



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN COMPUTACIÓN

“Reconocimiento de fallas en motores de inducción mediante patrones orbitales de vibraciones”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
DE CÓMPUTO CON OPCIÓN
EN SISTEMAS DÍGITALES.

P R E S E N T A

ING. GABRIEL LONGORIA CORDERO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. LUIS PASTOR SÁNCHEZ FERNÁNDEZ

DR. JOSÉ JUAN CARBAJAL HERNÁNDEZ



MÉXICO D.F., 2014



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 14:00 horas del día 11 del mes de noviembre de 2014 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del:

Centro de Investigación en Computación

para examinar la tesis titulada:

 "Reconocimiento de fallas en motores de inducción mediante patrones orbitales de vibraciones"

Presentada por el alumno:

Longoria

Apellido paterno

Cordero

Apellido materno

Gabriel

Nombre(s)

Con registro:

B	1	2	1	0	8	3
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

aspirante de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE CÓMPUTO CON OPCIÓN EN SISTEMAS DIGITALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de Tesis

Dr. Luis Pastor Sánchez Fernández

Dr. José Juan Carbajal Hernández

Dr. Sergio Suárez Guerra

Dr. Aleksiy Pogrebnyak

M. en C. Pablo Manrique Ramírez

Dr. José de Jesús Medel Juárez



PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CENTRO DE INVESTIGACIÓN
EN COMPUTACIÓN
DIRECCIÓN



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México el día 21 del mes Noviembre del año 2014, el (la) que suscribe Gabriel Longoria Cordero alumno (a) del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Cómputo con opción en Sistemas Digitales con número de registro B121083, adscrito a Centro de Investigación en Computación, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. Luis Pastor Sánchez Fernández, Dr. José Juan Carbajal Hernández y cede los derechos del trabajo intitulado Reconocimiento de fallas en motores de inducción mediante patrones orbitales de vibraciones, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección gabo_loc@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Gabriel Longoria Cordero

Nombre y firma

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi familia por brindarme el apoyo necesario para concluir mis estudios....

RESUMEN

El análisis de fallos en motores de inducción es una práctica industrial común, teniendo un rápido crecimiento cuando la maquinaria se hizo el principal factor en las extensas jornadas de trabajo. Los motores de inducción se basan en diferentes componentes eléctricos y mecánicos que pueden sufrir algún tipo de desgaste con su uso prolongado. Este trabajo se ha orientado a motores de inducción eléctrica, ya que son los más utilizados en la industria en todo el mundo. Históricamente, algunos trabajos se han enfocado a detectar algunas fallas (la mayoría de ellos identifican comúnmente) evitar problemas y daños en el futuro, si bien el mantenimiento se proporciona en un tiempo adecuado. Los motores de inducción pueden ser clasificados principalmente por el tamaño, potencia, número de fases, etc. Sin embargo, la desalineación, el desbalance y el torbellino de aceite son fallos comunes en todos los tipos de motores, estas fallas generan diferentes niveles de vibraciones externas.

Varias técnicas pueden ser utilizadas en el análisis de fallos de motor, tales como máquinas de vectores soporte, espectro de Fourier, el filtrado wavelet, entre otros. Sin embargo, la complejidad del procesamiento matemático para el procesamiento de la señal del motor es un inconveniente en ellos, en donde la aplicación en sistemas reales puede ser una tarea difícil. Por lo tanto, se propone una nueva técnica usando análisis orbital, que ofrece una forma práctica y fácil de reconocer fallos de alineación, balanceo y remolino de aceite en los motores de inducción.

El Análisis de Órbitas en fallas de motores se ha utilizado para modelar el funcionamiento normal, y representan una base de esta investigación. Las tres diferentes fallas a diversos niveles en el motor presentan una órbita de vibración con características particulares, que se puede utilizar para determinar cuándo un motor presenta un fallo, antes de que aparezca un daño grave en la máquina.

El trabajo de investigación se desarrolla y se divide en dos partes, en la primer etapa (adquisición de datos) se adquieren las señales de las vibraciones de los motores de inducción mediante la utilización de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-9233, para posteriormente ser transferidas dichas señales a la segunda etapa (análisis y emisión de diagnóstico), esta etapa está dirigida al análisis matemático de la señal para posteriormente ser procesado a un algoritmo de identificación de fallas mediante una red neuronal tipo propagation y finalmente emitir un resultado del estado en el que opera el motor.

ABSTRACT

Failure Analysis in induction motors is a common industry practice that quickly grows when machinery is a main factor in extensive working hours. Induction motors are compounded by different electrical and mechanical components that are exposed to some wearing with prolonged use. This work has focused on detecting mechanical faults in electric induction motors, due to they are the engine most used in the industry worldwide. Historically, some works have focused on detecting some faults (most of them commonly identified) problems, avoiding future damage, while the maintenance is provided early. Induction motors can be classified by their size, power, number of phases, etc. However, misalignment, imbalance and the swirl of oil failures are common mechanical faults in all types of engines; these failures generate different external vibration levels.

Several techniques can be used in the engine faults analysis, such as support vector machines, Fourier spectrum, wavelet filtering, and others. However, the complexity of a mathematical representation for the signal modelling in an engine and its application in real systems can be a difficult task. Therefore, a new technique using orbital analysis, which provides a convenient and easy way to recognize misalignment, balancing and swirl oil induction motors using neural networks has been proposed.

Orbit Analysis in engine failures has been used to model the normal operation of motors and it represent the basis of this research. In this case, three different motor faults at different vibration levels present a characteristic orbit with particular features, which can be used to determine when an engine presents a fault, before serious damage appears on the motor.

The research methodology has been divided into two parts: in the first step (data acquisition), vibration signals of induction motors are acquired using the data acquisition card NI USB-9233. Then these signals are used in the second stage (Analysis and Issue of diagnosis), where a mathematical analysis of the digital signal is processed through an designed algorithm for fault identification using a Feedforward Artificial Neural Network.

Índice de contenidos

RESUMEN.....	v
ABSTRACT	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de figuras	ix
Índice de tablas.....	xi
Glosario de términos	xii
Glosario de siglas.....	xiv
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Motivación y antecedentes	1
1.2 Problemas a resolver	2
1.3 Hipótesis.....	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1 General	3
1.4.2 Específicos	3
1.5 Alcance.....	3
1.6 Contribución.....	3
1.7 Método de investigación y desarrollo utilizado	4
1.8 Estructura de la tesis.....	4
Capítulo 2 Estado del arte.	6
2.1 Antecedentes	6
2.2 Programa de mantenimiento predictivo	9
2.3 Organización del programa de mantenimiento predictivo	10
2.4 Diagnóstico en línea del programa de mantenimiento predictivo	12
2.5 Diagnóstico fuera de línea de motores de inducción.....	13
2.6 Procesamiento digital de señales.....	13
2.7 Procesamiento digital de señales utilizado para el análisis de vibraciones mecánicas	14
2.8 Análisis de órbitas	21
2.9 El motor eléctrico de inducción	22
2.10 Herramientas tecnológicas actuales para el análisis de vibraciones.....	23
2.11 Conclusiones del capítulo.....	27
Capítulo 3 Análisis de vibraciones.....	28
3.1 Introducción	28
3.2 Caracterización de las vibraciones en maquinarias	29
3.3 Sistema máquina – soportes	32

3.3.1 Sistema máquina-soporte ante la acción de una fuerza de carácter armónico (la resonancia).....	34
3.4 Elementos de una vibración	38
3.4.1 Frecuencia y período de vibración	38
3.4.2 Amplitud	40
3.4.3 Fase de la vibración.....	41
3.4.4 Frecuencia natural	41
3.4.5 Frecuencia de resonancia	42
3.5 Unidades de vibración.....	42
3.6 Normas de severidad.....	44
3.6.1 ISO 2372, VDI 2056 y BS 4675: Vibraciones mecánicas de máquinas que operan con velocidad dentro 10 y 200 (rev/seg).....	44
3.6.2 Evaluación de la severidad vibratoria	45
3.6.3 Calidad de la vibración.....	46
3.7 Conclusiones del capítulo.....	47
Capítulo 4 Arquitectura del sistema distribuido	48
4.1 Introducción	48
4.2 Arquitectura del sistema de medición y análisis de mantenimiento predictivo	49
4.3 Estructura del sistema propuesto.....	51
4.4 Etapa de recolección de datos usado en el sistema propuesto.....	52
4.5 Transductores.....	53
4.5.1 El acelerómetro piezoeléctrico	54
4.5.2 Montaje del acelerómetro piezoeléctrico	56
4.5.3 Orientación de los acelerómetros	56
4.5.4 Fijación del acelerómetro en la misma ubicación para la toma de mediciones.....	57
4.5.5 Ubicación de los acelerómetros X, Y para obtener una órbita del motor.....	58
4.5.6 Montaje del acelerómetro piezoeléctrico	58
4.6 Adquisición de datos	60
4.7 Montaje experimental.....	62
4.8 Conclusiones del capítulo.....	63
Capítulo 5 Modelo de detección de fallas.....	64
5.1 Preprocesamiento de datos	64
5.2 Simulación de órbitas.....	67
5.3 Modelo neuronal	74
Capítulo 6 Resultados experimentales.....	78
6.1 Base de datos.....	78
6.2 Pruebas de reconocimiento.....	78
Discusiones y Trabajo Futuro	80
Conclusiones	82
Referencias	83

Índice de figuras

Capítulo 2

Figura. 2.1. Ejemplo de una señal demodulada.....	15
Figura. 2.2. Vibraciones en la tercera prensa de un maquina papelera, usando la técnica de promedios síncronos en el tiempo.....	16
Figura. 2.3. Nivel de ruido analizado con el análisis de octavas.....	16
Figura. 2.4. Ejemplo de análisis de formas de onda.....	17
Figura. 2.5. Análisis de la fase de vibración	18
Figura. 2.6. Esquema de una señal en tiempo con sus componentes de frecuencia.....	18
Figura. 2.7. Análisis de una señal mediante wavelets.....	19
Figura. 2.8. Análisis de una señal donde se muestran sus órdenes con diferentes colores	20
Figura. 2.9. Colocación de los acelerómetros “X”y”Y” a 90°	21
Figura. 2.10. Orbita generada por dos acelerómetros colocados perpendicularmente.....	21
Figura. 2.11. Partes de un motor eléctrico de inducción.....	22
Figura. 2.12. Estator de un motor eléctrico de inducción	23
Figura. 2.13. Rotor de un motor eléctrico de inducción	23
Figura. 2.14. Analizador de vibraciones mecánicas DI-440.....	24
Figura. 2.15. Analizador de vibraciones de mano VM12	25
Figura. 2.16. Colector de datos y analizador del FFT portátil bi-canal.....	26

Capítulo 3

Figura. 3.1. Ejemplo de vibración periódica	31
Figura. 3.2. Suma de vibraciones simples en el dominio del tiempo	31
Figura. 3.3. Ejemplo de vibración aleatoria	32
Figura. 3.4. Sistema máquina-soporte (masa-resorte-amortiguador).....	33
Figura. 3.5. Sistema máquina-soporte bajo excitación armónica.....	35
Figura. 3.6. Resonancia modificada por cierta cantidad de amortiguamiento	35
Figura. 3.7. Resonancia modificada por poco amortiguamiento.....	35
Figura. 3.8. Presencia de una masa desbalanceada en el sistema máquina-soporte.....	37
Figura. 3.9. Respuesta de un sistema máquina-soporte ante los efectos de un desbalance rotatorio.....	37
Figura. 3.10. Onda senoidal	39
Figura. 3.11. Elementos de una señal.....	40
Figura. 3.12. Fase de vibración	41
Figura. 3.13. Cambios relativos al espectro de referencia.....	46
Figura. 3.14. Criterio de severidad de las vibraciones acorde a las normas ISO 2372, VDI 2056 y BS 4675.....	47

Capítulo 4

Figura. 4.1. Diagrama a bloques de la adquisición de datos para el diagnóstico del motor.....	50
Figura. 4.2. Diagrama a bloques del sistema de medición y análisis para el diagnóstico del motor.....	51
Figura. 4.3. Esquema de la estructura de la investigación y desarrollo para el sistema propuesto.....	52
Figura. 4.4. Hardware usado para las mediciones de las vibraciones	53
Figura. 4.5. Diagrama funcional para la obtención de espectros de vibración.....	54
Figura. 4.6. Componentes internos de un acelerómetro activo	55

Figura. 4.7. Imagen que muestra que se deben de fijar los acelerómetros lo más cerca de los cojinetes	56
Figura.4.8. Orientación correcta de los acelerómetros para realizar mediciones	57
Figura. 4.9. Forma de montar el acelerómetro en diferentes meses	57
Figura. 4.10. Fijación de dos acelerómetros sobre el cojinete del motor	58
Figura. 4.11. Montaje con perno de acero	59
Figura. 4.12. Montaje con cera de abeja	59
Figura. 4.13. Montaje con dispositivo magnético	59
Figura. 4.14. Acelerómetro piezoeléctrico MA11 (Cortesía de <i>Honeywell</i>)	60
Figura. 4.15. Cables BNC	61
Figura. 4.16. Tarjeta de adquisición NI USB-9233	62
Figura. 4.17. Acelerómetros colocados a 90° entre ellos sobre el motor	63

Capítulo 5

Figura. 5.1. Ejemplo de una órbita con y sin filtrar utilizando un filtro Butterworth para remover los armónicos	66
Figura. 5.2. Los ejemplos de órbita cerrada con el fin de preservar las características principales del fallo del motor	67
Figura. 5.3. Ejemplo de formas de órbita que corresponden a diferentes fallos de motor	67
Figura. 5.4. Incorporación de ruido gaussiano a una de las señales	69
Figura. 5.5. Normalización de los datos de las señales	70
Figura. 5.6. Esquema de proceso de guardado de señales producidas	70
Figura. 5.7. Ruta donde se desea guardar el archivo de texto que contiene los puntos	70
Figura. 5.8. Controles de los parámetros de cada una de las fallas	71
Figura. 5.9. Diagrama de las señales de los ejes (x,y)	72
Figura. 5.10. Diagrama del ruido con el que se contamina la señal de la órbita	72
Figura. 5.11. Pantalla que muestra el resultado de las órbitas de las fallas que se simularon	72
Figura. 5.12. Pantalla donde se muestra la órbita que se simula en una iteración	73
Figura. 5.13. Opción que nos permite normalizar las órbitas simuladas	73
Figura. 5.14 Menú de las fallas que se pueden simular	73
Figura. 5.15. Controles principales de los parámetros que modifican las órbitas simuladas	74
Figura. 5.16. Parámetros principales del ruido gaussiano	74
Figura. 5.17. Arquitectura de la red neuronal para clasificar fallas en motores de inducción, donde X_n y Y_n son igual a 185 patrones	75
Figura. 5.18. Error del entrenamiento de la red neuronal	76

Índice de tablas

Tabla 3.1 Unidades comunes de medida.....	43
Tabla 3.2 Clasificación de máquinas de acuerdo a su potencia y a su montaje	45
Tabla 4.1 Diversos tipos de transductores.....	54
Tabla 4.2 Especificaciones de los acelerómetros piezoeléctricos	60
Tabla 4.3 Especificaciones de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-9233.....	61
Tabla 5.1 Resultados del reconocimiento de los fallos del motor utilizando la base de datos de aprendizaje	77
Tabla 6.1 Resultados del reconocimiento de los patrones orbitales con la base de datos que están contaminados con ruido gaussiano del 5 al 15%	79
Tabla 6.2 Resultados del reconocimiento de los patrones orbitales con la base de datos que están contaminados con ruido gaussiano del 20 al 30%	79
Tabla 6.3 Resultados del reconocimiento de los patrones orbitales con la base de datos que están contaminados con ruido gaussiano del 35 al 45%	80

Glosario de Términos

Acelerómetro Piezoeléctrico. El acelerómetro es uno de los transductores más versátiles. Este se basa en el principio de que cuando se comprime un retículo cristalino piezoeléctrico, se produce una carga eléctrica proporcional a la fuerza aplicada.

Armónico. Cualquiera de los componentes sinusoidales cuya frecuencia sea múltiplo de la frecuencia fundamental.

Cojinetes o Rodamientos. Pieza o conjunto de ellas sobre las que se soporta y gira el árbol transmisor de momento giratorio de una máquina.

Decibel (dB). Unidad de referencia para medir la potencia de una señal. Se conoce como el logaritmo de la proporción de dos cantidades, y se calcula mediante: $20 \log 10 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$.

Época. Ciclo en el que se adquieren y procesan por completo los datos de entrada a una red neuronal durante su entrenamiento.

Falla. Avería de uno o más componentes de un motor que afecta el rendimiento de operación.

Frecuencia. Inverso del período de una señal. Se mide en ciclos por segundo o Hertz (Hz).

Mantenimiento preventivo. Consiste en la revisión periódica de ciertos aspectos, tanto de hardware como de software.

Matriz. Conjunto de elementos (números) ordenados en filas y columnas.

Modelo matemático. Conjunto de ecuaciones que representan (la dinámica) de un sistema con precisión.

Motor de Inducción. Son un tipo de motor eléctrico que utiliza la corriente alterna.

Muestreo. Operación de crear una secuencia de números (muestras), a partir de una señal analógica en la que cada valor equivale a la magnitud de la misma en un instante de tiempo.

Norma ISO2372. Proporciona guías para aceptación de la amplitud de vibración, para maquinaria rotativa operando desde 600 hasta 12 000 RPM. Especifica niveles de velocidad general de vibración en lugar de niveles espectrales.

Órbitas. Es la trayectoria que representa el movimiento del centro de rotación del eje, y genera una imagen de dos dimensiones.

Orden. Un armónico relacionado a la velocidad rotacional de la máquina.

Red Neuronal Artificial. Son un paradigma de aprendizaje y procesamiento automático inspirado en la forma en que funciona el sistema nervioso de los animales. Se trata de un sistema de interconexión de neuronas que colaboran entre sí para producir un estímulo de salida.

RMS. Valor efectivo de una señal.

Sensor. Dispositivo empleado para transformar un tipo de energía en otro.

Target. Es la etiqueta con la que se diferencia de una o más clases dentro de una red neuronal.

Topología. Estructura en la que las neuronas son conectadas en una red neuronal artificial.

Traslape (Aliasing). Es un error creado cuando las señales analógicas son muestreadas por debajo de la frecuencia de Nyquist, en donde comúnmente altas frecuencias de la señal original son representadas como bajas frecuencias en la señal.

Vibración. Variación en el tiempo, de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico, cuando esta magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio o de referencia.

Glosario de siglas

A/D: Analógico – Digital.

ANSI: American National Standards Institute.

dB: Decibeles.

FFT: Fast Fourier Transform.

Hz: Hertzio.

ICANN: Internacional Conference on Artificial Neural Networks.

ISO: International Standard Organization.

LabVIEW: Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench.

Matlab: Matrix Laboratory.

PC: Personal Computer.

RPM: Revoluciones por minuto.

Siamflex: Sistema avanzado de monitoreo flexible.

V: Volt.

CAPITULO 1

Introducción

1.1 Motivación y antecedentes

A lo largo del tiempo, la necesidad del ser humano dentro de la industria lo ha llevado a desarrollar nuevas tecnologías para la construcción de sistemas innovadores con la finalidad de satisfacer las necesidades del sector productivo y las de la vida cotidiana. El uso de los motores dentro de la industria es un gran ejemplo de lo antes mencionado, ya que al automatizar cada vez más los procesos la demanda de los motores se hace mayor. Actualmente en los procesos industriales los motores de inducción son usados ampliamente en la industria para una producción continua y a grandes cantidades, viéndose expuestos los motores a una extensa variedad de ambientes y condiciones variantes que envejecen el funcionamiento óptimo y lo hacen vulnerable a fallas incipientes. Si estas fallas incipientes no son detectadas a tiempo contribuyen a la degradación y fallas en partes electromecánicas críticas del motor, lo que conlleva a excesivos tiempos fuera para su compostura y/o mantenimiento originando grandes pérdidas económicas en la industria.

Algunas industrias contemplan este tipo de riesgos y es por ello que algunas de ellas optaron por crear un grupo técnico dedicado a dar los diferentes tipos de mantenimientos a los motores de inducción, que a su vez crean programas para llevarlos a cabo sin generar costos extras a la empresa. Sin embargo cuando alguna de las maquinas no necesita el mantenimiento por un gran lapso de tiempo, mantener este grupo de trabajadores se vuelve un costo extra para la empresa. Por esta razón el crear técnicas alternativas, basadas en la ciencia y la tecnología, han adoptado una gran importancia

para detectar y prevenir fallas en los motores sin necesidad de invertir tiempo y personal, dando así un mantenimiento más adecuado a los motores sin interferir en la producción de la empresa.

La pregunta es, ¿cómo se podría monitorear el comportamiento del motor? para esto existen técnicas, una de ellas está basada en el análisis del sonido, pero a lo largo de la investigación y documentación se ha demostrado que el análisis basado en las vibraciones es el más fiable y sencillo de realizar. El análisis de vibraciones del motor consta en tomar las lecturas del estado de la máquina para generar un diagnóstico mediante el uso de un algoritmo matemático denominado redes neuronales.

Las redes neuronales han sido utilizadas con gran éxito en áreas como: Reconocimiento de patrones, clasificadores, procesamiento de señales, por lo que resulta una herramienta muy confiable y eficaz si se le da un entrenamiento adecuado para la clasificación de un conjunto de patrones de la función operativa del motor, los cuales podría clasificar en motores en buen estado, motores que requieren mantenimiento y otros que puedan representar una posible fallas o problema.

Todo este análisis se realizara ayudándonos de la herramienta de programación gráfica LABVIEW (Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench), en este programa nos permite generar pantalla para la lectura de las vibraciones del motor de forma gráfica, configurar sus características y obtener un diagnóstico.

1.2 Problemas a resolver

Aunque hoy en día existen diversas herramientas para el análisis de vibraciones aplicadas a los motores de inducción, la mayoría se basan en métodos matemáticos muy complejos y muy pocas usan métodos de inteligencia artificial para reconocer fallas en máquinas rotatorias, lo que hace necesaria la presencia de un analista de vibraciones que interprete y emita un diagnóstico adecuado para su posterior mantenimiento. Claro está que este diagnóstico no está exento de errores humanos.

1.3 Hipótesis

Es posible modelar fallas de remolino de aceite, desbalance y desalineamiento en motores de inducción eléctrica mediante el uso de señales provenientes de acelerómetros piezoeléctricos, empleando el análisis de órbitas. Asimismo, es posible identificar dichas fallas mediante el uso de un clasificador neuronal empleando las órbitas características del remolino de aceite.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Desarrollar un modelo computacional que permita el diagnóstico de fallas mecánicas de desbalance, desalineamiento y torbellino de aceite en motores de inducción, mediante el análisis de vibraciones y el reconocimiento de patrones.

1.4.2 Específicos

- i. Definir las fallas de los motores de inducción empleando el análisis de órbitas.
- ii. Diseñar e implementar un sistema de adquisición de datos.
- iii. Preprocesar las señales adquiridas.
- iv. Elaborar las órbitas de las señales adquiridas.
- v. Simular y elaborar un conjunto de pruebas y validación.
- vi. Diseñar el modelo computacional de reconocimiento de fallas
- vii. Realizar pruebas experimentales.

1.5 Alcance

El trabajo desarrolla un modelo computacional para el diagnóstico de fallas, tales como: desbalance, desalineamiento, desalineamiento extremo y remolinos de aceite en motores de inducción eléctrica. Dicho modelo se implementará en software de instrumentación virtual (LabVIEW) y permitirá detectar dichas fallas mediante el análisis de órbitas características del motor. Se plantea hacer uso de técnicas de análisis de órbitas, redes neuronales y filtrado digital.

1.6 Contribución

Las contribuciones obtenidas en el trabajo son las siguientes:

- Extracción de patrones de fallas de desbalance, desalineamiento y torbellino de aceite en motores de inducción eléctrica mediante el análisis de órbitas y procesamiento digital de señales.

- Construcción de un modelo computacional para el reconocimiento de fallas mecánicas incipientes de desbalance, desalineamiento y torbellino de aceite, en motores de inducción empleando redes neuronales.
- Elaboración de un sistema de monitoreo y detección de fallas incipientes en motores de inducción eléctrica.

1.7 Método de investigación y desarrollo utilizado



1.8 Estructura de la tesis

El siguiente trabajo de tesis se encuentra estructurado por los siguientes capítulos:

Capítulo 1. Introducción: se especifican objetivos y se propone la hipótesis que orientará el desarrollo de este trabajo, las aportaciones realizadas al término del mismo y el alcance que tendrá el proyecto.

Capítulo 2. Estado del Arte: se realiza la investigación del estado actual del conocimiento de las técnicas usadas hasta el momento en el diagnóstico de fallas incipientes en motores de inducción eléctrica.

