



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO



FACULTAD DE INGENIERÍA

CAMPUS SAN JUAN DEL RÍO

ÁREA DE ELECTROMECAÁNICA

TESIS

MONITOREO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MOTORES DE INDUCCIÓN PARA DETECCIÓN DE FALLAS DE CORTOCIRCUITO

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

PRESENTA:

LUIS ENRIQUE GARFIAS NIETO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MARTÍN VALTIERRA RODRÍGUEZ

San Juan del Río, Querétaro, septiembre de 2020



**MONITOREO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN MOTORES DE
 INDUCCIÓN PARA DETECCIÓN DE FALLAS DE CORTOCIRCUITO**

TESIS

Como parte de los requisitos para obtener el título de

INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Línea Terminal

DISEÑO Y MANUFACTURA

Presenta

LUIS ENRIQUE GARFÍAS NIETO

Dirigido por:

M.C. MARTÍN VALTIERRA RODRÍGUEZ

SINODALES:

M.C. MARTÍN VALTIERRA RODRÍGUEZ (11869)
 Presidente

DR. JUAN PRIMO BENÍTEZ RANGEL (2088)
 Secretario

DR. MIGUEL TREJO HERNÁNDEZ (6443)
 Vocal

DR. JUAN PABLO AMÉZQUITA SÁNCHEZ (11508)
 Suplente

San Juan del Río, Qro., Septiembre 2020

Resumen

Hoy en día, la globalización, industrialización y competitividad comercial demanda la calidad de los productos y la eficiencia de los procesos. En este sentido, la garantía del correcto funcionamiento de los equipos en un proceso es fundamental. Dentro de los diversos equipos y la mayoría de los procesos, el motor de inducción juega uno de los papeles más importantes. Aunque el motor de inducción es una máquina robusta, este está sujeto a diversos estreses mecánicos eléctricos, térmicos y ambientales inherentes a sus condiciones de operación, afectando su integridad mediante la generación de daños y, consecuentemente, generando costos de producción. Por lo tanto, la aplicación y desarrollo de sistemas de monitoreo, detección y diagnóstico de daños llega a ser fundamental. Este sistema puede basarse en el análisis de vibraciones ya que estas están directamente relacionadas con la dinámica del motor. Con el objetivo de contribuir a la solución de esta necesidad, una metodología basada en la transformada de Fourier y árboles de decisión para la detección de daño de corto circuito en motores de inducción es propuesta en este trabajo, en el cual se consideran diferentes niveles de severidad y se propone un semáforo que alerte acerca de esta severidad.

Dedicatoria

A mi familia principalmente que bajo diferentes adversidades siempre me motivó a seguir adelante, ahora seré un orgullo más en la familia. Gracias a ellos estoy donde estoy y aún estaré cada vez más lejos cumpliendo logros y aumentando el orgullo. Está por demás decir que también mis amigos tienen un espacio en esta dedicatoria, gracias a ellos el apoyo no faltó y claro, por qué no, mencionar el apoyo que siempre me brindaron los maestros que gracias a ellos adquirí los conocimientos para desarrollar una carrera.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Agradecimientos

Agradezco a todos los involucrados en el proceso, a mis padres, hermano, familiares, amigos y maestros. Todos me brindaron apoyo incondicional con altas y bajas, pero siempre apoyando no solo en este trabajo sino durante toda la estancia en la universidad. Las risas y momentos gratos no faltaron en la universidad tanto de amigos, compañeros y maestros. A mi asesor de tesis es al que más agradecimiento le tengo en cuestiones académicas, así como al personal administrativo que también colabora en la universidad, no me queda más que dar las gracias por todo lo habido y por haber.

Dirección General de Bibliotecas UJAO

Índice

Resumen	III
Dedicatoria.....	IV
Agradecimientos	V
Índice	VI
Índice de Figuras	VIII
Índice de Tablas	XI
1 INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Antecedentes.....	13
1.2 Descripción Del Problema.....	17
1.3 Justificación.....	18
1.4 Objetivos	19
1.4.1 Objetivo general	19
1.4.2 Objetivos particulares	19
1.5 Planteamiento General	20
2 FUNDAMENTACIÓN MATEMÁTICA	24
2.1 Motores De Inducción	24
2.1.1 Usos, aplicaciones, tipos y partes	24
2.1.2 Falla de corto circuito	27
2.2 Señales De Vibraciones Y Técnicas De Análisis	31
2.2.1 Vibraciones y características	31
2.2.2 Transformada de Fourier	42
2.2.3 Espectro	44
2.3 Sistema de adquisición de señales	45

2.3.1	Sensores de Vibraciones.....	46
2.3.2	Tarjeta LabView USB 6002	49
2.3.3	Labview	50
2.3.4	Matlab.....	51
2.3.5	Carga mecánica	51
2.4	Clasificación automática	53
3	METODOLOGÍA.....	55
3.1	Diagrama metodológico.	55
3.2	Acondicionamiento de banco de pruebas	55
3.3	Adquisición de señales	61
3.4	Análisis de Fourier	64
3.5	Extracción de componentes frecuenciales.....	65
3.6	Diagnóstico automático	66
4	EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS	68
4.1	Puesta de experimento	68
4.2	Puntos de medición.....	68
4.3	Señales de vibración	70
4.4	Espectros de Fourier	73
4.5	Tabla de componentes.....	76
4.6	Detección automática.....	77
5	CONCLUSIONES	83
5.1	Concluyentes	83
5.2	Prospectivas.....	84
6	Referencias	86

Índice de Figuras

<i>Figura 1-1 Planteamiento general del proyecto.</i>	20
<i>Figura 1-2: Metodología.</i>	22
<i>Figura 2-1: Partes del motor de inducción WEG.</i>	26
<i>Figura 2-2 Tipos de cortocircuitos en motores 3f y muestra de un detalle del corto vuelta-vuelta, www.motortico.com (2016).</i>	27
<i>Figura 2-3 Daño por cortocircuito en motor 3f con conexión estrella, www.motortico.com (2016).</i>	28
<i>Figura 2-4 Fotografías de cortocircuitos, www.motortico.com (2016).</i>	31
<i>Figura 2-5 Vibración periódica, Palomino (1997).</i>	33
<i>Figura 2-6 Vibración aleatoria, Palomino (1997).</i>	33
<i>Figura 2-7 Resonancia modificada por cierta cantidad de amortiguamiento, Palomino (1997).</i>	34
<i>Figura 2-8 Resonancia modificada por poco amortiguamiento, Palomino (1997).</i>	35
<i>Figura 2-9 Presencia de una masa desbalanceada en el sistema máquina – soportes, Palomino (1997).</i>	36
<i>Figura 2-10 Respuesta de un sistema máquina – soportes ante los efectos de un desbalance rotatorio, Palomino (1997).</i>	36
<i>Figura 2-11 Registro primitivo de las vibraciones en un sistema máquina – resortes, Palomino (1997).</i>	39
<i>Figura 2-12 Registro real de vibraciones obtenido en una máquina, Palomino (1997).</i>	40
<i>Figura 2-13 Espectro de la vibración ilustrada en la Figura 2-12, Palomino (1997).</i>	40
<i>Figura 2-14 Parámetros característicos, Palomino (1997).</i>	41
<i>Figura 2-15 Representación real y compleja de la Transformada Discreta de Fourier (DFT) , Palomino (1997).</i>	43
<i>Figura 2-16 Representacion de un espectrograma o espectro de frecuencia, Lecona (2018).</i>	45
<i>Figura 2-17 Acelerómetro tri-axial Kistler 8395 A10.</i>	48
<i>Figura 2-18 Montaje de acelerómetro tri-axial en tres puntos diferentes.</i>	48

<i>Figura 2-19 Configuración de Hardware para NI USB-6002.</i>	50
<i>Figura 2-20 Freno dinamométrico marca Festo serie LabVolt modelo 8540-00....</i>	52
<i>Figura 3-1: Metodología.</i>	55
<i>Figura 3-2 Diseño del banco para pruebas de motores (vista isométrica), Lecona (2018).</i>	56
<i>Figura 3-3 Cople mecánico montado y adaptado.</i>	57
<i>Figura 3-4 Acople entre motor y freno dinamométrico.</i>	58
<i>Figura 3-5 Bobinas originales del motor, Lecona (2018).</i>	60
<i>Figura 3-6 Diagrama de bobinas A y B con derivaciones, Lecona (2018).</i>	61
<i>Figura 3-7 Caja con tarjeta DAQ y terminales para conexión.</i>	62
<i>Figura 3-8 Entorno gráfico y de programación en LabVIEW.</i>	64
<i>Figura 3-9 Interfaz gráfica de Matlab.</i>	65
<i>Figura 3-10 Código fuente del análisis de Fourier.</i>	65
<i>Figura 4-1 Puesta de experimento.</i>	68
<i>Figura 4-2 Montaje del acelerómetro en la posición 1 cercana al rodamiento de la flecha del motor.</i>	69
<i>Figura 4-3 Montaje del acelerómetro en la posición 2 sobre el estator del motor.</i>	69
<i>Figura 4-4 Montaje del acelerómetro en la posición 3 cercana a la fijación de la base del motor.</i>	70
<i>Figura 4-5 Graficas de las vibraciones.</i>	71
<i>Figura 4-6 Grafica del Eje X, posición 1, carga 0% y 0 espiras en corto circuito...</i>	72
<i>Figura 4-7 Grafica del eje X, posición 1, carga 0% y 30 espiras en cortocircuito..</i>	72
<i>Figura 4-8 Interfaz de adquisición en funcionamiento.</i>	73
<i>Figura 4-9 Espectro de Fourier para el eje X, posición 1, carga 0% y 0 espiras en cortocircuito.</i>	74
<i>Figura 4-10 Espectro de Fourier para el eje X, posición 1, carga 0% y 10 espiras en cortocircuito.</i>	74
<i>Figura 4-11 Espectro de Fourier para el eje X, posición 1, carga 0% y 20 espiras en cortocircuito.</i>	75
<i>Figura 4-12 Espectro de Fourier para el eje X, posición 1, carga 0% y 30 espiras en cortocircuito.</i>	75

Figura 4-13 Gráfica de barras para la amplitud seleccionada. 77

Figura 4-14 Gráfica de barras para la amplitud seleccionada. 78

Figura 4-15 Gráfica de barras para la amplitud seleccionada. 78

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Índice de Tablas

Tabla 3-1 Matriz de pruebas experimentales.	59
Tabla 4-1 Tabla de valores de vibración para condiciones de falla y de carga a una frecuencia de 29.95 Hz en la posición 1 del acelerómetro.....	76
Tabla 4-2 Tabla de valores de vibración para condiciones de falla y de carga a una frecuencia de 29.95 Hz en la posición 2 del acelerómetro.....	76
Tabla 4-3 Tabla de valores de vibración para condiciones de falla y de carga a una frecuencia de 29.95 Hz en la posición 3 del acelerómetro.....	77
Tabla 4-4 Matriz de confusión condición sin carga.....	79
Tabla 4-5 Matriz de confusión condición carga 50%.	80
Tabla 4-6 Matriz de confusión condición carga 100%.....	80

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes.

A lo largo de los años, los motores han llegado a ser la máquina eléctrica más importante en los procesos industriales (FitzGerald et al., 1992; Sanz et al., 2002; Harper, 2005; Rivera et al., 2018), siendo los de inducción los más utilizados (Rivera-Guillen et al., 2018). Aunque los motores de inducción son máquinas eléctricas robustas, estas son susceptibles a sufrir fallas (Peña, 2011) debido a diferentes estreses mecánicos y eléctricos inherentes a su operación. Con el objetivo de evitar paros no programados en los procesos industriales, los cuales traerían pérdidas económicas importantes, el monitoreo y la detección oportuna de fallas es primordial.

En este sentido se han generado amplios campos de investigación y altos desarrollos tecnológicos para el diagnóstico de fallas en motores de inducción. En primer lugar, es importante mencionar que existen diferentes tipos de fallas, las cuales pueden ser asociadas a fallas por baleros, desalineamientos, desbalances de carga, barras rotas, cortocircuito en el embobinado, etc. Siendo la de corto circuito una de las más importantes y comunes (Díaz et al., 2010; Lecona, 2018). Esta falla consiste en que, por cuestiones de sobrecarga de corriente, excesos de temperatura, humedad, vibraciones excesivas, etc., el aislamiento del embobinado/cableado se degrada entrando en cortocircuito con las espiras o bobinas circundantes, evidentemente esto conllevaría a una falla mucho más severa y, por consiguiente, a la falla total de la máquina; por lo tanto, su oportuna detección es importante. Otro punto a considerar es la variable física que se utiliza para determinar la falla, por ejemplo: se han utilizado señales de temperatura, corriente, vibraciones, etc., las cuales modifican sus parámetros físicos dependiendo de la falla o cambio que haya en el motor bajo análisis. En lo siguiente, se mencionan y describen trabajos reportados en la literatura para atender esta problemática.

La detección de falla a través de mantenimientos preventivos influye directamente en el costo de la reparación, de manera que una falla diagnosticada a

tiempo impacta en la reducción del costo de la reparación ya sea porque la máquina fue diagnosticada antes de sufrir un daño mayor o que se tuvo el tiempo para programar el paro del motor, minimizando las pérdidas en la línea de producción. Para la detección de fallas es necesario desarrollar un sistema de monitoreo de una o varias variables físicas, en algunos casos unas son más convenientes que otras. Por ejemplo: Flores (2011), Rivera y García (2017), Cacho et al. (2014), y Lecona (2018) utilizan señales de corriente para diagnosticar la condición física del motor. Camarena et al. (2016) y Amézquita-Sánchez et al. (2017) utilizan señales de vibraciones. Con respecto a la falla de corto circuito, los trabajos de Díaz et al., (2010) y Cacho et al. (2014) han presentado metodologías para su diagnóstico; en estos trabajos, diferentes aspectos acerca de la instrumentación, se sensores, motores y análisis de datos convenientes para el análisis de este tipo de falla son presentadas.

Como se mencionó anteriormente, la señal elegida dependerá del estudio y diagnóstico que se desea realizar. En particular, las señales de vibraciones tienden a ser muy utilizadas ya que la mayoría de desperfectos o cambios en el funcionamiento de algún dispositivo impacta en su respuesta dinámica y por consiguiente en su respuesta vibratoria. Estos cambios pueden ser detectados y asociados a la aparición o existencia de algún tipo de fallo. En el trabajo de Ordoñez (2017) se presenta la utilización del método de la descomposición empírica de modos para descomponer señales de vibración en funciones modales intrínsecas las cuales representan el modo de oscilación incrustado en los datos; de estas señales, se extraen características para diagnosticar la falla.

Virtualmente todo sistema posee una capacidad de vibración y la mayoría de los sistemas pueden vibrar libremente de muchas maneras diferentes. La característica común de todos estos fenómenos es su periodicidad. Existe un esquema de movimiento o desplazamiento que se repite una y otra vez. Hasta el momento existen dos métodos fundamentales para la medición de vibraciones en maquinarias, dependientes de la magnitud que se desee medir y de la forma en que se tome energía del objeto de medición: medición acústica y medición de superficie.

La medición de vibraciones por medio del sonido tiene como ventaja que, al mismo tiempo, se miden las vibraciones de todos los puntos de la maquinaria, pero a la vez se tiene una gran desventaja ya que en la producción industrial muchas veces el sonido circundante es comparable o superior al que proviene de la máquina objeto de análisis. Un estudio realizado por Guiracocha (2015) presenta la generación de bases de datos para entrenar sistemas automáticos de diagnóstico de fallos en engranajes y rodamientos en base al estudio de señales de emisión acústica, señales de vibración mecánicas e imágenes termográficas producto de la introducción de fallos sobre un sistema mecánico rotativo compuesto por un eje de transmisión y caja de engranajes rectos. En cambio, la medición en la superficie debe ser de forma discreta, es decir, en algunos puntos de la máquina o de la estructura bajo análisis y en forma directa, porque se mide a través del contacto entre el dispositivo de medición y la máquina. El trabajo de Pernía (2004) da una introducción a las diferentes técnicas y equipos de instrumentación existentes en la actualidad, para así realizar mediciones de vibración mecánica en diferentes sistemas o maquinaria. En este sentido se encuentra que el dispositivo más utilizado para el censo de vibraciones es el acelerómetro (Torres et al., 2017), el cual realiza las mediciones espaciales o de desplazamiento/aceleración en los ejes X, Y y Z. La medición puede ser mono-axial o tri-axial, donde esta última es preferida ya que proporciona una mayor cantidad de información.

Una vez que los datos de las señales de vibraciones han sido adquiridos, el desarrollo y aplicación de técnicas y metodologías de procesamiento de señales son fundamental. En este sentido, técnicas como la transformada de Fourier, la transformada wavelet, los métodos de descomposición empírica de modos, métodos de alta resolución, etc., han sido utilizados, donde cada uno de ellos presenta ciertas ventajas y desventajas (Rivera-Guillén et al., 2018). Sin embargo, la transformada de Fourier resalta como una de las técnicas de procesamiento más eficientes en cuestión a carga computacional y en cuestión al análisis de señales estacionarias. Por lo tanto, la hace una técnica adecuada para ser aplicada en el análisis de vibraciones y detección de fallas de corto circuito en motores de inducción. Cabe mencionar que la transformada discreta de Fourier cuenta con un

algoritmo que optimiza más su aplicación. Este algoritmo se llama transformada rápida de Fourier y ya se encuentra disponible en software como Matlab (Lecona, 2018).

A nivel local, dentro de la Universidad Autónoma de Querétaro, ya se han presentado bastantes trabajos de investigación relacionadas a la detección de fallas en motores de inducción, en específico se han investigado fallas de barras rotas, desbalance y desalineamiento (Cabal-Yépez, E., 2012; Camarena-Martínez, et al., 2016); sin embargo, la falla de corto circuito ha sido poco explorada. Lecona (2018) presenta en sus tesis el estudio de señales de corriente para diagnosticar fallas de corto circuito; aunque se lograron buenos porcentajes de efectividad en el diagnóstico, el análisis de las señales de vibraciones no ha sido presentado. Ahora, considerando que las vibraciones han presentado buenos resultados para el diagnóstico de otras fallas mecánicas y eléctricas en motores de inducción, se considera necesario desarrollar un sistema de monitoreo de vibraciones, así como una metodología de procesamiento y análisis para diagnosticar la falla de corto circuito mediante este tipo de variable física. Además, con el objeto de proveer una metodología más robusta y, quizá, con mayor aplicabilidad, se deben considerar en el estudio diferentes niveles de severidad y diferentes niveles de carga mecánica, sabiendo que a los motores se les demanda diferentes niveles de torque según la aplicación.

1.2 Descripción Del Problema

El presente trabajo pretende contribuir al desarrollo de soluciones para el monitoreo del daño de corto circuito en el embobinado de los motores, considerando distintos niveles de severidad de daño ya que el realizar una pronta detección permitirá reducir costos de reparación, así como programar los tiempos más adecuados para no impactar al proceso de producción.

En base a los antecedentes revisados se observa que aún es necesario realizar sistemas y metodologías de diagnóstico de distintos niveles de severidad de falla de cortocircuito en motores de inducción, incluyendo diferentes niveles de carga con el objetivo de proveer sistemas más robustos y genéricos. Sin embargo, el realizar este tipo de contribuciones no es una tarea sencilla ya que se deben resolver una serie de problemáticas técnicas y teóricas.

En primer lugar, para poder estudiar la falla de cortocircuito bajo diferentes niveles de severidad, el motor bajo prueba tiene que estar adaptado artificialmente para reproducir estas condiciones sin ser dañado realmente ya que las pruebas deben repetirse varias veces para validar estadísticamente las propuestas de diagnóstico. De la misma manera, el control de la carga mecánica en el motor a diferentes niveles debe ser manipulado fácilmente, esto a través de un freno dinamométrico, el cual será acoplado mecánicamente. En esta parte se debe tener especial atención para evitar desalineamientos en la flecha los cuales pudieran impactar en las vibraciones generadas.

Otros puntos a resolver están orientados a poder hacer un sistema de adquisición de tres canales de vibraciones para poder adquirir simultáneamente las vibraciones tri-axiales en los distintos puntos de medición del motor. Finalmente, el software de análisis y, principalmente, la metodología que se desarrolle debe poder diagnosticar de forma correcta las diversas condiciones planteadas en este trabajo de tesis, ya que no sería adecuado depender de distintas metodologías para distintas condiciones de falla o condición de carga mecánica.

1.3 Justificación

Como se mencionó anteriormente, los motores de inducción son las máquinas eléctricas más utilizadas en la industria y la falla de cortocircuito es de las más comunes y la que puede llevar a consecuencias catastróficas en el motor; por lo tanto, su estudio y el desarrollo de metodologías de diagnóstico representan un tema de bastante interés tanto para el sector industrial como para el sector académico y/o de investigación.

