
Maximum	±5.2 Vpk
Common-mode voltage range (AI- to earth ground)	±2 V maximum
IEPE excitation current (software-selectable on/off)	
Minimum	2.0 mA
Typical	2.1 mA
Power-on glitch	90 µA for 10 µs
IEPE compliance voltage	19 V maximum
If you are using an IEPE sensor, use the following equation to make sure your configuration meets the IEPE compliance voltage range.	
$(V_{\text{common-mode}} + V_{\text{bias}} \pm V_{\text{full-scale}})$ must be 0 to 19	
Where	
$V_{\text{common-mode}}$ is the common-mode voltage applied to the NI 9234 V	
V_{bias} is the bias voltage of the IEPE sensor	
$V_{\text{full-scale}}$ is the full-scale voltage of the IEPE sensor	
Overvoltage protection (with respect to chassis ground)	
For a signal source connected to AI+ and AI-	±30 V
For a low-impedance source connected to AI+ and AI-	-6 V to 30 V
Input delay	$(40 + 5/512)/f_S + 2.6 \mu\text{s}$

¹ The data rate must remain within the appropriate data range. Refer to the [Data Rates](#) for more information.

Anexo D. Hojas de características de la tarjeta

Passband

Frequency	$0.45 * f_s$
Flatness ($f_s = 51.2$ kS/s)	40 mdB (pk-to-pk maximum)
Phase nonlinearity ($f_s = 51.2$ kS/s)	$\pm 0.45^\circ$ maximum

Stopband

Frequency	$0.55 * f_s$
Rejection	100 dB
Alias-free bandwidth	$0.45 * f_s$
Oversample rate	$64 * f_s$
Crosstalk (1 kHz)	-110 dB

CMRR ($f_{in} \leq 1$ kHz)

Minimum	40 dB
Typical	47 dB
SFDR ($f_{in} = 1$ kHz, -60 dBFS)	120 dB

Power Requirements

Power consumption from chassis

Active mode	900 mW maximum
Sleep mode	25 μ W maximum

Thermal dissipation (at 70 °C)

Active mode	930 mW maximum
Sleep mode	25 μ W maximum

Physical Characteristics

If you need to clean the module, wipe it with a dry towel.

Weight	173 g (6.1 oz)
--------	----------------

Safety Voltages

Connect only voltages that are within the following limits:

Channel-to-earth ground	± 30 V maximum, Measurement Category I
-------------------------	--

Isolation

Channel-to-channel	None
Channel-to-earth ground	None

Measurement Category I is for measurements performed on circuits not directly connected to the electrical distribution system referred to as *MAINS* voltage. MAINS is a hazardous live electrical supply system that powers equipment. This category is for measurements of voltages from specially protected secondary circuits. Such voltage measurements include signal levels, special equipment, limited-energy parts of equipment, circuits powered by regulated low-voltage sources, and electronics.

Anexo E

Hojas de características del analizador

Analizador de vibraciones Fluke 810

FLUKE®

Datos técnicos:

Para obtener una respuesta inmediata

El instrumento para la resolución de problemas más avanzado destinado a los técnicos de mantenimiento mecánico que necesitan una respuesta inmediata. Esta tecnología de diagnóstico única le ayudará a identificar y priorizar rápidamente los problemas mecánicos, poniendo en sus manos toda la experiencia de un técnico en análisis de vibraciones.