Capítulo 3. Análisis de vibraciones: se realiza el estudio de las vibraciones que se producen en los motores describiendo sus características, tipos, elementos que la componen, sus unidades y las normas por las que se encuentran regidas.

Capítulo 4. Adquisición de datos: se describe la arquitectura general del sistema y los pasos que se siguieron para la recolección de las señales de las vibraciones de los motores, de igual manera se mencionan las características de las herramientas del sistema a nivel hardware que se utilizaron y se hace mención de los pasos que se deben seguir para realizar una correcta medición de las señales en los motores de inducción.

Capítulo 5. Modelo de detección de fallas: se describe el proceso que se le da a las señales para dejarlas con las especificaciones que se necesitan para poder crear las órbitas de las señales de los motores, auxiliándonos de filtros pasa banda, se hace mención del software creado para la simulación de órbitas mediante LABView y posteriormente se presenta el diseño y construcción de una red neuronal artificial de tipo propagation.

Capítulo 6. Resultados experimentales: se describe como se obtuvieron los datos que se analizaron durante el trabajo de investigación, y se presentan las tablas de resultados que se obtuvieron durante el proceso del reconocimiento de las fallas mediante el análisis de órbitas.

CAPITULO 2

Estado del arte

2.1 Antecedentes

Análisis de fallos de motor es una práctica industrial común donde la maquinaria se hizo cumbre a las extensas publicaciones de trabajo. R. Hilera José & Martínez Víctor J. (2000) nos mencionan que los motores de inducción se basan en diferentes componentes eléctricos y mecánicos que pueden sufrir algún tipo de desgaste con el uso prolongado. Este trabajo se ha orientado a motores de inducción eléctrica, ya que son los más utilizados en la industria en todo el mundo. Históricamente, A-MAQ S.A. y Commtest (2005 y 2006 respectivamente) tratan sobre los trabajos que se han enfocado a detectar algunos fallos (la mayoría de ellos comúnmente identificado) para evitar problemas y daños en el futuro, si bien el mantenimiento se ofrece temprano. Los motores de inducción pueden ser clasificados principalmente por el tamaño, potencia, número de fases, etc. Sin embargo, Palomino Marín Evelio (2000) señala que la desalineación en barras del rotor es un fallo común en todos los tipos de motores que genera diferentes niveles de vibraciones externas.

En la actualidad muchos de los trabajos se centran en la identificación temprana de fallas mecánicas y eléctricas, ya que en caso de presentarse alguna, el rendimiento en los motores se vería afectado, por tal motivo el desarrollo de un software que sea capaz de identificar las fallas es de suma prioridad. En la actualidad existe una gran variedad de programas; sin embargo, el inconveniente que

presentan los métodos actuales de identificación se refleja en la complejidad del procesamiento matemático de la señal del motor. Por lo tanto, en este trabajo se propone una nueva técnica usando un análisis orbital, que ofrece una forma práctica y fácil de reconocer fallos de remolino de aceite, alineación y desalineamiento en los motores de inducción. Su funcionamiento se basa en el estudio de los rasgos característicos de los patrones que contienen las señales de la vibración del motor en funcionamiento. Las diversas fallas en los motores de inducción presentan diversas características que nos permite tener un índice bajo de confusión al momento de procesarlas en una red neuronal para su identificación, las cuales hacen que sus órbitas presenten patrones particulares a diferentes niveles de ruido.

Para el reconocimiento, el procesamiento y la clasificación de las fallas del motor comúnmente se utilizan las redes neuronales las cuales tienen sus orígenes desde Alan Turing, ya que fue el primero en poner a prueba la supuesta inteligencia de una máquina mediante su experimento en 1936, a partir de ese momento se realizaron diversos experimentos e investigaciones sobre este tema, sin embargo fue hasta 1957 que Frank Rosenblatt, desarrolló el Perceptron, cuyo modelo en la actualidad es el más antiguo, aun utilizado de varias formas para la aplicación como reconocedor de patrones. Este modelo de red neuronal es el que se utilizara en nuestro trabajo de investigación debido a que se concibió como un sistema capaz de realizar tareas de clasificación de forma automática, La idea de este sistema es disponer de un mecanismo que a partir de un conjunto de ejemplos, fuera capaz de determinar las ecuaciones de las superficies que hacen frontera de dichas clases, haciendo que su nivel de efectividad en el reconocimiento de patrones sea alto. R. Hilera José & Martínez Víctor J en el 2000 mencionan que este modelo es capaz de generalizar, es decir, después de haber aprendido una serie de patrones es capaz de reconocer otros similares aunque no se le hubieran presentado anteriormente. Pero tiene una serie de limitaciones, la más notable e importante es que no es capaz de clasificar clases que no son linealmente separables. Posteriormente Bernard Widrow y Marcial Hoff en 1960 se desarrolló el modelo ADALINE (ADaptative LINear Elements), esta fue el primer modelo aplicado a la resolución de problemas no lineales y por lo tanto fueron los primeros en resolver problemas reales, debido a sus características hace que el número de neuronas crezca con el aumento de clases a clasificar, haciéndola más robusta. En 1961 Karl Steinbuck da inicio a las memorias asociativas (Die Lernmatrix), son un tipo especial de RNA diseñada para la recuperación de patrones a partir de patrones de entrada, por medio de operaciones simples mediante estructuras de cálculo reducidas, la mayor parte del proceso trabaja con matrices y son más utilizadas en la recuperación de datos de imágenes. En 1967 Stephen Grossberg desarrolló el modelo Avalancha, que consistía en elementos discretos con actividad que varía en el tiempo que satisface ecuaciones diferenciales continuas, para resolver actividades tales como reconocimiento continuo del habla y

aprendizaje del movimiento de los brazos del robot. Para 1982, Jhon Hopfield presento una red que llevaba su mismo nombre; siendo una variación del asociador lineal, además, mostró cómo es que tales redes pueden trabajar, sus principales aplicaciones están la reconstrucción de patrones y la optimización. En 1986 Rumelhart, Hunton y Williams redescubren el algoritmo del back-propagation (desarrollado en 1974 por Paul Werbor) para el aprendizaje de redes neuronales, entre sus aplicaciones están la síntesis de voz de texto y control de robots.

El presente trabajo a diferencia de los trabajos anteriores, tales como la tesis que se elaboró Beatriz Jaime Fonseca dentro de las instalaciones del Centro de Investigación en Computación en 2006, titulada “Detección de Fallas en Motores de Inducción, mediante análisis de vibraciones” las vibraciones se trabajaran mediante el análisis de los patrones orbitales que generan las fallas, en la tesis antes mencionada se trabajó con las frecuencias que generan las fallas, teniendo como limitantes el hecho de que solo se pueda decir la gravedad de la falla y se pueda detectar solo una a la vez, la ventaja que tiene el método propuesto en el presente trabajo es que se puede detectar más de una falla además de poder predecir e identificar la falla con la que opera el motor, otra ventaja que se puede mencionar es que en el actual trabajo las fallas se identifican mediante una red neuronal de Perceptron simple y como se describió antes, debido a su sistema de separación de clases hace que su identificación de fallas sea en menor tiempo teniendo un margen de error mínimo.

De acuerdo al diccionario de la real academia española (2014) el significado de mantenimiento se puede definir como: conjunto de técnicas destinado a conservar equipos e instalaciones industriales en servicio durante el mayor tiempo posible (buscando la más alta disponibilidad) y con el máximo rendimiento. Schefter Cornelius et. at. (2004) indica que las empresas desconocen la evolución que se ha tenido sobre el mantenimiento, haciendo aun, que la maquinaria trabaje en condiciones forzadas, sin ningún tipo de cuidado que pudiese alargar su tiempo de vida útil y provocando que las averías tengan que ser reparadas de manera urgente, haciendo uso del llamado mantenimiento correctivo, lo cual resulta costo dependiendo de la severidad del daño ocasionado y en algunos casos la reparación es tan costosa que mejor se opta por el cambio de maquinaria.

En renovetec (2014) nos indican que el porcentaje de empresas que aun dedican la mayor parte de sus esfuerzos a realizar el mantenimiento correctivo es muy alto.

Schefter Cornelius et. at. (2004) nos indican que el mantenimiento preventivo planificado nace después de que se toma conciencia sobre la importancia de analizar y monitorear periódicamente las maquinarias eléctricas y mecánicas para detectar posibles fallas incipientes, que pueden ser basadas en las recomendaciones del fabricante, frecuencia de fallos, etc., naciendo así lo que ahora se conoce como *mantenimiento preventivo planificado*.

Las tecnologías predictivas se sustentan en la interpretación de los resultados de las mediciones de diferentes magnitudes, que caracterizan el comportamiento mecánico de la maquinaria industrial, todo lo cual permite la conformación de un diagnóstico eficaz del estado técnico de la máquina y de sus propios elementos. Una de las claves en estas tecnologías está en el área de las redes neuronales artificiales, la cual ha sido exitosamente aplicada en campos como la detección de fallas, control y procesamiento de señales entre muchas otras. . R. Hilera José & Martínez Víctor J (2000) hacen hincapié en que con las redes neuronales artificiales, la experiencia humana puede ser parcialmente guardada, enriquecida y usada nuevamente. Las redes neuronales artificiales, pueden ser entrenadas para la detección de fallas a partir de la experiencia de los expertos en detección de fallas y usando un conjunto de datos representativos. Una vez que la red neuronal ha sido entrenada apropiadamente, los pesos de la red contendrán el conocimiento necesario para realizar la detección de fallas.

Algunos trabajos donde se aplica el uso de redes neuronales para la detección de fallas son los siguientes:

- a) Detección de fallas en motores de inducción usando redes neuronales artificiales S. L. Ho et al. Septiembre 1995]
- b) Identificación y diagnóstico de fallas de vibraciones en estructuras usando redes neuronales [JFG DE Freitas et al. Mayo 1996.]
- c) Monitoreo del estado de las máquinas para fallas eléctricas usando un modelo de redes neuronales en señales de vibración [Hua Su et al. Julio 2005]

Todos estos trabajos enfocados a la determinación de fallas mecánicas usando redes neuronales. En donde obtienen excelentes resultados mediante esta herramienta.

2.2 Programa de mantenimiento predictivo

Royo et al. (2006) mencionan que este programa contribuye a detectar el comienzo de una futura avería, a la vez que permite disponer de las herramientas necesarias para analizar la causa del problema que se está desarrollando, lográndose determinar finalmente, el momento oportuno para corregir eficaz y eficientemente el problema detectado. Este se contempla en tres etapas imprescindibles:

- a) *Detección*: se basa en el seguimiento de la evolución de uno o varios parámetros seleccionados adecuadamente, de acuerdo a su sensibilidad ante los cambios en la condición de la máquina analizada.

- b) *Identificación*: Una vez que el problema ha sido detectado, se procede a determinar la causa que lo originó, es decir, identificar qué elemento o qué elementos de la máquina es o son los causantes de la alteración de la órbita, con respecto a las referencias que reflejaban una condición mecánica normal.
- c) *Corrección*: Por supuesto, conocer la causa del problema y por consiguiente la ubicación de éste, permite organizar y ejecutar de modo eficiente y eficaz los trabajos de eliminación del problema y de su propia causa. Santamaría Hólek Ricardo en el 2006 menciona la suma importancia del hecho de que la identificación de los problemas que puedan encontrarse incluso en su etapa de desarrollo prematuro, permite planificar los trabajos de mantenimiento oportuno, logrando que las pérdidas por concepto de mantenimiento sean mínimas.

2.3 Organización del programa de mantenimiento predictivo

Palomino Marín Evelio (2000) indica que un estricto y constante seguimiento de las vibraciones de las máquinas proporcionan un aviso previo a un fallo que pudo obligar a su paro repentino, a la vez, este tipo de mantenimiento puede disminuir costos en los cambios de elementos programados y que todavía pueden continuar trabajando por más tiempo. Es por tanto una forma de mejorar la eficiencia de un mantenimiento preventivo. En la organización del mantenimiento predictivo son importantes los siguientes nueve pasos:

1. Reconocimiento de la planta

Es preciso decidir la necesidad y eficacia en una empresa. Esta decisión estará en función del tipo de máquinas, de la cantidad y de su importancia en el proceso.

2. Selección de las máquinas

Dentro de una fábrica se hará un estudio de vibraciones de acuerdo a un calendario establecido de aquellos equipos que forman parte del proceso de producción de una forma esencial, es decir, de aquellos cuyo fallo provocaría pérdidas importantes desde el punto de vista de producción, por pérdidas económicas, dificultad y cantidad de tiempo en volver a arrancar. De igual modo, se seguirá de forma constante la parte de la maquinaria que por su tamaño o valor económico, productivo sean importantes para la empresa.

3. Elección de técnicas óptimas para verificar

Forma de efectuar la verificación, decidir qué, cómo, cuándo y dónde se han de realizar las mediciones.

4. Implantación del mantenimiento predictivo

El programa de implantación del mantenimiento predictivo debe contener:

- a) Máquinas a estudiar.
- b) Sistema de medición, toma de datos y análisis de los mismos.
- c) Datos por comparar.
- d) Conocimientos del tipo de mantenimiento y de los medios para tomar datos.

5. Fijación, revisión de datos y límites de condición aceptable

Para fijar un límite según valores que pueden llamarse normales es esencial contar con un histórico de datos obtenido en repetidas mediciones. Un valor medio de los datos obtenidos dará el nivel de vibración aceptable de cada uno de los puntos medidos. Los límites que marcan que un valor sea aceptable serán fijados según los históricos de datos y de la experiencia. Al principio, cuando no se tienen un conjunto de valores que permitan estimar si una vibración está dentro de los límites que marcan su normalidad, la aceptación de un valor se hará mediante las instrucciones del fabricante y con las gráficas de severidad.

6. Mediciones de referencia

Siempre se tendrá una medida de referencia con la que se compararán las muestras tomadas para verificar si se está dentro de los límites de aceptabilidad.

7. Recopilación, registro y análisis de las tendencias

Aquí se tratará de detectar una posible falla en la máquina.

8. Análisis de la condición de la máquina

En ese paso se confirma si existe realmente un fallo y se determinarán sus causas y la evolución que éste pueda sufrir.

9. Corrección de fallos

Finalmente se corrige la falla y se monitorean los resultados.

La forma más adecuada de realizar un monitoreo en los motores de inducción es escuchando, comprendiendo e interpretando las vibraciones que generan las maquinas. Kulichevsky , et. at. (2000) indican que los operadores de máquinas han empleado técnicas de verificación auditiva <<también subjetivas>> para comprobar si el comportamiento de “su máquina” es *normal* o no. De aquí que, tradicionalmente y quizás de forma inconsciente, las vibraciones hayan sido utilizadas como un

indicador del estado técnico de las máquinas y hasta hoy en día, continúen siendo el fenómeno más representativo del estado técnico de éstas, logrando a través de la medición de vibraciones, detectar e identificar fallos ya desarrollados o en períodos de desarrollo prematuro.

Durante algunos años se ha tomado la importancia del aprovechamiento de las vibraciones generadas por la maquinaria industrial para evaluar su estado mecánico. La presencia incontrolable de vibraciones en una máquina, hace inminente el fallo catastrófico de ésta debido al efecto en cadena que produce la proliferación de las fuerzas dinámicas, todo lo cual acarrea incuestionables pérdidas económicas.

Nelson Saavedra Pedro (2003) menciona que en el caso de los equipos rotatorios, la ventaja que presenta el análisis vibratorio respecto a otras técnicas como tintas penetrantes, radiografía, ultrasonido, etc., es que la evaluación se realiza con la máquina funcionando, evitando con ello la pérdida de producción que genera una detención.

2.4 Diagnóstico en línea del programa de mantenimiento predictivo

Carvajal, F. et al. (1999) indica que la posibilidad de que una falla produzca algún tipo de pérdida en la producción resulta inaceptable, por lo que se requieren técnicas confiables de diagnóstico que permitan detectar problemas incipientes en los componentes del motor, operando en línea y bajo condiciones de carga nominal.

Existen dos métodos para llevar a cabo estas técnicas: métodos invasivos y no invasivos. Los métodos no invasivos están basados en el fácil acceso y mediciones de bajo costo para advertir las condiciones del equipo sin la desintegración de su estructura propia, esto es, sin la necesidad de cambiar el diseño o su construcción para equipos o sistemas ya construidos.

Este esquema es el más apropiado para el monitoreo en línea y propósitos de detección de fallas. Por lo tanto nuestras técnicas de diagnóstico deben ser no invasivas tanto como sea posible e intrínsecamente seguras. En las técnicas de diagnóstico en línea, implementadas y aplicadas en la actualidad, se consideran estos factores y permiten evaluar el estado operativo de motores de inducción instalados en diferentes ambientes de trabajo.

En el caso de detección de fallas mecánicas, consideran que las variables de mantenimiento son normalmente vibraciones; señales dinámicas que pueden tener alguna complicación a la hora de su comprensión o procesamiento por parte de instrumentación o ingeniería de sistemas. Las variables de mantenimiento predictivo más comunes en proyectos de diagnóstico en línea son:

- Vibración absoluta de carcasa.
- Vibración relativa de eje.

- Posición axial relativa de eje.
- Expansión diferencial de carcasa.
- Rpm.
- Fase vibratoria.
- Temperatura de cojinetes.
- Otras variables de proceso.

2.5 Diagnóstico fuera de línea de motores de inducción

El diagnóstico fuera de línea permite probar motores de inducción desenergizados a través de la medición de sus parámetros básicos y los de sus circuitos de fuerza asociado. Carvajal, F. et. at. (1999) nos hacen mención en que con base a éstas mediciones se determina la condición del equipo. Actualmente, el diagnóstico fuera de línea de motores de inducción se ha aplicado en las siguientes pruebas:

- Resistencia de aislamiento.
- Pruebas estándar de corriente alterna.
- Comparación de pulsos.
- Pruebas de rotor.

2.6 Procesamiento digital de señales

Las vibraciones pueden ser observadas en dos dominios básicos, el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia. Ambos presuponen una vinculación directa. Electrónicamente hablando, la vibración es registrada en virtud de una señal eléctrica que es proporcional al fenómeno mecánico que se está cuantificando. Ésta se obtiene en forma primitiva en el dominio del tiempo. Parra Suárez O. A. et. at. (2000) indican que para obtener el llamado *espectro* de las vibraciones es necesario hacer pasar la señal a través de un filtro de “barrido” que sucesivamente irá desentrañando cada una de las componentes de la vibración por frecuencias.

Existen varias formas de medir las vibraciones. Una forma común es medir la vibración global, pero si se hace esto, combinamos las señales fuente junto con una señal agregada, por ejemplo, podríamos verificar el nivel de vibración estático contra algunos predefinidos como límite para

determinar si las características técnicas presentadas por el fabricante se exceden y entonces se requiera un mantenimiento.

Aunque la aproximación de la medición de vibración estática sea apropiada para algunas aplicaciones, en otros se requiere un punto de vista más robusto, ofrecido por la aproximación dinámica. Dicha medida, nos permite examinar una señal a mayor profundidad. La señal de vibración dinámica contiene información en el dominio de la frecuencia que puede usarse para eliminar las falsas alarmas, evaluar la severidad del problema y ayudar en gran medida con el diagnóstico.

2.7 Procesamiento digital de señales utilizado para el análisis de vibraciones mecánicas

El objetivo del procesamiento digital de señales utilizado para el análisis de vibraciones es poder extraer el máximo de información relevante que ellas poseen. Estupiñan P. Edgar et. at. (2006) menciona las diferentes técnicas de análisis tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia, las cuales tienen sus propias ventajas para algunas aplicaciones en particular.

Los sistemas de diagnóstico se caracterizan por procesar la señal dinámica de la variable predictiva (vibraciones mecánicas) y convertirla al dominio de frecuencia en forma de espectro mediante el algoritmo FFT (Fast Fourier Transform). Aunque éste es el tipo de representación básica de un sistema de diagnóstico, son muchos los tipos de gráficos que un sistema de diagnóstico en línea puede ofrecer, tales como:

- Análisis de demodulaciones.
- Análisis de los promedios sincrónicos en el tiempo.
- Análisis de octavas.
- Análisis de forma de onda.
- Análisis de fase de vibración.
- Análisis espectral.
- Análisis de wavelets.
- Análisis de orden.
- Análisis de órbitas.

a) Análisis de demodulaciones

El análisis de demodulaciones en amplitud consiste en analizar la envolvente de la señal temporal de una señal modulada. Nelson Saavedra Pedro (2009) indica que este análisis permite determinar más fácilmente la periodicidad de las modulaciones y diagnosticar problemas tales como:

- Rodamientos picados.
- Engranajes excéntricos o con dientes agrietados.
- Deterioro de álabes en turbinas.
- Problemas eléctricos en motores.

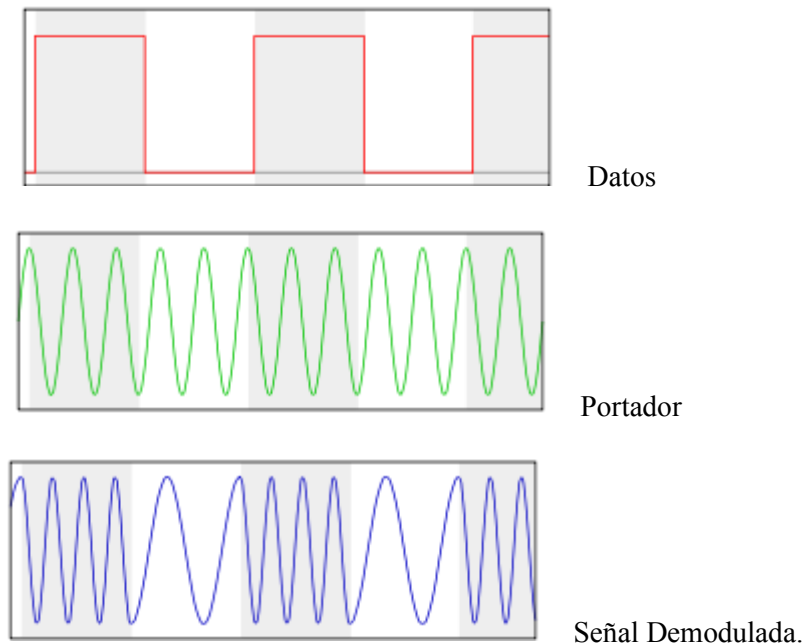


Figura 2.1. Ejemplo de una señal demodulada.

b) Análisis de los promedios sincrónicos en el tiempo

Nelson Saavedra Pedro (2003) indica que la técnica consiste en recolecta señales vibratorias en el dominio del tiempo, las suma y promedia sincrónicamente mediante un pulso de referencia repetitivo. Las componentes sincrónicas al pulso se suman en el promedio y las no sincrónicas disminuyen de valor con el número de promedios. Esto permite determinar en forma más fácil el origen de las diferentes componentes vibratorias. Como se ve en la Figura 2.2.

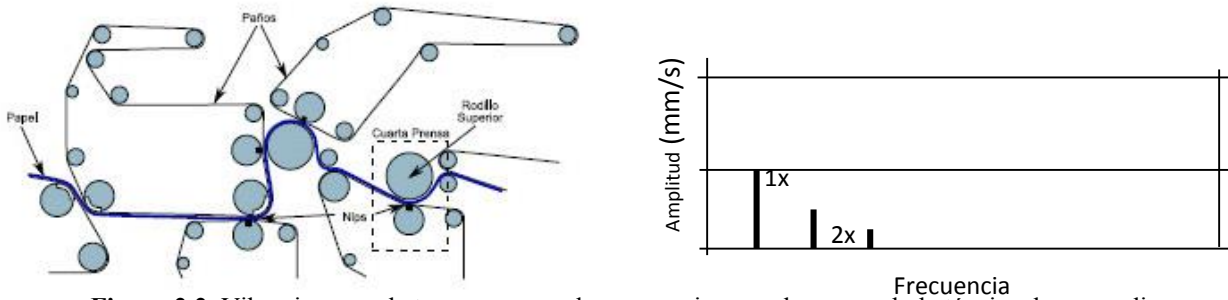


Figura 2.2. Vibraciones en la tercera prensa de un maquina papelera, usando la técnica de promedios síncronos en el tiempo.

c) Análisis de octavas

Esta técnica de análisis para ruido permite realizar estudios de señales vibro-acústicas y de audio que son estacionarias, como se ve en la Figura 2.3.

Jaime Fonseca Beatriz Adriana (2006) indica que el análisis del ruido producido por un motor o una máquina rotando, permite obtener conocimiento de las frecuencias que pueden afectar a la parte que se encuentra revolucionando.