También, el desarrollo de un sistema de monitoreo y análisis que permita adquirir las señales de vibraciones para detectar automáticamente una falla de cortocircuito permitirá contribuir en las tareas de mantenimiento preventivo y correctivo, impactando en la reducción de costos al evitar paros no programados, evitar fallas más severas y evitar dañar otros equipos conectados a la línea de producción; de hecho, también permitirá evitar riesgos para los operarios.

Además el estudio del comportamiento de la falla de cortocircuito bajo diferentes niveles de severidad y de carga mecánica permite obtener una matriz de pruebas mayor a la que se realizan en otros trabajos, permitiendo generar sistemas más robustos y genéricos ya que, por un lado, los motores están sujetos a diferentes demandas mecánicas según la aplicación y, por otro lado, el poder analizar diferentes severidades de falla podría permitir priorizar la acción de mantenimiento según la cuantificación el nivel de daño.

Finalmente, es importante mencionar que se analizarán distintos puntos de medición en el motor con dos intenciones. La primera es explorar si es factible la detección a partir de diferentes posiciones; es decir, la detección puede ser realizada independientemente del punto de medición. La segunda es analizar si las mediciones combinadas de distintos puntos pueden coadyuvar en la detección.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema de monitoreo y análisis de señales de vibraciones para la detección de fallas de cortocircuito en motores de inducción usando la transformada de Fourier como técnica de procesamiento y árboles de decisión automática como algoritmo de reconocimiento de patrones.

1.4.2 Objetivos particulares

- Diseñar y desarrollar el sistema de adquisición de datos del acelerómetro tri-axial en la tarjeta NI USB 6002.
- Desarrollar el software para la adquisición de señales usando software de programación LabView.
- Realizar la matriz de pruebas considerando cuatro diferentes niveles de severidad de falla y tres cargas mecánicas, así como 3 posiciones diferentes de colocación del sensor tri-axial.
- Desarrollar la metodología de detección automático de la falla considerando análisis espectral de Fourier y árboles de decisión.
- Analizar la matriz de pruebas para extraer las frecuencias espectrales importantes que determinan los patrones de falla.

1.5 Planteamiento General

El planteamiento general del presente trabajo se desglosa en la figura 1-1. En ella se presentan los pasos que se deben realizar para llevar a buen término el presente trabajo.

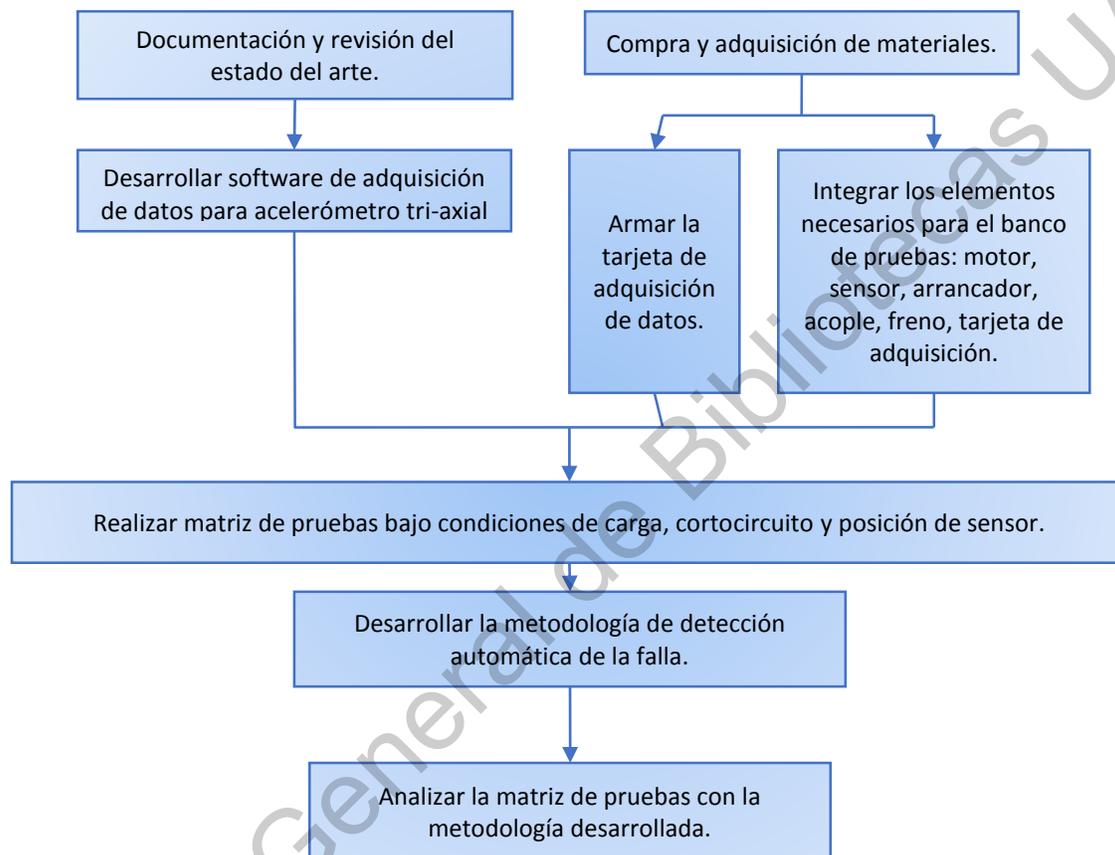


Figura 1-1 Planteamiento general del proyecto.

Para comenzar con el proyecto se requiere realizar la documentación y revisión del estado del arte, misma que sirve para obtener información acerca de los temas que implica el proyecto. Se buscan fuentes bibliográficas para los temas de procesos industriales, motores de inducción, sistemas de mantenimiento preventivo y diagnóstico de fallas, sistemas de monitoreo de distintas variables físicas como lo son las vibraciones, sistemas de medición y análisis de vibraciones, algoritmos para el procesamiento o análisis de datos (Fourier, espectrogramas,

etc.), así como algoritmos de clasificación automática, en particular árboles de decisión.

De manera paralela a la documentación se adquieren los materiales necesarios para realizar el armado de la tarjeta de adquisición, banco de pruebas y lo referente a los consumibles de la experimentación.

Mientras se diseña y construye el software de adquisición de datos, también se construye la tarjeta de adquisición de datos y se integran tanto el banco de pruebas, arrancador, motor de inducción de 2 HP, el freno dinamométrico de cuatro cuadrantes, sensor tri-axial y acople mecánico.

Una vez integrados todos los elementos necesarios para realizar las pruebas pertinentes de vibraciones, se determina la matriz de pruebas, la cual consiste de usar 3 niveles de carga diferentes, 4 niveles de falla de cortocircuito y 3 posiciones diferentes para el sensor tri-axial, donde se realizarán 10 pruebas de cada condición para pruebas estadísticas. El total de pruebas será de 360 pruebas considerando la adquisición de los tres ejes de vibración en cada prueba.

Al obtener las pruebas, se desarrolla un algoritmo de procesamiento de señales basado la transformada de Fourier en Matlab, donde se espera determinar las componentes frecuenciales que representen los patrones asociadas a la falla. Una vez desarrollado el algoritmo de detección de fallas de cortocircuito se procede a caracterizar cada patrón de prueba de vibración para determinar la severidad de las fallas.

Una vez desarrollado todo lo anterior, la metodología de implementación para determinar el diagnóstico de la condición de falla se muestra en la figura 1-2. En primera instancia se observa el motor acoplado al freno dinamométrico, el motor ya cuenta con las adaptaciones necesarias para inducir de forma controlada diferentes condiciones de severidad de falla, así como la condición de sano. Para presentar un análisis más amplio, se usa el freno para variar la carga mecánica ya

que en las aplicaciones industriales la carga del motor puede tener diferentes niveles según la aplicación.

Una vez que se coloca el motor con la condición que se desea analizar (severidad de falla y nivel de carga mecánica) se realizará la adquisición de las señales de vibración usando el sensor 8395 A10 Kistler tri-axial y tarjeta NI USB-6002. Es importante mencionar que como parte del análisis se capturarán las señales de tres puntos distintos del motor. Una vez la señal es adquirida, se aplica la transformada de Fourier, se extraen las características y un algoritmo de reconocimiento de patrones basado en árbol de decisiones determina la condición física del motor.

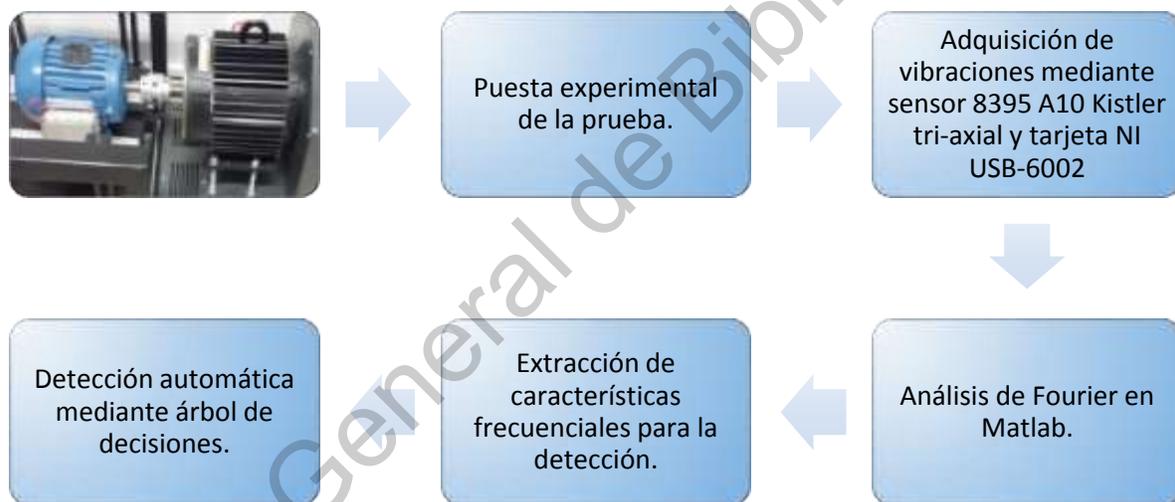


Figura 1-2: Metodología.

CAPÍTULO 2

Dirección General de Bibliotecas UAQ

2 FUNDAMENTACIÓN MATEMÁTICA

2.1 Motores De Inducción

La utilización de motores de inducción; mismos que son máquinas dinámicas rotativas, genera un campo de investigación relativamente amplio ya que son primordiales en las industrias. Mantener un motor de inducción funcionando en óptimas condiciones significa mucho para una empresa. Los motores de inducción funcionan en base a un estator (parte fija a la carcasa) que tiene conexiones externas para usarlo a diferente voltaje y para variar la velocidad y el rotor (parte giratoria) que puede ser de dos tipos: jaula de ardilla o bobinado, son devanados que se encuentran en corto circuito. En las máquinas de inducción, las corrientes alternas se aplican directamente a los devanados del estator. Por lo tanto, las corrientes del rotor se producen por inducción. Las bobinas son trifásicas y están desfasadas 120° ; cuando por estas bobinas circula un sistema de corrientes trifásicas, se induce un campo magnético que envuelve directamente al rotor, este campo magnético variable induce una tensión en el rotor según la ley de Faraday; así pues, se da el efecto donde todo conductor por el que circule una corriente eléctrica, inmerso en un campo magnético experimenta una fuerza que tiende a ponerlo en movimiento. La acción mutua del campo giratorio y las corrientes existentes en los conductores del rotor, originan una fuerza electrodinámica sobre dichos conductores del rotor, los cuales hacen girar el rotor del motor.

2.1.1 Usos, aplicaciones, tipos y partes

Los motores de inducción trifásicos pueden ser de dos tipos:

- Con rotor bobinado o de anillos.
- Con rotor jaula de ardilla.

La diferencia entre estos dos tipos se debe principalmente a la construcción del rotor, el funcionamiento es muy similar. El primer tipo cuenta con una estructura más compleja y delicada, son escobillas que rozan con el rotor, con una posible

interposición de resistencias para el control de la fase de arranque, es de mayor dimensión y necesita mantenimiento más periódico. El segundo tipo se estructura a manera de barras cerradas en cortocircuito, por lo que gracias a su simplicidad da origen a un motor simple, robusto y económico. Debido al desarrollo de la electrónica de control es posible usar los motores asíncronos, en particular a los del tipo jaula de ardilla. Dichos motores tienen una indefinida cantidad de usos y aplicaciones, como los son compresores, ventiladores, bombas, trituradoras, elevadores, agitadores y bandas transportadoras, solo por mencionar algunas; así pues, este tipo de motor es de uso general.

Los motores de inducción están constituidos por dos circuitos, uno magnético; la parte fija de este es el estator que burdamente es un anillo de chapa magnética ajustado a la carcasa, la carcasa es meramente de protección exterior y soporte, la parte interior del estator dispone de ranuras donde se coloca un devanado, aunado a esto el rotor es colocado al interior del estator que de igual manera es un cilindro fabricado de chapa magnética, en la periferia van dispuestas unas ranuras para colocar un devanado. Por otra parte, el circuito eléctrico está dividido en dos circuitos que van situados uno en el estator (primario) y otro en el rotor (secundario). El rotor en cortocircuito puede estar formado por bobinas que se cortocircuitan en el exterior de la máquina o por reóstatos, o bien, puede estar formado por barras de cobre soldadas a dos anillos en sus extremos, este último tipo llamado jaula de ardilla antes ya mencionado.

Para fines demostrativos y reales, el motor utilizado en el presente proyecto es de la marca WEG. WEG es una de las marcas más conocidas de fabricantes de motores de inducción trifásicos. A continuación, en la figura 2-1 se presentan las partes del motor de inducción trifásico por parte de la guía de especificación de motores eléctricos WEG extraída de la guía de especificación para motores eléctricos WEG.



Figura 2-1: Partes del motor de inducción WEG.

Estator:

- Carcasa (1) – Estructura que da soporte de construcción de hierro fundido, acero o aluminio, resistente a la corrosión y con aletas normalmente.
- Núcleo de chapas (2) – chapas de acero magnético.
- Devanado trifásico (8) – tres conjuntos iguales de bobinas, una para cada fase.

Rotor:

- Eje (7) – Transmite la potencia mecánica desarrollada por el motor, es el centro del motor.
- Núcleo de chapas (3) – Chapas de características similares a las del estator.
- Barras y anillos de cortocircuito (12) – son de aluminio inyectado sobre presión en una única pieza.

Otras partes del motor:

- Tapa (4)
- Ventilador (5)
- Tapa deflectora (6)
- Caja de conexión (9)
- Terminales (10)
- Rodamientos (11)

2.1.2 Falla de corto circuito

Al producirse un cortocircuito interno en las vueltas de un devanado de cualquier máquina de corriente alterna (CA), resulta una nueva trayectoria para la circulación de la corriente siendo esta más corta y directa, por lo cual se provoca la disminución en la impedancia de la bobina debido a la reducción del conductor (es decir, ahora las vueltas estarán en paralelo en vez de estar en serie como normalmente es). El incremento desmesurado de la corriente es consecuencia de este tipo de falla, lo cual origina una temperatura extra fuera de lo normal para el funcionamiento de la máquina y a su vez genera el debilitamiento del aislamiento; al no tener un aislamiento correcto, la máquina comienza a tener una reacción en cadena que llegará hasta el fuego dejando fuera de funcionamiento total a dicha máquina (ver Figura 2-2).

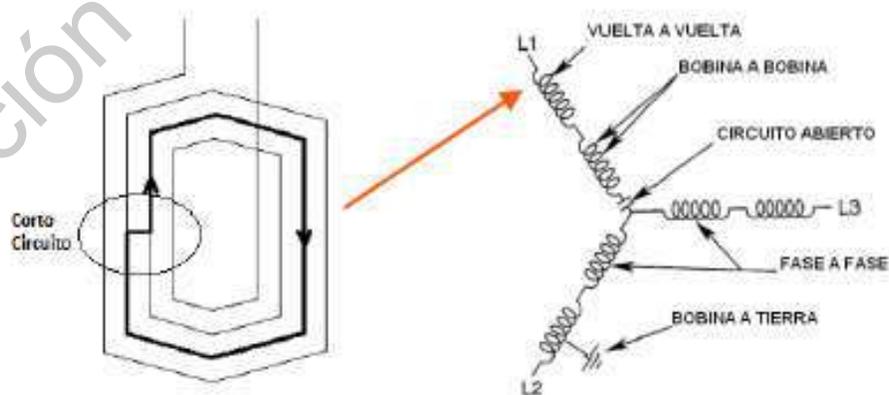


Figura 2-2 Tipos de cortocircuitos en motores 3f y muestra de un detalle del corto vuelta-vuelta, www.motortico.com (2016).

Durante el funcionamiento normal de un motor industrial de baja tensión típicamente se establecen voltajes de 127 VCA entre las vueltas adyacentes de una bobina, típicamente es lo que soportará el sistema de aislamiento. Al presentarse el corto vuelta-vuelta mostrado en la Figura 2-2, la bobina en cuestión actúa como un auto-transformador. Por ejemplo: se tienen 60 vueltas por fase en un motor, y se produce un cortocircuito en 2 vueltas adyacentes, esto significa que $N_1=60$ Vueltas y $N_2=1$ Vuelta, la corriente secundaria sería 60 veces mayor que la primaria de acuerdo con la ecuación de la corriente secundaria $I_2 = I_1 \left(\frac{N_1+N_2}{N_2} \right)$, y el efecto Joule (calor) es proporcional al cuadrado de la corriente (I^2R), implica un efecto 3600 veces mayor al normal. El alambre de cobre tardará segundos en comenzar a fundirse, aquí es donde la reacción en cadena detona terminando en una sobre corriente por cortocircuito, que hará operar la protección del motor. La Figura 2-3 presenta el caso del ejemplo.

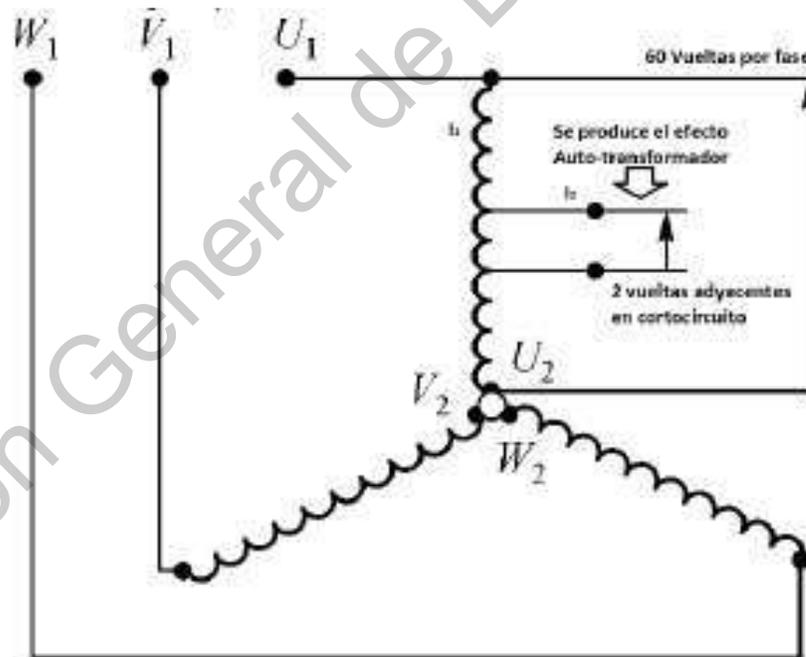


Figura 2-3 Daño por cortocircuito en motor 3f con conexión estrella, www.motortico.com (2016).

Tres etapas son existentes en la falla de cortocircuito de una bobina que comienzan como un debilitamiento de aislamiento en los conductores. Detectar cambios en los devanados proporciona una oportunidad relevante para reparar la

máquina antes de que se presente una falla catastrófica que origina pérdidas monetarias y hasta pérdidas morales. La realidad del índice de la falla dependerá de diversos factores tales como:

- Severidad de la falla.
- Voltaje entre las vueltas.
- Tipo y cantidad de aislante presente.
- Causa de la falla.

Las 3 etapas que caracterizan un cortocircuito en una bobina las siguientes:

Etapa 1: El aislamiento es estresado por algún factor, causando cambios en el valor de la capacitancia y de la resistencia en la sección de la falla. Una ruptura inicial es establecida a través del aislamiento. La temperatura se ve afectada de tal suerte que se incrementa, dando lugar a la carbonización del aislamiento en esta sección. Es posible detectar la falla antes de que sea irreversible, dependiendo de la gravedad de esta etapa.