Características y ventajas:

- La **identificación y localización integrada de las averías mecánicas más comunes (rodamientos, alineación incorrecta, desequilibrio, holguras)** concentra los trabajos de mantenimiento en el origen del problema, reduciendo los tiempos de parada no planificados
- La **escala de gravedad de las averías con cuatro niveles** le permitirá priorizar el trabajo de mantenimiento
- Las **recomendaciones de reparación** advierten a los técnicos sobre las medidas correctoras
- La **ayuda en pantalla sensible al contexto** ofrece consejos en tiempo real y sirve de guía a los nuevos usuarios
- La **memoria integrada ampliable de 2GB** proporciona espacio suficiente para los datos de sus máquinas
- La **función de auto comprobación** garantiza un rendimiento óptimo y más tiempo para el trabajo
- El **tacómetro láser proporciona precisión en la velocidad de funcionamiento de las máquinas** y favorece un diagnóstico seguro
- El **acelerómetro triaxial** reduce en 2/3 el tiempo de medida que precisaría si utilizara acelerómetros de eje único

Utilice el analizador de vibraciones para

- Solucionar rápidamente los problemas que presenten los equipos y comprender la causa principal de la avería
- Inspeccionar el equipo antes y después del mantenimiento planificado y confirmar la reparación
- Puesta en marcha de nuevos equipos y garantizar una instalación correcta
- Proporcionar una prueba cuantificable de las condiciones del equipo que facilite sus decisiones de inversión en cuanto a reparar o sustituir los equipos
- Priorizar y planificar actividades de reparación y trabajar con mayor eficiencia
- Anticiparse a la aparición de averías en los equipos y tener el control sobre el inventario de piezas de recambio

Especificaciones del analizador

Especificaciones de diagnóstico	
Averías estándar	Desequilibrio, holgura, alineación incorrecta y averías en los rodamientos
Análisis para	Motores, ventiladores, turbinas, correas y cadenas de transmisión, cajas de cambios y engranajes, acoplamientos, bombas centrífugas, bombas de pistón, bombas de paletas deslizantes, bombas de propulsión, bombas de tornillo, bombas de rotación de rosca/engranaje/lóbulos, compresores de pistón, compresores centrífugos, compresores de tornillo, máquinas con acoplamiento compacto, husillos
Rango de velocidad de rotación de las máquinas	200 rpm a 12.000 rpm
Detalles de diagnóstico	Diagnóstico de texto plano, gravedad de la avería (leve, moderada, grave, crítica), detalles de reparación, picos experimentados, espectros
Especificaciones eléctricas	
Selección de rangos	Automática
Convertidor A/D	4 canales, 24 bits
Ancho de banda útil	2 Hz a 20 kHz
Muestreo	51,2 kHz
Funciones de procesamiento de señales digitales	Filtro anti-aliasing configurado automáticamente, filtro paso alto, decimación, superposición, presentación en ventana, FFT, cálculo de la media
Velocidad de muestreo	2,5 Hz a 50 kHz
Rango dinámico	128 dB
Precisión de amplitud	100 dB
Resolución FFT	800 líneas
Ventanas espectrales	Hanning
Unidades de frecuencia	Hz, órdenes, cpm
Unidades de amplitud	pulg./seg, mm/seg, VdB (EE.UU.), VdB (Europa)
Memoria no volátil	Tarjeta de memoria micro SD, 2GB de memoria interna + almacenamiento adicional a través de ranura accesible para el usuario
Especificaciones generales	
Dimensiones (AxPxAN)	18,56 cm x 7 cm x 26,72 cm
Peso (con la batería)	1,9 kg
Pantalla	¼ VGA, 320 x 240 color (5,7" en diagonal) TFT LCD con retroiluminación de LED
Conexiones de entrada/salida	
Conexión de sensor triaxial	Conector M12 de 4 pines
Conexión de sensor de eje único	Conector BNC
Conexión de tacómetro	Conexión mini DIN de 6 pines
Conexión a PC	Conector mini 'B' USB (2.0)
Batería	
Tipo de batería	Ión-litio, 14,8 V, 2,55 Ah
Tiempo de carga de la batería	3 horas
Tiempo de descarga de la batería	8 horas (en condiciones normales)
Adaptador de red CA	
Tensión de alimentación	100 a 240 V CA
Frecuencia de entrada	50/60 Hz
Sistema operativo	WinCE 6.0 Core
Idiomas	Inglés, francés, alemán, italiano, japonés, portugués, chino simplificado, español
Garantía	3 años

Especificaciones del analizador continuación

Especificaciones ambientales	
Temperatura de trabajo	0 °C a 50 °C
Temperatura de almacenamiento	-20 °C a 60 °C
Humedad de funcionamiento	10% a 95% H.R., sin condensación
Certificaciones reconocidas	CHINA RoHS, CSA, CE, C TICK, RAEE
Compatibilidad electromagnética	EN 61326-1:2006, EN 61010:1:2001 2ª edición.