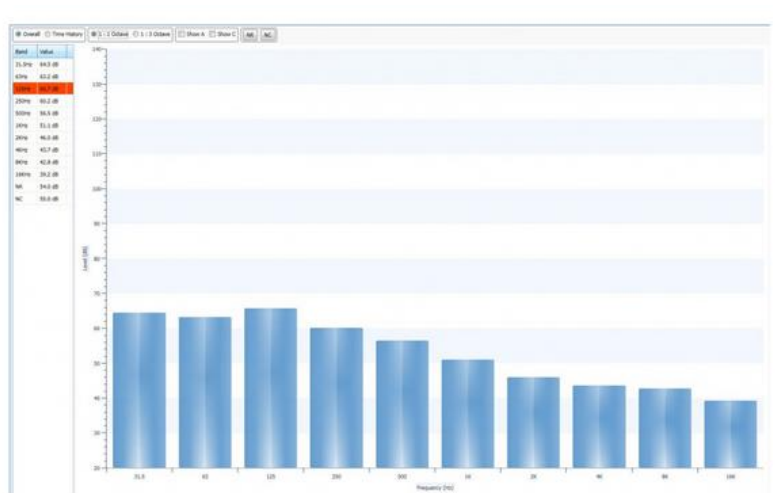


Figura 2.3. Nivel de ruido analizado con el análisis de octavas.

d) Análisis de forma de onda

Nelson Saavedra Pedro (2003) nos indica que el análisis de la forma de la vibración en el tiempo a veces puede proveer información complementaria al análisis espectral. Este análisis es adecuado para reconocer los siguientes tipos de problemas:

- Impactos.
- Rozamientos intermitentes.
- Modulaciones en amplitud y frecuencias.
- Transientes.
- Truncaciones.

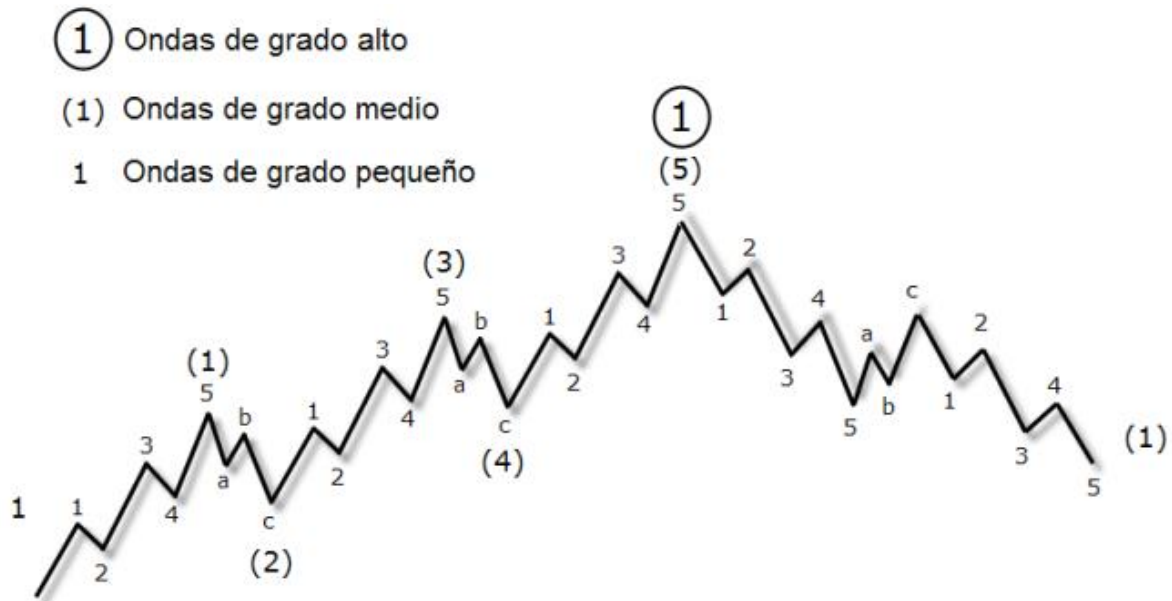


Figura 2.4. Ejemplo de análisis de formas de onda.

e) Análisis de fase de vibración

Se puede definir la diferencia de fase entre dos vibraciones de igual frecuencia como la diferencia en tiempo o en grados con que ellas llegan a sus valores máximos, mínimos o cero. Estupiñan P. Edgar et. at. (2006) mencionan que el análisis de diferencias de fase a la velocidad de giro de la máquina entre las vibraciones horizontal y vertical o entre las vibraciones axiales de los diferentes descansos del sistema motor-máquina, permite determinar los movimientos relativos entre ellos, y diferenciar entre problemas que generan vibraciones a frecuencia 1 x rpm.

- Desbalance.
- Desalineamiento.
- Eje doblado.
- Resonancia.
- Poleas excéntricas o desalineadas.

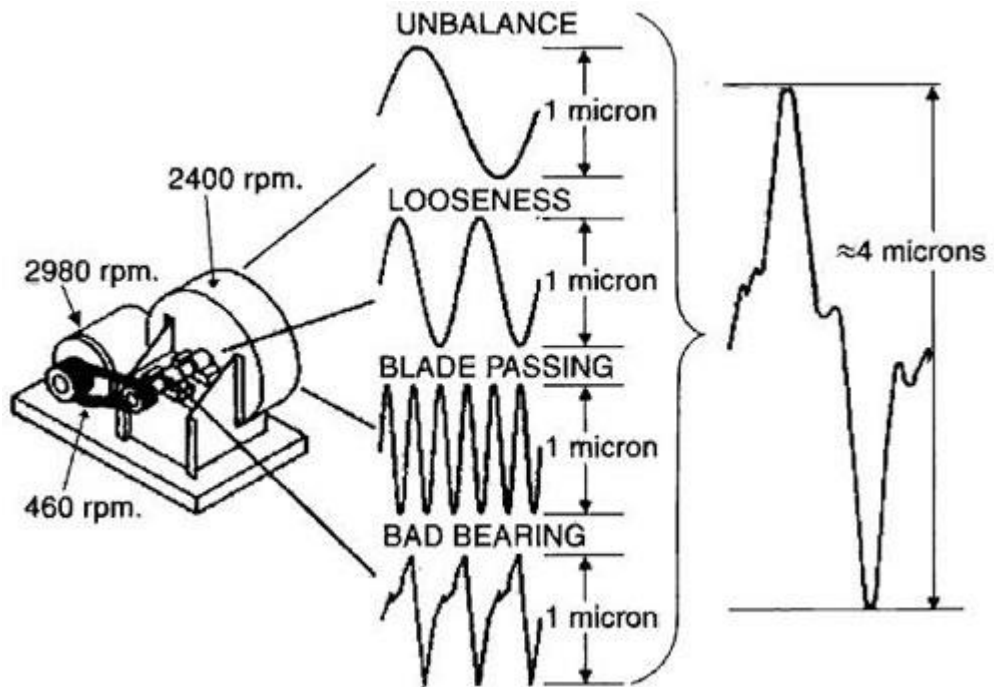


Figura 2.5. Análisis de la fase de vibración.

f) Análisis espectral

La esencia del análisis espectral es descomponer la señal vibratoria en el dominio del tiempo en sus componentes espectrales en frecuencia. Esto permite, en el caso de las máquinas, correlacionar las vibraciones medidas generalmente en sus descansos, con las fuerzas que actúan dentro de ella como el mostrado en la Figura 2.6.

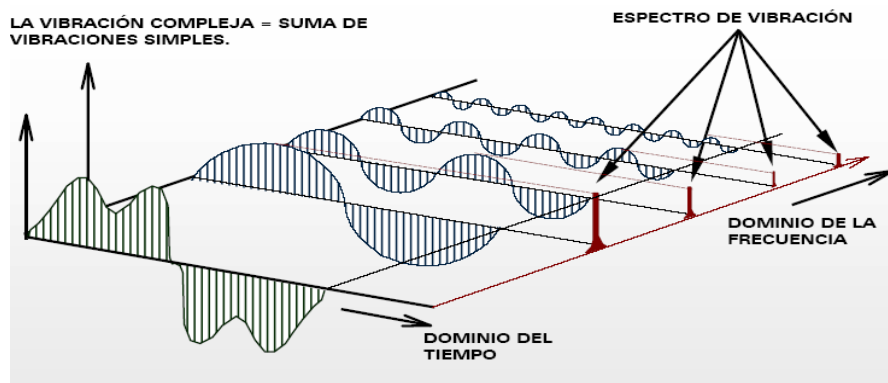


Figura 2.6. Esquema de una señal en tiempo con sus componentes en frecuencia.

g) Análisis de wavelets

La transformada wavelet representa una señal en términos de versiones trasladadas y dilatadas de una onda finita (denominada wavelet madre).

La teoría de wavelets está relacionada con muy variados campos. Todas las transformaciones wavelet pueden ser consideradas formas de representación en tiempo - frecuencia y, por lo tanto, están relacionadas con el análisis armónico.

Mediante el análisis wavelet podemos descomponer una serie temporal simultáneamente en el dominio del tiempo y la frecuencia, lo que le convierte en una herramienta muy útil a la hora de analizar señales y permite obtener tanto los modos de variabilidad temporal más importantes como su evolución en el tiempo, permitiendo además la localización el tiempo de señales oscilatorias de muy corta duración.

La gran ventaja del análisis wavelet es que el comportamiento en el dominio de la frecuencia se manifiesta dinámicamente a lo largo del tiempo, donde la información más importante se encuentra en las frecuencias bajas, mientras que en las altas frecuencias se encuentran los detalles o matices de la señal.

En cuanto a sus aplicaciones, la transformada wavelet discreta se utiliza para la codificación de señales, mientras la continua se utiliza en el análisis de señales.

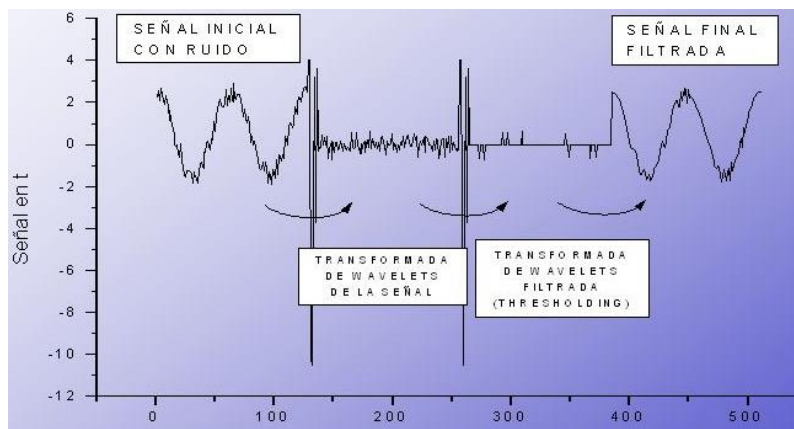


Figura 2.7. Análisis de una señal mediante wavelets.

h) Análisis de orden

Es una técnica ideal cuando se analizan sistemas mecánicos con componentes rotacionales como motores, bombas, transmisores, turbinas, compresores, etc., Dentro del programa National Instruments 2013 permite separar las diferentes frecuencias o vibraciones que son ocasionadas por fallas en el sistema, tales como desbalances, desalineaciones, torbellino de aceite, espacio entre engranes, rupturas, etc.

El análisis de orden normaliza las mediciones de velocidad rotacional, hacia la frecuencia natural del sistema, para poder separar mejor las componentes de las señales, y éstas se definen como órdenes del sistema rotacional.

Se puede rastrear la magnitud y fase de los diferentes órdenes del sistema. Permite el procesamiento con señales de tacómetros tanto digitales como analógicos, para sincronizar las señales medidas de vibración con la velocidad de rotación del motor.

El estudio de órdenes, se desarrolla a través del uso de técnicas de análisis como transformadas de Gabor, filtros adaptativos y re-muestreo. El uso del análisis de orden es una técnica poderosa para el análisis de ruido y vibraciones en motores de inducción cuando es necesario la variación de la velocidad de rotación.

Esta aplicación refleja en una buena medida las características físicas de una máquina en rotación, como se muestra en la Figura 2.8.

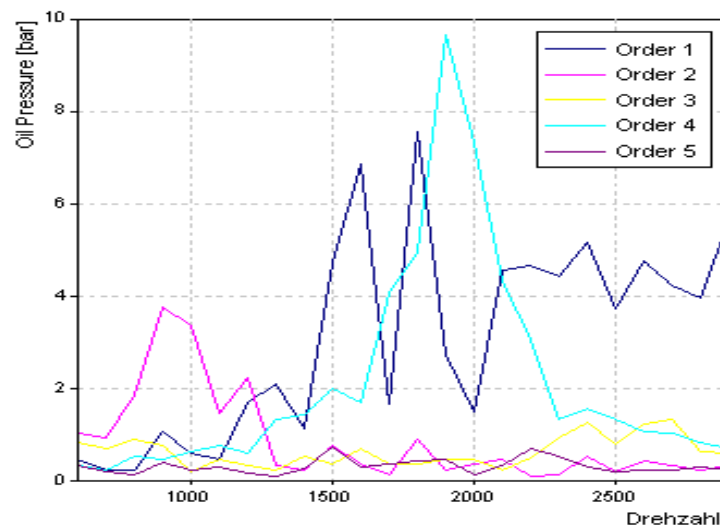


Figura 2.8. Análisis de una señal donde se muestran sus órdenes con diferentes colores.

2.8 Análisis de órbitas

El análisis de órbitas es muy poderoso para el diagnóstico de fallas, siempre y cuando se interprete de forma correcta. Forland, Clair (1999) indica que la órbita se usa para desplegar el movimiento del eje; para ello es necesario colocar dos acelerómetros para la medición de las vibraciones como mínimo, colocados ortogonalmente (vertical y horizontal), sobre los cojinetes, como se muestra en la Fig. 2.5. Shi Dongfeng et. at. (2000) demuestran que si además de esto se incluye un transductor de referencia, se podrá sincronizar y si fuera necesario re-muestrear las señales para obtener el movimiento del eje en el descanso, pudiendo detectar algunas fallas mecánicas en el motor, basándonos en el análisis espectral o de orden, como se muestra en la Figura 2.9.

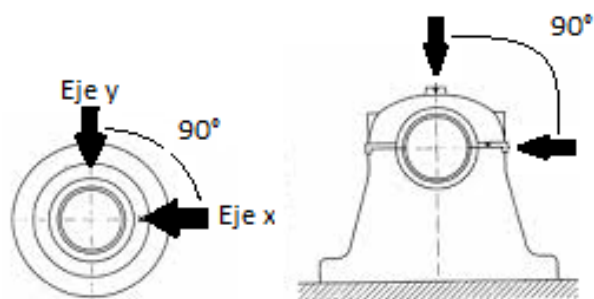


Figura 2.9. Colocación de los acelerómetros "X"y"Y" a 90°.

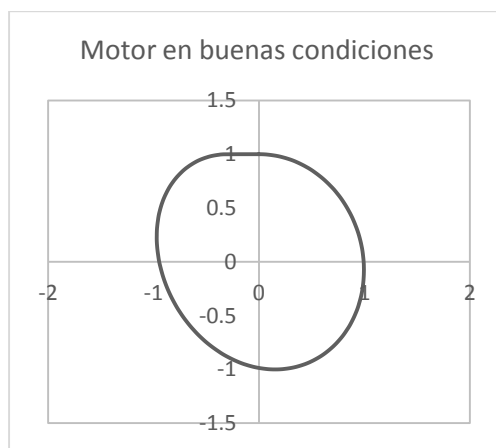


Figura 2.10. Órbita generada por dos acelerómetros colocados perpendicularmente.

Una órbita representa el movimiento dinámico del centro de rotación del eje, y genera una imagen de dos dimensiones del movimiento del centro del eje.

2.9 El motor eléctrico de inducción

Los motores aparecieron hace muchos años, por la necesidad de transformar cierta energía (hidráulica, solar, química, eléctrica, etc.) en energía mecánica, esto para dar movilidad a maquinaria y poder minimizar los esfuerzos, tiempos, costos y maximizar la producción.

Walter N. Alerich (1972) menciona que el motor de inducción es el motor eléctrico utilizado en la mayoría de la industria (aproximadamente un 85% del total de los motores).

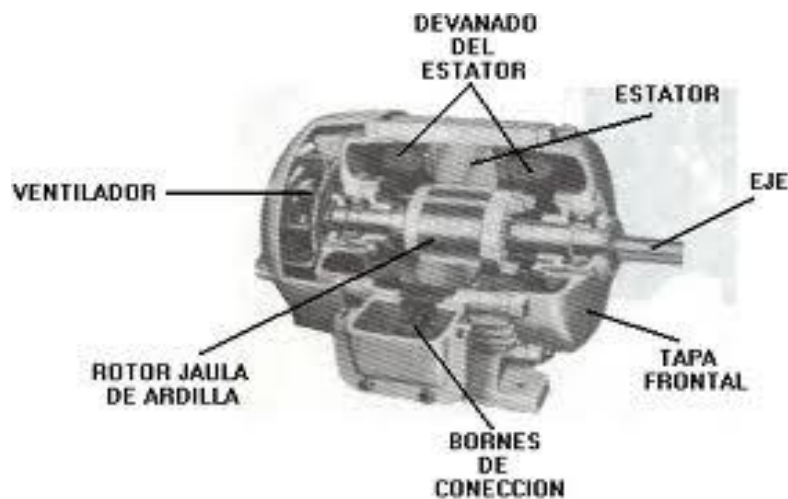


Figura 2.11. Partes de un motor eléctrico de inducción.

No tiene un imán permanente como los motores síncronos, sino que es un electroimán, tiene barras de conducción en todo su largo incrustadas en ranuras a distancias uniformes alrededor de la periferia, las barras están conectadas con anillos (en corto circuito) a cada extremidad del rotor, están soldadas a las extremidades de las barras. Este ensamblado se parece a las pequeñas jaulas rotativas para ejercitar a mascotas como hámster y ardillas de ahí su nombre de motor de jaula de ardilla.

Walter N. Alerich (1972) indica que la variante de jaula de ardilla presenta la gran ventaja de ser un motor de construcción simple, robusta, de bajo costo y que requiere un mantenimiento mucho menor que cualquier otra máquina rotativa al carecer de escobillas, colector de anillos o colector de delgas.

Las diferencias que presenta un motor de inducción residen principalmente a nivel del estator y el rotor, a continuación se tiene algunas de ellas.

El Estator. Tiene tres devanados desfasados $2\pi / (3P)$, siendo P el número de pares de polos de la máquina.

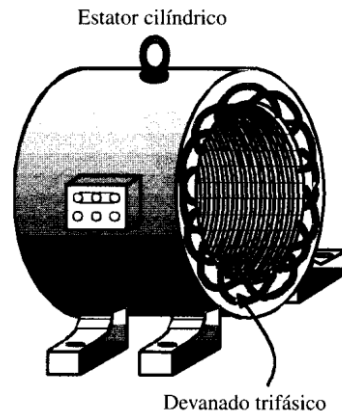


Figura 2.12. Estator de un motor eléctrico de inducción.

El Rotor de jaula de ardilla. Los conductores del rotor están igualmente distribuidos por la periferia del rotor. Los extremos de estos conductores están cortocircuitados, por tanto no hay posibilidad de conexión del devanado del rotor con el exterior. La posición inclinada de las ranuras mejora las propiedades de arranque y disminuye ruidos.

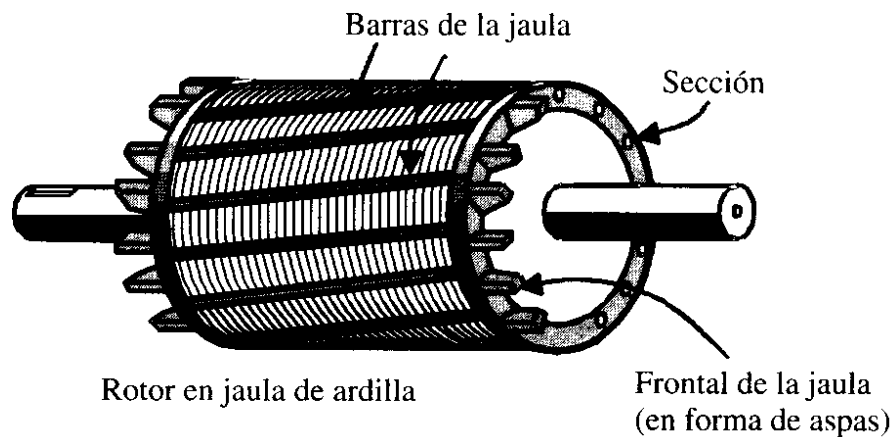


Figura 2.13. Rotor de un motor eléctrico de inducción.

2.10 Herramientas tecnológicas actuales para el análisis de vibraciones.

La importancia de utilizar un ambiente de programación gráfico, radica en la necesidad de crear una interfaz de comunicación entre el sistema generado para la detección de fallas incipientes en motores y el usuario mismo, que sea amigable y de fácil comprensión. Para lograr este fin se utiliza una herramienta de programación conocida como LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering

Workbench), con la que se adquieren y procesan las señales para alimentar la red neuronal, la cual finalmente mostrará el diagnóstico.

En LabVIEW se pueden construir interfaces de usuario, o paneles frontales con elementos de control o indicadores. Cuenta con dispositivos de entrada, indicadores gráficos como LEDs u otros diseñando su funcionamiento y aplicaciones mediante un diagrama de bloques.

Por tales motivos, este ambiente gráfico de programación es altamente utilizado para la generación de pantallas que simulan y controlan procesos industriales y/o procesamiento de señales entre otras cosas.

El tema del análisis de vibraciones para el diagnóstico de fallas incipientes no es nuevo, actualmente contamos con sistemas comerciales y de investigación para diferentes áreas industriales como el diagnóstico de sistemas de refrigeración y enfriamiento, palas de minería, y también en máquinas rotatorias entre otras.

En cuanto a sistemas comerciales tenemos por ejemplo el analizador DI-440 de la empresa Diagnostic Instruments, que mide el nivel de ruido y vibración en motores de inducción y convierte las señales captadas por acelerómetros piezoeléctricos, en componentes de frecuencia que representan las características internas del motor.

El DI-440, también proporciona la fase de la señal de vibración adquirida, información que puede servir para descartar posibles fallas y permitir un diagnóstico más objetivo.

En la Figura 2.14, se puede observar una señal de vibración de un motor de inducción de baja potencia en la pantalla del DI-440.



Figura 2.14. Analizador de vibraciones mecánicas DI-440.

Jaime Fonseca Beatriz Adriana (2006) hace mención de que este dispositivo, sólo proporciona al usuario la señal, pero no diagnóstica si existe algún problema, en la máquina rotatoria, esto último ya es tarea de un experto en vibraciones y motores.

Otro ejemplo de un analizador comercial es el Vibration Severity Meter VM12 de la empresa Alemana MMF, mostrado en la Figura 2.15. El VM12, es un dispositivo diseñado para medir la velocidad de vibración en rangos de frecuencia de entre 10 Hz y 1000 Hz, mediante un acelerómetro piezoeléctrico externo. Este medidor de vibración es de fácil operación, ya que sólo necesita que el sensor sea montado, enseguida se enciende el dispositivo y se observa en un conjunto de 4 display's, la medida de la amplitud de la vibración a diferentes frecuencias.



Figura 2.15. Analizador de vibraciones de mano VM12.

Dispositivos como el DI-440 o el VM12, hay muchos en el mercado, algunos obtienen a su salida algún gráfico; algunos otros, entregan un valor numérico, pero todos tienen la característica de que sólo analizan la señal de vibración mecánica, sin hacer ningún diagnóstico de la posible falla.

Otros instrumentos de diagnóstico, incluyen varias técnicas de análisis. Dentro de estos analizadores, los más comúnmente utilizados en Chile se encuentran el: CSI-2120 y CSI-2130 de la empresa Computacional System Incorporated, el CMVA 65 de la empresa SKF Condition Monitoring, el DCX-XRT y DCA-31 de la empresa DLI Engineering, el Snapshot de la empresa Bently Nevada y el Vibrotest 60 de la empresa Schenck Corporation.

Siam – FLEX en 2005 ofrecía el producto siamflex (sistema avanzado de monitoreo flexible), este es un sistema de monitoreo, vigilancia y diagnóstico el cual se personaliza para la máquina específica en la que se va a instalar, con el objetivo de considerar sus peculiaridades propias. Siamflex es un sistema específico para las palas de minería.

Utiliza técnicas de procesamiento de señales como espectro de órdenes, espectro FFT, espectros de cascada, forma de la onda, forma en que varía la velocidad de rotación de las transmisiones durante la medición de las vibraciones, transformada revolución-órdenes.

El sistema colector de datos y analizador FFT portátil bi canal, basado en ruta es otro sistema. Permite una fácil monitorización de estado de los equipos utilizando en sectores como papelerero, energético, petroquímico o metalúrgico, ya que es un colector de datos portátil basado en ruta, que incluye variables de proceso y señales de vibración, en una gama de entre 10 c.p.m. (0.16 Hz) y 2.400.000 c.p.m. (40 KHz). Las evaluaciones de fallos en rodamientos se realizan utilizando la tecnología probada SKF Acceleration Enveloping.