Etapa 2: La sección de la falla se ve amplificada y proporciona un camino más directo de la corriente. La auto inductancia se produce en la bobina misma. El calor sigue al alza en la sección de falla debido al incremento de la corriente dentro de las vueltas que se encuentran en cortocircuito, incrementando la temperatura en esta sección y carbonizándose rápidamente el aislamiento. La máquina aumenta las posibilidades de disparar las protecciones en este punto, y aunque puede seguir en funcionamiento por unos segundos todo concluye en una falla irreversible.

Etapa 3: El aislamiento es interrumpido y la energía dentro del cortocircuito puede causar una reacción explosiva en el aislamiento y la fundición del cobre y daño del aislamiento en las bobinas. La inductancia y en ocasiones la resistencia óhmica, pueden detectar la avería a este punto. El daño está completo.

Las 3 etapas son de acuerdo con los devanados, pero por otro lado la flecha puede fallar debido al desbalance ocurrido en el sistema eléctrico. El desbalance eléctrico es traducido en vibraciones las cuales, en una cantidad adecuada y siendo puntuales en la fundición de la flecha, crearán grietas debilitándola y provocando llegar a un punto de quiebre, pero la flecha no es la única que se ve afectada por las vibraciones, los rodamientos son el soporte de la flecha por lo tanto es importante cuidarlos de tal manera que salvaguarde la misma flecha; aunque dichos rodamientos son capaces de absorber vibraciones, en algún determinado momento serán susceptibles a fallar, llegando a esto la máquina no cumplirá con la capacidad de realizar el objetivo principal de la manera eficiente.

La sobrecarga, la humedad en el interior del estator, el aumento anormal de temperatura, la contaminación del bobinado, los voltajes transitorios, los desbalances de tensión y los efectos mecánicos pueden iniciar la falla de la bobina en la etapa 1. Estudios realizados por el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI de USA) han mostrado las causas de las fallas en los motores de inducción. Las fallas más comunes en motores de corriente alterna son los siguientes:

- Defectos en rodamientos (41%): relacionados con el mantenimiento, lubricación, malas prácticas de montaje y desmontaje.
- Defectos en el estator (37%): tienen lugar en el interior del bobinado.
- Otros defectos (12%): en otras partes del motor, como ejes, base de montaje, tapas, ventilación, etc.
- Defectos en el rotor (10%): principalmente daños en las barras del rotor.

El mecanismo de falla de cortocircuito es variado. Recientemente, una causa común se atribuye a los variadores de frecuencia, por el fenómeno de onda reflejada, que produce un debilitamiento prematuro por casusas eléctricas. Otra causa común es la sobrecarga térmica, que debilita constantemente el aislamiento por efectos térmicos. Finalmente, en algunas industrias y aplicaciones con presencia de humedad y polvo, esta puede ingresar a la máquina, facilitando la

creación de cortocircuitos en los bobinados. La Figura 2-4 muestra algunas fotografías de cortocircuitos en los devanados de un motor.

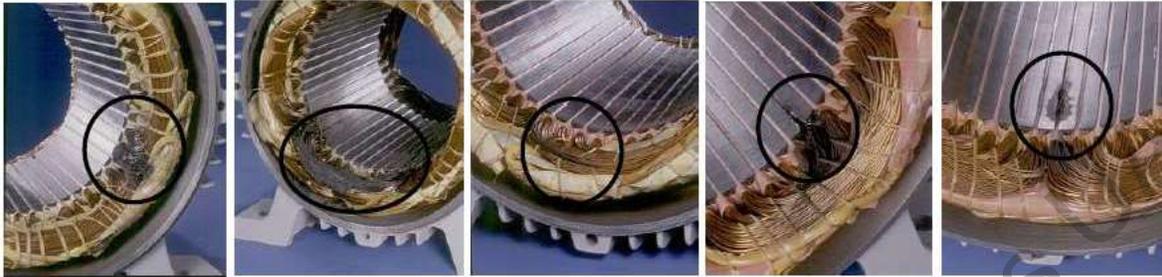


Figura 2-4 Fotografías de cortocircuitos, www.motortico.com (2016).

2.2 Señales De Vibraciones Y Técnicas De Análisis

2.2.1 Vibraciones y características

El movimiento oscilante de una partícula alrededor de un punto fijo, sea un movimiento constante tanto en frecuencia, intensidad o dirección, o en su defecto si no es normal (aleatorio), se da en la mayoría de los casos. A este fenómeno se le conoce como vibración. Todo cuerpo es capaz de presenciar un movimiento oscilatorio. Las vibraciones están dadas por dos magnitudes: la frecuencia y la amplitud.

Cualquier onda puede ampliar su amplitud de una vibración recibida por otro cuerpo. Esto ocurre si la vibración se da en determinadas frecuencias que son características del cuerpo en cuestión, dando así lugar a una vibración de mayor amplitud. Cuando el ruido es medido en un punto, se obtiene ese nivel de manera que en general es la presión sonora. En el caso de las vibraciones, las unidades son aceleración, velocidad o el desplazamiento. La aceleración resulta ser el parámetro más utilizado dado en unidades de m/s^2 .

Teniendo en cuenta que los movimientos físicos de cualquier máquina rotatoria son interpretados como una vibración cuyas amplitudes y frecuencias deberán ser cuantificadas a través de un dispositivo de medición que convertirá estas en un dato que pueda ser medido y analizado de manera digital. La amplitud significa que grado de severidad es el problema mientras que la frecuencia

determina que es lo que está mal en la máquina. Las vibraciones son clasificadas en tres naturalezas diferentes: armónicas, periódicas o aleatorias.

Vibraciones armónicas

Es la forma más simple de oscilación, es caracterizada por una senoide. Este tipo de vibración puede ser generada en sistemas lineales, esto se debe a la presencia de problemas potenciales, un desbalance es un ejemplo de ello. Este tipo de movimientos son estudiados a través de un vector rotatorio a una velocidad angular constante ω , a partir de esta se define la frecuencia de oscilación f la cual es expresada en Hertz (Hz), a diferencia de la frecuencia angular que es expresada en ($1/s$). La modelación matemática de las vibraciones armónicas es conducida según el bloque de ecuaciones 1:

$$y = Y \sin(\omega t + \varphi) = Y \sin(2\pi f t + \varphi) \quad ; \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad ; \quad f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} \quad (2-1)$$

siendo φ la fase de la vibración.

Estas expresiones concuerdan y confirman con el concepto de frecuencia que hace la norma ISO 2041, ejemplo: FRECUENCIA es el recíproco del periodo fundamental (tiempo de repetición de un fenómeno periódico). Se expresa en Hertz (Hz), lo cual corresponde a un ciclo por segundo (Palomino, 1997).

Vibración periódica

Este movimiento es característico por repetirse de manera periódica, es decir, tiene un patrón que se repite cada determinado tiempo. Por ejemplo, una transmisión dentada produciría una vibración que, aunque no es armónica, es periódica. En la Figura 2-5 se muestra un ejemplo de vibración periódica.

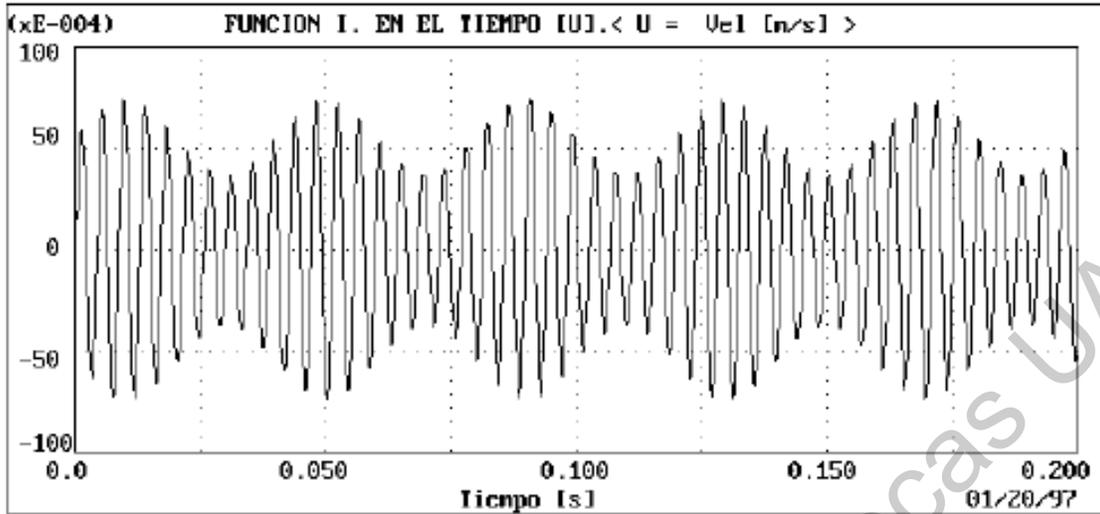


Figura 2-5 Vibración periódica, Palomino (1997).

Vibración Aleatoria

De manera errática y con contenidos en toda la banda de frecuencias analizadas ocurre una vibración aleatoria, es decir, dichas vibraciones producen un espectro continuo que se encuentra constituido por infinitas vibraciones armónicas, cada una caracterizada por una amplitud, fase y frecuencia, respectivamente. La Figura 2-6 muestra un ejemplo del espectro de vibraciones aleatorias.

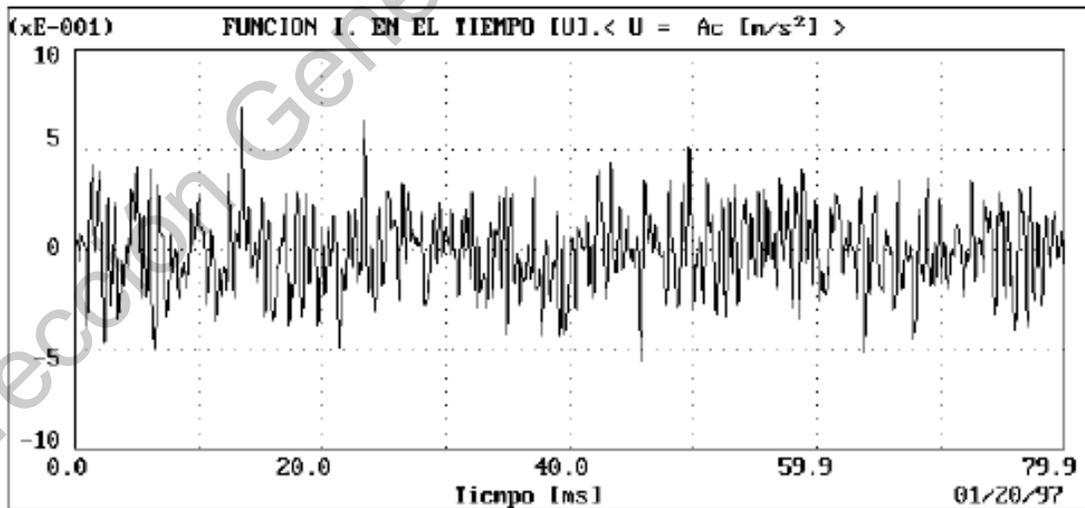


Figura 2-6 Vibración aleatoria, Palomino (1997).

Factores importantes de las vibraciones en máquinas

La presencia de vibraciones en las máquinas rotatorias está dada por tres causas fundamentales de frecuencias, tales como:

- Frecuencias generadas
- Frecuencias excitadas
- Frecuencias producidas por fenómenos electrónicos

Frecuencias generadas

Son las generadas por el funcionamiento habitual de la máquina, son representativas de los desbalances, la frecuencia de engranes o el paso de los elementos rodantes por los defectos que tienen los cojinetes o los mismos balines, el paso de las paletas en caso de turbinas, etc.

Frecuencias excitadas

Las frecuencias de resonancia de los elementos que componen la máquina son llamadas frecuencias excitadas. Al excitar una frecuencia de resonancia, las vibraciones se ven amplificadas de acuerdo a las Figuras 2-7 y 2-8 a razón del amortiguamiento.

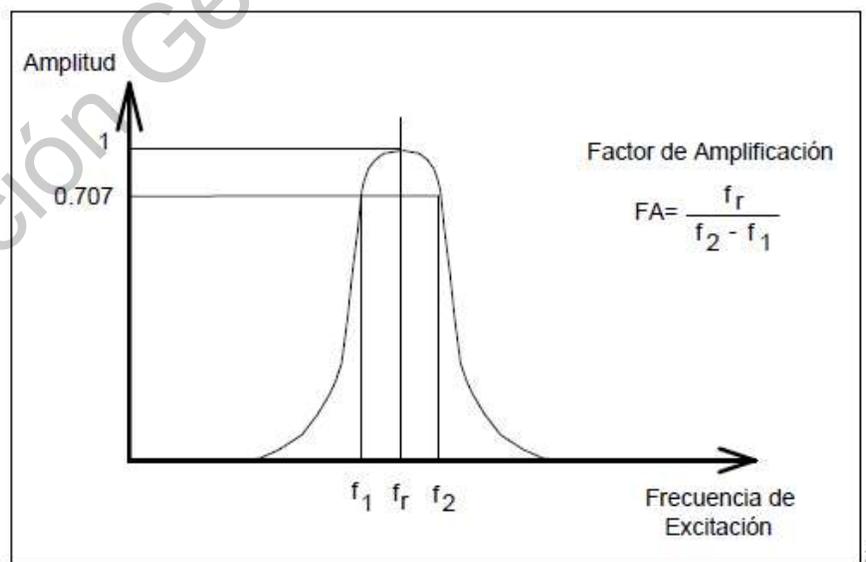


Figura 2-7 Resonancia modificada por cierta cantidad de amortiguamiento, Palomino (1997).

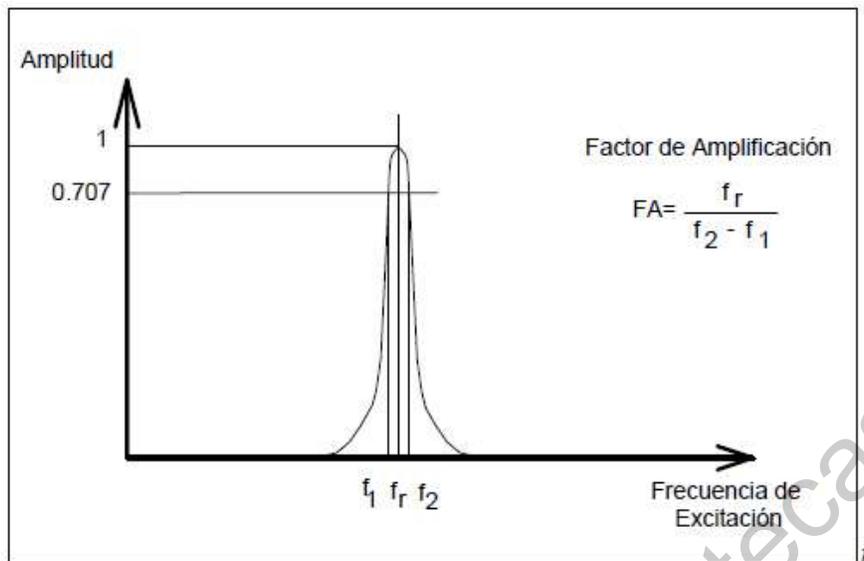


Figura 2-8 Resonancia modificada por poco amortiguamiento, Palomino (1997).

La resonancia de un sistema bajo oscilaciones forzadas existe cuando cualquier cambio, incluso muy pequeño, en la frecuencia de la excitación, causa un decrecimiento en la respuesta del sistema (Palomino, 1997).

El enemigo número uno de las frecuencias de resonancia es el desbalance el cual es el que más las excita, por muy pequeño que sea, puede ser seriamente amplificado si se sintoniza la frecuencia natural del rotor desbalanceado en sus apoyos, con la frecuencia de operación del mismo. Aproximadamente un 40% de casos con niveles altos de vibraciones son debidas al desbalance. Este tipo de problema representa una fuerza excitadora armónica, dada a través de la aceleración de una masa desbalanceada m_d que gira a una velocidad angular constante ω alrededor del eje generando una fuerza de inercia. Observe la Figura 2-9.

La masa excéntrica produce una fuerza vectorial rotatoria con una velocidad angular ω de amplitud $m_d \omega^2 r$; así pues, desde el punto de vista de frecuencias se ve representado en la Figura 2-10. Notar que a frecuencia cero, no existe amplitud de movimiento. La vibración se estabiliza a una amplitud de desplazamiento $\frac{m_d r}{M}$ de manera independiente al amortiguamiento; por lo tanto, una buena condición de balanceo garantiza el menor producto de $m_d r$. Cuando la

velocidad de operación es similar a la frecuencia natural del sistema se logra observar un notable crecimiento de la amplitud de las vibraciones en la máquina.

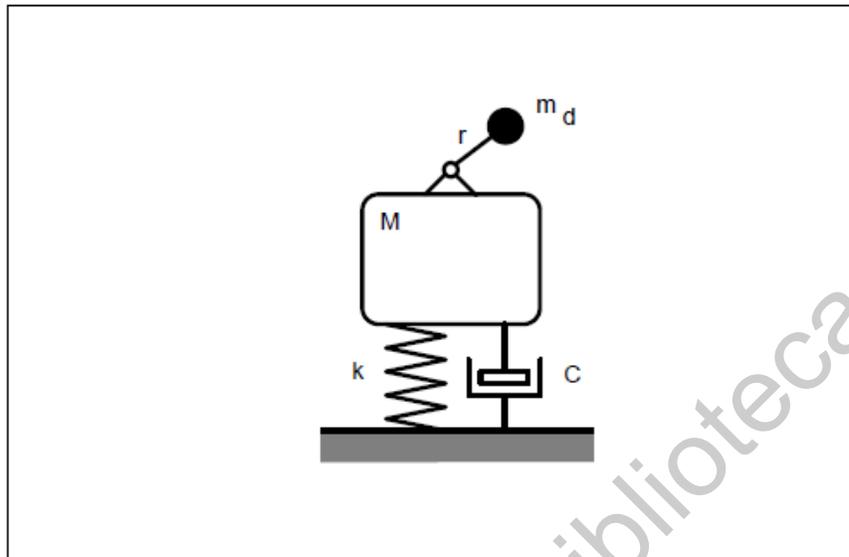


Figura 2-9 Presencia de una masa desbalanceada en el sistema máquina – soportes, Palomino (1997).

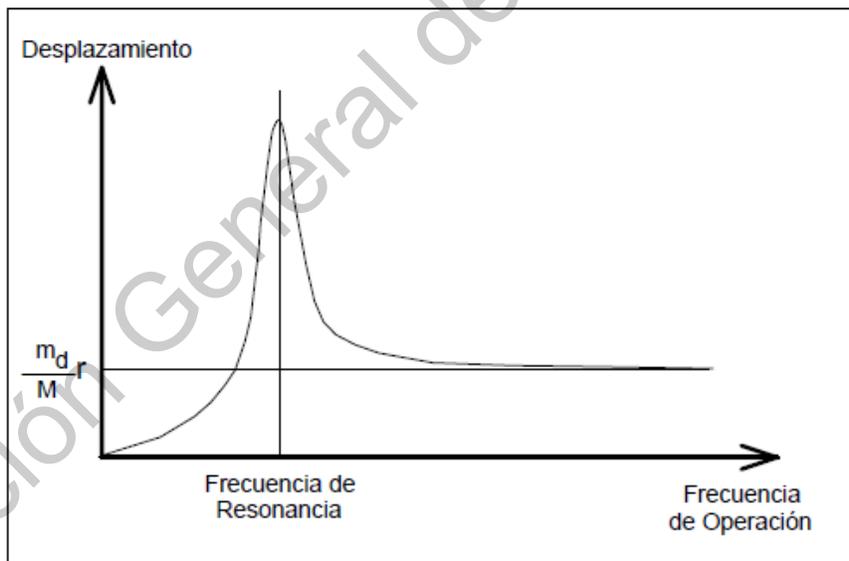


Figura 2-10 Respuesta de un sistema máquina – soportes ante los efectos de un desbalance rotatorio, Palomino (1997).

Frecuencias producidas por fenómenos electrónicos

Al momento de obtener los espectros de las vibraciones en una máquina, se observan frecuencias fuera de ubicación o falsas. Esto tiene lugar en los casos

donde una vibración senoidal sea registrada recortada por errores en la entrada del instrumento de medición, lo cual entrega un espectro falso.

Al analizar propiedades dinámicas de los sistemas vibrantes será posible considerar el movimiento vibratorio como un problema físico real y no solo como un ejercicio matemático. En la actualidad existen dos métodos fundamentales para la medición de vibraciones en maquinarias, dependientes de la magnitud que se desee medir y de la forma en que se tome energía del medio objeto de medición.

- Medición acústica.
- Medición de superficie.