Especificaciones del sensor

Tipo de sensor	Acelerómetro
Sensibilidad	100 mV/g ($\pm 5\%$, 25 °C)
Rango de aceleración	Pico de 80 g
No linealidad en amplitud	1%
Respuesta en frecuencia	
Z	2 - 7.000 Hz ± 3 dB
X, Y	2 - 5.000 Hz ± 3 dB
Requisitos de alimentación (IEPE)	18 V CC a 30 V CC, 2 mA a 10 mA
Tensión de salida de polarización	12 V CC
Conexión a tierra	Carcasa con conexión a tierra
Diseño del elemento sensor	Cerámica piezoeléctrica/corte
Material del cuerpo	Acero inoxidable 316L
Soporte montaje	Tornillo prisionero de cabeza redonda 10-32, imán de tierras raras de 2 polos (resistencia a la tracción de 21,7 Kg)
Conector de salida	M12 de 4 pines
Conector de acoplamiento	M12- F4D
Memoria no volátil	Compatible con TEDS 1451.4
Límite de vibración	Pico de 500 g
Límite de impacto	Pico de 5.000 g
Sensibilidad electromagnética, equivalente en g	100 μ g/gauss
Sellado	Hermético
Rango de temperatura	-50 °C a 120 °C $\pm 7\%$
Garantía	1 año

Especificaciones del tacómetro

Dimensiones	2,86 cm x 12,19 cm
Peso	96 g con cable
Alimentación	Alimentación a través del Analizador de Vibraciones 810
Detección	Diodo láser clase 2
Rango	6,0 a 99.999 rpm
Precisión	
6,0 a 5.999,9 rpm	$\pm 0,01\%$ y ± 1 dígito
5.999,9 a 99.999 rpm	$\pm 0,01\%$ y ± 1 dígito
Resolución	0,1 rpm
Rango efectivo	1 cm a 100 cm
Tiempo de respuesta	1 segundo (>60 rpm)

FLUKE®

Especificaciones del tacómetro continuación

Controles	Botón transparente de encendido/apagado de la medición
Interfaz	Mini DIN 6 pines
Longitud del cable	50 cm
Garantía	1 año
Accesorios del tacómetro	Cinta reflectora: 1,5 cm x 52,5 cm

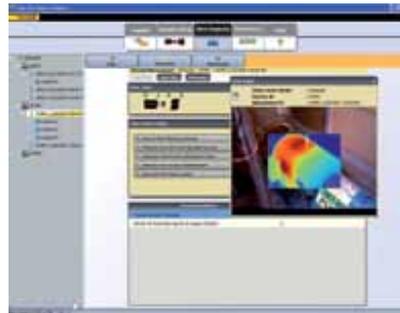
Software Viewer para PC

Requisitos mínimos del hardware	1 GB de RAM
Requisitos del sistema operativo	Windows XP, Vista

Software de aplicación Viewer

El analizador de vibraciones Fluke 810 incluye el software Viewer para PC que amplía su capacidad de almacenamiento de datos y de seguimiento. Con el software Viewer podrá:

- Crear informes de diagnóstico y realizar un seguimiento del estado de gravedad de su máquina
- Crear configuraciones de maquinaria cómodamente a través del teclado y el ratón, y transferir los datos a su analizador de vibraciones 810
- Ver con más detalle los espectros de diagnóstico y vibración



- Importar y almacenar imágenes en formato JPEG e imágenes térmicas capturadas con cámaras termográficas Fluke para una visualización más completa del estado de su máquina