Se utiliza el procesamiento de señales digitales y un convertidor A/D Sigma-Delta de alta resolución para proporcionar un proceso de recopilación de datos preciso y rápido, como se muestra en la Figura 2.16.



Figura 2.16. Colector de datos y analizador del FFT portátil bi-canal.

Todos estos sistemas tienen como factor común su arquitectura cerrada y su alto precio (usualmente entre US\$12,000 – US\$40,000), y se diferencian principalmente por el rango dinámico de sus conversores A/D, el número de canales de adquisición (simultáneos o multiplexados), resolución espectral, ancho de banda, velocidad de adquisición de datos, software de manejo de información, técnicas de análisis implementadas y sistema de protección y robustez frente a medios hostiles.

2.11 Conclusiones del capítulo

Durante el presente capítulo se mencionaron de forma breve la historia de las redes neuronales y las técnicas que se utilizan en la industria para brindar un adecuado mantenimiento a los motores, siendo necesario conocer las características de las vibraciones que influyen en el motor y sus análisis correspondientes para detectar específicamente las fallas.

Otro tema que es fundamental y del que se habló fue acerca de los componentes del que consta un motor de inducción para saber en dónde ocurren principalmente las fallas y si es necesario en un futuro cambiarlas.

Por último, se habló acerca de algunos sistemas comerciales que existen y que son de difícil manipulación haciendo que el usuario tenga que tener experiencia con las vibraciones para la identificación de las fallas debido a la ausencia de algoritmos capaces de detectar fallas por sí solos.

CAPITULO 3

Análisis de vibraciones

3.1 Introducción

Se podría pensar que las vibraciones en las maquinarias suelen ser malignas, ya que si no se atienden adecuadamente o se detectan a tiempo tienden a ocasionar serios problemas en la maquinaria tales como: desgaste en chumaceras, fisuras por fatiga, pérdida de efectividad de los sellos, rotura de aislantes, ruido, etc. Actualmente esta idea ha cambiado debido a que las vibraciones se pueden servir para conocer el estado en el que se encuentran operando, ya que las fallas catastróficas suelen ser precedidas por un cambio en las condiciones de las vibraciones, el lapso de cambio de condición suele ser con tiempo suficiente para prevenir una falla mayor.

A-MAQ S.A (2005) mencionan que las vibraciones suelen estar estrechamente relacionadas con la vida útil de la maquinaria, ya que si se presenta un nivel bajo de vibraciones es una indicación de que la maquinaria funciona correctamente y por lo tanto su vida útil será mayor. En cambio Commtest (2006) indica que conforme aumenta el nivel de vibraciones se debe de tomar como una señal de alarma, ya que la mayoría de las maquina a un corto o largo plazo presenta algún tipo de falla.

Actualmente, el mantenimiento predictivo que se le da a la maquinaria en las industrias se hace a través de la medición y análisis de las vibraciones, ya que cerca del 90% de las fallas en máquinas rotativas está precedida por un cambio en las vibraciones, haciéndolo un método confiable y efectivo.

Algunas desventajas de este método es que existen vibraciones producidas de forma natural por el funcionamiento de las máquinas, por lo que una de las tareas del sistema es identificar aquellas que

deben ser corregidas. Así pues, las frecuencias y amplitudes de la señal de la vibración del motor pueden ser un factor importante de analizar para detectar la falla. Palomino Marín Evelio (2000) demuestra que las frecuencias y amplitudes de las señales de vibración del motor, permitirán identificar la gravedad del problema, para tomar acción oportuna antes de que el daño sea irreversible provocando grandes pérdidas económicas.

Para entender un poco mejor por qué las vibraciones son indicadores del estado de la maquinaria es necesario definir el concepto de vibración. Una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero, las vibraciones pueden tener diversos grados de libertad pero todas entre ellas son ortogonales. Por lo tanto una señal de vibración de una máquina que se captura es la suma vectorial de las vibraciones de cada una de sus componentes.

Según la norma ISO 2041; en relación con la terminología de vibraciones, se establece que:

“Vibración es toda variación en el tiempo, de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico, cuando esta magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio de referencia.”

3.2 Caracterización de las vibraciones en maquinarias

En el dominio del tiempo la base principal de las señales son las ondas sinusoidales, ya que son más simples y suelen ser la representación pura de las oscilaciones. Por naturaleza las vibraciones pueden ser armónicas, periódicas, compuestas o aleatorias.

a) Vibración armónica

Un movimiento se llama periódico cuando a intervalos regulares de tiempo se repiten los valores de las magnitudes que lo caracterizan. Un movimiento periódico es oscilatorio si la trayectoria se recorre en ambas direcciones. Un movimiento oscilatorio es vibratorio si su trayectoria es rectilínea y su origen se encuentra en el centro de la misma.

El movimiento ARMONICO es un movimiento vibratorio en el que la posición, velocidad y aceleración se pueden describir mediante funciones sinodales o cosenoidales. De todos los movimientos armónicos, el más sencillo es el Movimiento Armónico Simple.

El MOVIMIENTO ARMONICO SIMPLE es aquel en el que la posición del cuerpo viene dada por una función del tipo:

$$y = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{t} \quad (2)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{t} \quad (3)$$

donde y es la elongación, es decir, es la distancia del móvil al origen (O) del movimiento en cada instante, A es la amplitud máxima que se alcanza, t es el periodo o tiempo que tarda en realizarse una vibración completa, f es la frecuencia o el número de vibraciones completas realizadas en la unidad de tiempo, ω es la pulsación o frecuencia angular y φ es el desfase, fase inicial o corrección de fase, su valor determina la posición del cuerpo en el instante inicial.

Resumiendo diremos que un movimiento armónico simple (M.A.S) es un movimiento vibratorio bajo la acción de una fuerza recuperadora elástica, proporcional al desplazamiento y en ausencia de todo rozamiento y que las propiedades de las vibraciones armónicas, son: 1) Las mismas se caracterizan por su AMPLITUD y FRECUNCIA., 2) La posición del punto que vibra viene determinada por su FASE. 3) A cada fase le corresponde una OPUESTA, y 4) La fase puede empezar a medirse desde cualquier posición.

b) Vibración periódica

Una vibración periódica es aquella que se repite con todas sus características después de un intervalo de tiempo conocido como periodo de la vibración y representado por la letra T . Matemáticamente, la función que describe la vibración o función periódica debe satisfacer la condición

$$f(t + T) = f(t) \quad \forall t \in I_d \quad (4)$$

Si la vibración o función no satisface la ecuación 4, la vibración se denomina aperiódica. La Figura 3.1 muestra un ejemplo de una vibración periódica. Note que la vibración se repite con todas sus características después de un intervalo de tiempo.

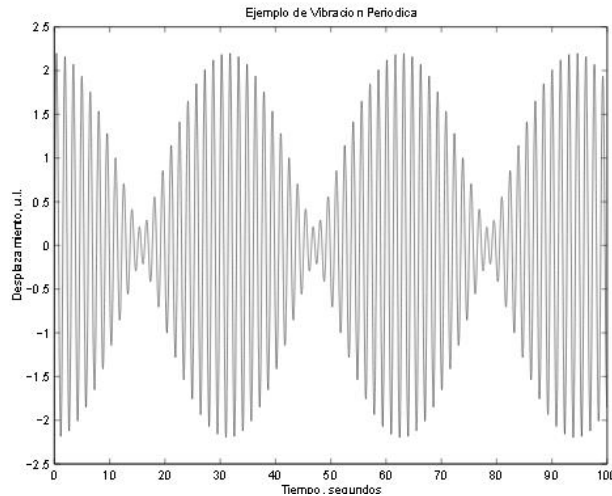


Figura 3.1. Ejemplo de vibración periódica.

c) Vibración compuesta

Una vibración compuesta es la suma de varias vibraciones simples. La vibración de una máquina es una vibración compuesta de una serie de vibraciones simples asociadas a sus componentes internos en movimiento. Teniendo esto en cuenta, se deduce que la forma de onda de vibración de una máquina no es una señal sinusoidal sino que puede llegar a ser muy compleja. Como se puede ver en la Figura 3.2, dos señales de vibración de diferente frecuencia se suman formando una vibración compuesta. Incluso en casos tan sencillos como este, no resulta fácil obtener las frecuencias y amplitudes de las dos componentes a partir de la forma de onda resultante. La gran mayoría de las señales de vibración son mucho más complejas que esta y pueden llegar a ser extremadamente difíciles de interpretar.

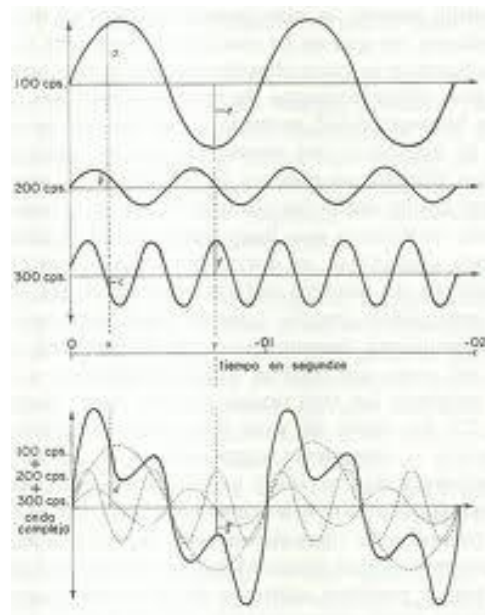


Figura 3.2. Suma de vibraciones simples en el dominio del tiempo.

d) Vibración Aleatoria

Son pocos los casos en los cuales se presenten vibraciones aleatorias, la mayoría tiene contenidos de frecuencias en toda la banda de frecuencias analizada. Presentan ondas sinusoidales distorsionadas cada una con un espectro acompañadas de una mezcla de armónicos (sonidos producidos por la resonancia de otros) que se caracterizan por amplitud, frecuencia y fase respectivamente. A estas vibraciones que no permiten un conocimiento seguro del comportamiento futuro se les llama aleatorias.

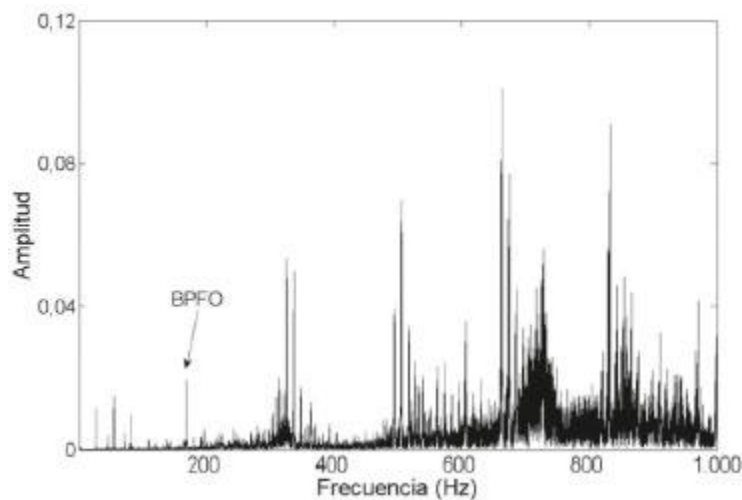


Figura 3.3. Ejemplo de vibración aleatoria.

3.3 Sistema máquina-soportes

El sistema máquina-soporte puede ser descrito a través de un sistema masa-resorte-amortiguador. Desde el punto de vista práctico, cualquier parte de un sistema que pueda ser deformado al aplicársele una fuerza y pueda recuperar su forma inicial al cesar ésta, podrá ser tratado para su estudio como un resorte, siendo la constante elástica k de éste, la magnitud de fuerza necesaria para deformarlo la unidad de longitud o sea, esta constante k denominada habitualmente rigidez, se expresa en unidades de $[fuerza/longitud]$. De aquí que, un elemento elástico responda con una fuerza que es k veces su propia deformación (Figura 3.4).

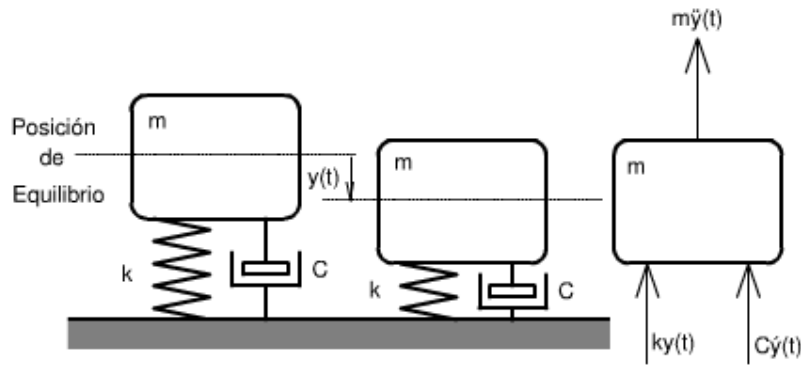


Figura 3.4. Sistema máquina-soporte (masa-resorte-amortiguador).

Palomino Marín Evelio (2000) menciona que el tramo de árbol que media entre dos rodamientos, el bloque del hormigón sobre el cual descansa una máquina o la carcasa de un motor, pueden ser tratados como resortes durante el análisis dinámico de estos sistemas.

Realmente, en la práctica de ingeniería durante el fenómeno vibratorio se disipa energía en mayor o menor grado, lo que implica que la amplitud del movimiento no se mantenga constante en el transcurso del tiempo posterior a un “impulso” inicial, al menos que no sea que una fuerza se encargue de restablecer estas pérdidas. Las fuerzas amortiguadoras son extremadamente complicadas de modelar por lo que, de acuerdo al alcance de este material, solo será considerada la influencia del llamado amortiguamiento viscoso, caracterizado por el hecho de que la fuerza amortiguadora, es proporcional a la velocidad del movimiento en una magnitud C , denominada coeficiente de amortiguamiento y que es expresado en unidades de [fuerza-tiempo/longitud].

Tal sistema máquina-soporte, simplificado a un sistema masa-resorte-amortiguador, formado por una masa m vinculada a tierra a través de un resorte k y un amortiguador C según se observa en la Figura 3.4, tendrá un comportamiento dinámico que estará caracterizado fundamentalmente por su frecuencia natural o frecuencia de las vibraciones propias no amortiguadas, que a su vez será descrita por las siguientes expresiones:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ en [1/s] ; } f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ en [Hz] ; } f_n = \frac{60}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ en [c.p.m.]} \quad (5)$$

Identificándose ω_n como frecuencia angular natural y f_n como frecuencia natural.

De todo esto es importante destacar que, prescindiendo del efecto del amortiguamiento propio de los soportes de las máquinas, es posible aseverar que:

“Todo sistema máquina-soporte está caracterizado por una frecuencia que solo depende de la masa y la rigidez de este, denominada frecuencia natural.”

Adicionalmente, existen otros dos parámetros en la caracterización dinámica del sistema máquina-soporte. Si se admite que las fuerzas disipadoras de energía son proporcionales a la velocidad de las vibraciones del sistema máquina-soporte, entonces estos parámetros serán definidos según:

- El coeficiente de amortiguamiento crítico $C_c = 2\sqrt{km}$
- La razón de amortiguamiento $\zeta = \frac{c}{c_c}$

Palomino Marín Evelio (2000) indica que el coeficiente de amortiguamiento crítico C_c es una propiedad del sistema y no depende del amortiguamiento mismo, *mientras que la razón de amortiguamiento ζ se define como el cociente entre el coeficiente de amortiguamiento y el coeficiente de amortiguamiento crítico.*

Estos parámetros constituyen elementos decisivos a tener en cuenta cuando se pretenda desarrollar un programa de aislamiento y control de las vibraciones, tanto para maquinarias como para estructuras.

De igual forma, es sumamente importante destacar que cuando se considera en el análisis el posible amortiguamiento de los soportes de la máquina, entonces la frecuencia característica de la vibración en ausencia de fuerzas que restauren las pérdidas energéticas será la denominada *frecuencia de las vibraciones amortiguadas.*

$$f_d = f_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (6)$$

3.3.1 Sistema máquina – soportes ante la acción de una fuerza de carácter armónico (la resonancia)

Palomino Marín Evelio (2000) menciona que durante la operación de las máquinas se presentan fuerzas excitadoras que suministran la energía necesaria para mantener las vibraciones aun cuando exista amortiguamiento. Estas fuerzas pueden ser consideradas de carácter armónico, o sea:

$$F(t) = F \sin(2\pi ft) \quad (7)$$

En este caso, F es la amplitud de la fuerza y f la frecuencia de la variación en el tiempo de la fuerza.

En este sistema máquina-soporte se agrega una fuerza excitadora generalizada, tal y como se observa en la Figura 3.5, que podrá ser producida por la propia máquina y/o transmitida por ésta a otros agentes externos.

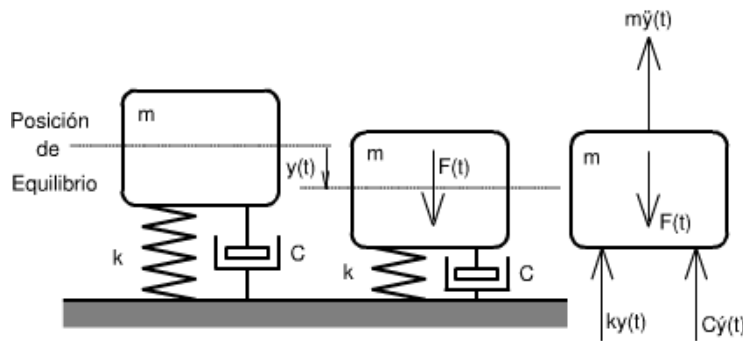


Figura 3.5. Sistema máquina-soporte bajo excitación armónica.

Palomino Marín Evelio (2000) dice que *si la excitación es una fuerza de carácter armónico, el sistema vibrará también en forma armónica con la misma frecuencia que la excitación pero desfasado en el tiempo.*

El fenómeno denominado *resonancia* aparece cuando se sintoniza alguna de las frecuencias de la excitación con alguna frecuencia natural (frecuencia propia de la máquina y que dependerá de su diseño de ésta). En estos casos, las vibraciones son amplificadas en una banda de frecuencia cercana y a ambos lados de la frecuencia natural, como se observa en la Figura 3.6 y Figura 3.7.

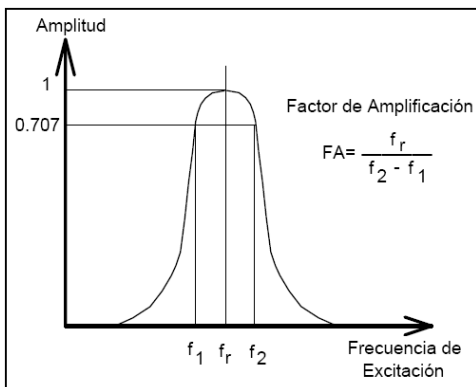


Figura 3.6. Resonancia modificada por poco amortiguamiento.

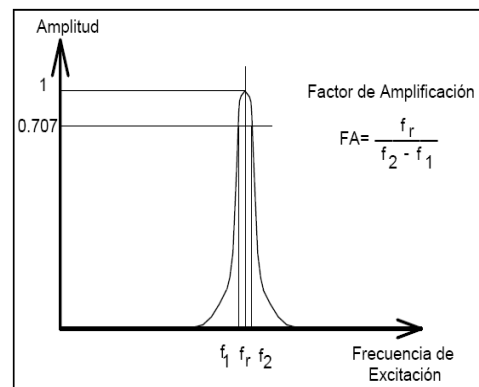


Figura 3.7. Resonancia modificada por cierta cantidad de amortiguamiento.

La resonancia tendrá lugar si la frecuencia de la fuerza excitada está contenida dentro de la denominada *banda de potencia media*. Esta banda se define a 3 dB por debajo del pico correspondiente a la frecuencia de resonancia. Por otro lado, esta *frecuencia de resonancia* tendrá

que estar relacionada con la frecuencia natural en dependencia del amortiguamiento presente, como se expresa a continuación.

$$f_r = f_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (8)$$

La norma ISO 2041 establece que:

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

Origen de las frecuencias de las vibraciones en maquinaria

Pintor Borobia Jesús Ma. (2000) indica que existen tres causas fundamentales que propician la presencia de vibraciones en las máquinas rotatorias a determinadas frecuencias y se identifican como:

- ***Frecuencias generadas.*** Se les suele identificar como frecuencias forzadas o frecuencias de diagnóstico y son aquellas que la máquina genera realmente durante su funcionamiento habitual. Generalmente este tipo de frecuencias vienen asociadas con cierto tipo de fallas, como lo son: desbalance, defectos locales en las pistas de un cojinete de rodamiento, frecuencias de engranaje, por citar algunas.
- ***Frecuencias excitadas.*** Son las frecuencias de resonancia de los elementos que componen la máquina, incluyendo las estructuras portantes y los elementos no rotatorios en general.

Cuando se excitan las frecuencias de resonancia, las vibraciones suelen amplificarse de acuerdo a lo que se ilustra en las Figuras 3.6 y 3.7, dependiendo de la cantidad de amortiguamiento existente. Para Pintor Borobia Jesús Ma. (2000) el desbalance es uno de los principales problemas que más excita las frecuencias de resonancia que se encuentran cercanas a la frecuencia de rotación de la máquina.

Aproximadamente, el 40% de los casos de vibraciones excesivas que se dan en el área práctica corresponden a un tipo de falla, siendo esta el desbalance. Este tipo de falla en los motores es una de las mejores representaciones de una fuerza excitadora de carácter armónico a través de una fuerza de inercia. Esta última fuerza se genera debido a la aceleración de una masa desbalanceada m_d que gira respecto al eje de rotación con una velocidad angular constante ω Figura 3.8.

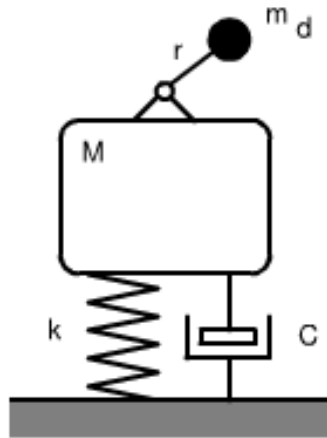


Figura 3.8. Presencia de una masa desbalanceada en el sistema máquina-soporte.

Es importante no dejar de lado y mencionar que la masa excéntrica produce una fuerza que se representa mediante un vector rotatorio con velocidad angular ω y amplitud $m_d\omega^2r$. El problema se puede analizar de otra forma, pudiéndolo hacer desde la frecuencia pudiendo modelar su comportamiento como se muestra en la Figura 3.9.

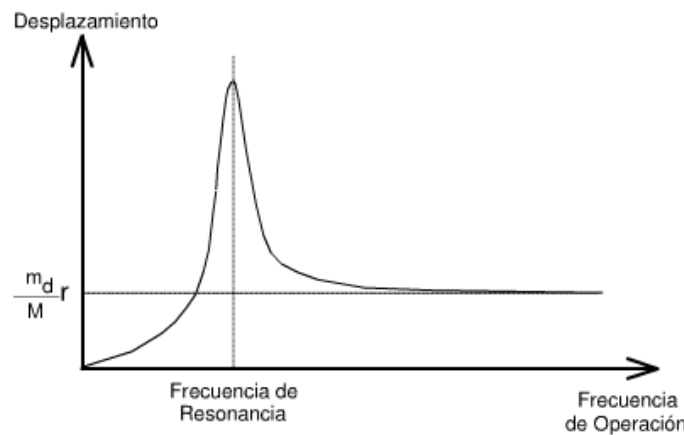


Figura 3.9. Respuesta de un sistema máquina-soporte ante los efectos de un desbalance rotatorio.

Se observa que a frecuencia cero, lógicamente, no existe amplitud de movimiento. No obstante, con la independencia del amortiguamiento, la vibración estabilizará una amplitud de desplazamiento $m_d r / M$, por lo cual una buena condición de balanceo deberá garantizar el menor producto $m_d r$.

Schefter Cornelius, Girdhar Paresh (2004) indica que se puede observar el notable crecimiento de la amplitud de las vibraciones en la máquina, cuando la velocidad de operación del rotor se asemeja a la frecuencia natural del sistema máquina-soportes.

- **Frecuencias producidas por fenómenos electrónicos.** En algunas ocasiones cuando se obtienen los espectros de las vibraciones de una máquina, se observan frecuencias falsas o fuera de su ubicación correcta. Schefter Cornelius, et. at. (2004) menciona que esto tiene lugar en el caso de una medición de una vibración senoidal, se ocasione un error en el ajuste de los atenuadores de entrada del instrumento de medición, ocasionando que este lo registre de forma recortada, produciendo un espectro falso.