Los cambios en la presión del aire son generados a consecuencia de las fuerzas vibratorias que producen todos los elementos de las máquinas; es decir, cada elemento varía en forma y posición. Una onda de presión es propagada de manera que afecta la membrana del oído, de esta forma, la medición del sonido da una medición de las vibraciones. Sin embargo, la medición del sonido tiene una desventaja y es que en las industrias no solo hay sonidos de una sola maquinaria, sino que las mediciones se ven afectadas por sonidos circundantes de diferentes máquinas, pero a la vez también tiene una ventaja y es que al mismo tiempo se miden todas las vibraciones de la máquina en una sola medición.

De una manera directa y discreta como lo es la medición de la vibración superficial es posible cuantificar la vibración en algunos puntos de la máquina ya que es llevada a cabo a través del contacto entre el transductor y la máquina.

Descripción de los niveles de vibraciones

El análisis de vibraciones puede llevarse a cabo mediante representaciones en el tiempo o en la frecuencia, al llevar a cabo la medición del nivel de vibraciones es necesario conocer que magnitud se desea adquirir para representar la vibración, de aquí que para ello pueda ser empleado, el desplazamiento, la velocidad y/o la aceleración.

La norma ISO 2041 las define como:

El *desplazamiento* es una cantidad vectorial que describe el cambio de posición de un cuerpo o partícula con respecto a un sistema de referencia.

La *velocidad* es un vector que especifica la derivada del desplazamiento en el tiempo.

La *aceleración* es un vector que especifica la derivada de la velocidad en el tiempo.

Estas son expresadas mediante las siguientes relaciones:

$$y(t) = Y \sin(2\pi ft) \quad (2-2)$$

$$v(t) = (2\pi f)Y \sin\left(2\pi ft + \frac{\pi}{2}\right) \quad (2-3)$$

$$a(t) = (2\pi f)^2 Y \sin(2\pi ft + \pi) \quad (2-4)$$

Así pues, estas magnitudes tienen relación entre sí en términos de amplitud, es decir, para ondas armónicas están relacionadas mediante la frecuencia de la propia onda, según:

$$V = \frac{A}{2\pi f} \quad ; \quad Y = \frac{V}{2\pi f} \quad ; \quad A = \frac{V}{(2\pi f)^2} \quad (2-5)$$

donde:

Y: amplitud de desplazamiento.

V: amplitud de la velocidad.

A: la amplitud de la aceleración.

Dominios del tiempo y la frecuencia

Como ya se mencionó las vibraciones pueden ser analizadas en el dominio del tiempo o de la frecuencia. Ambos están vinculados directamente. Las

vibraciones son registradas en términos de señales eléctricas que son proporcionales al fenómeno mecánico al que se está cuantificando. De manera primitiva es obtenido en el dominio del tiempo, la Figura 2-11 representa dicho suceso.

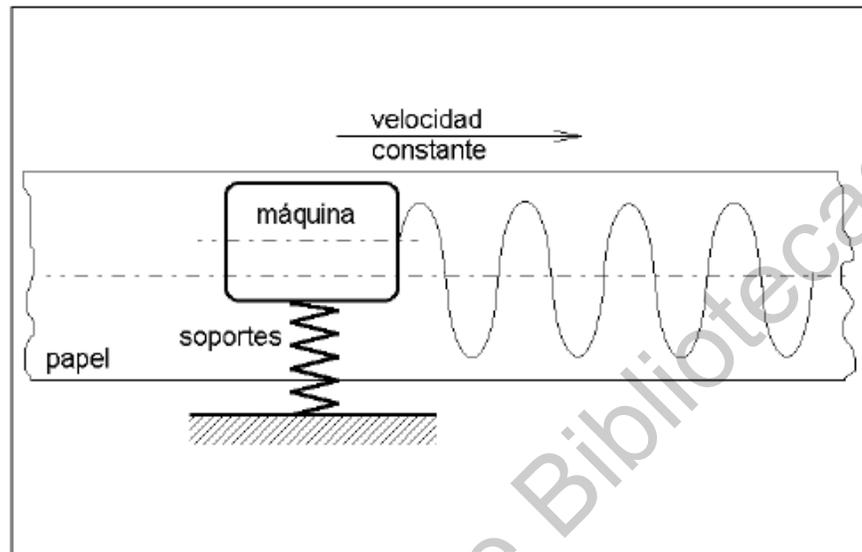


Figura 2-11 Registro primitivo de las vibraciones en un sistema máquina – resortes, Palomino (1997).

Desde lo matemático, el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia están relacionados a través de modelo matemático creado por FOURIER en el siglo XIX.

La transformada rápida de Fourier (FFT) ha sido incorporada en instrumentos de medición y en programas computacionales. En cualquier caso, el espectro muestra una distribución de los niveles de vibraciones en frecuencias.

Cuando una vibración real es registrada el espectro exhibe las componentes a lo largo de toda la banda de frecuencias y no de manera discreta, observe las Figuras 2-12 y 2-13.

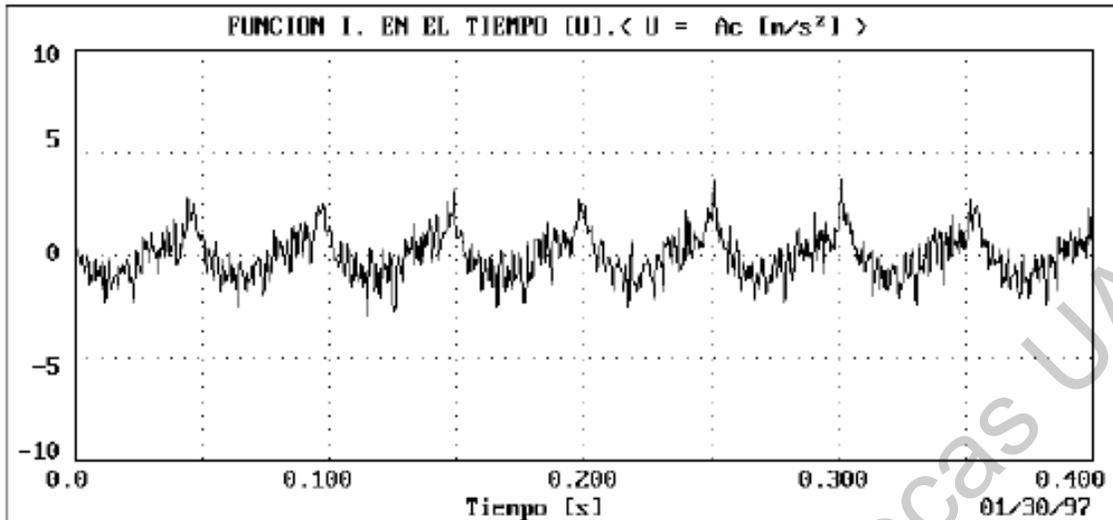


Figura 2-12 Registro real de vibraciones obtenido en una máquina, Palomino (1997).

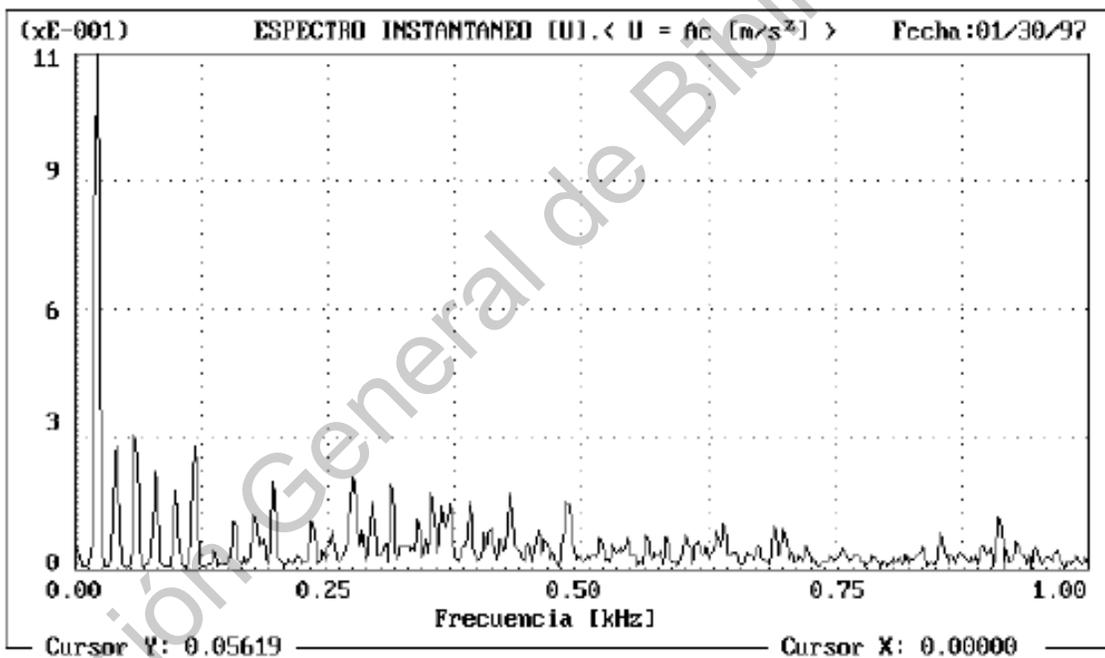


Figura 2-13 Espectro de la vibración ilustrada en la Figura 2-12, Palomino (1997).

Análisis en el dominio del tiempo

La Figura 2-14 representa una vibración en el dominio del tiempo, a partir de la cual, se han indicado los valores pico, pico – pico y rms. El valor más utilizado es el valor rms que se asocia a la potencia de la vibración y es determinado de manera discreta según la siguiente ecuación:

$$Y_{rms} = \sqrt{\frac{y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2}{n}} \quad (2-6)$$

en el caso de una vibración armónica será determinado por: $Y_{rms} = 0.707y_{pico}$

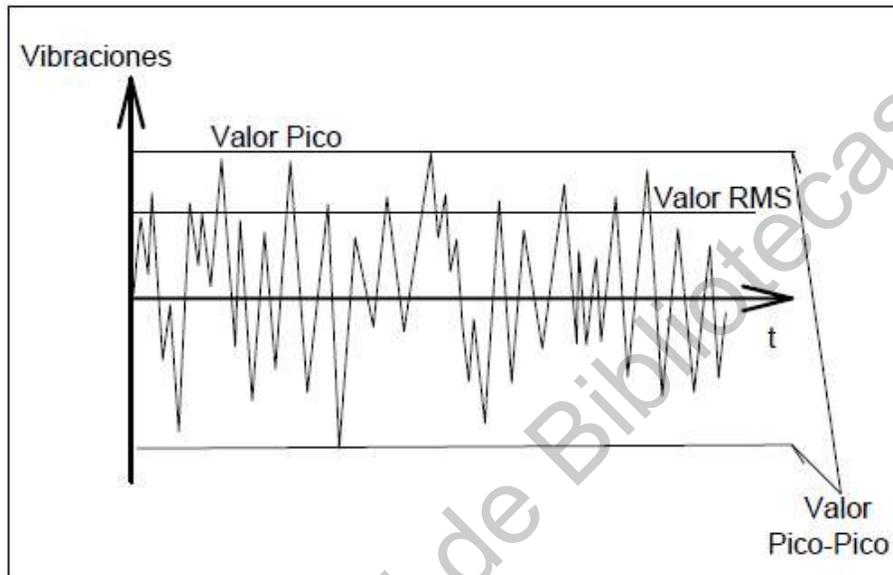


Figura 2-14 Parámetros característicos, Palomino (1997).

El valor pico – pico es utilizado para las mediciones de desplazamiento. Los valores pico y rms son empleados para las mediciones de velocidad y aceleración.

Según la norma ISO 2041 define el valor pico y el valor pico – pico según:

El valor pico es el valor máximo de una magnitud (aceleración, velocidad, desplazamiento) que varía durante cierto intervalo de tiempo.

El valor pico – pico (de un evento oscilatorio) es la diferencia algebraica entre los valores extremos de una magnitud que varía durante cierto intervalo de tiempo.

Análisis en el dominio de la frecuencia

La medición de las vibraciones sobre la descomposición en su contenido a diferentes frecuencias, se necesita decidir la magnitud a medir. El desplazamiento determina la posición de la superficie que vibra. Cualquier medición se debe realizar a una frecuencia específica ya que el desplazamiento está relacionado con la frecuencia. Los rangos efectivos en transductores de proximidad son entre 0 y 600 Hz y para el caso de transductores de desplazamiento por contacto son de 0 a 200 Hz.

La velocidad es la medida de cuán rápido la superficie alcanza posiciones extremas, su rango efectivo de frecuencias para transductores de velocidad es de 10 a 2000 Hz.

La aceleración indica la razón de cambio de la velocidad desde una posición de equilibrio hasta los extremos, resultando aceleraciones altas a altas frecuencias. Un transductor de alta sensibilidad tiene como rango de medición efectivo de 0.2 Hz a 500 Hz y los de baja sensibilidad tienen un rango de medición efectivo de 5 Hz a 2000 Hz.

Una función de cualquier tipo de magnitud mencionada anteriormente en la medición del transductor contiene un contenido infinito de frecuencias, mientras las frecuencias tienden a infinito la amplitud decreciente, aunque los valores tiendan a cero la medición contiene infinito número de frecuencias. Para un mejor tratamiento de la señal existen técnicas para la discretización de la señal, la técnica a la que el presente documento se refiere es al análisis de Fourier.

2.2.2 Transformada de Fourier

Una serie de Fourier es una serie infinita que converge puntualmente a una periódica y continúa a trozos, es decir por partes. Una señal de vibración es periódica cumpliendo el requisito principal de poder ser analizada por Fourier, a este tipo de análisis también se le conoce como análisis armónico. El análisis por Fourier de señales muestreadas está sustentado por las siguientes relaciones:

$$Y(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} y(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2-7)$$

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} Y(k) \cdot e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (2-8)$$

para $n=0, 1, \dots, N-1; k=0, 1, \dots, N-1$.

siendo N el número de muestras de la señal vibro acústica, a estas muestras se le nombrara segmento, para el caso de las vibraciones $y(n)$ es real y $Y(k)$ es compleja. Las ecuaciones 2-7 y 2-8 corresponden a la TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER (DFT), la aplicación se representa por la Figura 2-15.

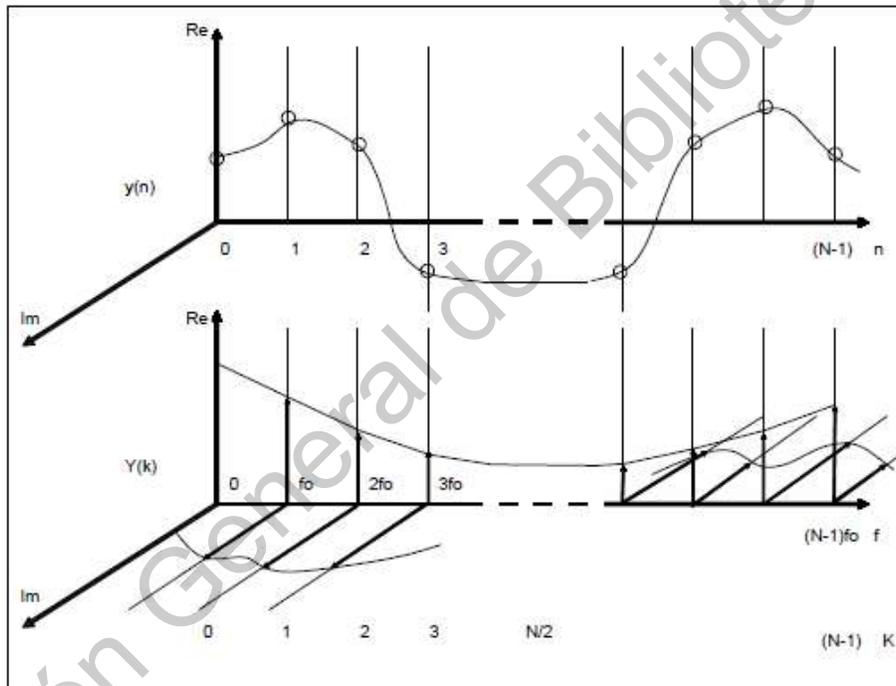


Figura 2-15 Representación real y compleja de la Transformada Discreta de Fourier (DFT), Palomino (1997).

Según el autor Palomino anteriormente la DFT fue implementada en computadoras en programas que ejecutaban N^2 operaciones de cálculo. En esos mismos tiempos se publica un algoritmo más eficiente para el cálculo de la DFT, llamado Transformada Rápida de Fourier (FFT).

Las series de Fourier son representadas de la siguiente manera:

$$\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos \frac{2n\pi}{T} t + b_n \sin \frac{2n\pi}{T} t \right] \quad (2-9)$$

donde a_n y b_n son llamados coeficientes de Fourier de la serie de Fourier de la función $f(x)$.

Este teorema de Fourier la suma de funciones seno y coseno equivale a una función periódica $f(t)$ de periodo T. De tal manera que:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{m=1}^{\infty} a_m \cos(m\omega_0 t) + \sum_{m=1}^{\infty} b_m \sin(m\omega_0 t) \quad (2-10)$$

donde $\omega_0 = 2\pi/T$ es la frecuencia angular fundamental y todas las siguientes frecuencias son múltiplos enteros denominados armónicos de ω_0 .

El análisis de Fourier representa el proceso de encontrar los coeficientes tanto de los cosenos como de los senos y la reconstrucción de la función mediante dichos coeficientes es llamado síntesis de Fourier, realizar este cálculo en una computadora resulta una suma infinita donde se debe trincar y sumar solo una parte finita de términos arrojando como resultado una aproximación de la función original.

2.2.3 Espectro

El espectrograma o espectro de frecuencia contiene la descomposición de una señal muestreada en dominio del tiempo, pero representada en el dominio de la frecuencia, aportando elementos como amplitud, componente fundamental, componente DC, armónicos, interarmónicos y subarmónicos, donde:

- Amplitud: referida a los coeficientes de Fourier expresando el valor en pu a determinada frecuencia.
- Componente fundamental: corresponde a la señal de mayor amplitud y está representada en la frecuencia fundamental.
- Componente DC: corresponde al nivel de energía de corriente directa existente en el sistema.
- Armónicos: son componentes múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

- Interarmónicos: son componentes que se encuentran justo a la mitad entre armónicos.
- Subarmónicos: son componentes que se encuentran antes que la frecuencia fundamental.

La Figura 2-16 representa un típico ejemplo de la representación del espectrograma.

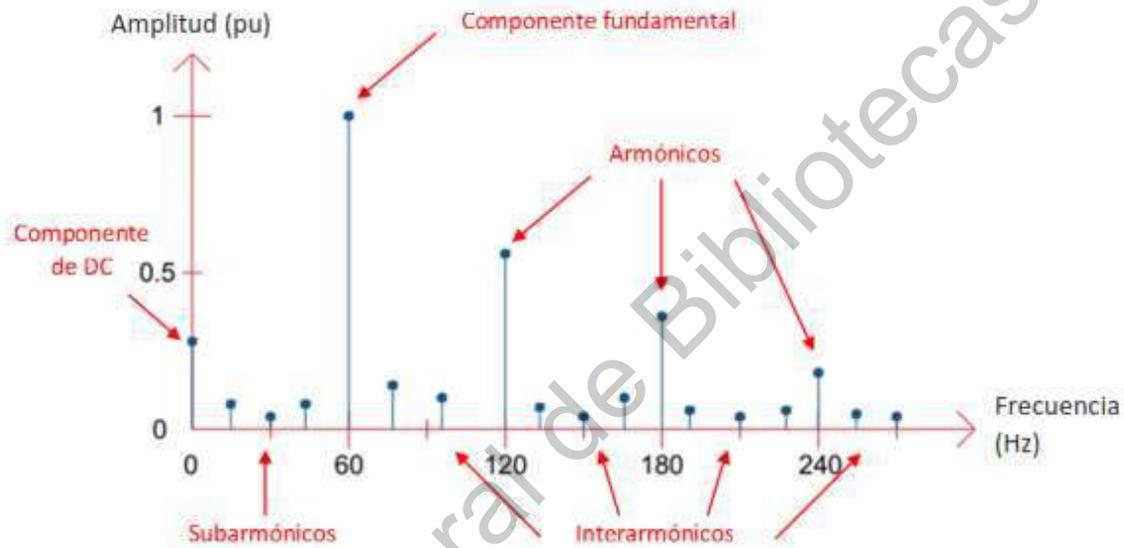


Figura 2-16 Representación de un espectrograma o espectro de frecuencia, Lecona (2018).

2.3 Sistema de adquisición de señales

El llamado sistema de adquisición es referido a obtener una señal de un elemento sensor, misma señal que es adquirida por una tarjeta electrónica controlada por un hardware y así ser transferida a otro software de análisis de datos.

Las magnitudes eléctricas en este caso son adquiridas por un elemento sensor (acelerómetro tri-axial), la señal que emite el elemento sensor es registrada en un documento .txt mediante una tarjeta de adquisición de datos (NI USB 6002) controlada por software (LabView), este documento es posteriormente analizado

por otro software (Matlab), resultando así en una metodología de diagnóstico basada en el análisis espectral.