Fluke. *Manteniendo su mundo en marcha.®*

Fluke Ibérica, S.L.
Pol. Ind. Valportillo
C/ Valgrande, 8
Ed. Thanworth II · Nave B1A
28108 Alcobendas
Madrid

Tel.: 91 4140100
Fax: 91 4140101
E-mail: info.es@fluke.com
Web: www.fluke.es

©Copyright 2010 Fluke Corporation. Reservados todos los derechos. Precios recomendados de venta al público (sin IVA). Impreso en los Países Bajos 01/2010.
Pub-ID 11590-spa

Información sujeta a modificación sin previo aviso.



Anexo F

Manual de usuario

Inicialización de la interfaz gráfica

Para iniciar el programa que ejecuta la interfaz gráfica externa se deben seguir los pasos detallados a continuación.

1. Ejecutar MATLAB/Simulink.
2. Abrir en el “Current Directory” la carpeta específica de trabajo del software de la interfaz gráfica, en este caso la carpeta se llama “Analizador_1.0”.
3. Escribir en el “Command Window” el nombre del fichero (Analizador) que inicializa el sistema sin la extensión *.m y pulsar ENTER.

A continuación, se muestra la ventana principal de la interfaz gráfica “Análisis de vibraciones”, en esta ventana se presentan opciones de las principales etapas de un análisis de vibraciones como se muestra en la Figura A.F.1. Cada opción genera una nueva ventana para ingresar los parámetros necesarios y realizar el proceso seleccionado. De manera resumida, las opciones principales que se presentan son: “Adquisición de datos” en esta etapa principalmente se ingresan los parámetros para configurar la tarjeta de adquisición y los acelerómetros,

se adquieren las señal de los canales seleccionados y se presentan la señal en el dominio del tiempo. En la segunda opción, “Procesamiento”, a partir de las señales previamente adquiridas o guardadas en sesiones previas, se procesan para transformarlas del domino del tiempo al dominio de la frecuencia a partir de la FFy y de la STFT y los resultados se muestran gráficamente. En la tercera opción, “Diagnóstico”, en esta sección después de haber procesado los datos se dará un diagnóstico del análisis de la señal vibratoria de acuerdo con la amplitud de las frecuencias.



Figura A.F.1. Ventana de inicio del software “Análisis de vibraciones”

Funcionamiento de la interfaz gráfica

Antes de ejecutar cualquier acción en la interfaz gráfica es conveniente revisar lo siguiente:

1. Antes de ejecutar el programa principal, se deben realizar todas las conexiones físicas necesarias para llevar a cabo los requerimientos de la sesión de trabajo. Conexión de la tarjeta de adquisición al puerto USB, conexión de los acelerómetros a la tarjeta de adquisición (siempre empezando por el canal cero y en orden ascendente).
2. Disponer de la ficha técnica de los acelerómetros, principalmente del valor de la sensibilidad de cada uno de los acelerómetros que servirá para la configuración de estos

elementos previo a la adquisición de datos.

3. Previo a la adquisición, mediante el software Measurement & Automation Explorer (MAX) comprobar que el sistema reconoce la tarjeta de adquisición y se encuentra activa para ser llamada desde cualquier programa. Además, es importante asignarle un identificador (ID) con la cual pueda ser llamado desde cualquier rutina de programación como se muestra en la Figura A.F.2, donde se observa que el dispositivo “NI9234” se encuentra listo para ser usado.