3.4 Elementos de una vibración

3.4.1 Frecuencia y Periodo de una vibración

La cantidad de tiempo requerida para llevar a cabo un ciclo completo de un espectro de vibración se llama “periodo de vibración”. Si una máquina realiza un ciclo completo de vibración en sexagésimo de segundo (1/60), se dice que el periodo de vibración es igual a un sexagésimo de segundo (Figura 3.10).

La frecuencia de la vibración es la medida de la cantidad de ciclos completos que acontecen en un periodo de tiempo específico. La relación entre la frecuencia y el periodo de un patrón de vibración es expresada mediante la ecuación 2. Por lo general es expresada como cantidad de ciclos que acontecen en un minuto, es decir, r.p.m.

Un tercer modo de especificar la frecuencia es en términos de cantidad de ciclos por segundo, o sea en Hertz (Hz). Puesto que 1 Hz es igual a 60 r.p.m. Por lo tanto si se cuenta con una frecuencia especificada en Hz, la misma podrá convertirse en r.p.m., tal y como se muestra en las siguientes ecuaciones.

Si la frecuencia está expresada en Hz:

$$a) \text{rpm} = \text{Hz} \times 60 \frac{\text{seg}}{\text{min}}: \text{ Si la frecuencia está expresada en Hz} \quad (9)$$

$$b) \text{Hz} = \frac{\text{rpm}}{60 \frac{\text{seg}}{\text{min}}}: \text{ Si la frecuencia está expresada en r.p.m.} \quad (10)$$

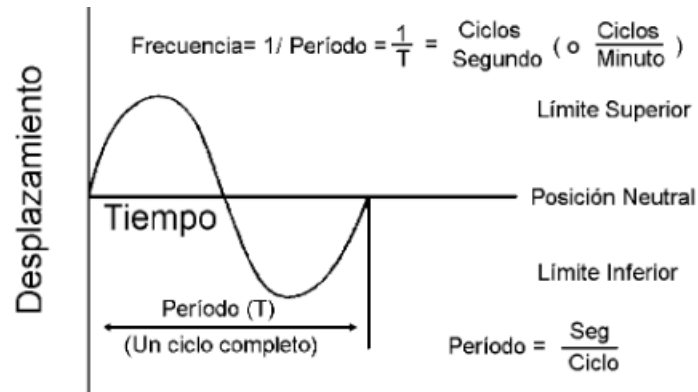


Figura 3.10. Onda senoidal.

La frecuencia de la vibración es indispensable para poder identificar que pieza es defectuosa y la índole del problema. Las fuerzas que dan lugar a la vibración son generadas por el movimiento rotativo de los componentes de la máquina. Por lo tanto dichas fuerzas cambiarán tanto en cantidad como en dirección a medida que la pieza modifica su posición con respecto al resultado de la máquina. Por resultado, la frecuencia de la vibración que se produce dependerá de la velocidad rotatoria de la pieza afectada. Así, conociendo la frecuencia de la vibración podemos identificar la pieza defectuosa. Es también importante saber que los distintos problemas que afectan las máquinas provocan vibraciones con frecuencias también distintas lo que hace posible que identifiquemos la naturaleza del problema.

Significado de la frecuencia de vibración

Las fuerzas que causan la vibración son usualmente generadas por las partes del motor que se encuentran en movimiento, o en su defecto, a las que se les transmite ese movimiento. Walter N. Alerich (1972) indica que debido a que estas fuerzas cambian de dirección o amplitud de acuerdo a la velocidad rotacional (rpm) de la máquina, se puede producir que la mayoría de los problemas de vibración tendrán frecuencias directamente relacionadas con sus velocidades.

La frecuencia de vibración ha sido tan útil, que se han podido descartar muchas fallas, tanto eléctricas como mecánicas siguiendo determinados criterios definidos mediante pruebas experimentales.

Jaime Fonseca Beatriz Adriana (2006) dice que si la frecuencia de vibración es de $1 \times \text{rpm}$ (donde x es la velocidad rotacional del motor), entonces podemos limitar el problema a fallas de desbalance, desalineamiento, pedestal cojo, soltura mecánica, resonancia y algunas fallas eléctricas.

Es de esta forma como el análisis de frecuencias de vibración, se comporta como proceso de eliminación de posibles fuentes de problemas cuando se quiere emitir un diagnóstico.

3.4.2 Amplitud

La amplitud desde el punto de vista de las vibraciones, es cuanta cantidad de movimiento puede tener una masa desde una posición neutral.

En términos de nivel total la amplitud se mide generalmente en valores:

Pico

Pico-pico

RMS (también llamado valor efectivo), para velocidad y aceleración.

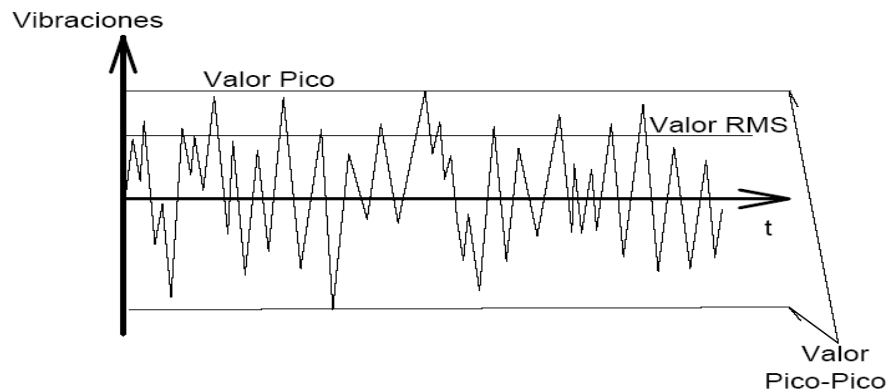


Fig. 3.11. Elementos de una señal.

En medición de vibraciones el método más usado es el *valor efectivo* o *RMS* que está asociado a la potencia de la vibración, el cual se determina de forma discreta como:

$$Y_{RMS} = \sqrt{\frac{y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_N^2}{N}} \quad (11)$$

En el caso particular de una vibración armónica será:

$$Y_{RMS} = 0.707Y_{PICO} \quad (12)$$

Palomino Marín Evelio (2000) menciona que un factor de relativa importancia para el diagnóstico de maquinarias y estructuras es el llamado Factor de Cresta (**CF**), expresado según el cociente entre el valor Pico y el Valor RMS.

$$CF = \frac{Y_{PICO}}{Y_{RMS}} \quad (13)$$

La detección del valor pico-pico se emplea para las mediciones de desplazamiento.

Los detectores de pico y RMS se usan para las mediciones de velocidad y aceleración. La norma ISO 2041 establece las definiciones correspondientes para el valor pico y pico-pico:

1. El valor pico es el valor máximo de una magnitud (aceleración, velocidad, desplazamiento) que varía durante cierto intervalo de tiempo.
2. 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.

3.4.3 Fase de la vibración

Se define fase como la posición de una pieza que vibra en un instante dado con relación a un punto fijo o a otra pieza que vibra.

En la práctica, las medidas de fase sirven para comparar un movimiento vibracional con otro, o determinar cómo vibra una pieza con respecto a otra.

Por ejemplo, las dos pesas de la Figura 3.12 vibran a la misma frecuencia y desplazamiento, pero la pesa "1" se halla en el límite superior del movimiento a la vez que la pesa "2" está en la mitad. Trazando un ciclo completo de movimiento de dichas pesas, y empezando por el mismo momento, vemos que los puntos de desplazamiento pico están separados por 90° (un ciclo completo es de 360°). Así que podemos decir que estas dos pesas están vibrando en desfase de 90° .

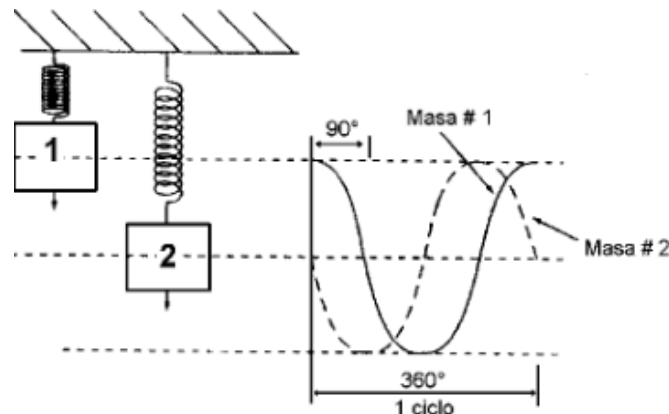


Figura 3.12. Fase de vibración.

3.4.4 Frecuencia natural

Es la frecuencia a la cual vibrará una máquina o estructura cuando esté sometida a una vibración espontánea. Se trata de la frecuencia a la cual una máquina "prefiere" vibrar. Por ejemplo, cuando se toca una campana, esta vibrará a la frecuencia para la cual fue diseñada. La mayoría de las máquinas

y estructuras tienen muchas frecuencias naturales a las cuales vibrarán. Wilbert García González (2011) planteó que cualquier fuerza momentánea provoca la excitación a una o más frecuencias naturales.

3.4.5 Frecuencia de resonancia

Es la frecuencia a la cual se produce la coincidencia entre una frecuencia natural y una frecuencia de inducción. Wilbert García González (2011) indica que por lo general la vibración aumenta a medida que la frecuencia de inducción se acerca a la frecuencia natural, alcanzando su punto máximo cuando ambas coinciden.

3.5 Unidades de vibración

Scheffer Cornelius et. al. (2004) indica que cuando se procede a efectuar la medición de las vibraciones es necesario decidir que magnitud se medirá.

La velocidad es la medida de cuán rápido la superficie vibrante alcanza sus posiciones extremas. El rango de frecuencias efectivo para transductores de velocidad es de entre 10 Hz y 2000 Hz, aproximadamente.

Es claro que la mayoría de las fallas en motores con vibraciones fuera del rango normal, son fallas ocasionadas por problemas de “fatiga” o desgaste de sus componentes; en donde el tiempo requerido para adquirir esta fatiga, está determinado por la distancia a la que se mueve el componente con respecto a un nivel de referencia (desplazamiento de la vibración) y el número de veces por minuto o segundo que lo hace (frecuencia de vibración). Scheffer Cornelius et. al. (2004) dice que por lo tanto, la velocidad de vibración es la medida directa de la fatiga.

$$Fatiga = Velocidad = Desplazamiento \times Frecuencia = \left[\frac{mm}{seg} \right] \quad (14)$$

Debido entonces a que la velocidad de vibración es igual a la fatiga del componente oscilante, los beneficios y ventajas de medir la velocidad de vibración, en lugar de su desplazamiento se enlistan a continuación:

1. La velocidad de vibración indica la fatiga del motor, por lo que se puede determinar qué tan severo es el problema.
2. No es necesario conocer la frecuencia de la vibración para saber el grado de severidad de la falla, debido a que la medida de velocidad ya involucra ese valor.

3. La velocidad de la vibración nos indica el estado del motor, independientemente de que la medida de la frecuencia de la vibración sea simple (sólo una frecuencia) o compleja (varias frecuencias).

El desplazamiento, es la medida de las posiciones extremas de la superficie que vibra. Está relacionado con la frecuencia por lo que cualquier medición de desplazamiento tendrá que ser realizada a una frecuencia específica. El rango de frecuencias efectivo aproximado para transductores de proximidad es de entre 0 y 600 Hz. En el caso de transductores para la medición de desplazamiento por contacto el rango de frecuencias efectivo es de entre 0 y 200 Hz.

La Aceleración, es utilizada para expresar la razón de cambio de la velocidad desde la posición de equilibrio hasta los extremos, teniéndose aceleraciones elevadas a altas frecuencias. Los transductores para la medición de la aceleración de las vibraciones con alta sensibilidad poseen un rango de frecuencias efectivo de entre 0.2 Hz y 500 Hz aproximadamente y los de más baja sensibilidad exhiben un rango de frecuencias de entre 5 Hz y hasta 2000 Hz.

Su unidad de medición son: mm/seg² o m/seg².

Sin embargo, por acuerdo internacional, los niveles de aceleración de la vibración en máquinas rotatorias son expresados en unidades de “G’s” (Constante Gravitacional de la tierra a nivel del mar), donde $1G = 980.9 \frac{cm}{seg^2} = 9.809 \frac{m}{s^2}$.

En la Tabla 3.1 se muestran las unidades más comunes que se utilizan dentro de las características de la vibración.

Tabla 3.1. Unidades comunes de medida.

Características de la Vibración	Sistema Ingles de Medidas	Sistema Métrico o Decimal
Frecuencia	r.p.m. o Hz	RPM o Hz
Desplazamiento	Mills pico a pico	Micras, pico
Velocidad	Pulg/seg rms Pulg/seg pico	Mm/seg rms Mm/seg pico
Aceleración	G pico	G rms
Fase	Grados	Grados

Uso del desplazamiento, velocidad y aceleración.

Las características de la vibración causadas por el desplazamiento, velocidad y aceleración son medidas para poder determinar la severidad de la vibración. Estas características son a menudo definidas como la amplitud de vibración.

Con referencia al funcionamiento de una máquina, la amplitud de la vibración es el primer indicador de la condición de la misma. Cuanto mayor la amplitud la vibración se muestra más grave,

en otras palabras tienes una correlación directa. Sin embargo, el hecho de que la amplitud de la vibración puede ser medida en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración.

La medición de la velocidad está en relación directa con la severidad de la vibración, para la mayoría de los fines generales de medición de la vibración, este es el parámetro de medición favorito para muchos especialistas como lo indica Wilbert García González (2011). En general, las vibraciones que acontecen en la gama de frecuencias comprendida entre 600 y 60,000 rpm se mide mejor utilizando la velocidad de vibración.

La medición del desplazamiento se utiliza en condiciones de esfuerzo dinámicos, el desplazamiento suele ser un mejor indicador de la severidad del problema del motor. Generalmente, la medición del desplazamiento suele tener un mejor funcionamiento como indicador de severidad de fallas a bajas frecuencias, dichas frecuencias suelen ser por debajo de los 600 rpm.

La medición de la aceleración está relacionada con la fuerza, se puede dar el caso en el que existan fuerzas con frecuencias cuyos valores sean muy altos, pero a la vez tener un desplazamiento y una velocidad con valores bajos, por lo tanto, esta medición suele ser el mejor indicador a altas frecuencias (60,000 rpm o más).

3.6 Normas de severidad

Toda máquina está sujeta a ciertos niveles de vibración, sin embargo es importante reconocer si se encuentra dentro de los niveles permisibles.

Una buena base de partida es utilizar los límites de severidad contenidos en publicaciones de organizaciones como American National Standards Institute (ANSI), Asociación Alemana de Ingenieros (VDI) o International Standards Organizations (ISO) en los estándares internacionales ISO10816- 1995, VDI 2056 y la BS4675, en dichas normas se estipula la posición de las mediciones así como los límites máximos permisibles por clase de equipo. Schefter Cornelius & Girdhar Paresh en el 2004 menciona que estos indicadores contemplan la medición del nivel total de Velocidad RMS dentro de un rango de frecuencias específico.

3.6.1 ISO 2372, VDI 2056 y BS 4675: Vibraciones mecánicas de máquinas que operan con velocidad dentro 10 y 200 (rev/seg)

Estos estándares, definen las bases y las reglas específicas a emplear en la evaluación de la vibración mecánica de máquinas que operan entre 10 y 200 (rev/seg). Jaime Fonseca Beatriz Adriana en 2006 indica que las vibraciones consideradas por estos estándares para evaluar la severidad de las

vibraciones, son aquellas medidas en la superficie de las máquinas, sobre sus descansos o en los puntos de montaje, en el rango de frecuencias de 10 Hz a 1000 Hz.

En estos estándares, las máquinas se clasifican según la potencia, el tipo de montaje utilizado y el uso de la máquina. Las clasificaciones según la potencia se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Clasificación de máquinas de acuerdo a su potencia y a su montaje.

Clase	Descripción
CLASE I o K	Máquinas pequeñas con potencia menor a 15 KW.
CLASE II o M	Máquinas de tamaño mediano con potencia entre 15 y 75 KW, o máquinas rígidamente montadas hasta 300 KW.
CLASE III o G	Máquinas grandes con potencia sobre 300 KW, montadas en soportes rígidos.
CLASE IV o T	Máquinas grandes con potencia sobre 300 KW, montadas en soporte flexible.

3.6.2 Evaluación de la severidad vibratoria

Basándose en consideraciones teóricas y experimentales, se define como unidad de medida para cuantificar la severidad vibratoria, el valor RMS de la velocidad de la vibración.

Vibraciones con el mismo valor RMS de velocidad en la banda de frecuencias de 10 – 1000 Hz, se consideran que tiene igual severidad vibratoria. Este estándar considera que se produce un cambio significativo en la respuesta vibratoria, cuando ésta cambia en la razón 1:1.6, como se aprecia en la Figura 3.13. Es decir se estima que se produce un cambio en nivel vibratorio, cuando las vibraciones varían en un 60%.

En base en la Tabla 3.2, podemos establecer los siguientes criterios:

- Incrementos en los niveles de vibración en un 2.5 veces, indican un cambio de condición mecánica del motor.
- Incrementos de los niveles de vibración en 10 veces, constituye un cambio alarmante.

Como guía general, se puede emplear la estrategia mostrada en la Figura 3.14, relacionando los espectros medidos con el espectro de referencia. En otras palabras, se estima que el mejor indicador de la condición mecánica de la máquina viene dado por los cambios relativos que sufren los niveles de vibraciones con respecto a los espectros de referencia de la propia máquina.

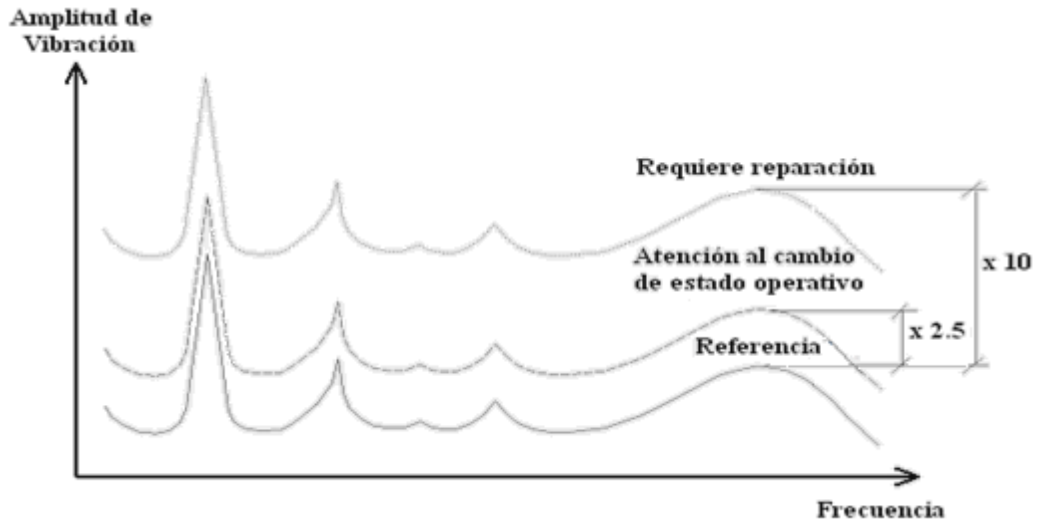


Figura. 3.13. Cambios relativos al espectro de referencia.

3.6.3 Calidad de la vibración

La calidad de la vibración permite tener un parámetro para evaluar cualitativamente una máquina.

Los estándares ISO 2372, VDI 2056 y BS 4675, utilizan los siguientes calificativos para evaluar el estado de la vibración:

- a) Normal
- b) Admisible
- c) Límite
- d) No Permisible

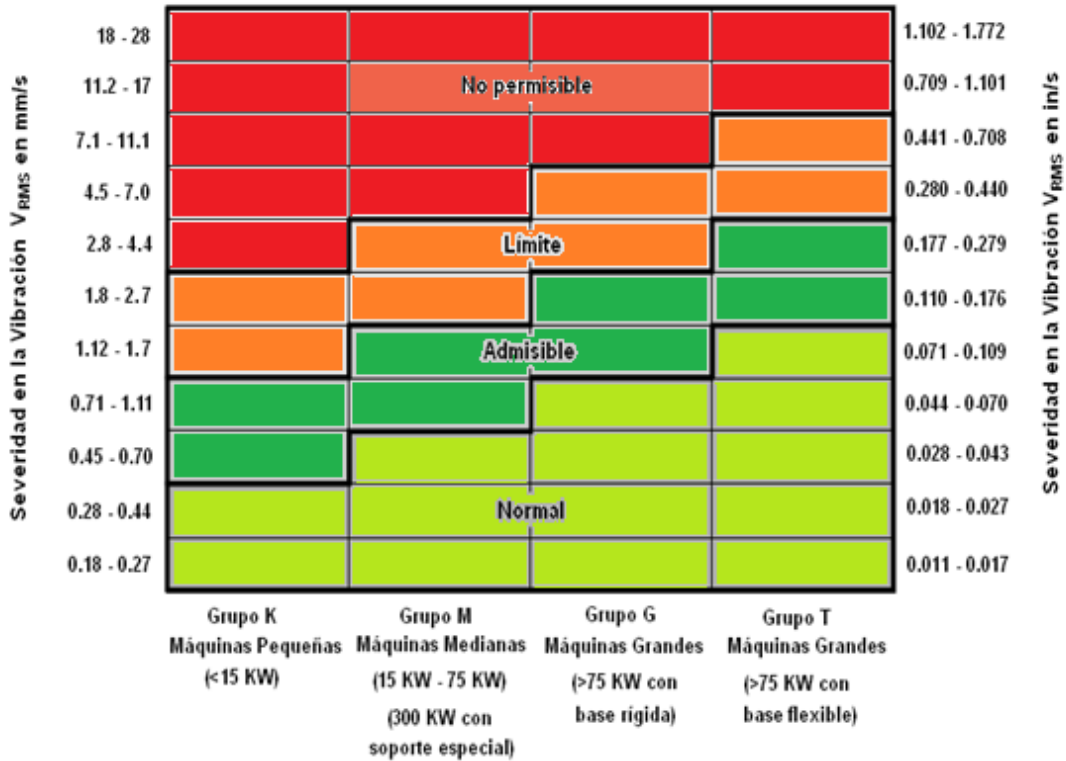


Figura. 3.14. Criterio de severidad de las vibraciones acorde a las normas ISO 2372, VDI 2056 y BS 4675.

3.7 Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo se profundizó en el tema de las vibraciones para conocer sus componentes y así saber cómo analizar sus elementos de forma conjunta o por separado sin la necesidad de utilizar equipos sofisticados y caros, para poder determinar el estado de operación de un motor sin la necesidad de que este falle y su operación se vea interrumpida o el costo de reparación sea elevado. Para ello fue necesario brindar información básica de las vibraciones, tales como su definición, sus características, la relación que tiene con las máquinas rotatorias, su forma de adquisición y sus niveles permitidos basados en las normas ISO.

CAPITULO 4

Arquitectura del sistema distribuido

4.1 Introducción

El avance tecnológico que se ha dado actualmente en el rubro de la computación, sistemas en tiempo o real, adquisición de datos y sobre todo de la instrumentación virtual, ha sido factor decisivo para impulsar de una forma sorprendente en el estudio de diagnóstico de fallas usando señales del medio ambiente, al contar con instrumentos de alta tecnología y sensibilidad que se renuevan constantemente, lo que permite obtener instrumentos de adquisición, acondicionamiento y análisis de mejor calidad a un costo mucho más accesible.

Uno de los puntos importantes en la medición de vibraciones es contar con los elementos adecuados que conviertan las vibraciones mecánicas en señales que puedan ser almacenadas, manejadas y analizadas técnicamente. Uno de los tipos de señales que permiten realizar lo anterior son las señales eléctricas.

De acuerdo a las necesidades de medición y a las características de las vibraciones que se pretenden medir, se seleccionan los instrumentos y los equipos adecuados para llevar a cabo la medición, de manera que se obtengan registros precisos y confiables.

A lo largo de este capítulo se describirá la estructura de la investigación y desarrollo para el sistema propuesto, el módulo de medición de vibraciones, sus especificaciones, los tipos de transductores disponibles para la adquisición de vibraciones mecánicas en motores de inducción, y el hardware usado en el sistema.

4.2 Arquitectura del sistema de medición y análisis de mantenimiento predictivo

El diagrama general de un sistema basado en tecnologías predictivas para el mantenimiento de motores de inducción se dividen en dos partes: a) adquisición de datos y b) Análisis y emisión de diagnóstico.

- a) La adquisición de datos (DAQ), National Instrument (2014) plantea que el DAQ es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura presión o sonido. Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PC's estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable. Los pasos a seguir en esta etapa se muestra en la figura 4.1.