2.3.1 Sensores de Vibraciones

Existen diversos tipos de sensores o transductores de vibración, los hay de desplazamiento por contacto y sin contacto, de velocidad y acelerómetros. Este trabajo se centra en un acelerómetro capacitivo tri-axial, el cual utiliza un elemento de detección capacitiva variable del sistema micro electromecánico de silicio (MEMS), cada elemento sensor de cada eje consiste en una masa inercial muy pequeña y un elemento de flexión en voladizo colocado entre dos placas. La capacitancia varía a medida que la masa se desvía bajo aceleración. La señal de salida analógica proporcional a la aceleración aplicada, esta señal se escala como una tensión proporcional a la aceleración aplicada.

El acelerómetro es alimentado por una fuente externa regulada de 6 a 50 VCC, el formato de la señal de salida es bipolar a 0 ± 4 V. en particular, el diseño del sensor esta optimizado para aplicaciones de baja frecuencia.

El montaje del acelerómetro requiere de una superficie limpia y plana, además también puede montarse mediante un perno, un soporte adhesivo o un soporte magnético. Es de vital importancia que el montaje sea adecuado para que el elemento sensor no refleje errores en la medición, para realizar el montaje se debe tener en cuenta que la zona con mejor contenido de vibraciones es la que se encuentra cercana a los soportes de los elementos rotatorios.

El acelerómetro empleado en el presente trabajo es del modelo Kistler 8395 A10, el cual tiene como características el siguiente listado:

- Rangos de medición: ± 2 g, ± 10 g, ± 30 g, ± 50 g, ± 100 g, ± 200 g
- Respuesta de frecuencia: 0... 1000 Hz (5%) (excepto ± 2 g)
- Bipolar, salida del acelerómetro de ± 4 V
- Temperatura de funcionamiento -55 ... 125 °C

- Ruido bajo
- Excelente estabilidad térmica
- Cubo pequeño de 30 gr. De masa
- Tensión de alimentación de 6 ... 50 VCD
- 6000 gpk de choque nominal

En la Figura 2-17 se muestra el elemento sensor utilizado. La figura 2-18 muestra los puntos elegidos para el montaje del acelerómetro tri-axial, las figuras son extraídas del DataSheet del elemento sensor.

Dirección General de Bibliotecas UJAQ

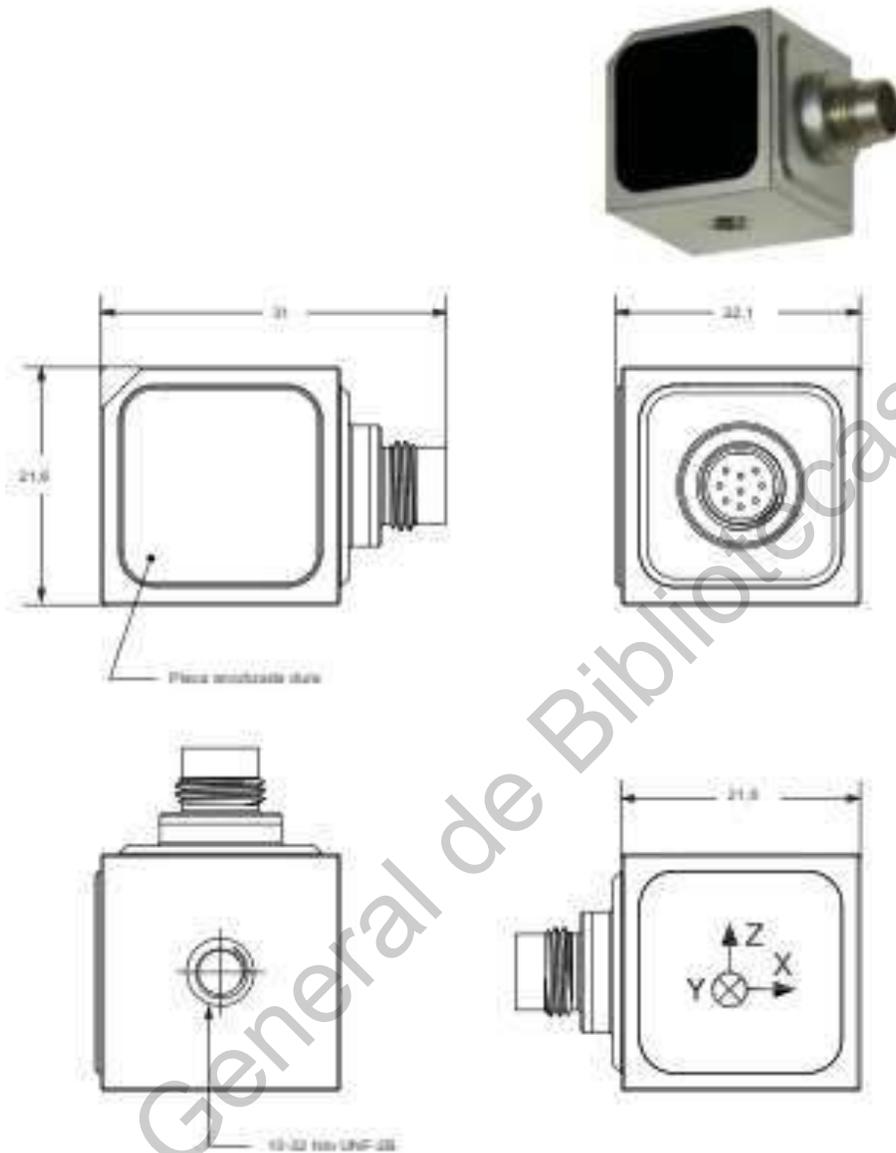


Figura 2-17 Acelerómetro tri-axial Kistler 8395 A10.

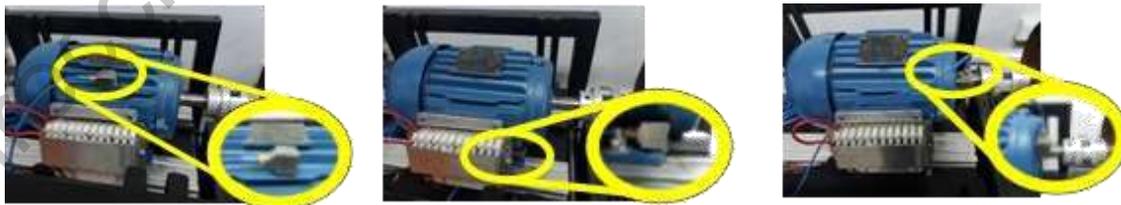


Figura 2-18 Montaje de acelerómetro tri-axial en tres puntos diferentes.

2.3.2 Tarjeta LabView USB 6002

Para adquirir la señal del acelerómetro se emplea una tarjeta de adquisición DAQ por sus siglas en inglés Data Adquisición de la marca National Instruments modelo NI USB 6002 compatible con el software LabView. Las características de la tarjeta se muestran a continuación:

Analog inputs (Entradas Análogas)

- Número de canales: 4 diferenciales y 8 de un solo extremo
- Resolución ADC: 16 bits
- Frecuencia de muestreo máxima: 50 kS/s
- Rango de entrada: ± 10 V
- Tensión de operación: ± 10 V

Analog outputs (Salidas Análogas)

- Salidas análogas: 2
- Resolución DAC: 16 bits
- Rango de salida: ± 10 V
- Máxima frecuencia de muestreo: % kS/s simultáneamente por canal

Digital Inputs (Entradas digitales)

- Rango de tensión de entrada (Encendido): 0 a 5 V
- Rango de tensión de entrada (Apagado): 0 a 3.3 V
- Protección de tensión de entrada: ± 20 V

La Figura 2-19 muestra la tarjeta de adquisición DAQ extraída del DataSheet.

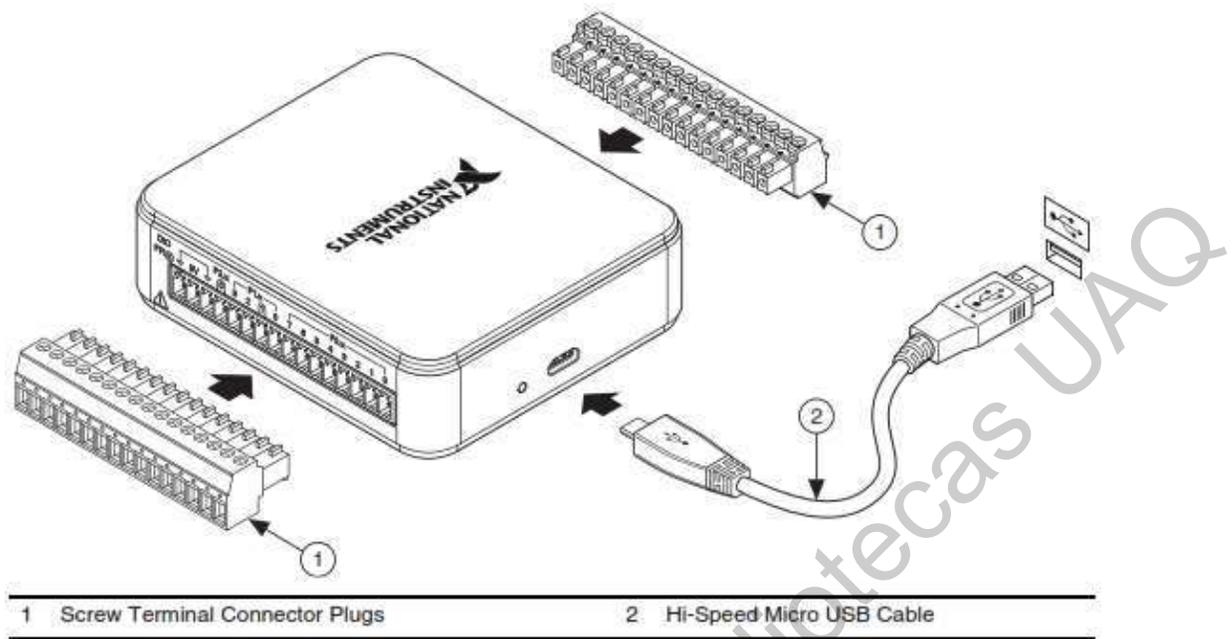


Figura 2-19 Configuración de Hardware para NI USB-6002.

2.3.3 Labview

Según la página oficial de internet de National Instruments NI, LabVIEW es un software de ingeniería que ofrece una programación gráfica donde fácilmente se visualiza cada aspecto de la aplicación, como los son configuraciones de hardware, datos de medidas y depuración. Fácilmente son desarrollados algoritmos de análisis de datos e interfaces de usuario.

La visualización gráfica hace más fácil integrar hardware de medidas de cualquier proveedor, no solo del mismo National Instruments NI, el análisis en tiempo real es su mayor ventaja, ya que permite comunicar tarjetas de adquisición de datos, la información es enviada desde el entorno a la computadora y a su vez la información pueda ser monitoreada y analizada en tiempo real.

2.3.4 Matlab

Sin duda uno de los programas más utilizados para la realización de cálculos numéricos es Matlab (MATriz LABoratory). Es un entorno y un lenguaje de programación, una de sus principales ventajas es que permite construir herramientas propias reutilizables; así como funciones y programas especiales o mejor conocidos como M-archivos, mismos que se pueden agrupar en librerías. Matlab involucra cálculo matricial y álgebra lineal entre sus principales características es capaz de manejar polinomios, funciones, ecuaciones diferenciales ordinarias, gráficas, etc.

Sin duda alguna, el programa se adecua de manera perfecta para la aplicación del presente trabajo, todo el análisis de datos es llevado a un entorno GUI el cual es un entorno de programación visual para crear y ejecutar programas donde el principal análisis consiste en el ingreso continuo de datos. Este entorno tiene las características básicas de algunos programas visuales como Visual Basic o Visual c++.

2.3.5 Carga mecánica

Como banco de pruebas se utilizó un motor de 2 hp en una base experimental de la tesis "Monitoreo y análisis de corriente en motores de inducción con espiras cortocircuitadas" del autor local Antonio Morales Lecona, donde el autor analiza el mismo problema visto desde la magnitud corriente.

El banco de pruebas tiene un freno dinamométrico modelo 8540-00 de la marca Festo, este freno tiene las características de simular cargas dadas en $N\cdot m$, es decir aplica un par de fuerza contrario al movimiento del motor empleado. Cuando el motor gira con $0 N\cdot m$ se encuentra en vacío, cuando la carga incrementa el motor gira ligeramente más lento de lo normal ya que ahora se dice que arrastra la carga, de esta manera el motor se ve más forzado, variando las condiciones de operación. Esto emula las diferentes aplicaciones del motor, donde el torque demandado en su flecha es diferente.

En la Figura 2-20 se muestra el freno dinamométrico. La figura es extraída del Data Sheet, donde se describe que es un freno de cuatro cuadrantes de la marca Festo, serie LabVolt modelo 8540-00. Tiene como características: cuatro cuadrantes lo cual significa que se puede comportar como motor, generador o como freno. Este freno cuenta con una interfaz Humano-Máquina que permite configurar los parámetros del equipo mediante una pantalla táctil.



Figura 2-20 Freno dinamométrico marca Festo serie LabVolt modelo 8540-00.

Inicialmente en la pantalla se dan dos opciones, speed mode y torque mode, para así ser utilizado como motor y freno respectivamente. El freno que es la parte que interesa tienen un incremento de $0.51 \text{ N}\cdot\text{m}$ por cada toque. El acople entre el motor y el freno se realiza mediante un cople mecánico que genera cierta alineación entre ambas máquinas.

2.4 Clasificación automática

En la literatura existen muchos algoritmos de reconocimiento de patrones, tales como redes neuronales artificiales, máquinas de soporte vectorial, sistemas difusos, algoritmos de agrupamiento automático y árboles de decisiones, entre muchos otros. En particular, los árboles de decisiones han atraído la atención de muchos profesionales debido a su baja carga computacional y a su fácil diseño. En general, estos consisten en reglas if-then-else, en las cuales una serie de valores son evaluados para ver si cumplen las condiciones para pertenecer a una clase o nodo, de no ser el caso pasan a otro nodo para ser evaluadas. El árbol tendrá tantos nodos como clases o categorías; por lo tanto, la pertenencia a un nodo indica la pertenencia a una clase en específico. En este trabajo, las clases serán las condiciones del motor, incluyendo sano y los diferentes niveles de severidad. El diseño de estos árboles puede ser realizado de forma manual seleccionando apropiadamente los valores de las características que serán evaluadas o de forma automática usando software especializado como Matlab. Este último es preferido en muchas ocasiones ya que no depende de la apreciación del diseñador. En este, el conjunto de características y la clase a la que pertenece cada conjunto de características es introducido al algoritmo, el cual se encarga de encontrar los valores que permiten separar las clases para así establecer las reglas if-then-else.

CAPÍTULO 3

Dirección General de Bibliotecas UAQ

3 METODOLOGÍA

3.1 Diagrama metodológico.

La metodología se encuentra dividida en dos etapas fundamentales, la primera es la adquisición de datos y la segunda es el análisis de los datos obtenidos en las muestras. La Figura 3-1 muestra la metodología desglosada en donde la primera etapa mencionada como adquisición de datos la comprenden la puesta experimental de la prueba y la adquisición de señales de vibración, la segunda etapa corresponde al análisis de Fourier, la extracción de características frecuenciales para la detección de falla y la detección automática mediante árbol de decisiones.



Figura 3-1: Metodología.

3.2 Acondicionamiento de banco de pruebas

El banco de pruebas es de manera robusta el cual soporta motores de diferentes tamaños, está diseñado para cambiar tanto el motor como la carga, es de fácil acople. En la Figura 3-2 es mostrado el diseño del mismo, contiene una estructura versátil donde los 3 ejes pueden ser modificados para alinearlos con la

carga, las cuatro ruedas giratorias permiten el movimiento sobre el piso; también, tienen un freno para evitar el movimiento y un nivelador de piso-4. El motor es arrancado mediante un arrancador a tensión plena, puede ser adaptado para ser controlado por un pulso externo (en este trabajo no fue habilitado).

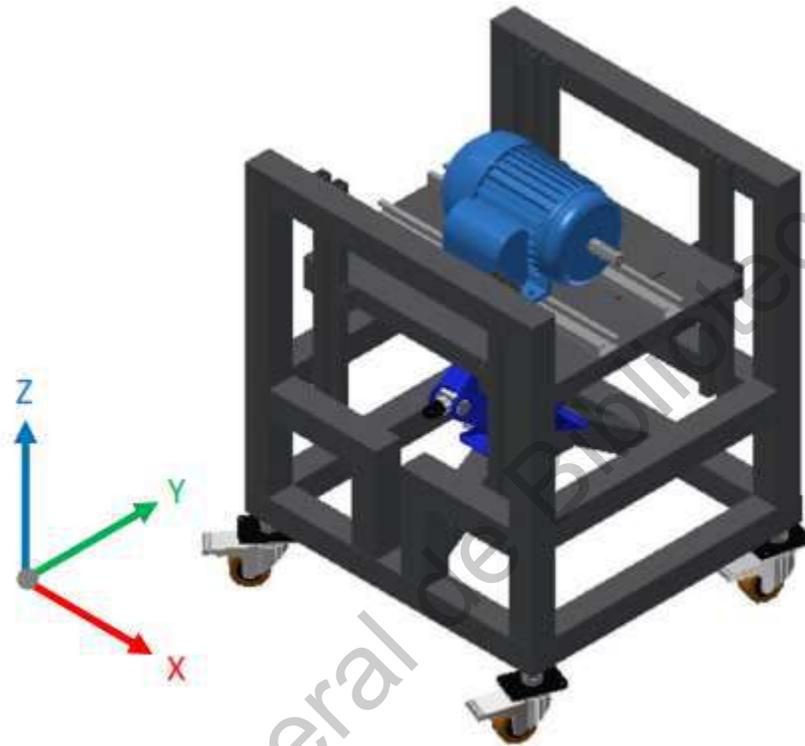


Figura 3-2 Diseño del banco para pruebas de motores (vista isométrica), Lecona (2018).

Para acondicionar el banco fue necesario usar un cople mecánico, con el que la potencia es transmitida al freno dinamométrico. Existen coples comerciales a diferentes medidas, pero debido a que no hay coples de dos medidas diferentes, este tuvo que ser construido. El cople consta de tres partes, dos extremos que van sujetas a cada flecha y en el centro unión lleva un conector de goma estriado para la fácil unión de los dos extremos y evitar las excentricidades por mal alineación o nivelación del banco y la carga mecánica- La Figura 3-3 muestra el cople montado y adaptado.

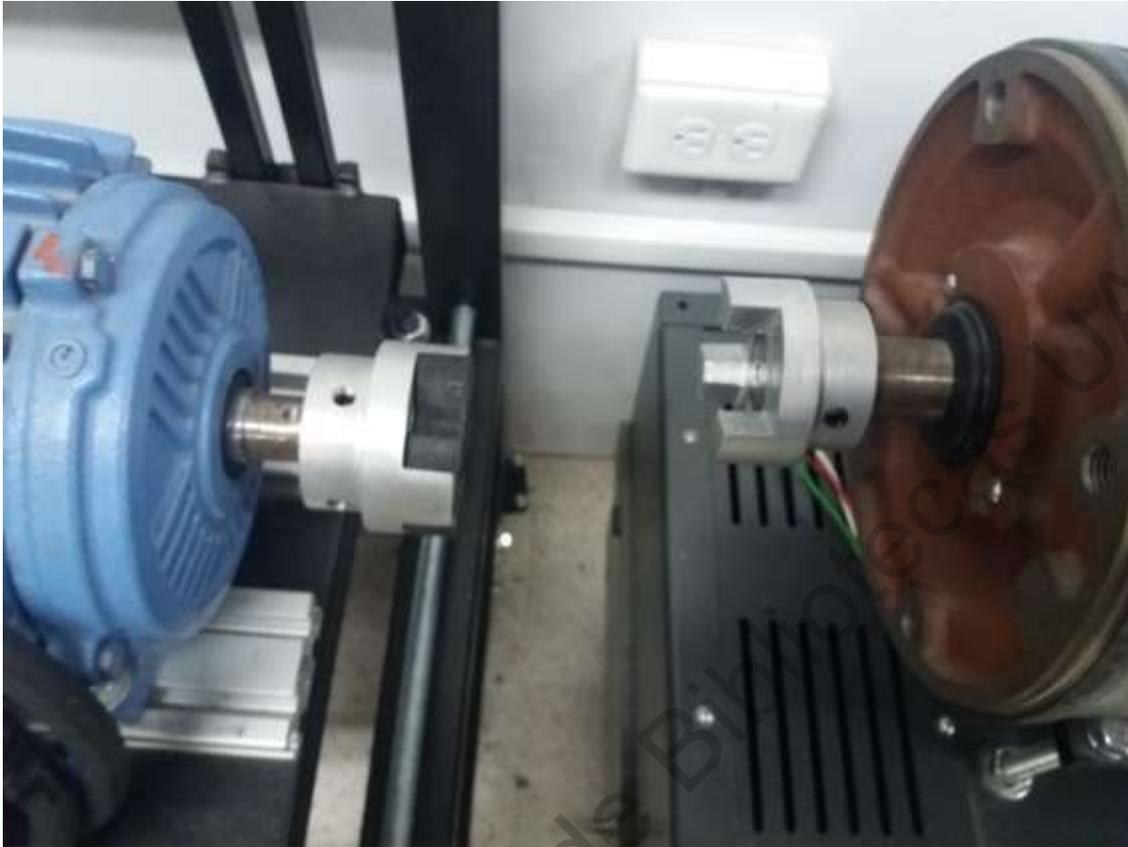


Figura 3-3 Cople mecánico montado y adaptado.