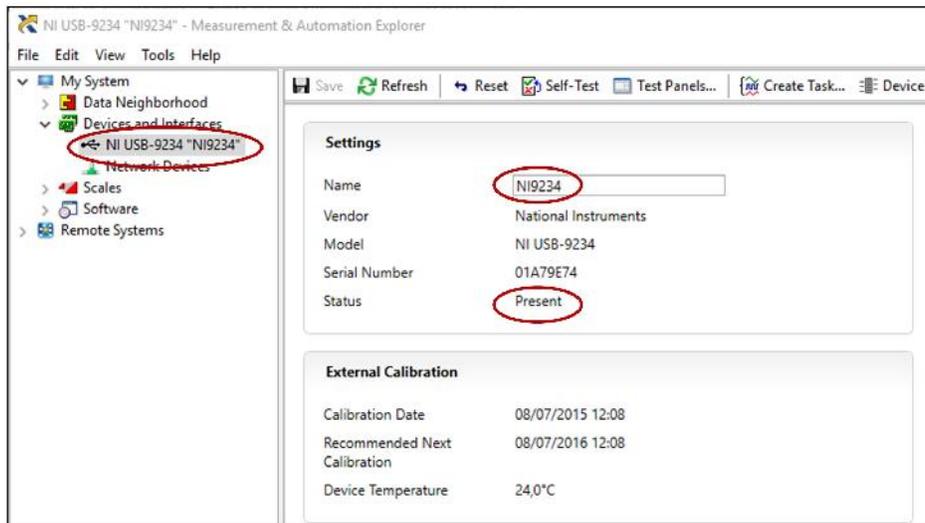


Figura A.F.2. Configuración de la tarjeta de adquisición en software “MAX”

4. Antes ejecutar la opción de adquirir los datos, es importante conocer los parámetros de configuración de la tarjeta de adquisición (principalmente la tasa de muestreo) ya que estos no se pueden elegir arbitrariamente sin conocimiento previo ya que se producirían errores.
5. Después de haber inicializado el software, lo primero que se debe hacer es realizar una captura de datos utilizando el menú “Adquisición de datos” y posteriormente elegir entre los métodos de procesamiento. Antes no se puede realizar ninguna acción de almacenamiento porque todavía la interface no dispone de datos almacenados.
6. Para la ejecución de las secciones “Procesamiento” y “Diagnóstico” sólo se puede trabajar con un solo canal a la vez, por lo tanto, siempre será necesario seleccionar un canal y posteriormente ejecutar la función requerida.

Menú: Adquisición de datos

Esta sección permite realizar la adquisición de la señal vibratoria y posteriormente guardar o procesarla. Sin embargo, previamente se deben considerar las recomendaciones de la sección anterior. En la Figura A.F.3 se presenta la ventana principal de esta sección. En esta interfaz se observa los canales (cuatro) disponibles para adquirir los datos, de estos, se pueden seleccionar los necesarios de acuerdo con las necesidades y los acelerómetros que se disponen. De acuerdo con los canales seleccionados, se activarán los ejes donde se observarán las señales en el dominio del tiempo después de haber adquirido los datos y seleccionar la opción “Graficar”.