A continuación se describen las etapas de la adquisición de datos.

i) Transductora, Los transductores más comúnmente utilizados para la medición de vibraciones son los *acelerómetros piezoeléctricos*, además de los velocímetros sísmicos o electrodinámicos y los sensores de desplazamiento sin contacto, estos son los encargados de registrar las vibraciones que se ocasionan en el motor en formas de puntos.

ii) Acondicionamiento, la mayoría de los sensores y de los transductores generan señales que deben condicionarse antes de que el dispositivo DAQ pueda adquirir la señal. Este proceso anticipado, designado al condicionamiento de la señal, incluye funciones, tales como suministro de voltaje, corriente de polarización, disminución de impedancia, filtración y amplificación.

iii) Adquisición de datos, es típicamente un dispositivo enchufable a la computadora mediante algún Bus, tal como el DAQ de NI. El dispositivo de adquisición de datos proporciona la capacidad para convertir la señal analógica condicionada a digital. La computadora puede después analizar y presentar la señal condicionada y digitalizada. Nelson Saavedra (2004) nos menciona que la adquisición de datos se hace con alta resolución (mayor de 16 bits), bajo nivel de ruido y con una velocidad de muestreo por canal mayor de 100 Khz.

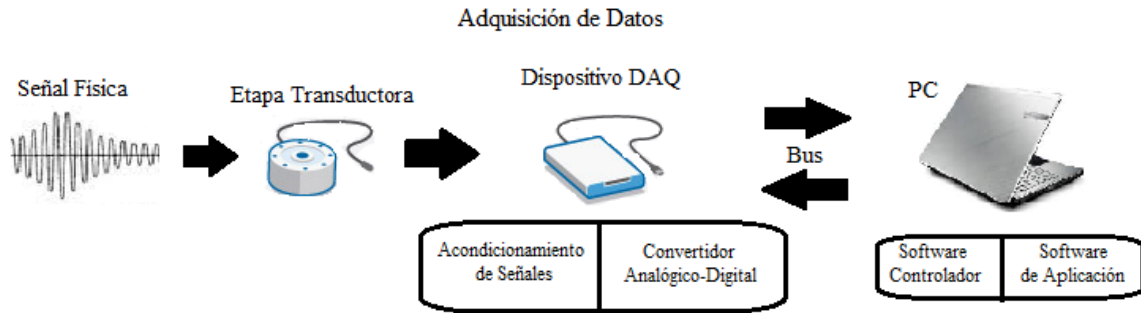


Figura 4.1. Diagrama a bloques de la adquisición de datos para el diagnóstico del motor.

- b) La etapa de Análisis y Emisión de Diagnóstico representa la herramienta de mayor utilidad en el diagnóstico de su estado de funcionamiento. El analista en esta etapa tiene la misión de interpretar, con ayuda de un software, las vibraciones de las máquinas y emitir un diagnóstico respecto de su estado de funcionamiento. Para poder realizar esto con efectividad, es necesario apoyarse en un análisis matemático, un algoritmo que sea capaz de detectar las tres principales fallas de un motor (desbalance, desalineamiento y remolino de aceite) y por último que nos permita emitir un reporte de diagnóstico del estado del motor.
- i. **Análisis matemático**, puede resultar la etapa más difícil del proceso si no se elige el modelo matemático adecuado y de fácil entendimiento. En esta etapa se debe pasar la señal que se encuentra en unidades de aceleración a unidades de desplazamiento mediante una doble integración, una vez que la señal se encuentra en unidades de desplazamiento se deberá filtrar la señal con la finalidad de eliminar los armónicos que ocasionan que la señal sea totalmente distorsionada, esto se logra mediante la utilización de un filtro pasa banda.
 - ii. **Algoritmo de identificación de fallas**, mediante la utilización del software Matlab se creó una red neuronal de propagación hacia adelante y es capaz de detectar las fallas que se quieren.
 - iii. **Reporte de Diagnóstico**, esta etapa es el resultado final del proceso, ya que aquí es donde se emitirá la falla que tiene el motor.

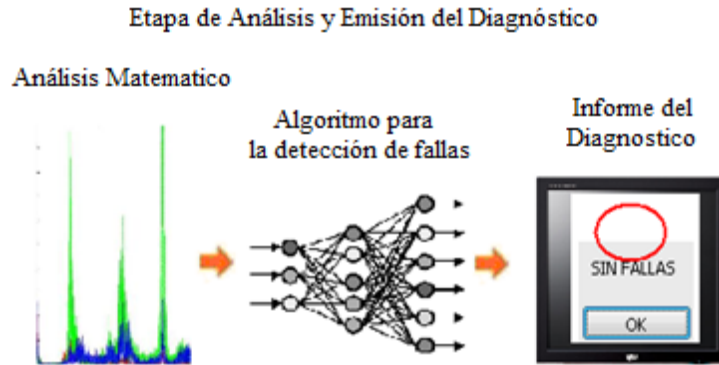


Figura 4.2. Diagrama a bloques del sistema de medición y análisis para el diagnóstico del motor.

4.3 Estructura del sistema propuesto

Mediante la estructura de la investigación y desarrollo del sistema propuesto se espera aumentar el porcentaje de eficiencia del método, que la estructura cuente con una flexibilidad para que en un futuro si se desea agregar o sustituir algún método de reconocimiento de patrones mediante el análisis de órbitas se pueda realizar sin mayor complicación y finalmente que el usuario cuente con una interfaz y un método de fácil comprensión y uso, esta sección se compone de los siguientes módulos:

- a) **Sistema de recolección de datos (medición de las vibraciones).** Nos ayuda a captar las señales de las vibraciones, mediante los acelerómetros piezoeléctricos, que produce el motor cuando está en funcionamiento.
- b) **Almacenar Datos.** Las señales recolectadas en la etapa anterior son guardadas en un archivo de texto para poderlas manipular, utilizar y llevar un historial del motor.
- c) **Estudio de órbitas basado en el análisis de órbitas.** Las órbitas que se grafican con los puntos de las coordenadas de los datos que se almacenaron se analizan para observar la forma de la órbita y determinar en qué condiciones opera el motor.
- d) **Creación de matrices de datos de entrenamiento y prueba.** Las señales que se almacenaron se juntan en un archivo de Excel para formar matrices que después nos servirán para el entrenamiento de la red neuronal y posteriormente hacer una prueba de reconocimiento de fallas.
- e) **Detección de fallas con una red neuronal tipo propagation, por medio de las coordenadas de las órbitas.** Las matrices que se generaron se procesan en la red neuronal para su entrenamiento y posteriormente se utiliza la matriz de prueba para determinar que identifique las fallas de los motores.

El esquema siguiente muestra la metodología sugerida para la detección de fallas en motores de inducción eléctrica presentada en este trabajo de tesis.

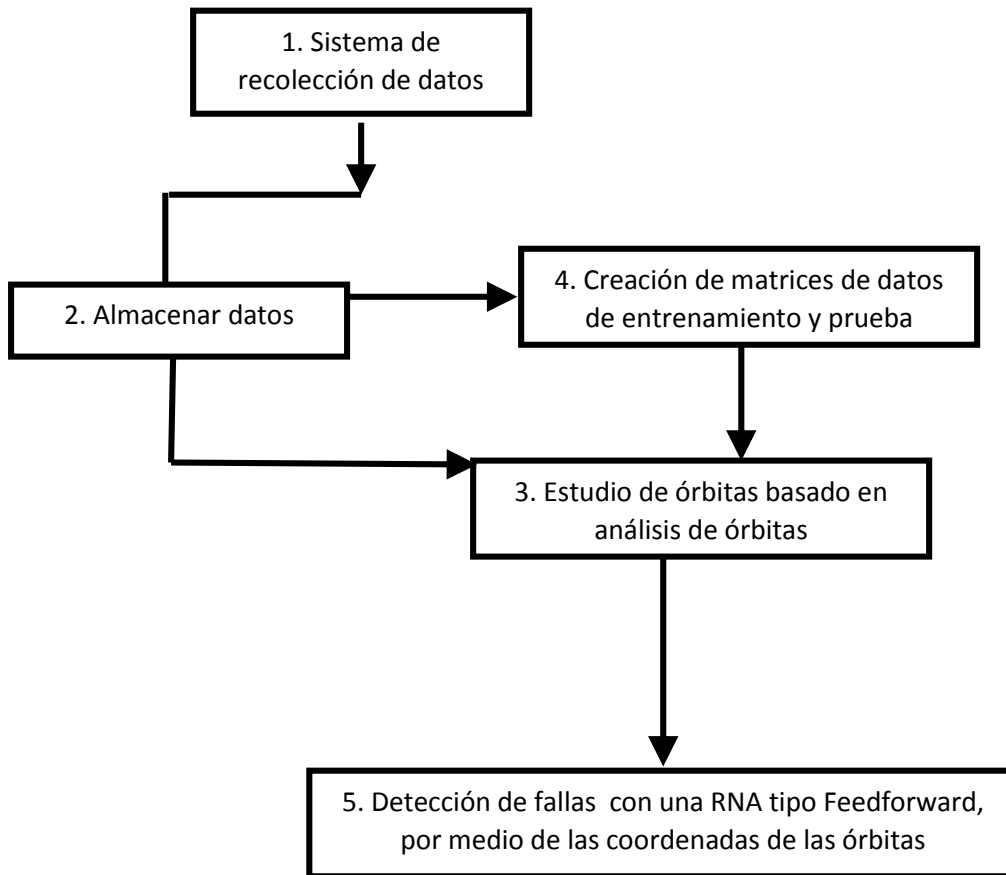


Figura. 4.3. Esquema de la estructura del sistema propuesto.

4.4 Etapa de recolección de datos usado en el sistema propuesto

La etapa de recolección es la fase inicial del proceso del reconocimiento de las fallas en motores de inducción, ya que es donde se recolectan los datos del motor en forma de puntos para posteriormente crear la base de datos, tanto de entrenamiento como de prueba. En la figura 4.3 se muestra el diagrama del sistema que se propone para la recolección de datos, iniciando con el montaje de dos acelerómetros sobre un motor de inducción (las características del montaje se describirán más adelante), tales acelerómetros son conectados mediante cables BNC a un dispositivo de adquisición de datos NI USB 9233 para posteriormente ser transmitidos los datos mediante un cable USB a una laptop de uso común y poderlos procesar mediante el programa LABview o guardarlos en un archivo de texto. El hardware propuesto para la recolección de las mediciones de las vibraciones se muestra en la Figura 4.4.

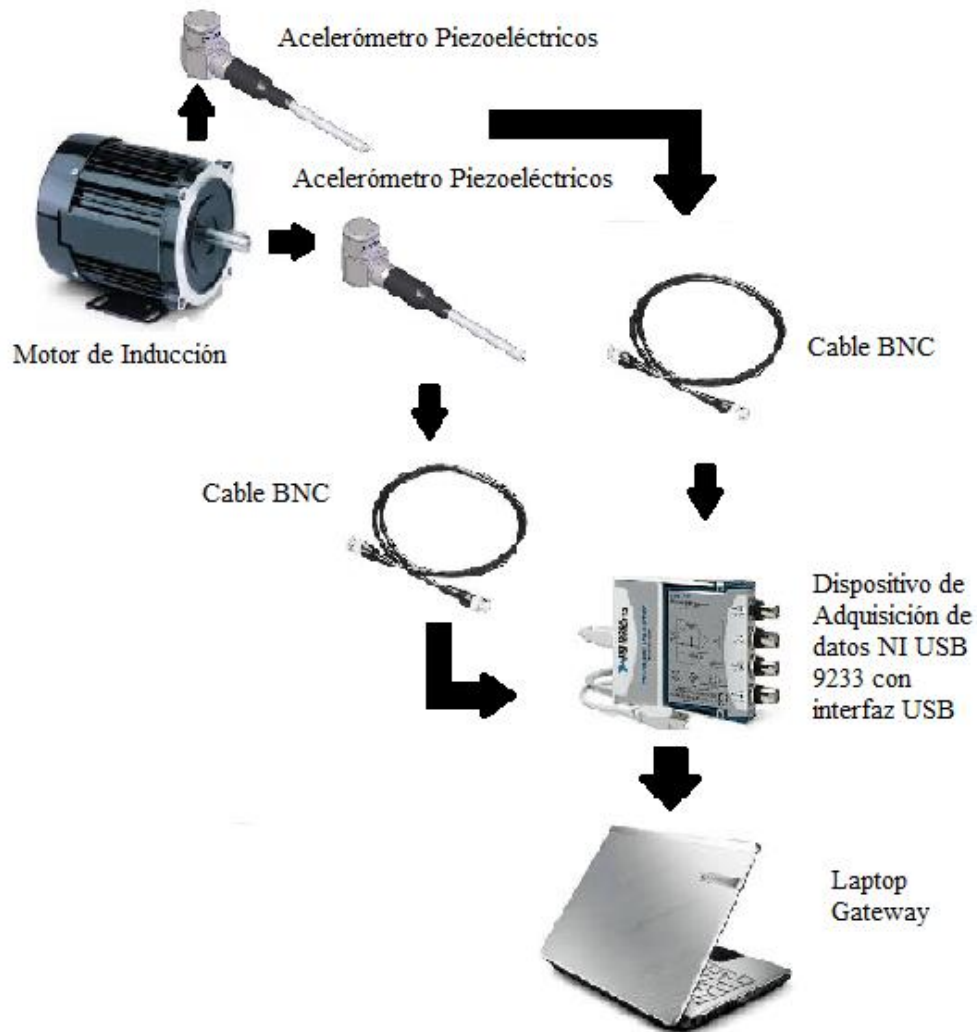


Figura. 4.4. Hardware usado para las mediciones de las vibraciones.

4.5 Transductores

La forma primitiva de observación de las vibraciones se sustenta en el dominio del tiempo. Lo normal es emplear un sensor o transductor como dispositivo capaz de convertir la magnitud que se desea cuantificar en una señal eléctrica que pueda ser leída por otro instrumento. Según la norma ISO 2041 (2014), transductor, es un dispositivo diseñado para recibir energía de un sistema y suministrar energía ya sea del mismo tipo o de otra naturaleza, hacia otro sistema, de forma tal que a la salida del transductor aparezca la característica de interés de la energía de entrada.

Sin embargo, Palomino Marín Evelio (2000) indica que cuando se miden vibraciones con el objetivo de diagnosticar problemas en máquinas y estructuras, el análisis se debe efectuar en el dominio de la frecuencia, para lo cual en forma funcional se emplea un sistema como se muestra en la figura 4.5. Así, la señal eléctrica que entrega el sensor deberá ser acondicionada para luego ser “leída” por la tarjeta de adquisición que presentará la información de forma digital o analógica.

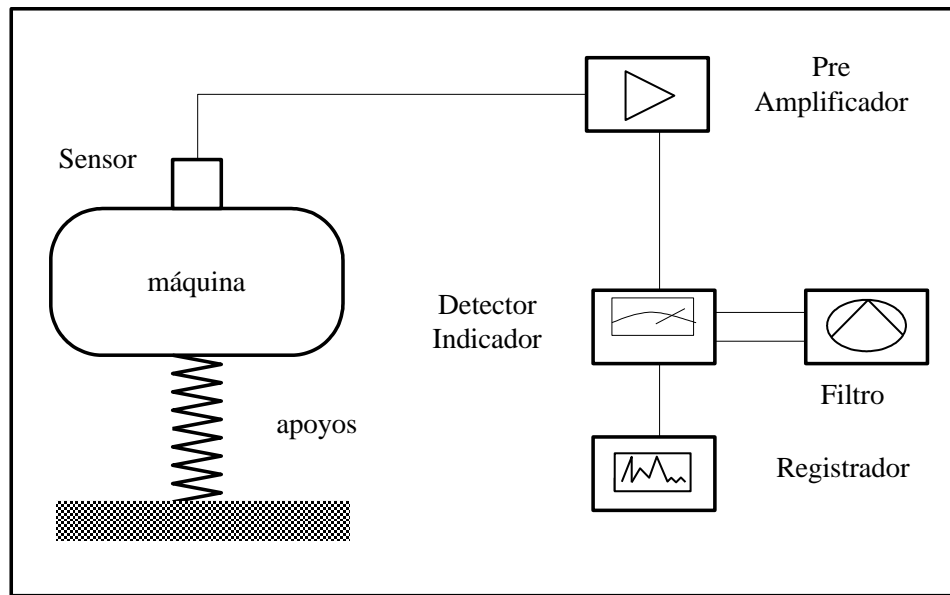


Figura 4.5. Diagrama funcional para la obtención de espectros de vibración.

Un transductor no debe agregar falsos componentes a la señal, y deberá producir señales uniformes en todo el rango de frecuencias que nos interesa. Los tipos diferentes de transductores responden a parámetros diferentes de la fuente de vibración, como se observa en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Diversos tipos de transductores.

Nombre	Sensible a
Sensor de Proximidad	Desplazamiento
Sensor de Velocidad	Velocidad
Acelerómetro	Aceleración

4.5.1 El acelerómetro piezoeléctrico

Este tipo de acelerómetros aprovechan los fenómenos piezoeléctricos en algunos materiales, para generar una señal eléctrica proporcional a la aceleración de la vibración a la que son sometidos. El elemento activo del acelerómetro es un cristal piezoeléctrico pegado a una masa conocida. Un lado

del cristal está conectado a un poste rígido en la base del sensor. En el otro lado se encuentra adjunto un material llamado masa sísmica. Cuando el acelerómetro se encuentra sometido a vibración, se genera una fuerza, la cual actúa sobre el elemento piezoeléctrico. Esta fuerza es igual al producto de la aceleración por la masa sísmica. Debido al efecto piezoeléctrico, se genera una salida de carga proporcional a la fuerza aplicada. Puesto que la masa sísmica es constante, la señal de salida de carga es proporcional a la aceleración de la masa. Palomino Marín Evelio (2000) menciona que sobre un amplio rango de frecuencia, tanto la base del sensor como la masa sísmica tienen la misma magnitud de aceleración, por lo que el sensor mide la aceleración del objeto bajo prueba.

Los acelerómetros piezoeléctricos, son extremadamente versátiles y ampliamente usados para la supervisión de maquinarias industriales. Miden niveles de vibración en micro-g's desde 60 cpm hasta unos 900,000 cpm (1 a 15,000 Hz).

Los acelerómetros piezoeléctricos comparados con otros tipos de transductores de aceleración (resistivos, capacitivos, piezoresistivos, reluctancia, elemento vibrante, servo, etc.), los acelerómetros piezoeléctricos tienen las siguientes ventajas:

- Un rango de medición bastante elevado, bajo ruido de salida
- Excelente linealidad en todo su rango dinámico
- Amplio rango de frecuencias
- Tamaño compacto

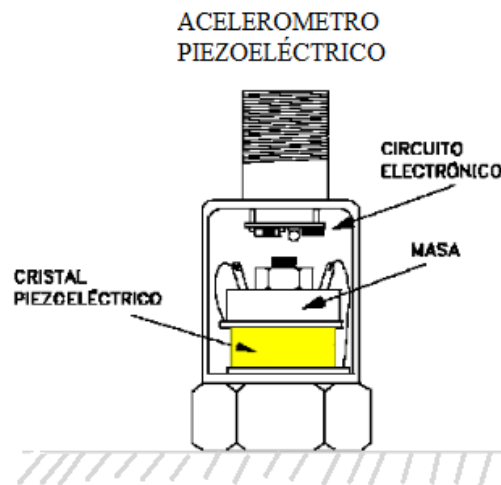


Figura 4.6. Componentes internos de un acelerómetro activo.

4.5.2 Montaje del acelerómetro piezoeléctrico

El elemento sensor primario es la principal fuente de error en una medición, ya que éste es el vínculo entre lo que se desea medir y el instrumento de medición. Por ello, es de vital importancia lograr un montaje adecuado del acelerómetro.

En primera instancia, debe quedar claro que la máxima sensibilidad del acelerómetro estará dada en la vibración que lo excite en su dirección axial, lo que conduce a una sensibilidad del 100%. Sin embargo, Palomino Marín Evelio (2000) indica que cuando se excita transversalmente, la sensibilidad es menor del 4% aproximadamente, dependiendo del fabricante.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta que la zona que mejor refleja las vibraciones de una maquinaria es aquella cercana a los apoyos de los elementos rotatorios o en su defecto, aquellos puntos donde el medio de transmisión de las vibraciones sea la más directa. Es decir, debemos colocar los acelerómetros lo más cerca posible a la línea de centro del cojinete para evitar recoger señales distorsionadas. Como se muestra en la figura 4.7.

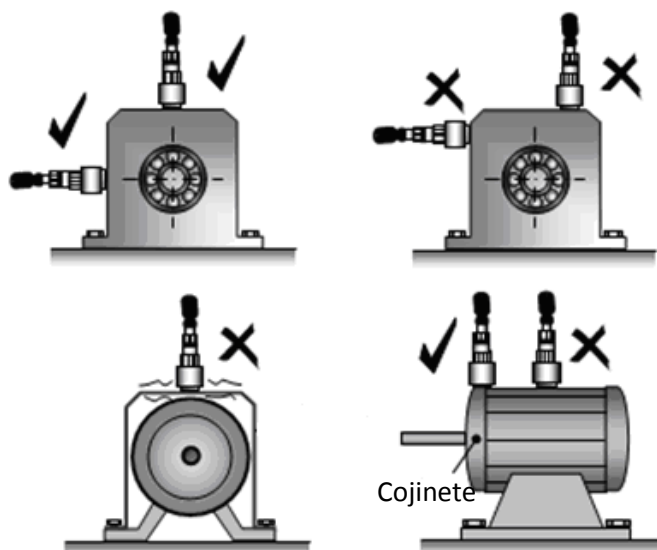


Figura. 4.7. Imagen que muestra que se deben de fijar los acelerómetros lo más cerca de los cojinetes.

4.5.3 Orientación de los acelerómetros

Diferentes situaciones requieren que los acelerómetros sean orientados de diferentes formas, por ejemplo, para detectar desalineamiento, el acelerómetro es usualmente montado en dirección radial del cojinete, pero para detectar desalineamiento angular los acelerómetros deben estar montados en dirección axial. Commtest (2006) menciona que la señal producida por el acelerómetro es dependiente de la orientación en la cual el acelerómetro es montado, como se ve en la figura 4.8.

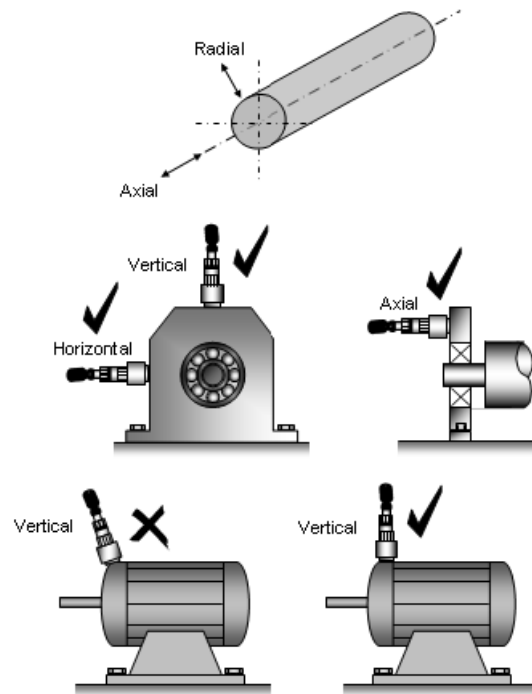


Figura. 4.8. Orientación correcta de los acelerómetros para realizar mediciones.

4.5.4 Fijación del acelerómetro en la misma ubicación para la toma de mediciones

Para la medición en un punto en particular es importante que siempre se coloque el acelerómetro en la misma ubicación para minimizar mediciones inconsistentes que nos puedan conducir a erróneas conclusiones, de ser posible usar el mismo acelerómetro para un punto en particular. Como se ve en la figura 4.9.

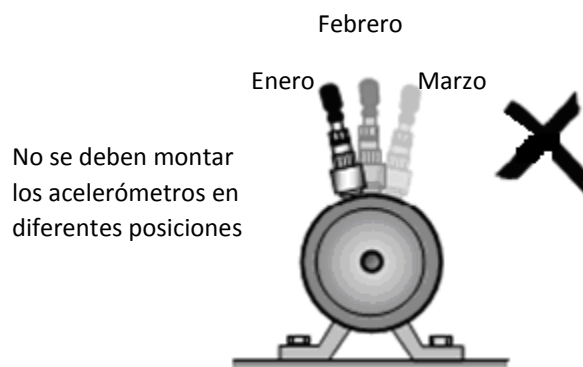


Figura. 4.9. Forma de montar el acelerómetro en diferentes meses.

4.5.5 Ubicación de los acelerómetros X, Y para obtener una órbita del motor

Si lo que queremos es obtener la órbita de movimiento dinámico del eje de rotor entonces se tienen que fijar dos acelerómetros ortogonalmente. Como se muestra en la figura 4.10.