El material del cople es de aluminio, en cada extremo tiene una ranura nombrada cuñero y por la periferia dos barrenos separados 90° para colocar opresores y así fijar y evitar desplazamientos donde las flechas pueden ser desacopladas.

Una buena alineación evita las malas mediciones; es decir, tener un desalineamiento ya que este provocaría vibraciones. Aunque el acoplamiento pudiera no ser perfecto, el conector de goma evita esas mínimas imperfecciones. Evidentemente, al tener dos máquinas rotatorias, se debe evitar un desacople por vibraciones. Para esto, el banco cuenta con dos tornillos laterales de fijación, estos tornillos evitan separación alguna entre la carga y el motor; además de evitar una carga discrepante a la entregada por el freno, es decir la carga puede llegar a ser diferente por la distancia de acople. La Figura 3-4 muestra el acople del freno con el banco.



Figura 3-4 Acople entre motor y freno dinamométrico.

Como ya se mencionó, el motor no cuenta con un pulso de control de arranque, esto es porque en este trabajo no es de interés medir el transitorio de arranque del motor, sino el estado estable el cual es pocos segundos después del arranque. Este hecho también es importante ya que se recuerda que la técnica de análisis es la transformada de Fourier la cual afecta su desempeño cuando se analizan señales no estacionarias (ejemplo: el estado transitorio de arranque de un motor).

Para realizar las pruebas es necesario establecer la matriz de pruebas. En esta matriz se establecen los parámetros y condiciones en las que se realizan las pruebas para tener el material adecuado según el análisis planteado. Las pruebas fueron realizadas en base a 3 puntos diferentes de medición, 3 estados de carga, 4 estados de severidad en cortocircuito de espiras y 10 repeticiones de cada combinación anterior para fines estadísticos. La Tabla 3-1 muestra la matriz de pruebas.

Tabla 3-1 Matriz de pruebas experimentales.

	0%	50%	100%
sano (0 - 10)	10 pruebas	10 pruebas	10 pruebas
Ligero (10 - 20)	10 pruebas	10 pruebas	10 pruebas
Moderado (20 - 30)	10 pruebas	10 pruebas	10 pruebas
Severo (30 o más)	10 pruebas	10 pruebas	10 pruebas

La Matriz de pruebas contiene 360 pruebas. Los puntos de medición son la parte más cercana a la flecha de rotación, es decir sobre la carcasa donde las vibraciones son las que más interesan ya que como se mencionó anteriormente ahí es donde se está soportando la rotación. La segunda posición es sobre la carcasa cerca de la caja de conexiones, se coloca en esa parte ya que es una parte plana y se puede observar las vibraciones del estator. La última posición fue realizada en la base del motor donde es fijada a la estructura del banco de pruebas, aquí las vibraciones corresponden al efecto que tiene la máquina rotatoria respecto a la base de fijación.

En la condición de carga se decide tomar como referencia 3 diferentes cargas: vacío equivalente a 0 N*m, 50 % equivalente a 3.06 N*m y 100% equivalentes a 6.13 N*m.

Para la última condición de prueba se establecen 4 niveles de estado: sano (0 a 10 espiras en cortocircuito), ligero (10 a 20 espiras en cortocircuito), moderado (20 a 30 espiras en corto circuito) y severo (más de 30 espiras en cortocircuito). Como ya se mencionó en la tesis del autor Lecona (2018) se emplea un motor nuevo que fue rebobinado para obtener hasta 50 espiras de cortocircuito, las características son:

- Potencia: 2 Hp.

- Trifásico
- Tensión nominal de alimentación: 208-230/460 V.
- Corriente nominal: 6.33-5.72/2.86 A.
- Frecuencia de operación: 60 Hz.
- Velocidad nominal: 1750 rpm.

El motor cuenta con 6 bobinas de 141 espiras cada una, como consecuencia es un motor de 9 terminales. La Figura 3-5 muestra el esquema de bobinado.

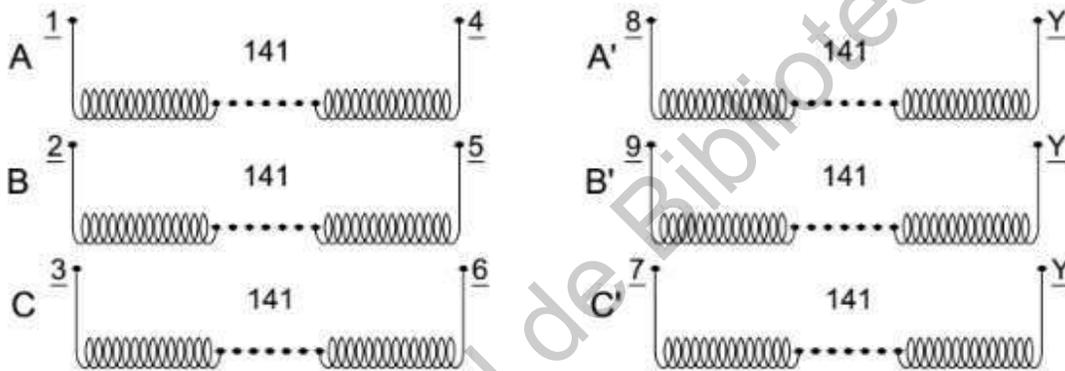


Figura 3-5 Bobinas originales del motor, Lecona (2018).

Las derivaciones se realizaron sobre las bobinas A y B quedando de la siguiente manera; 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30, 40 y 50 vueltas respecto a la terminal de salida de cada bobina. La Figura 3-6 muestra esquemáticamente los nuevos bobinados.

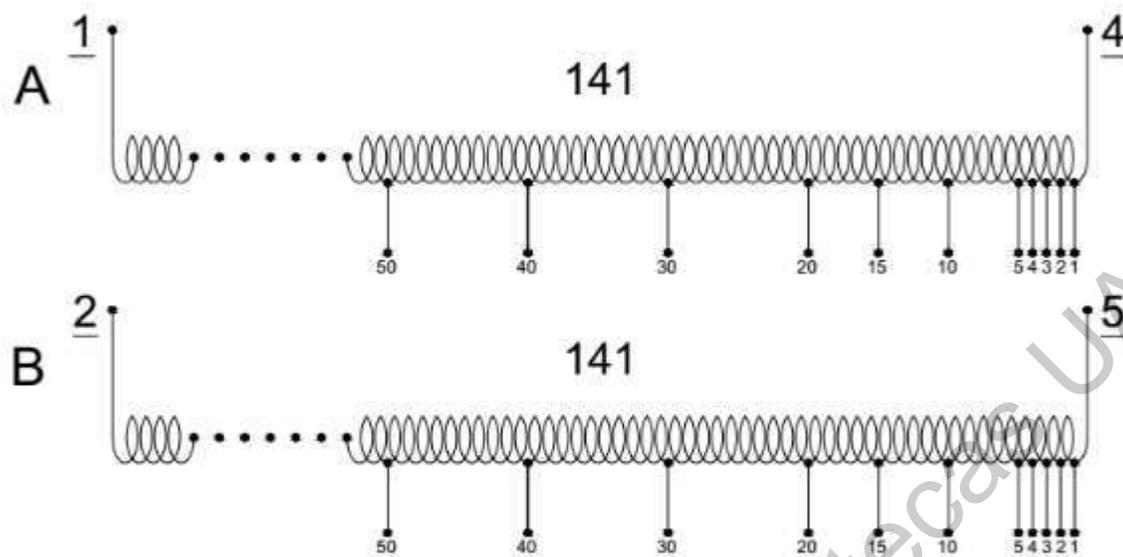


Figura 3-6 Diagrama de bobinas A y B con derivaciones, Lecona (2018).

3.3 Adquisición de señales

Para la tarjeta de adquisición solo se utilizaron un sensor acelerómetro triaxial Kistler, una tarjeta NI USB 6002, una fuente regulada de tensión y 4 terminales BNC hembras y una terminal banana hembra.

Para fines de practicidad y presentación, dentro de una caja de plástico se encuentra la tarjeta, la caja contiene las terminales BNC y banana, así pues 3 terminales BNC corresponden a cada eje axial y una para un pulso en un uso futuro. La terminal banana es la tierra que proviene de la fuente de tensión. En la figura 3-7 se muestra como fue el producto final.

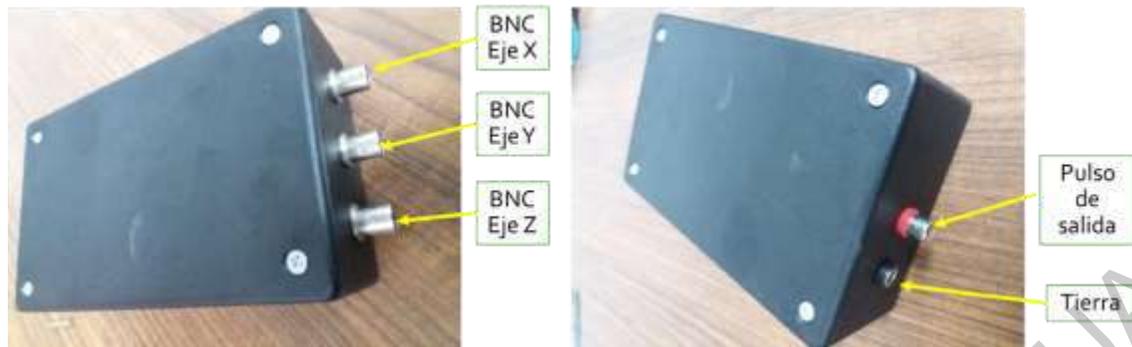


Figura 3-7 Caja con tarjeta DAQ y terminales para conexión.

El sensor como tal tiene un cable de tres salidas una para cada eje y dos cables de alimentación uno positivo y otro negativo, conectados a la fuente de tensión. Las señales de cada eje son conectadas a los puertos de la tarjeta de adquisición el puerto A1 0 para el eje X, A1 4 para el eje Y y A1 1 para el eje Z, el puerto A1 GND es conectado al borne de tierra de la fuente de tensión.

En cuanto a la tarjeta solo es alimentada por la computadora mediante un cable USB, adquiere los datos en los puertos ya mencionado con un rango de ± 10 V con una frecuencia de muestreo de 6000 Hz durante 20 segundos los cuales equivalen a 120000 muestras por cada prueba realizada. La tarjeta es programada mediante el software LabVIEW.

. La tarjeta adquiere la señal 5 segundos después de que el motor está en operación, esto para que el motor se encuentre en estado estable y eliminar el arranque que es el que contiene las componentes frecuenciales en modo no estacionario. Después de que se adquiere la señal toda la información se encuentra en una base de datos que es generada por el programa LabVIEW, de manera sistemática en cada prueba se debe cambiar manualmente el nombre del archivo, el archivo contiene la vibración de los tres ejes, x, y, z, el archivo generado por LabVIEW será de terminación .txt.

El software LabVIEW es de fácil programación ya que su entorno es a bloques, colocar los bloques y los elementos necesarios son programables por

separado. La Figura 3-8 se observa la programación. Lo siguiente es una breve descripción de los elementos usados.

- Elapsed Time: es utilizado para el tiempo de adquisición y el tiempo transcurrido, se utiliza la característica Elapsed Has Time que muestra la cantidad de tiempo que ha transcurrido desde la hora de inicio para poder manipularla y establecer un botón de paro de medición.
- DAQ Assistant: este bloque tiene la funcionalidad de definir los parámetros de la tarjeta de adquisición, en ella se programó que es lo que realiza cada terminal de la misma. La figura 3-8 muestra la programación de la DAQ. La característica DATA es utilizada para registrar los datos muestreados.
- Split Signals Function: divide dos o más señales en señales componentes así se separan las tres señales de cada eje.
- Convert From Dynamic Data Express VI: Convierte el tipo de datos dinámicos a datos numéricos o booleanos.
- Waveform Chart: Envía la señal muestreada a un osciloscopio en donde se observa la señal de forma de onda en tiempo real.
- Write To Spreadsheet File VI: Convierte arrays en cadenas de datos y escribe las cadenas en un Nuevo archivo, aquí es creado el archivo .txt
- File Path: aquí se coloca una cadena de datos y es la forma de darle ubicación y nombre al archivo creado.

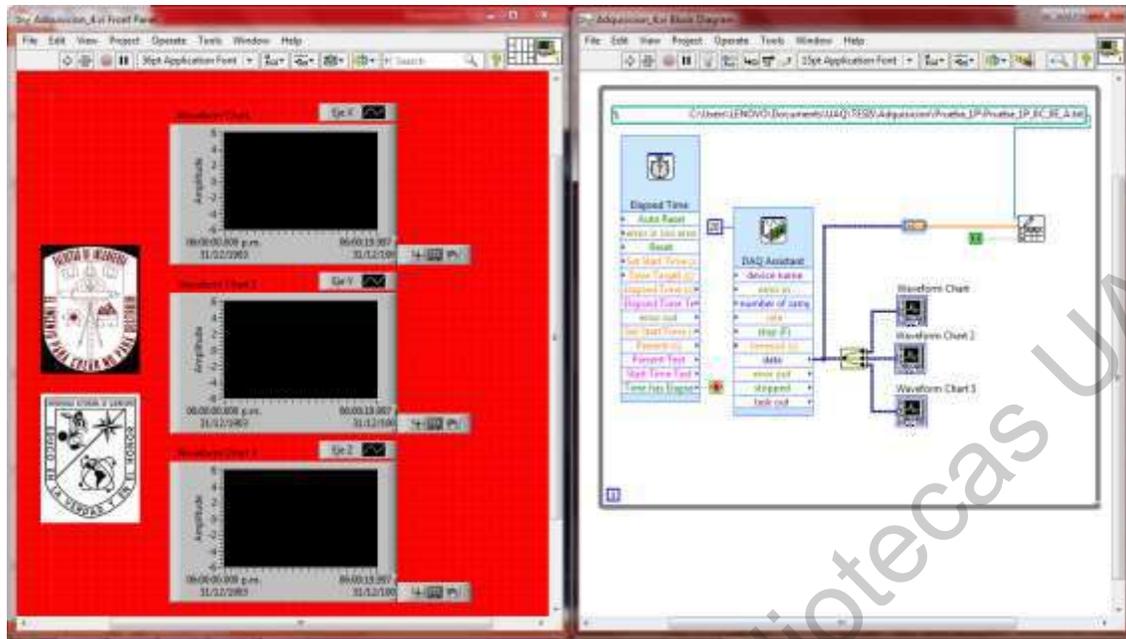


Figura 3-8 Entorno gráfico y de programación en LabVIEW.

3.4 Análisis de Fourier

Para el análisis de Fourier se crea un entorno GUI donde el archivo .txt se extrae en una tabla de datos, después de la extracción será graficado en tres ventanas gráficas. Las ventanas gráficas corresponden a los tres ejes axiales x, y, z, simultáneamente se grafican y calculan las FFT de cada eje mediante el algoritmo programado en el mismo entorno GUI. En la Figura 3-9 se puede observar una interfaz de diagnóstico la cual del lado izquierdo muestra 3 ventanas gráficas que corresponden a la vibración, una segunda columna muestra 3 ventanas gráficas que corresponden a Fourier, tres botones: examinar, graficar y diagnosticar. En el botón examinar se selecciona un archivo .txt mismo que es colocado en una tabla de datos de tres columnas que corresponden a la medición de los tres ejes axiales, el botón graficar se habilita una vez que se tiene cargado el archivo de datos y grafica las 6 ventanas gráficas disponibles en la interfaz. El último botón es habilitado después de graficar y tiene la funcionalidad de dar a conocer el estado de la falla.



Figura 3-9 Interfaz gráfica de Matlab.

Matlab contiene en sus librerías funciones como la fft que es utilizada para analizar una señal en el dominio de la frecuencia, tal como se muestra en la imagen 3-10 se calcula la fft para cada eje y posteriormente es plotado en las gráficas.

```

302 - g=axis('tight');
303 - ylabel('Vibraciones (m/s^2)', 'FontWeight','bold','Color','w')
304 - title('Eje 2', 'Color', 'y')
305 - %Fourier eje x
306 - ff=abs(fft(Ax(r,1),N)/N);
307 - ff=ff;
308 - %Fourier eje y
309 - fy=abs(fft(Ay(r,1),N)/N);
310 - fy= fy/2* linspace(0,1,W/2+1);
311 - %Fourier eje z
312 - ffz=abs(fft(Az(r,1),N)/N);
313 - ffz=ffz;
314 - %Fourier eje x
315 - fx=abs(fft(Ax(r,2),N)/N);
316 - fx= fx/2* linspace(0,1,W/2+1);
317 - %Fourier eje y
318 - fy=abs(fft(Ay(r,2),N)/N);
319 - fy= fy/2* linspace(0,1,W/2+1);
320 - %Fourier eje z
321 - ffz=abs(fft(Az(r,2),N)/N);
322 - ffz=ffz;
323 - %Plot de Fourier
324 - axes(handles.axes1);
325 - plot(fx,fx,'g')

```

Figura 3-10 Código fuente del análisis de Fourier.

3.5 Extracción de componentes frecuenciales

La extracción de componentes frecuenciales simplemente se maneja como una comparación de espectros, pero para realizar una comparación se debe de

tener una referencia con la cual hacer la comparación, esta referencia se determina y obtiene midiendo las vibraciones con el motor sano y sus respectivos niveles de carga, una vez obteniendo la referencia se compara con los diferentes estados de falla y condiciones de carga.

Esta etapa fue totalmente experimental y empírica; es decir, de forma visual se eligen los grupos de componentes frecuenciales que muestran diferencias en amplitud entre las distintas condiciones. En esta extracción también pueden ser usados diferentes rangos frecuenciales que denoten cambios entre condiciones. También es importante mencionar que en este trabajo se busca establecer un algoritmo de reconocimiento de patrones (patrones asociados a cada condición) más que establecer una relación física y analítica del comportamiento del motor con respecto a cambios en amplitud y frecuencia. No obstante, la generación de la base de datos a través de la matriz de pruebas establecida permitirá que el estudio analítico pueda ser llevado a cabo en otros trabajos.

3.6 Diagnóstico automático

Una vez que las características (componentes frecuenciales discriminatorias entre clases) han sido obtenidas, estas deben ser procesadas por el algoritmo de reconocimiento de patrones, es este caso el árbol de decisiones. Para esto, la matriz de pruebas se dividirá en dos porcentajes: uno para entrenamiento (diseño del árbol) y otro para validación, es decir se debe evaluar el desempeño de efectividad con datos que no fue entrenado. Como se comentó, todo esto se realiza en Matlab usando la función `fitrtree`. Una vez que el árbol es diseñado este se prueba con el restante de pruebas (conjunto de validación) para obtener la matriz de confusión y así determinar la efectividad del mismo. En el siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 4

Dirección General de Bibliotecas UAQ

4 EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

4.1 Puesta de experimento

La puesta de experimento del presente trabajo esta mostrado en la Figura 4-1 en donde todos los elementos están conectados para realizar las pruebas, el ciclo comienza con la conexión del acelerómetro tri-axial Kistler modelo 8395 A10 tanto a la fuente de tensión como a la tarjeta DAQ. La tarjeta DAQ es conectada mediante un cable USB a la computadora, posteriormente se lleva a cabo la programación de la carga en el freno dinamométrico marca Festo de la serie LabVolt y modelo 8540-00 para cada condición de carga. Después se coloca el nombre del archivo de prueba en la interfaz de adquisición, terminado esto se acciona el arrancador trifásico que proporciona la excitación del motor, al paso de 5 segundos de arranque del motor la interfaz de adquisición es iniciada midiendo las vibraciones; una vez terminada la prueba de 20 segundos, se da por terminado el ciclo y así volver a correr el ciclo para las 360 pruebas de la matriz de pruebas presentada.