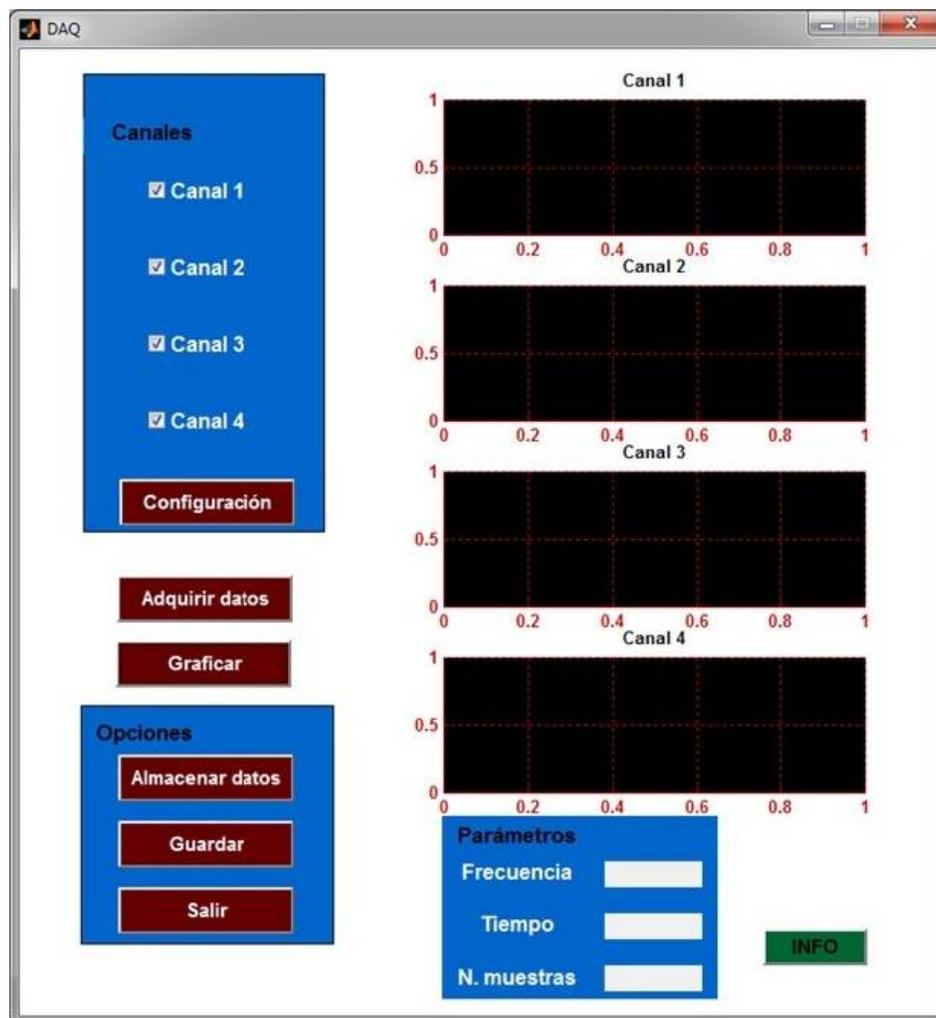


Figura A.F.3. Ventana principal del menú “Adquisición de datos”

El botón “Configuración” de esta interface genera una ventana emergente que permite al usuario ingresar los siguientes parámetros: tasa de muestreo (muestras/segundo), tiempo de adquisición (segundos) y seleccionar el número de sensores a utilizar (máximo 4), en caso de ingresar parámetros diferentes al que necesita el programa o que los valores ingresados estén fuera del rango establecido, aparecerá un mensaje de alerta como se observa en la Figura A.F.4. Inmediatamente después de ingresar el número de sensores, se activan las casillas correspondientes para ingresar la sensibilidad de los acelerómetros como se observa en la Figura A.F.5.



Figura A.F.4. Mensaje de error al ingresar parámetros fuera de rango.



Figura A.F.5. Parámetros de entrada previo a la adquisición.

Después de haber configurado el sistema, para iniciar la adquisición de los datos sólo basta con pulsar el botón “Adquirir datos”. Los datos adquiridos son guardados temporalmente hasta decidir que hacer con ellos. Las principales opciones son las siguientes:

- La opción “Graficar” bosqueja los datos adquiridos en el dominio del tiempo para ver el comportamiento de las señales vibratorias, el eje x representa el tiempo (s) y en el eje de las ordenadas la amplitud (g) de la señal.
- El botón “Almacenar” se pulsa una vez que se ha realizado la adquisición y representación de las señales. Esta opción permite al usuario almacenar en un fichero de texto toda la información de cada una de las señales adquiridas para ser procesadas en sesiones futuras.
- El botón “Guardar” se selecciona cuando se han realizado todas las acciones correspondientes en la sección de “Adquisición de datos” y la opción “Salir” enviar la sesión de trabajo a la ventana principal para disponer de otras funciones como es el procesamiento de las señales.

Por otra parte, en la parte inferior derecha, se encuentra bloque “Parámetros” para visualizar el los principales parámetros después de una captura de una señal vibratoria. A la derecha de esta sección, aparece el botón “INFO” que al pulsarlo emerge una ventana que presenta las características técnicas de cada uno de los elementos del sistema de adquisición de datos implementado en el banco de pruebas.