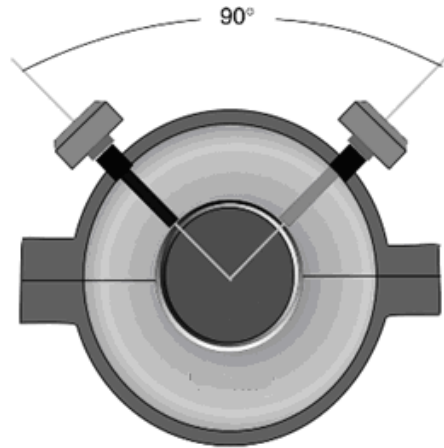


Figura. 4.10. Fijación de dos acelerómetros sobre el cojinete del motor.

4.5.6 Montaje del acelerómetro piezoeléctrico

El acelerómetro piezoeléctrico puede ser fijado a la superficie donde se desea efectuar la medición con la ayuda de diferentes elementos tales como: el perno de acero, la cera de abeja, el imán permanente, pegamentos y el conocido puntero.

En dependencia del elemento de fijación empleado se podrá contar con una mayor o menor aprovechamiento del rango de frecuencias del acelerómetro durante la medición.

- **Montaje con perno de acero**

Se emplea para medir vibraciones en una banda de altas frecuencias, para lo cual se requiere garantizar una frecuencia de resonancia alta. También se emplea para el monitoreo permanente de las vibraciones en maquinarias y estructuras.

Este método garantiza un desempeño óptimo del acelerómetro por lo que deberá ser usado siempre que sea posible. Este tipo de montaje no limita el rango de temperatura del acelerómetro permitiendo la medición de altos niveles de vibraciones.

Requiere de cierto tiempo para la preparación de la superficie de montaje así como para el taladrado y roscado del agujero.

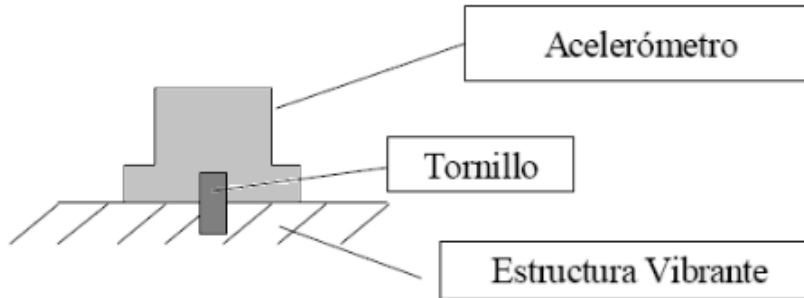


Figura 4.11. Montaje con perno de acero.

- **Montaje con cera de abeja**

Este método es empleado para realizar mediciones rápidas, cuando no es posible taladrar la superficie de medición o cuando se utilizan acelerómetros que no poseen agujeros roscados en su base.

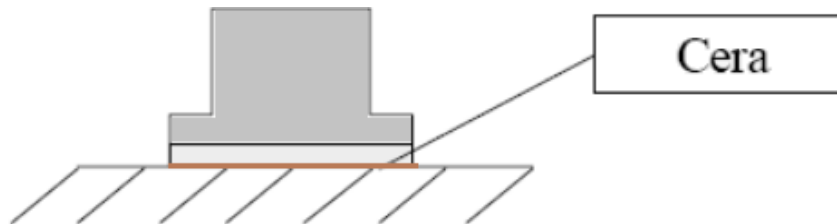


Figura 4.12. Montaje con cera de abeja

- **Montaje de dispositivo magnético**

Este método exige de una limpieza total de la superficie de montaje así como del menor nivel de rugosidad posible. La rapidez del montaje hace de este método una vía ideal para la realización de mediciones preliminares durante la selección de los posibles puntos de medición para sistemas portables. Puede medir niveles altos de aceleración.

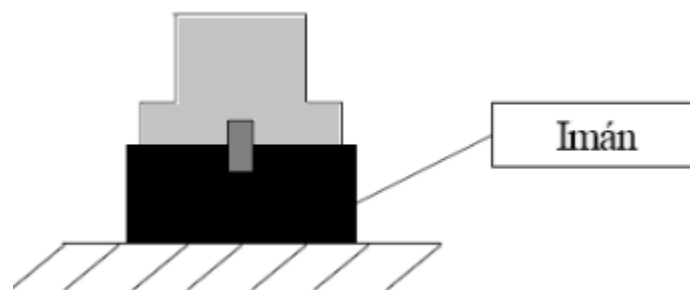


Figura 4.13. Montaje con dispositivo magnético.

4.6 Adquisición de datos

a) Sensor y sistema de fijación

El sensor utilizado para la construcción del sistema fue el MA11 de la marca Honeywell, con una frecuencia de operación ubicada en el rango de 2 Hz – 10 kHz.

El MA11 es un acelerómetro piezoeléctrico con cubierta inoxidable y con sistema de fijación magnética, con las siguientes especificaciones:

Tabla 4.2. Especificaciones de los acelerómetros piezoeléctricos.

Sensibilidad	Rango dinámico	Vías de voltaje	Rango de Corriente	Montaje
99.4 mV/g ±10%	±80 g.	11.00 V	0.5 mA – 0.8 mA	¼" -28 UNF Female

Detalles de conexión

Cable blanco: +ve Supply/Signal

Cable negro: Tierra = 0 Volts

Este tipo de acelerómetros son alimentados por un acondicionador de señales dinámicas, las cuales amplifican la señal del acelerómetro para poder ser registrada en el equipo de adquisición de datos. (Ver Apéndice A).



Figura 4.14. Acelerómetro piezoeléctrico MA11 (Cortesía de *Honeywell*).

b) Conectores BNC

Los conectores BNC se utilizan para conectar el acelerómetro piezoeléctrico MA11, hacia el acondicionador de señales.



Figura 4.15 Cables BNC.

c) NI USB 9233

Para la adquisición de las medidas de vibraciones mecánicas en el motor de inducción se utiliza la herramienta de programación gráfica LabVIEW 2013 Express, con la utilización de la tarjeta de adquisición de datos NI USB 9233 de National Instruments, ilustrada en la figura 4.16.

Esta tarjeta está específicamente diseñada para la adquisición de señales de sonido y vibraciones. Cuenta con un software de aplicación que funciona para señales asociadas con acelerómetros, micrófonos y algunos otros tipos de transductores con un rango dinámico amplio.

La ventaja es que esta tarjeta nos permite muestrear hasta 4 entradas analógicas simultáneamente hasta 50ks/s además de contar con filtros anti-aliasing variable, además de que su Bus es mediante USB haciendo más fácil la transferencia de datos entre la tarjeta y la computadora. A continuación se muestra una tabla de comparación con otras tarjetas, basada en las características que se mencionan en la página de LABview 2014.

Tabla 4.3. Especificaciones de la tarjeta de adquisición de datos NI USB-9233

Tarjeta	Bus	Resolución ⁿ de entrada (Bit)	Rango Dinámico (dB)	Muestras tomadas por canal	Entradas Análogas	Rango de entrada	Ganancias	Soporte de TEDS	Salidas Análogas
NI USB- 9233	USB	24	120	50kS/s	4	$\pm 5.4V_{peak}$	n/a	No	0

Entre sus características mencionamos algunas como:

1. Velocidad de muestreo de 50kS/s por canal. donde Ks = Kilosamples.
2. Resolución de entrada de 24 bits.
3. Voltaje de entrada de +/- 10 mV a +/- 42.4 mV.
4. Medidas simultáneas de tiempo y frecuencia.
5. Bus Usb de alta velocidad.



Figura 4.16. Tarjeta de adquisición NI USB-9233.

4.7 Montaje experimental

La vibración es un síntoma común derivado de fallas mecánicas en los motores de inducción. Tales vibraciones pueden medirse utilizando un sensor de acelerómetro piezoeléctrico, que genera una señal eléctrica que es proporcional a la vibración de la aceleración de una masa sísmica. Como cada motor tiene una velocidad de rotación diferente, de acuerdo a las normas como la ISO 10816 (1995) y VDI 2056 (1964) han establecido tasas de frecuencia de muestreo para la medición del motor. Según ellos, este trabajo utiliza una frecuencia de muestreo de 50 kHz, siendo lo suficientemente grande como para obtener una señal de buena calidad y evitar el aliasing en los motores de inducción probadas.

La señal de la vibración producida por un acelerómetro dependen de su orientación. Con el fin de medir los patrones orbitales, dos acelerómetros piezoeléctricos se colocaron en el chasis del motor cerca de cada eje (x, y). Una vibración orbital del rotor se puede medir si los acelerómetros se colocan ortogonalmente (figura 4.17).

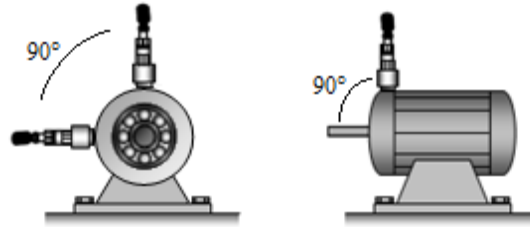


Figura 4.17. Acelerómetros colocados a 90° entre ellos sobre el motor.

Una vez que los acelerómetros se colocan correctamente, se obtienen las señales de las vibraciones. Estas señales están contaminados con otras señales indeseables y deben ser eliminados con el fin de extraer la órbita que se utilizará; la siguiente sección se explica este importante proceso.

4.8 Conclusiones del capítulo

En dicho capítulo se explicó la arquitectura del hardware que se propuso para la recolección, preprocesamiento y estudio de los datos de las señales de los motores, dividiéndolo en dos secciones, para un fácil estudio de las señales. En la primera etapa consta de la adquisición de datos y el proceso que se debe de llevar a cabo para que dichas señales se puedan manipular con cualquier computadora. La segunda etapa consistió en la descripción de los pasos que se deben de seguir para poder estudiar las señales y posteriormente poder utilizar una red neuronal como clasificador de fallas.

Dentro del capítulo se describen los elementos que componen el sistema del hardware (acelerómetros, tarjeta de adquisición de datos, etc.) para saber sus especificaciones de cada uno de los componentes. Y de igual forma se describe y se dan los diferentes tipo de montajes de los acelerómetros piezoeléctricos, se explica cual debe de ser la forma correcta para montar los acelerómetros piezoeléctricos para la obtención de buenos resultados, en caso de que no se siguieran las recomendaciones que se dieron durante el capítulo se podría tener errores que afectarían nuestro proceso.

CAPITULO 5

Modelo de detección de fallas

5.1 Preprocesamiento de datos

Las órbitas de las señales se construyen utilizando dos señales de vibración, que se trazan en un plano (x, y) del gráfico. Se necesita un tratamiento de preprocesamiento de señal para evitar los efectos indeseables tales como ruido o frecuencias espurias. En primer lugar, las señales de vibraciones medidas son preprocesadas por separado con el fin de preservar sus características particulares. La forma de la órbita se construye utilizando señales de desplazamiento; sin embargo, como un acelerómetro mide vibraciones en unidades de aceleración $a(t)$, las señales deben estar representadas en unidades de posicionamiento. Este proceso se puede realizar cuando la aceleración de una señal se transforma en velocidad y luego en el desplazamiento mediante la integración de la señal de aceleración en el dominio del tiempo usando las siguientes ecuaciones.

$$v(t) = \int_0^t a(t)dt + v_0 \quad (15)$$

$$x(t) = \int_0^t v(t)dt + d_0 \quad (16)$$

donde $a(t)$, $v(t)$ y $x(t)$ son la aceleración, velocidad y desplazamiento de la señal; v_0 y d_0 son los valores de la velocidad y el desplazamiento inicial respectivamente.

La señal de la vibración cuando está en unidades de desplazamiento se ve agravada por varios armónicos; cada uno puede estar relacionado con la operación normal del motor o con un fallo del

motor. Los armónicos no deseables pueden distorsionar la forma de la órbita (Figura 5.1), cambiando en particular la principal característica de una forma de fallo. En este sentido, esos armónicos deben evitarse a fin de tener una órbita de buena calidad. Un filtro digital es un sistema que realiza operaciones matemáticas en una señal muestreada, discreta en el tiempo para reducir o mejorar ciertos aspectos de esa señal. Un filtro digital se caracteriza por su función de transferencia, o de equivalencia. El análisis matemático de la función de transferencia (h) puede describir cómo se va a responder a una entrada específica. El diseño de un filtro consiste en el desarrollo de especificaciones adecuadas al problema y luego producir una función de transferencia que cumpla con estas especificaciones. La siguiente expresión define la ecuación del filtro utilizado para la limpieza de la señal de desplazamiento:

$$s(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)x(n-k) \quad (17)$$

donde $s(n)$ es la señal filtrada y $h(k)$ es la función de transferencia. Hay varias maneras para expresar una función de transferencia; sin embargo, en la descripción del dominio de la frecuencia $h(k) \rightarrow H(\omega)$, muestra la respuesta del filtro de aislar una banda de armónicos deseables. En este trabajo, un filtro de pasa banda Butterworth se llevó a cabo para la eliminación de los armónicos espurios de acuerdo con la siguiente respuesta de magnitud.

$$|H(\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{c - \cos \omega}{\Omega_0 \sin \omega}\right)^{2N}} \quad (18)$$

donde $\omega = 2\pi f/f_s$, f_s es la frecuencia de muestreo, $\Omega_0 = \tan(\omega_0/2)$ y c se puede expresar de la siguiente manera:

$$c = \frac{\sin(\omega_{pa} + \omega_{pb})}{\sin \omega_{pa} + \sin \omega_{pb}} \quad (19)$$

donde $\omega_{pa} = 2\pi f_{pa}/f_s$, $\omega_{pb} = 2\pi f_{pb}/f_s$ y $[f_{pa}, f_{pb}]$ es el pasa banda.

Este trabajo utiliza una frecuencia de paso de banda de 10 Hz; este valor es suficiente para proporcionar una buena calidad en la forma de la órbita, para la eliminación de los armónicos no deseados. La banda de paso del filtro se ajusta a la frecuencia fundamental de la señal medida (ω_0).

La figura 5.1 muestra un ejemplo de una órbita de una vibración medida directamente de un motor de inducción y el efecto del filtro pasa banda utilizado en las mismas señales. En este caso, las órbitas no filtradas no pueden capturar el comportamiento de una falla de un motor debido a que sus formas se distorsionan por los efectos armónicos no deseados. Una vez que se retiraron los armónicos, el fallo del motor se puede observar con claridad (Figura 5.1).

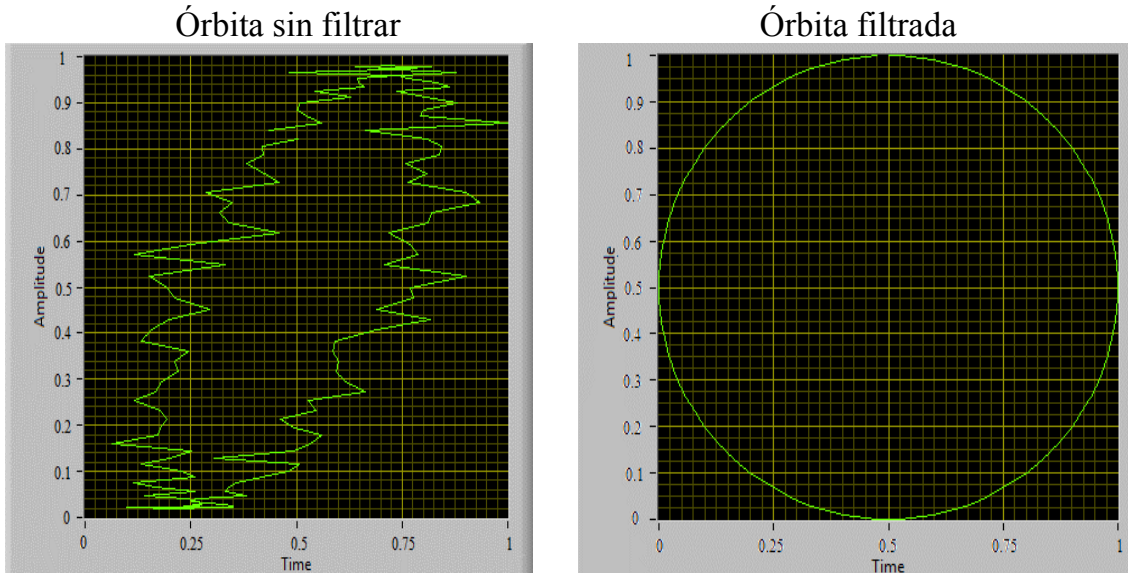


Figura. 5.1. Ejemplo de una órbita filtrada y una sin filtrar utilizando el filtro Butterworth para remover los armónicos.

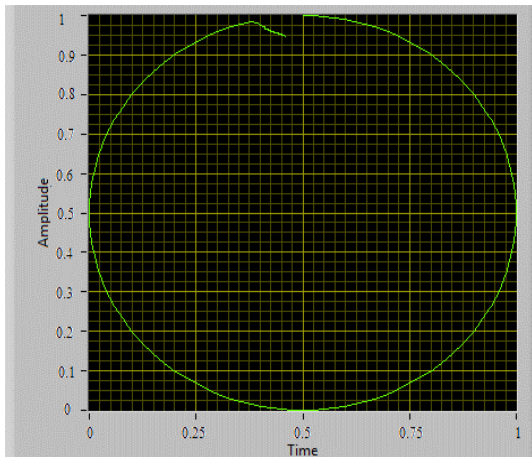
Cada señal filtrada genera órbitas de forma continua con la misma simetría; Sin embargo, sólo una órbita es suficiente para identificar un fallo de motor. En este caso, es importante obtener una órbita cerrada y completa a fin de evitar un patrón distorsionado donde la característica principal del fallo se puede perder (Figura 5.2). El procedimiento para la extracción de una órbita está buscando el inicio y fin, que la distancia entre ellos sea la mínima, definido por una tolerancia. No hay una regla específica para el establecimiento de esa tolerancia; sin embargo, este valor debe ser suficiente pequeño para obtener buenas formas de órbitas. Para fines prácticos, esta tolerancia se calcula determinando la media distancia de todos los puntos en la señal. En este caso, el criterio de la distancia se obtuvo utilizando la ecuación euclidiana como sigue:

$$\bar{d} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (20)$$

donde \bar{d} es la distancia promedio entre los puntos, y (x, y) son los puntos de las coordenadas de las órbitas respectivamente. Finalmente, las órbitas extraídas deben ser normalizadas debido a sus diferencias en sus tamaños. Por lo tanto, todas las órbitas cambian de tamaño en un $[-1, 1]$ y varían de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$s'_{1,2}(n) = \frac{s_{1,2}(n)}{\max\{|s_1(n)|, |s_2(n)|\}}, \quad \forall n = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (21)$$

Órbita Abierta



Órbita Cerrada

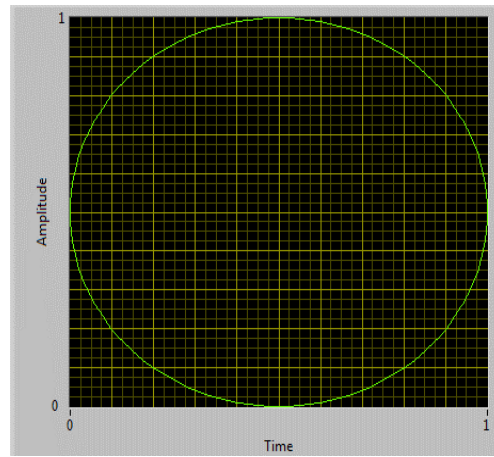


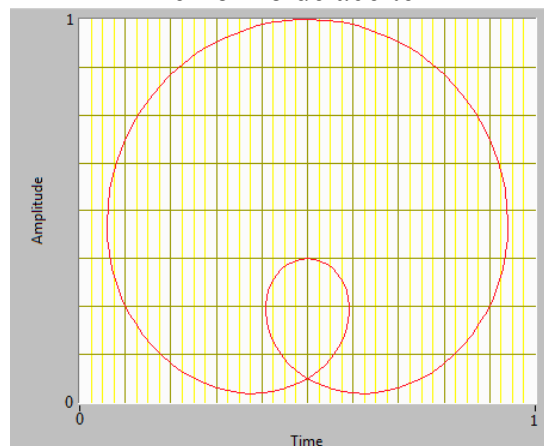
Figura 5.2. Una órbita cerrada se debe de obtener con el fin de preservar las características principales del fallo del motor.

5.2 Simulación de órbitas

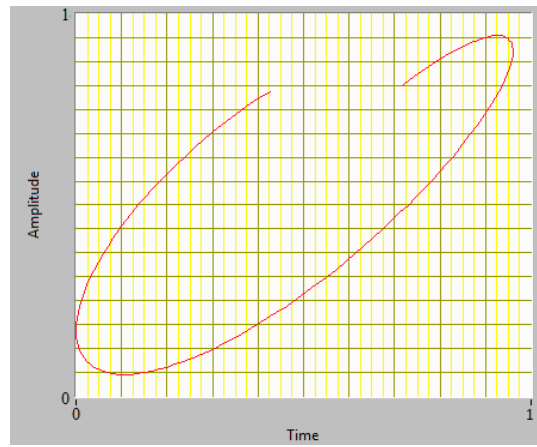
a) Características principales

Las formas de las órbitas tienen correspondencia con los fallos de motor de inducción. De acuerdo con esas fallas descritas anteriormente, las órbitas tienen algunas características específicas que pueden ser útiles para la identificación de patrones. La figura 5.3, muestra las formas más representativas para los defectos descritos, en los que una forma circular perfecta representa una buena condición del motor, y la forma elíptica corresponde a un fallo de desbalance, una elipse distorsionada corresponde a un desalineamiento, y por último si la órbita presenta dos elipse, una dentro de ella y la del interior más pequeña se habla de una falla de remolino de aceite. Es importante remarcar que el nivel de un fallo distorsiona significativamente la órbita.

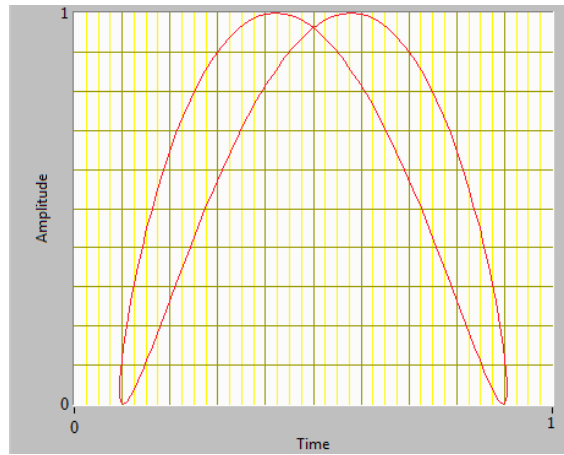
Remolino de aceite



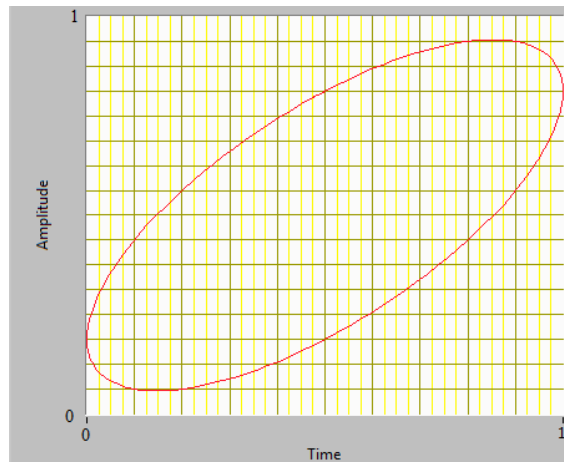
Desalineamiento



Desalineamiento extremo



Desbalance



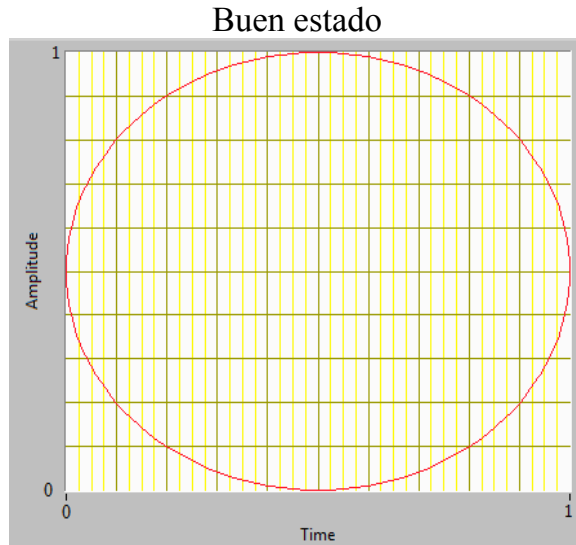


Figura. 5.3. Ejemplo de formas de órbita que corresponden a diferentes fallos de motor

b) Simulación de órbitas empleando LabVIEW

Para la simulación de las órbitas con fallas nos apoyamos en LABview, la programación consta de los siguientes pasos.