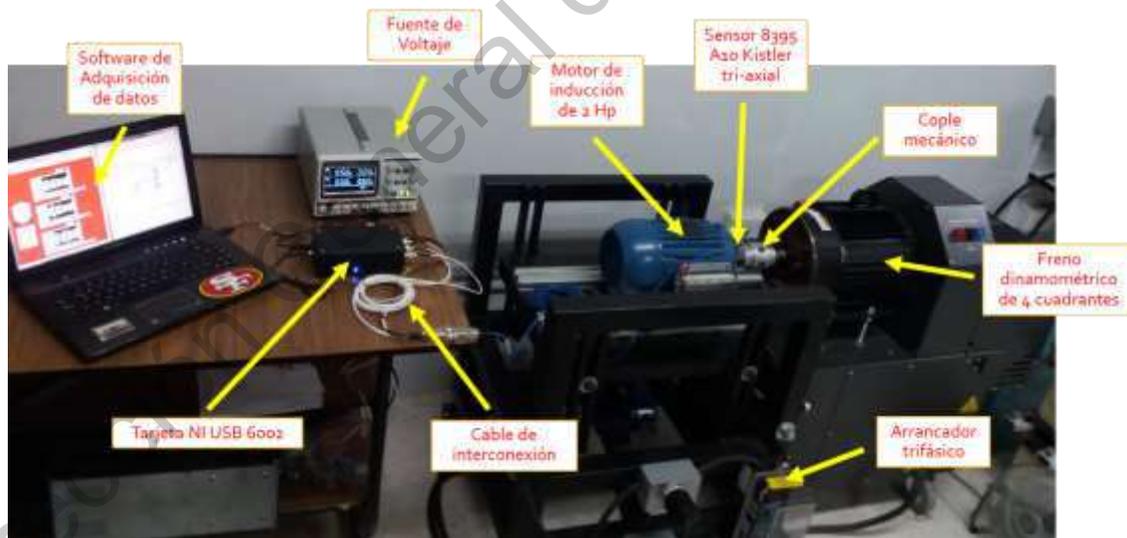


Figura 4-1 Puesta de experimento.

4.2 Puntos de medición

En las Figuras 4-2, 4-3 y 4-4 se muestra el acomodo del acelerómetro en las tres posiciones tomadas en cuenta.



Figura 4-2 Montaje del acelerómetro en la posición 1 cercana al rodamiento de la flecha del motor.

La posición 1 es la más cercana a la flecha, aquí los ejes X y Z están invertidos respecto a las otras posiciones. Están invertidos debido a que el acelerómetro solo tiene una base magnética y no es posible colocarlo sobre el eje horizontal.

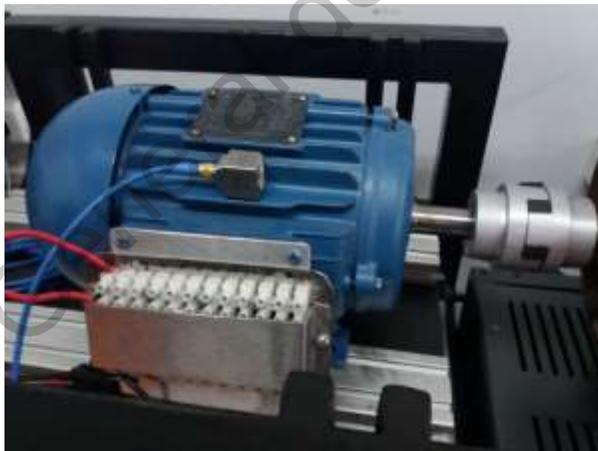


Figura 4-3 Montaje del acelerómetro en la posición 2 sobre el estator del motor.

La segunda posición se encuentra sobre la carcasa del motor midiendo vibraciones sobre el estator, se coloca aquí debido a la facilidad de fijación ya que la superficie donde se coloca esta plana y de esta manera se logra que el eje horizontal sea paralelo a la base.

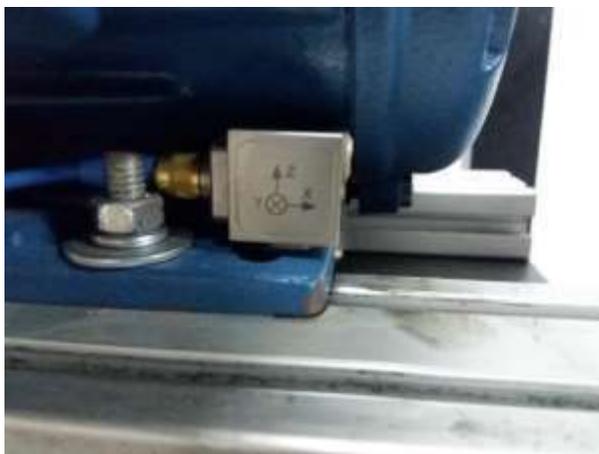


Figura 4-4 Montaje del acelerómetro en la posición 3 cercana a la fijación de la base del motor.

La tercera y última posición se encuentra sobre la base del motor, en este caso las vibraciones son entre el motor y la base del banco de pruebas.

Todas las posiciones fueron decididas por facilidad de montaje y todas miden la vibración, solo pueden usarse las pruebas de cada una para fines comparativos y no de similitud ya que son mediciones diferentes, pueden tener similitudes más no significa que sean lo mismo en términos de amplitud principalmente.

4.3 Señales de vibración

El funcionamiento de la GUI ya se mencionó en la sección previa. Un ejemplo de los resultados que se obtienen se muestra en la Figura 4-5. Del lado izquierdo se muestran las señales de vibración adquiridas, al centro sus espectros, del lado derecho los datos numéricos y abajo el daño diagnosticado.

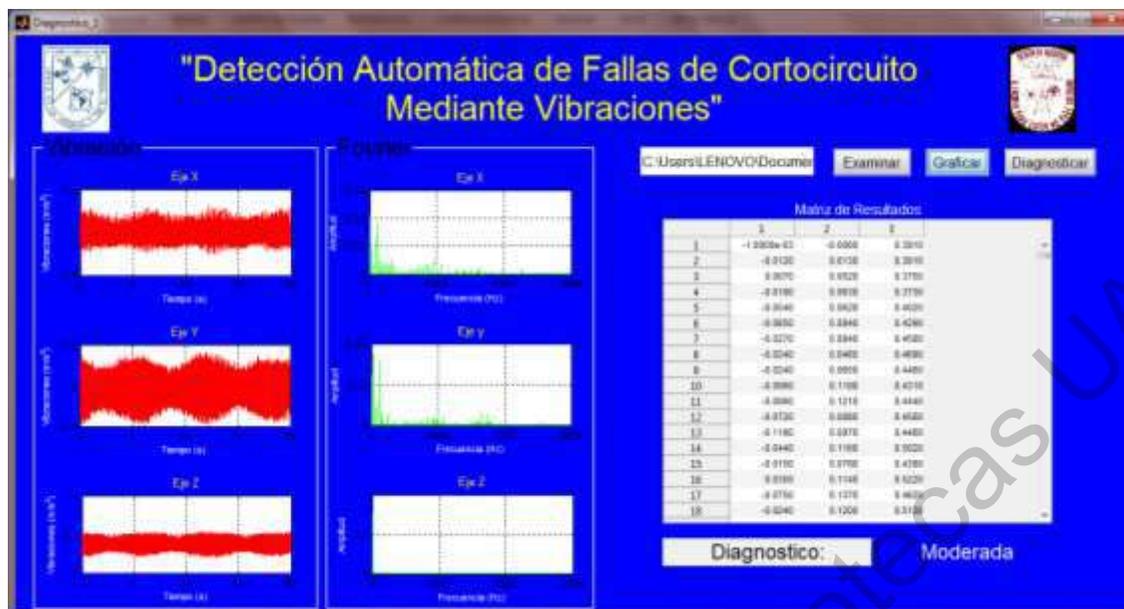


Figura 4-5 Graficas de las vibraciones.

Un ejemplo de las señales de vibración con mayor zoom se muestra en las Figuras 4-6 y 4-7. La Figura 4-6 muestra el eje X en la posición 1 con 0% de carga y 0 espiras en corto circuito, mientras que la Figura 4-7 muestra el mismo eje X pero en la posición 1 con 0% de carga y 30 espiras en cortocircuito. Si bien solamente lo que cambia son las espiras en cortocircuito, se observa como las amplitudes son mayores cuando la falla es mayor; es decir las vibraciones son tienden a incrementarse conforme se incrementan las espiras en cortocircuito.

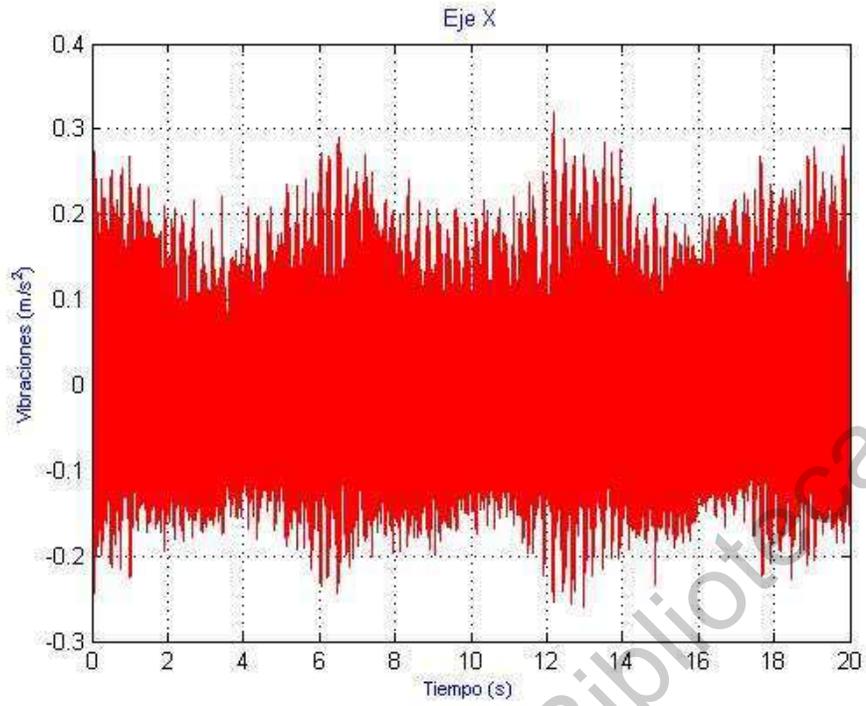


Figura 4-6 Grafica del Eje X, posición 1, carga 0% y 0 espiras en corto circuito.

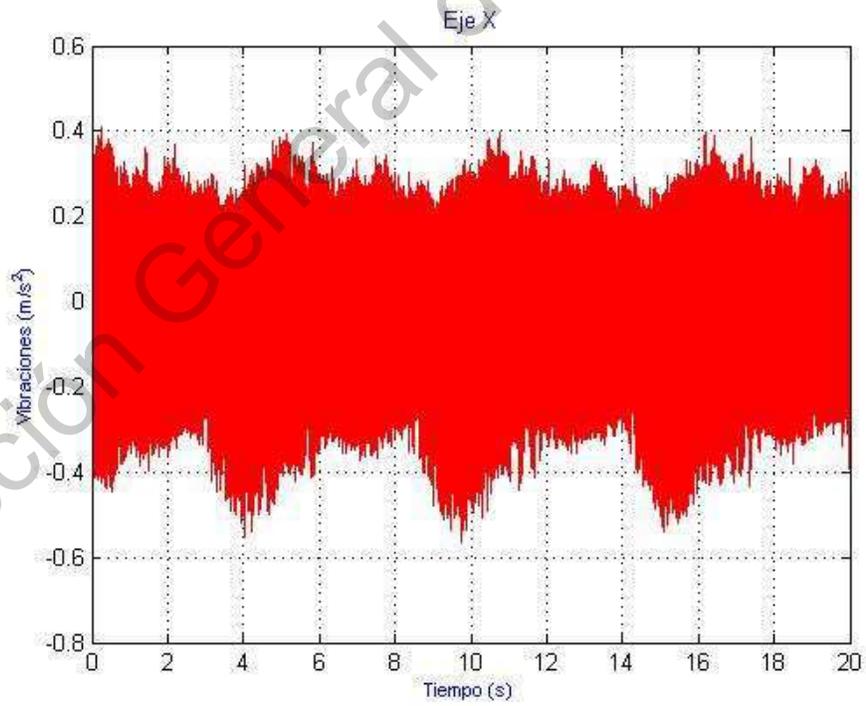


Figura 4-7 Grafica del eje X, posición 1, carga 0% y 30 espiras en cortocircuito.

Las señales de vibración, como se ha venido mencionando, pueden ser vistas en tiempo real; en la Figura 4-8, se observa que la interfaz de adquisición funciona correctamente, del lado izquierdo se observan los osciloscopios con la forma de onda y el lado derecho la programación a bloques. En la parte derecha manualmente se coloca el título del nuevo archivo. En este trabajo el nombre es especificado para cada prueba realizada, así como la ubicación del mismo; no obstante, este procedimiento podría ser automatizado.

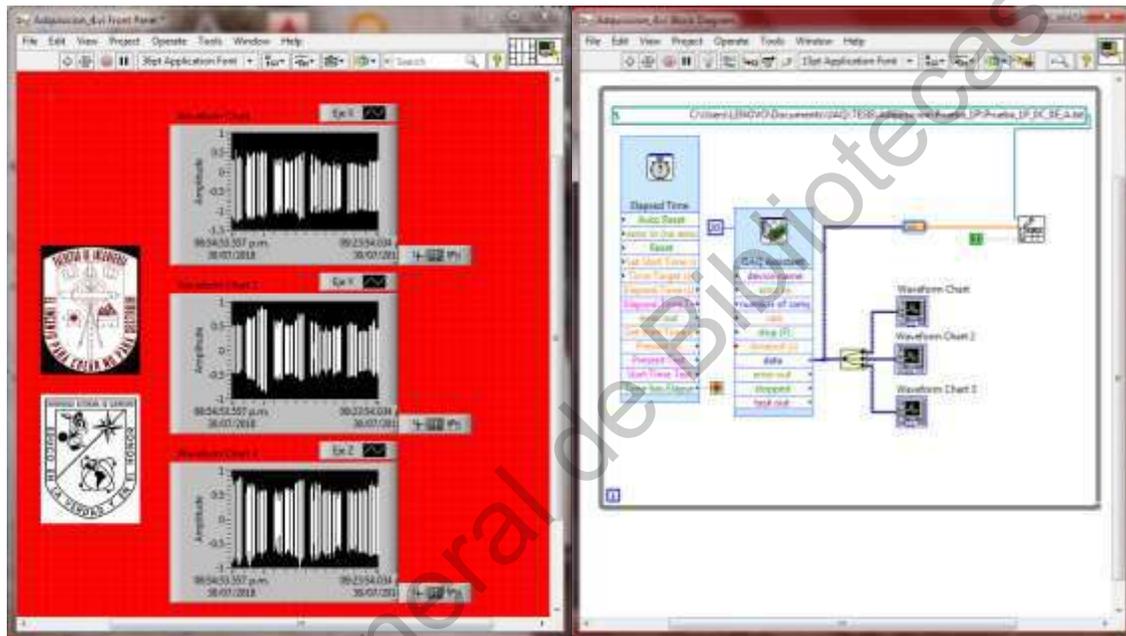


Figura 4-8 Interfaz de adquisición en funcionamiento.

4.4 Espectros de Fourier

Para fines prácticos y de simplicidad solo se muestra un caso en particular y este es el eje X, posición 1, carga 0% y sus variantes en 0, 10, 20 y 30 espiras en cortocircuito, tal y como se ve en las Figuras 4-9, 4-10, 4-11 y 4-12. Los valores numéricos de los otros casos se muestran en tablas para un mejor agrupamiento y entendimiento.

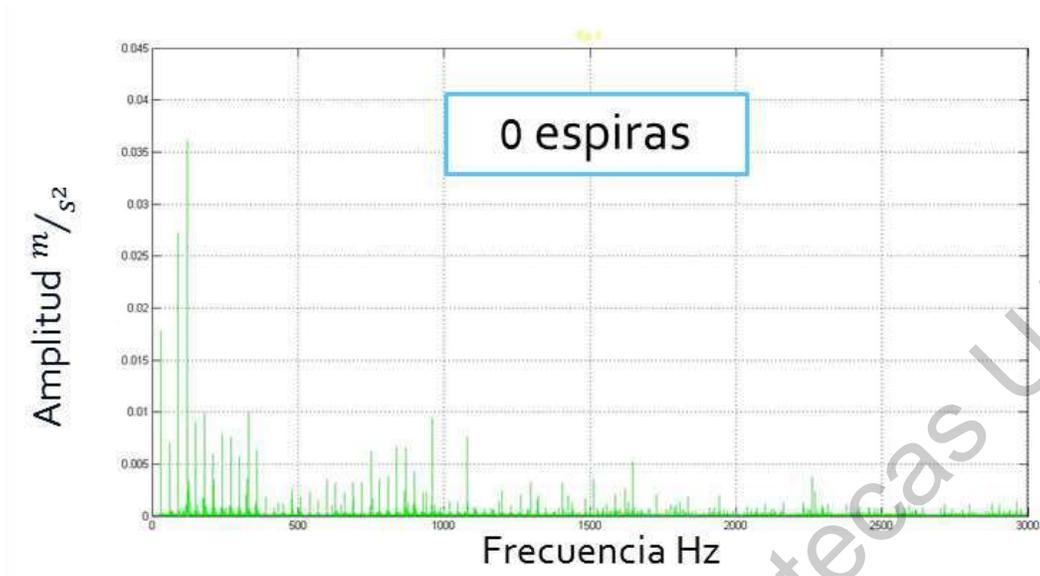


Figura 4-9 Espectro de Fourier para el eje X, posición 1, carga 0% y 0 espiras en cortocircuito.

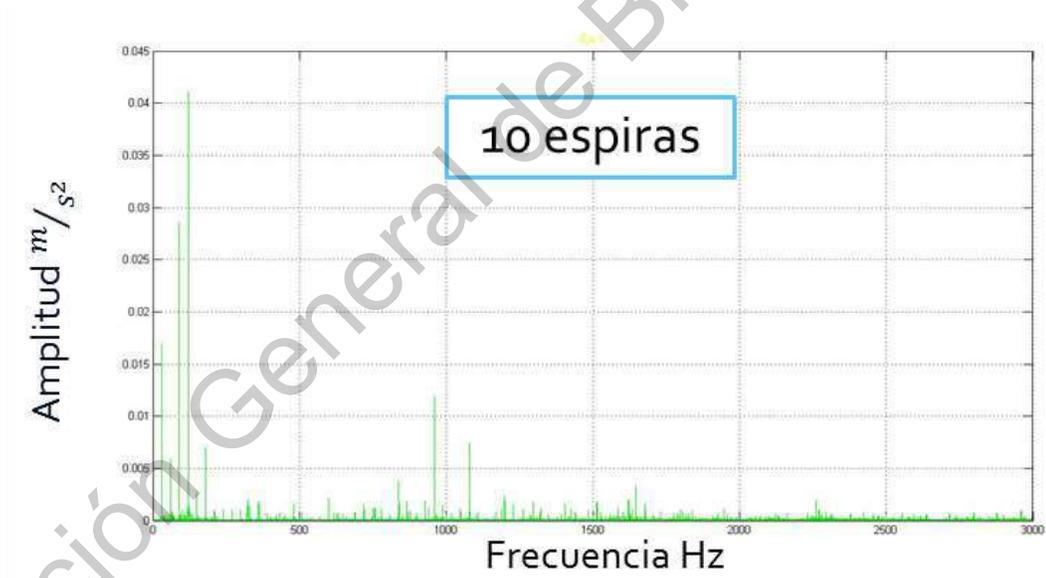


Figura 4-10 Espectro de Fourier para el eje X, posición 1, carga 0% y 10 espiras en cortocircuito.