Menú: Procesamiento

Esta sección permite procesar los datos adquiridos previamente o en sesiones anteriores. Para procesar las señales se cuentan con dos opciones en la barra de menús: Cargar y Transformadas. El menú Transformadas a su vez tiene dos opciones para el procesamiento: la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para condiciones de velocidad constante y la Transformada

de Fourier de Tiempo Corto (STFT) para condiciones de velocidad variable como se observa en la Figura A.F.6.

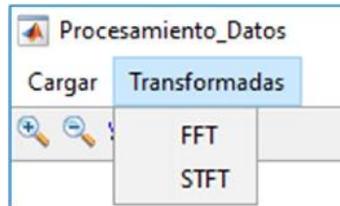


Figura A.F.6. Barra de menús de la ventana Procesamiento.

Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Para realizar el procesamiento de la señal adquirida previamente con la FFT, es necesario seleccionar una de las señales adquiridas ya que sólo se puede procesar los datos de un canal a la vez. Por lo tanto, en la interface de esta sección aparece un menú desplegable para seleccionar el canal de interés como se observa en la Figura A.F.7. Después de seleccionar el canal aparece la gráfica de la representación de la señal en el dominio del tiempo.

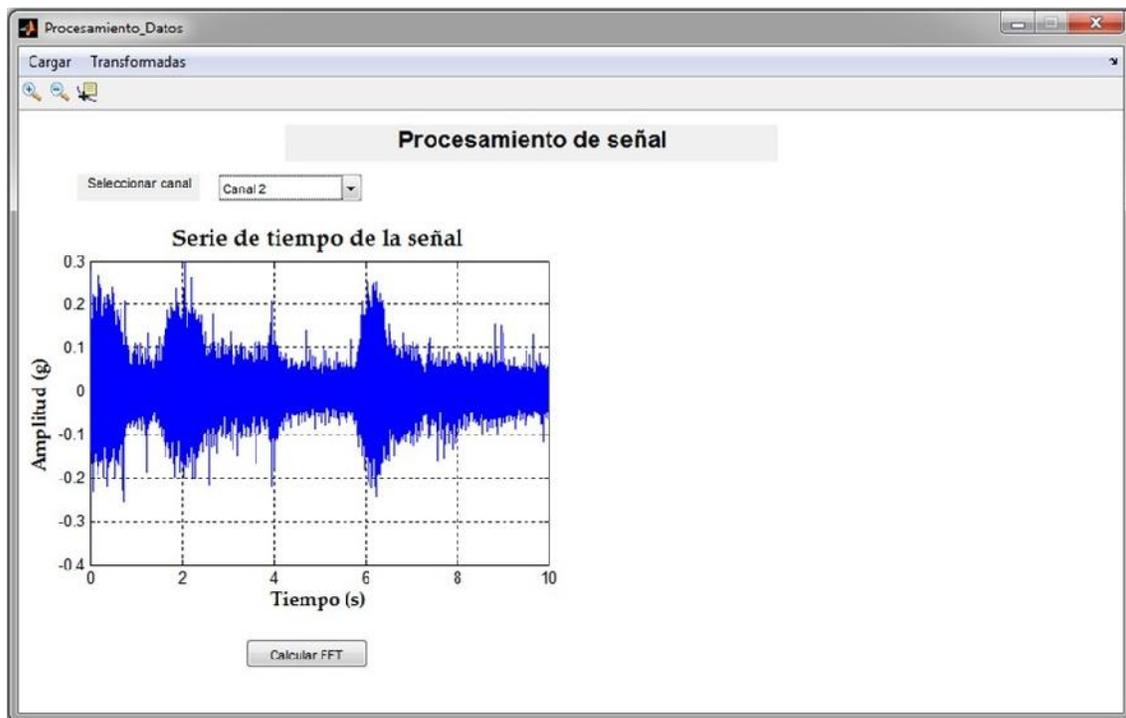


Figura A.F.7. Representación temporal del canal seleccionado.