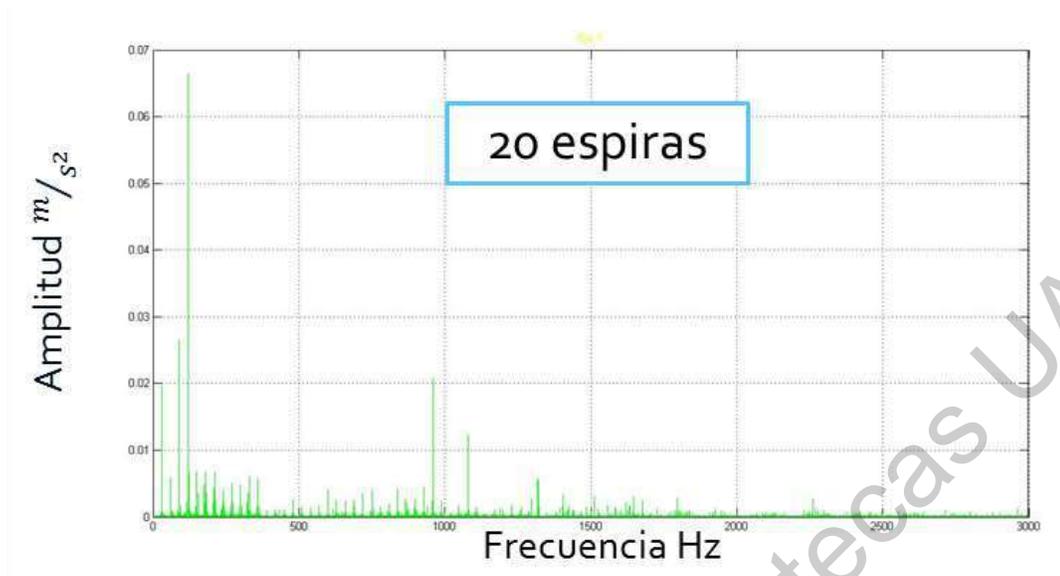


Figura 4-11 Espectro de Fourier para el eje X, posición 1, carga 0% y 20 espiras en cortocircuito.



Figura 4-12 Espectro de Fourier para el eje X, posición 1, carga 0% y 30 espiras en cortocircuito.

A partir de estas gráficas es evidente el incremento del contenido frecuencial en términos de amplitud. Siendo más visible los cambios en las componentes entre 0 y 500 Hz. Tal es el caso, que a mayor severidad mayor amplitud en las componentes.

4.5 Tabla de componentes

Aunque la amplitud de diferentes componentes frecuenciales pudo ser seleccionada para distinguir las diferentes condiciones de falla y considerando que el siguiente paso en la metodología es una tarea de reconocimiento de patrones, se elige la componente de 29.95 Hz para los tres casos de posición del acelerómetro, obteniendo así una tabla donde se muestran los valores de vibración en el eje X.

En las Tablas 4-1, 4-2 y 4-3 se muestran los valores de las vibraciones para la componente frecuencial seleccionada respecto a las cuatro condiciones de falla, 3 condiciones de carga y para las 3 posiciones utilizadas.

Tabla 4-1 Tabla de valores de vibración para condiciones de falla y de carga a una frecuencia de 29.95 Hz en la posición 1 del acelerómetro.

Frecuencia 29.95 Hz					Posición 1
1	sano (0 - 10)	Ligero (10 - 20)	Moderado (20 - 30)	Severo (30 o más)	
0%	0.01772	0.01688	0.01965	0.02071	
50%	0.001276	0.001325	0.0008391	0.001028	
100%	0.0001449	0.0006446	0.0008444	0.0004813	

Tabla 4-2 Tabla de valores de vibración para condiciones de falla y de carga a una frecuencia de 29.95 Hz en la posición 2 del acelerómetro.

Frecuencia 29.95 Hz					Posición 2
1	sano (0 - 10)	Ligero (10 - 20)	Moderado (20 - 30)	Severo (30 o más)	
0%	0.03472	0.03077	0.03346	0.03272	
50%	0.001723	0.002001	0.00009197	0.001154	
100%	0.0001908	0.0009828	0.001069	0.0005765	

Tabla 4-3 Tabla de valores de vibración para condiciones de falla y de carga a una frecuencia de 29.95 Hz en la posición 3 del acelerómetro.

Frecuencia 29.95 Hz					Posición 3
1	sano (0 - 10)	Ligero (10 - 20)	Moderado (20 - 30)	Severo (30 o más)	
0%	0.02509	0.018	0.02195	0.02266	
50%	0.000719	0.000981	0.00008226	0.0004364	
100%	0.00007671	0.0003754	0.0003731	0.0001535	

4.6 Detección automática

Las Figuras 4-13, 4-14 y 4-15 muestran de forma gráfica los valores de las tablas anteriores. Es importante mencionar que, para poder marcar una proporcionalidad positiva entre niveles de carga, estas fueron escaladas con los siguientes factores 1/10, 10, 100, para 0%, 50% y 100% de carga, respectivamente. También se consideró la media de las pruebas. Este escalamiento, aunque no es necesario desde el punto de vista reconocimiento de patrones, se decidió con el objetivo de mostrar una tendencia ascendente con respecto a la carga mecánica.

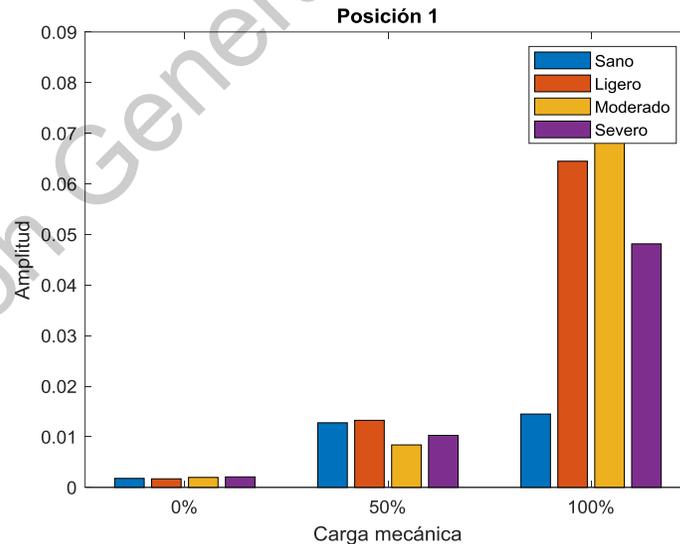


Figura 4-13 Gráfica de barras para la amplitud seleccionada.

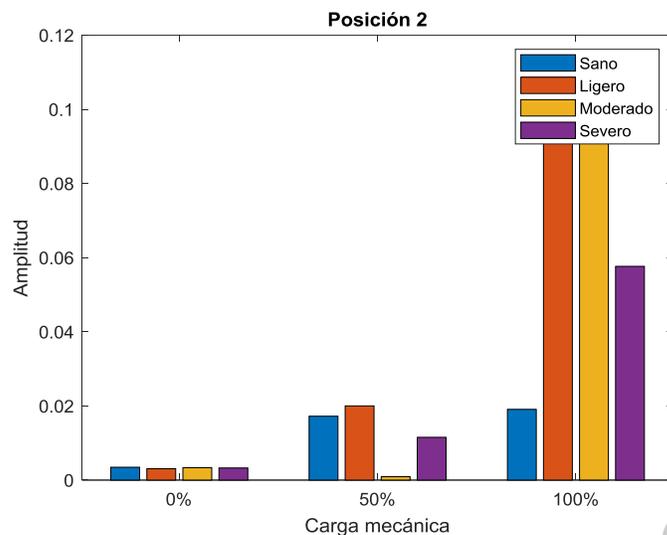


Figura 4-14 Gráfica de barras para la amplitud seleccionada.

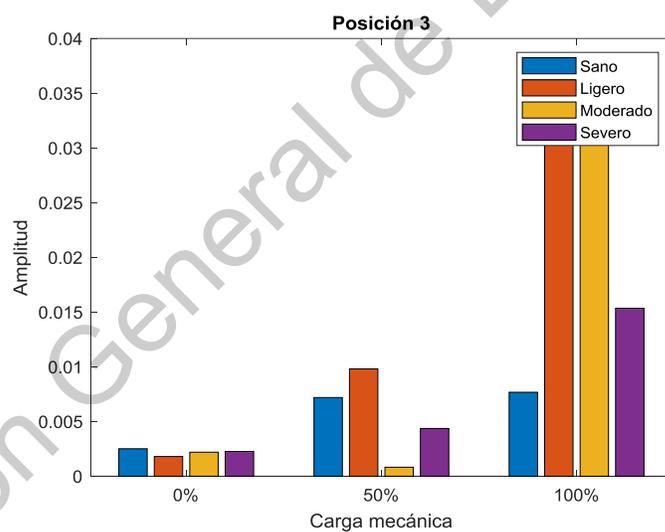


Figura 4-15 Gráfica de barras para la amplitud seleccionada.

Independientemente, las condiciones de sano, ligero, moderado y severo se perciben los cambios por grupo. Los mejores resultados se observan en la posición (Figura 4.13) ya que conforme aumenta el nivel de carga aumenta la amplitud por condición; ejemplo, la barra de color naranja crece conforme aumenta la condición de severidad y la carga mecánica.

En este punto es importante mencionar que, aunque los distintos puntos de medición pueden proporcionar patrones caracterizables, el mejor punto de medición es de alguna manera la posición 1. Evidentemente este resultado es preliminar y muy básico, ya que el análisis realizado solo considera Fourier y muy probablemente mejores resultados pueden ser obtenidos con técnicas avanzadas de procesamiento de señales. Incluyendo técnicas de pre procesamiento como normalización, estandarización, filtrado, etc.

Habiendo considerado que resultados adecuados son obtenidos a partir del eje X y la posición 1, se procede a diseñar y entrenar el árbol de decisiones con estos datos únicamente. Los datos restantes quedan a disposición para futuros trabajos donde se exploren metodologías más sofisticadas.

La Tabla 4.4 muestra la matriz de confusión obtenida para la condición de sin carga. Entiéndase por matriz de confusión los resultados de clasificación según la asignación de clases. Antes de comenzar con la discusión de la tabla es importante saber que, del conjunto total de pruebas por cada posición, es decir 120 pruebas (solo para la posición 1 considerando que 360 son el total de 3 posiciones), el 30 % (36 pruebas) fue seleccionado para el diseño del árbol y el 70 % (84 pruebas) para su validación. No hay regla para elegir los porcentajes; por lo tanto, se eligió dejar el porcentaje mayor para la validación.

Tabla 4-4 Matriz de confusión condición sin carga.

	Sano	Ligero	Moderado	Severo	% Efectividad
Sano	20	1	0	0	95.24
Ligero	2	18	1	0	85.71
Moderado	0	3	18	0	85.71
Severo	0	0	0	21	100
Total					91.66

Los resultados de la Tabla 4.4 muestran una eficiencia del 91.66% global, lo cual es un dato bastante adecuado. Se observa que de 84 pruebas (70%), 21 corresponden a cada clase (Sano, Ligero, Moderado y Severo). En un escenario

ideal la Tabla debería mostrar la diagonal con puros números 21, indicando que las 21 pruebas de cada clase fueron clasificadas correctamente; no obstante, esto no fue así. Para la condición de sano 20 pruebas fueron clasificadas correctamente, mientras que 1 fue clasificada como daño ligero. La única condición que clasificó al 100 fue la de daño severo, lo cual de alguna manera puede ser esperado al ser la condición más extrema y por lo tanto la que más impacto tiene en el motor, haciendo que su detección sea más sencilla.

Las Tablas 4.5 y 4.6 muestran las matrices de confusión para las condiciones de 50% y 100% de carga mecánica, donde eficiencias globales de 95.24% y 90.45%, respectivamente, son obtenidas.

Tabla 4-5 Matriz de confusión condición carga 50%.

	Sano	Ligero	Moderado	Severo	% Efectividad
Sano	21	0	0	0	100
Ligero	1	19	1	0	90.48
Moderado	0	2	19	0	90.48
Severo	0	0	0	21	100
Total					95.24

Tabla 4-6 Matriz de confusión condición carga 100%

	Sano	Ligero	Moderado	Severo	% Efectividad
Sano	20	1	0	0	95.24
Ligero	2	17	2	0	80.85
Moderado	0	3	18	0	85.71
Severo	0	0	0	21	100
Total					90.45

A partir de las tablas anteriores se observa que todas las eficiencias superan el 90%. Es importante mencionar que tres árboles tuvieron que ser diseñados, uno para cada condición de carga. Cada árbol quedó con 4 nodos (uno por cada clase: sano, ligero, moderado y severo) y los valores umbrales de cada nodo quedaron determinados como la media más una desviación estándar de los datos mostrados

en las Figuras 4-13, 4-14, 4-15. La intención inicial era construir un algoritmo que fuera insensible a la carga mecánica; no obstante, al observar los valores de la Tabla 4.1 esto no es posible debido a la variación de valores en función de la carga. Por lo tanto, se decide realizar un árbol para cada condición. En la propuesta actual, esto no representa problema ya que la carga mecánica es conocida; sin embargo, en condiciones reales de operación esta debería ser medida para poder saber que árbol utilizar. Independientemente, de esta situación se deriva una oportunidad de investigación para desarrollar un método que agregue la medición o estimación de carga mecánica (ejemplo con la medición de corriente) para obtener un sistema de diagnóstico automático mediante las variables de carga mecánica y vibraciones en el eje X, así el árbol desarrollado evaluará dos variables para diagnosticar la condición del motor no importando la carga mecánica.

CAPÍTULO 5

Dirección General de Bibliotecas UAQ

5 CONCLUSIONES

5.1 Concluyentes

Con los patrones encontrados en las pruebas es posible desarrollar un sistema de detección de fallas de corto circuito y así lograr una reducción en el impacto negativo de un daño en los motores de inducción; un aumento de carga puede ayudar a marcar más los patrones de falla; sin embargo, este puede degradar e incrementar más rápido la severidad de la falla debido al incremento mayor de corriente.

Al utilizar diferentes posiciones de uso del sensor es posible compararlas entre sí y determinar que efectivamente en todas las posiciones el resultado de los patrones es similar; es decir, en todas las posiciones se pueden establecer patrones que permitan distinguir entre fallas. No obstante, los resultados más adecuados, considerando un procesamiento muy simple como fue la transformada de Fourier, se obtuvieron cuando el sensor se colocó cerca al soporte de la flecha; es decir, cercano a los rodamientos. Tener espiras de cortocircuito además de generar más vibraciones conlleva la generación de otro tipo de fallas, las cuales pueden ser estudiadas y diagnosticadas mediante el análisis de esta variable física.

Para un profundo análisis es necesario utilizar más condiciones de prueba, tales como el nivel de carga, el nivel de cortocircuito, el posicionamiento del sensor, así como repeticiones en las mismas condiciones para un mejor análisis estadístico. En este trabajo se encuentra que eje X en la posición 1 ofrece los mejores resultados; no obstante, la base de datos generada permitirá explorar diversas metodologías con el objetivo de establecer un método que sea insensible al punto de medición. De igual manera, la información de otros ejes puede ser fusionada con la intención de ofrecer un diagnóstico más certero. Con el eje X y la posición se logró una eficiencia total superior al 90% en todos los casos de carga mecánica a través de tres árboles de decisión, dejando la apertura a la propuesta de algoritmos de clasificación más robustos y quizá más complejos, pero con mejor eficiencia.

5.2 Prospectivas

Una prospectiva general es que el experimento pueda llevarse a cabo en un solo software y no en dos como se realizó en este caso de estudio (Matlab y LabView). Hacerlo en un solo software, además de reducir la simplicidad, aumenta la eficacia y compatibilidad en la adquisición y procesamiento; mejor aún, este sistema de detección podría realizarse sin hacer uso de una computadora llegando a un sistema embebido o de propósito específico, desarrollando un aparato de medición basado por ejemplo en microcontroladores.

La componente frecuencial elegida para el diagnóstico fue de forma visual; no obstante, se queda como prospectiva relacionar la falla con alguna o algunas componentes frecuenciales de forma analítica, las cuales tengan una justificación en la dinámica del motor. También, es importante llevar a cabo la prueba y análisis de otros indicadores lineales y no lineales que cuantifiquen las características del espectro. En este trabajo se usó la amplitud, pero pueden usarse muchos otros más como índices estadísticos, fractales, entropías, etc. Aquí el pre procesamiento y pos procesamiento jugarán papeles importantes en las propuestas metodológicas de procesamiento digital de señales.

En cuanto a la detección automática, también se visualiza la prospectiva de evaluar algoritmos más avanzados de reconocimiento de patrones, así como evaluar técnicas de fusión de datos con el objeto de incrementar la eficiencia.

Finalmente, queda como prospectiva unificar los árboles de decisión propuestos agregando la variable de medición de la carga mecánica, la cual por sencillez y como método no invasivo puede ser estimada mediante la señal de corriente.

CAPÍTULO 6

Dirección General de Bibliotecas UAQ

6 Referencias

1. Amézquita - Sánchez, J. P., Valtierra - Rodríguez, M., Pérez - Ramírez, C. A., Camarena - Martínez, D., García - Pérez, A., & Romero - Troncoso, R. J. (2017). Fractal dimension and fuzzy logic systems for broken rotor bar detection in induction motors at start-up and steady-state regimes. *Measurement Science and Technology*, 28(7), 075001.
2. Cabal - Yépez, E., Valtierra - Rodríguez, M., Romero - Troncoso, R. J., García - Pérez, A., Osornio - Ríos, R. A., Miranda - Vidales, H., & Álvarez - Salas, R. (2012). FPGA-based entropy neural processor for online detection of multiple combined faults on induction motors. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 30, 123-130.
3. Cacho, A. A., Espinoza, L. M., Montero, R. S., Ramírez, A. Z., Azuela, J. S., & Rodríguez, M. O. (2014) Clasificación Automática de Fallas Causadas por Espiras en Corto Circuito en Motores de Inducción.
4. Camarena - Martínez, D., Pérez - Ramírez, C. A., Valtierra - Rodríguez, M., Amézquita - Sánchez, J. P., & de Jesús Romero - Troncoso, R. (2016). Synchrosqueezing transform-based methodology for broken rotor bars detection in induction motors. *Measurement*, 90, 519-525.
5. Camarena - Martínez, D., Valtierra - Rodríguez, M., Amézquita - Sánchez, J. P., Granados - Lieberman, D., Romero - Troncoso, R. J., & García - Pérez, A. (2016). Shannon Entropy and-Means Method for Automatic Diagnosis of Broken Rotor Bars in Induction Motors Using Vibration Signals. *Shock and Vibration*, 2016.
6. Díaz, D., Díaz, R., Amaya, M. C., & Palacios, J. (2010). Análisis del cortocircuito entre espiras de un motor de inducción tipo jaula de ardilla mediante la aplicación del método de elementos finitos (mef). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (51), 16-23.
7. Fitzgerald, A. E., Charles, U., Milanés, S. D. Y., & Jorge, N. S. (1992). *Electric machinery. Máquinas eléctricas.*

8. Flores, R., & Asiaín, T. I. (2011). Diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas rotatorias utilizando la técnica de espectros de frecuencia de bandas laterales. *Información tecnológica*, 22(4), 73-84.
9. Granda Ordoñez, C. E. (2017). Procesamiento de señales de vibración mediante Descomposición Modal Empírica (EMD) para la extracción de características con fines de diagnóstico de fallos en maquinaria rotativa (Bachelor's thesis).
10. Guiracocha, G. (2015). Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones acústicas e imágenes termográficas infrarrojas para un sistema mecánico rotativo con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en engranajes (Bachelor's thesis).
11. Harper, G. E. (2005). *El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos*. Editorial Limusa.
12. Lecona Morales, Antonio (2018). Monitoreo y análisis de corriente en motores de inducción con espiras cortocircuitadas. Tesis de Licenciatura, UAQ.
13. Peña, H. E. (2011). Fallas en los motores eléctricos de inducción.
14. Pernía-Márquez, D. (2004). *Introducción a la medición de vibración*. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes. Venezuela.
15. Rivera, G. H. V., & García, A. (2017). Análisis espectral aplicado a la identificación de una falla mecánica de un motor de inducción alimentado con inversor. *Jóvenes en la ciencia*, 2(1), 1864-1869.
16. Rivera-Guillen, J. R., De Santiago - Pérez, J. J., Amézquita - Sánchez, J. P., Valtierra - Rodríguez, M., & Romero - Troncoso, R. J. (2018). Enhanced FFT-based method for incipient broken rotor bar detection in induction motors during the startup transient. *Measurement*, 124, 277-285.
17. Sanz Feito, J., & Feito, J. S. (2002). *Máquinas eléctricas*.
18. Torrez Padilla, M. C., & Quezada Castro, A. (2016). Diseño de un sistema medidor de vibraciones para máquinas rotativas de 900rpm hasta 84000rpm. *Journal Boliviano de Ciencias*, 12, 23.

19. Palomino Marín, Evelio (1997). La medición y el análisis de vibraciones en el diagnóstico de máquinas rotatorias. Cuba.
20. WEG. Motores eléctricos, 2016 [En línea]. Disponible en:
<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacion-50039910-manual-espanol.pdf>
21. Recuperado de:
<https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/procesos-industriales/30-07-2017>
- 22.
23. Recuperado de: www.ni.com/pdf/manuals/374369a.pdf
24. Recuperado de: <https://es.calameo.com/read/005244716e9a2a658209e>
25. Recuperado de:
<http://web.sensor-ic.com:8000/ZLXIAZAI/KISTLER/000-860e-07.11.pdf>
26. Recuperado de:
<http://www.motortico.com/biblioteca/MotorTico/2016%20APR%20-%20Falla%20de%20Cortocircuito%20en%20Bobinados%20Maquinas%20C>
A.pdf