El espectro de frecuencias de esta señal se muestra sólo con pulsar el botón “Calcular FFT”, como se observa en la Figura A.F.8. Para analizar con detalle el espectro de frecuencia, en la parte inferior de la gráfica se encuentra la opción “Frecuencia final” que permite modificar el límite superior del eje horizontal (x, Frecuencia) de la gráfica del espectro para ver a detalle el espectro a bajas frecuencias. Para utilizar esta opción solo es necesario ingresar el valor del límite superior en el cuadro y posteriormente pulsar el botón “Calcular FFT”, esto se repite cada vez que se quiera modificar la gráfica.

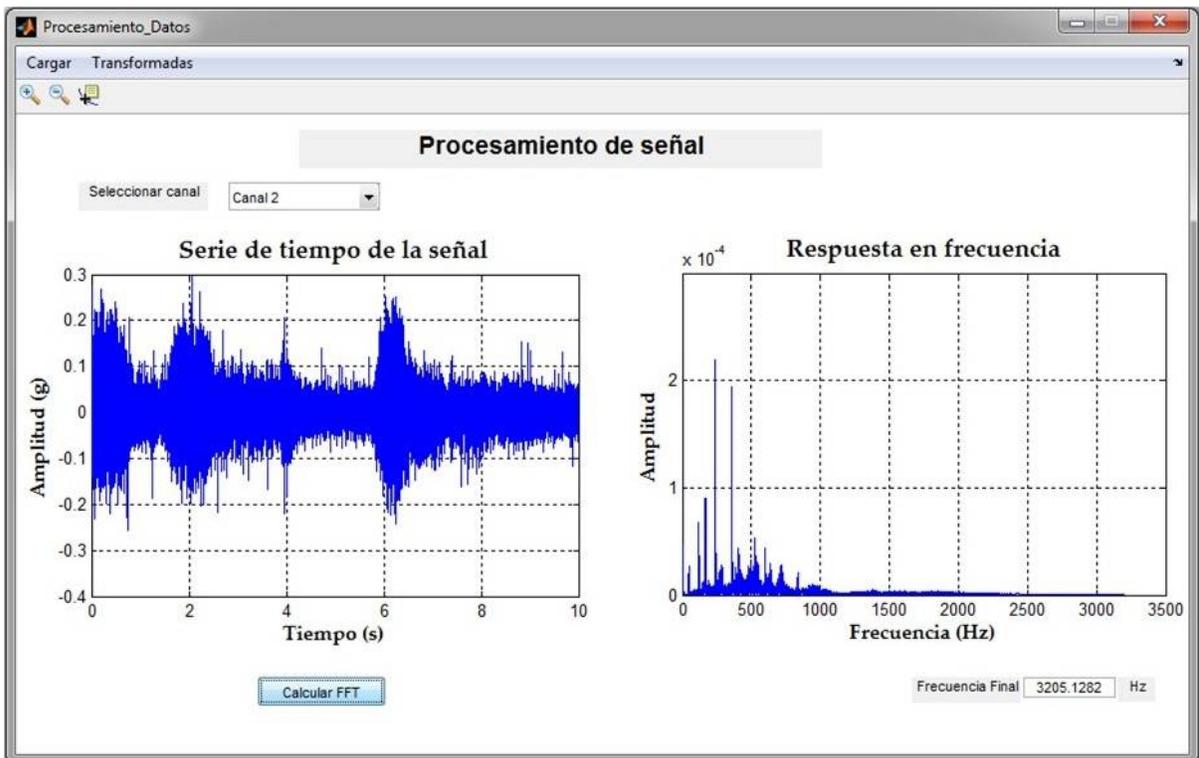


Figura A.F.8. Representación en tiempo y frecuencia de señal adquirida.