- A. Se crean dos señales, cada una de ellas corresponde al “eje x” y “eje y”, tal y como se hace cuando se mide en los motores con un ángulo de 90° , cada señal se le puede modificar la amplitud, fase y el número de ciclos.
- B. A una de las señales se le añade ruido gaussiano en donde se podrán manipular tres parámetros: muestras (cantidad de patrones que se desean por eje), desviación (Cantidad de ruido que se le aplicara a la señal) y semilla (tiene que estar en -1 ya que así nos aseguramos que el ruido sea de forma aleatoria).

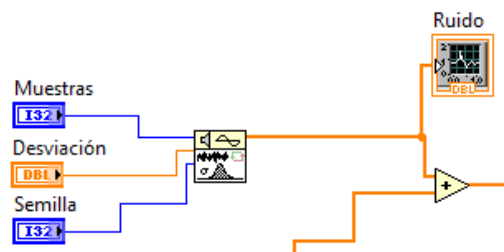


Figura 5.4. Incorporación de ruido gaussiano a una de las señales.

C. Las señales de ambos ejes se normalizan antes de ser juntadas para ser graficadas.

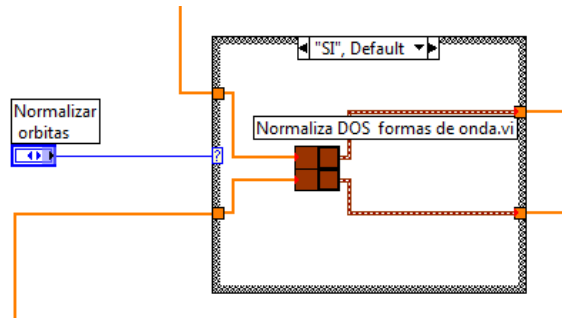


Figura 5.5. Normalización de los datos de las señales.

D. Ya normalizadas las señales, se juntan para ser graficadas y ser guardadas en la ruta que se indica en la figura.

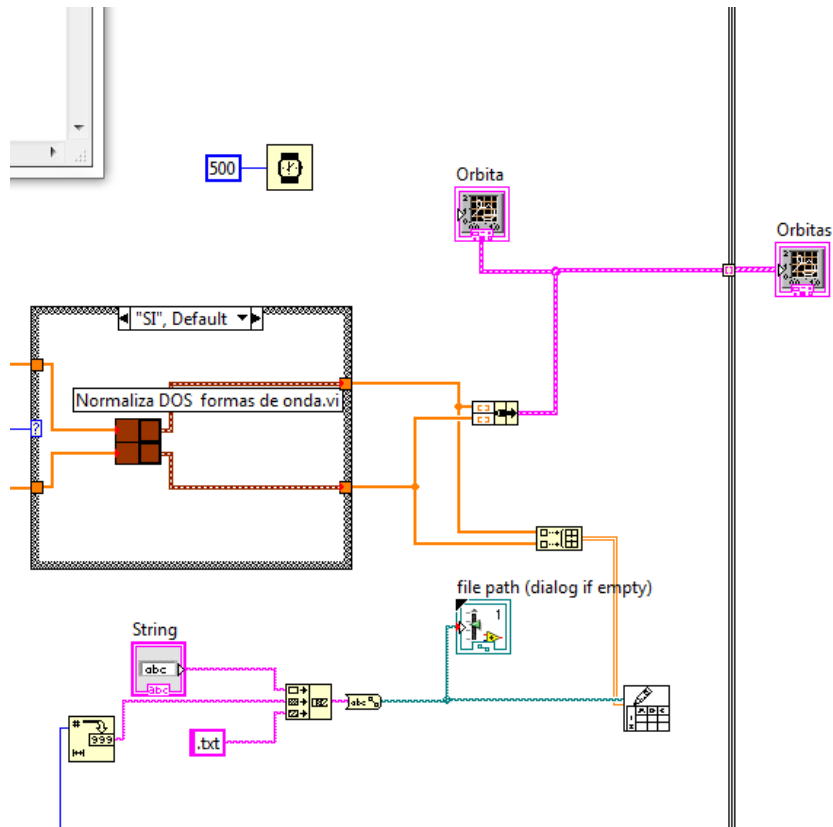


Figura 5.6. Esquema de proceso de guardado de señales producidas.

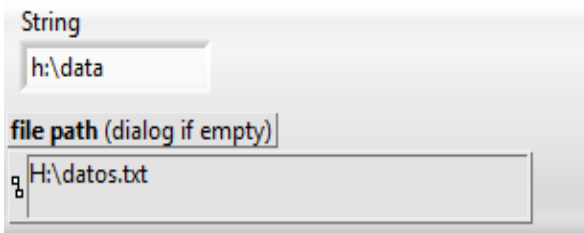


Figura 5.7. Ruta donde se desea guardar el archivo de texto que contiene los puntos.

- E. Se podrá seleccionar entre las tres principales fallas (remolino de aceite, desbalance y desalineamiento extremo), se podrán modificar los parámetros de forma individual sin afectar o modificar los valores de las otras fallas.

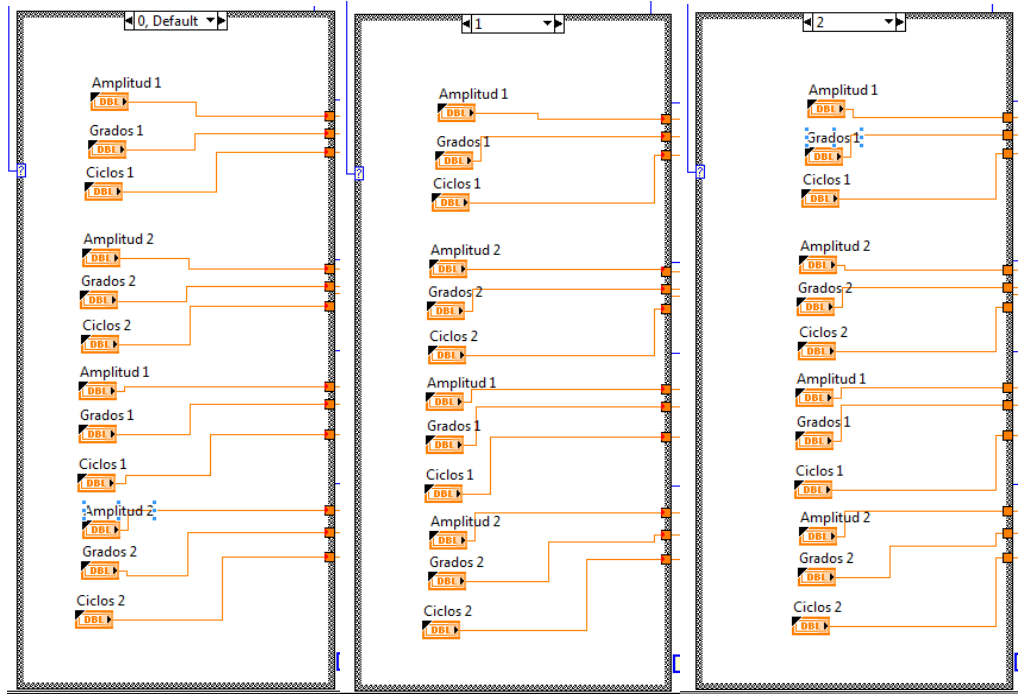


Figura 5.8. Controles de los parámetros de cada una de las fallas.

A continuación se describirá la parte visual, la cual consta de tres ventanas donde se mostrarán los gráficos de las órbitas resultantes.

- F. En estas ventanas nos permite visualizar de forma individual las señales de los ejes “x” y “y”.

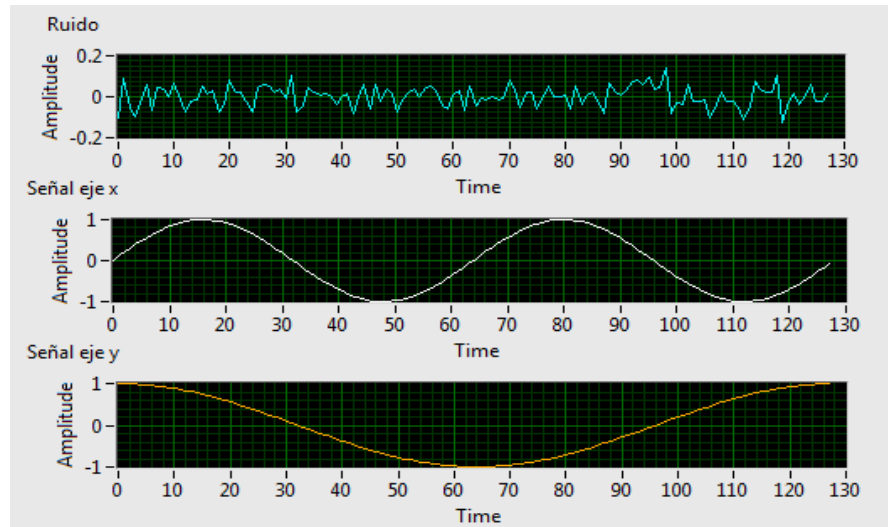


Figura 5.9. Diagrama de las señales de los ejes (x, y).

- G. En la parte superior de las ventanas anteriores se muestra el ruido gaussiano que se le introduce a la señal, siendo proporcional al valor de la desviación.

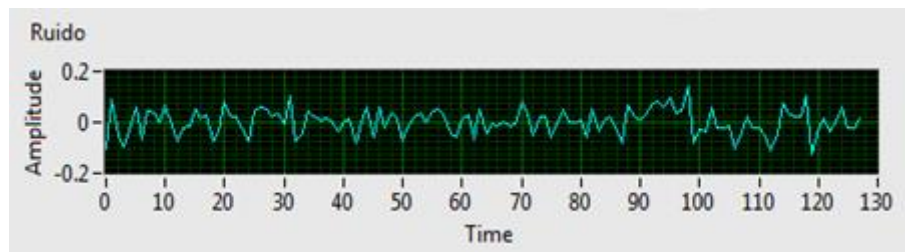


Figura 5.10. Diagrama del ruido con el que se contamina la señal de la órbita.

- H. En la ventana de órbita se muestra la órbita que se genera en una iteración y en la ventana de órbitas las órbitas formadas en todo el ciclo.

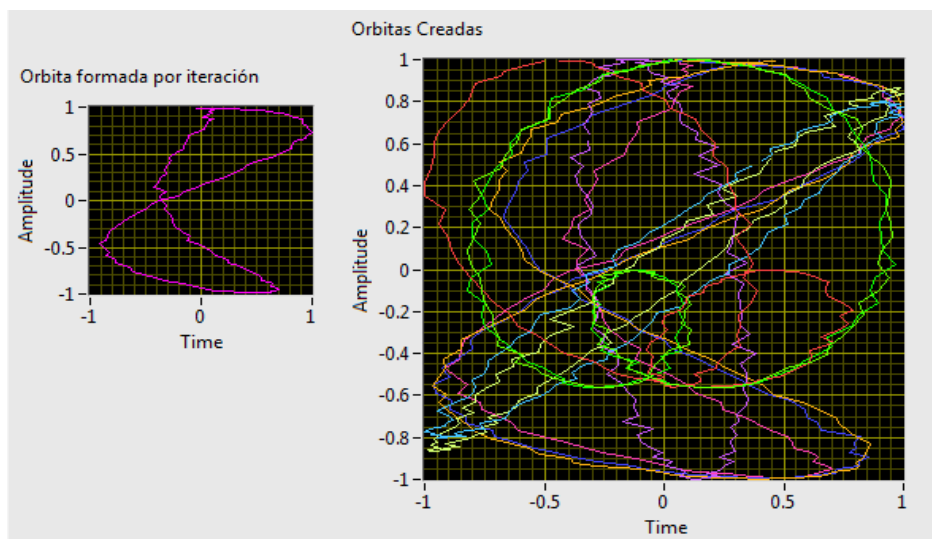


Figura 5.11. Pantalla que muestra el resultado de las órbitas de las fallas que se simularon y de forma individual.

- I. Esta opción nos permite ver las órbitas que se forman de cada una de las fallas.

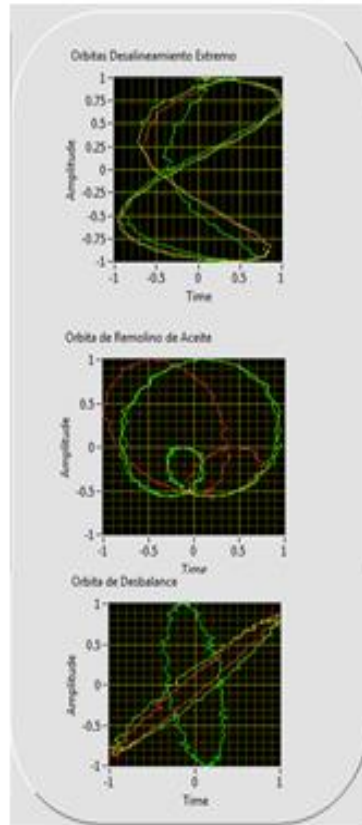


Figura 5.12. Pantalla donde se muestran las órbitas que se simula de las fallas.

- J. Existe la opción de normalizar la órbita, según como se necesite.

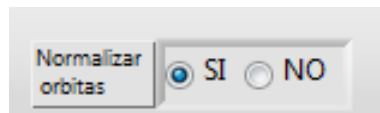


Figura 5.13. Opción que nos permite normalizar las órbitas simuladas.

- K. En estos campos se especifica el número de muestra que se desean de cada falla.

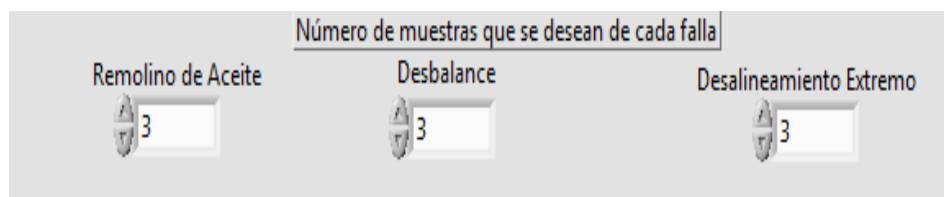


Figura 5.14. Campo para determinar el número de fallas que se desean simular.

- L. Los siguientes campos se ocupan para la manipulación de los ciclos, amplitudes y fases de los ejes “x” y “y”. Por consecuente la forma de la órbita se verá afectada según el campo que modifiquemos.

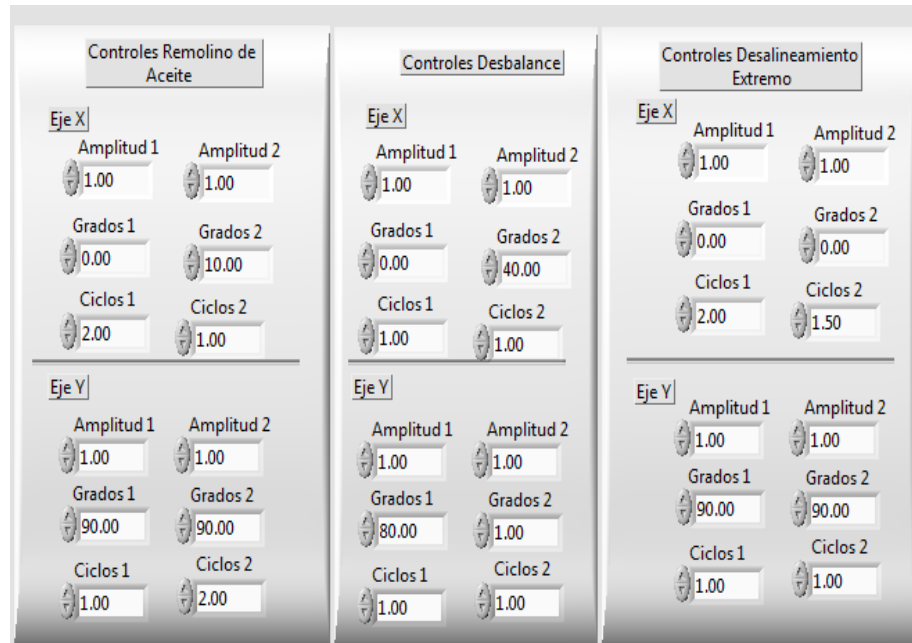


Figura 5.15. Controles principales de los parámetros que modifican las órbitas simuladas.

M. En este conjunto de campos se relaciona con el ruido, la cantidad de muestras y el número de patrones que tendrá cada muestra.



Figura 5.16. Parámetros principales del ruido gaussiano.

5.3 Modelo neuronal

a) Arquitectura de la red neuronal artificial

Hay varias técnicas para el reconocimiento de patrones que se pueden utilizar para la identificación de las formas de las órbitas. En este trabajo, las Redes Neuronales Artificiales (RNA) se utilizan como clasificadores, porque han demostrado ser un modelo de aprendizaje muy eficaz con las altas tasas de eficacia. La arquitectura RNA que mejor ajusto con el contexto del problema era de [256-90-4]. En este caso, las entradas se fijaron en 256 neuronas, donde el primer medio es para el eje X y la otra mitad para el eje Y. El número máximo de épocas es de 1000, donde se utilizan para el entrenamiento de la red neuronal que tiene un M.S.E. (por sus siglas en inglés Mean Square Error en español es el error medio cuadrático) de 1×10^{-10} . La capa oculta se ha inicializado entre 20 y 180 neuronas secuencialmente, donde 90 neuronas fue la configuración con mejores resultados. Fueron utilizados tres conjuntos para evaluar el rendimiento de la RNA (dividiendo la base de datos de entrenamiento

para diferentes propósitos en el proceso de formación); una dentro del conjunto para el algoritmo de entrenamiento (180 patrones de los datos disponibles para entrenar), un conjunto de validación (38 patrones de los datos disponibles) y una prueba final fijada para evaluar el rendimiento final del algoritmo (38 patrones de los datos disponibles), con coeficientes de correlación (r) de 0.998, 0.989 y 0.995, respectivamente. El proceso de entrenamiento que utiliza el aprendizaje de la RNA fue el algoritmo de Levenberg-Marquardt.

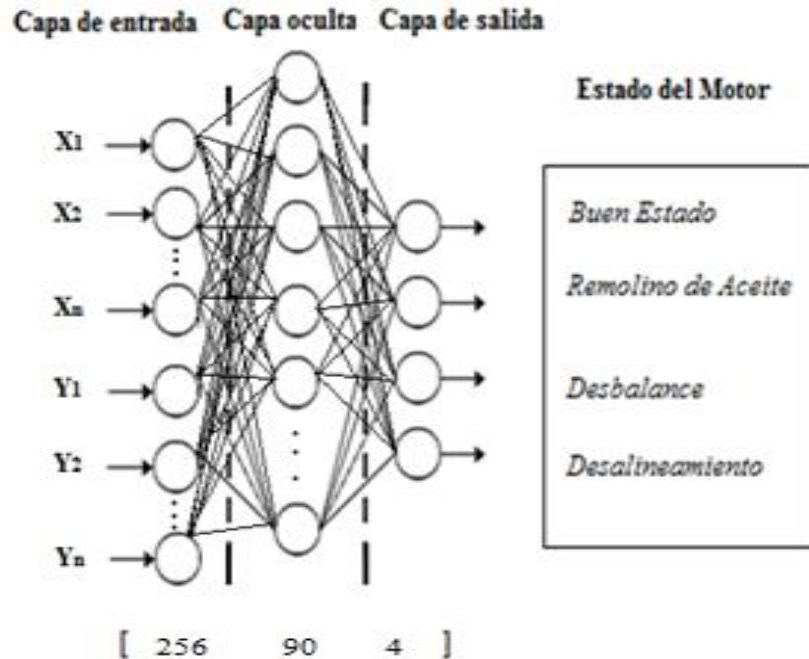


Fig. 5.17. Arquitectura de la red neuronal para clasificar fallas en motores de inducción, donde X_n y Y_n son igual a 128 patrones.

Para poder realizar las pruebas de entrenamiento se utilizó la base de datos con las fallas simuladas a fin de probar el software que se creó para la simulación de las fallas, además de que no se tenían señales reales con las suficientes fallas para realizar la prueba.

Los pasos que se siguieron durante la fase de prueba del entrenamiento del clasificador (red neuronal) consistió en ocupar la red que se encuentra en Matlab, poniendo en la pantalla principal de trabajo la instrucción `nprtool`, se desplegó automáticamente un menú donde nos da una pequeña introducción de cómo se compone la red, como siguiente paso se introdujeron las matrices de las señales y los target, este último se utilizó para poder diferenciar las fallas y que la red neuronal las pudiera clasificar mediante este. A continuación se eligió el porcentaje de patrones que se deseaba destinar para cada sección y se definía el número de neuronas que se pondrían en la capa intermedia. Finalmente se entrenó la red y como consiguiente se obtuvieron los datos de los recursos que se

ocuparon (número de épocas, tiempo de entrenamiento los gradientes), en esta sección el dato que nos interesa es saber el M.S.E. (Error Medio Cuadrático) y ahí mismo nos indica el mejor rendimiento de la validación y en que época fue, tal como se muestra en la figura.

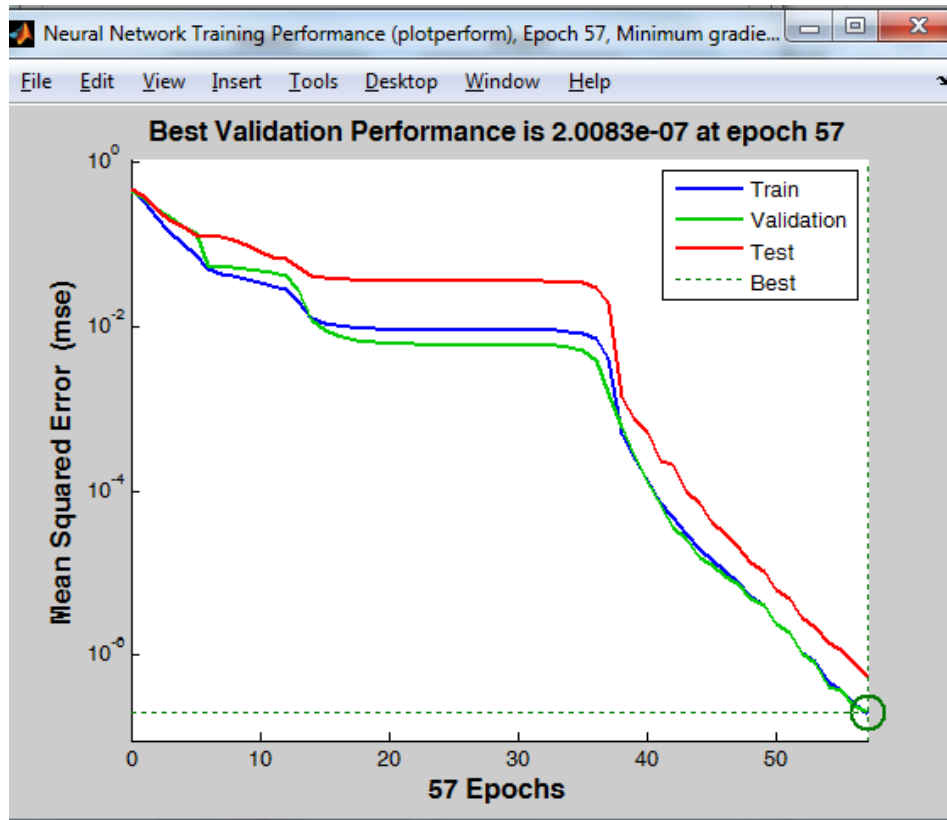


Figura. 5.18. Error del entrenamiento de la red neuronal.

Otro de los datos importantes que se nos brinda al final de la prueba es la matriz de confusión donde nos indica la cantidad de patrones que se pudieron identificar, así como la cantidad de patrones a los que no logro recordar, es aquí la importancia de elegir bien la cantidad del porcentaje para cada una de las secciones ya que también de eso dependerá el desempeño de la red neuronal, en este caso se eligió el 15% de los patrones para emplearlos en la validación y el resto en el reconocimiento de estos mismos. En nuestra prueba se alcanzaron buenos resultados ya que el rango en el que se manejó la eficiencia fue entre el 90 y el 100%, indicándonos que las fallas se encuentran bien definidas y que el entrenamiento se realizó de la forma correcta, los resultados que nos entregó la red neuronal se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Resultados del reconocimiento de los fallos del motor utilizando la base de datos de aprendizaje.

Falla del Motor	<i>Número de patrones</i>	Reconocimiento		<i>Número de patrones</i>	Validación	
		Patrones recordados	Eficiencia		Patrones recordados	Eficiencia
Buen estado	7	7	100%	3	3	100%
Desbalance	70	68	97.14%	20	18	90%
Desalineamiento	60	59	98.33%	20	20	100 %
Remolino de Aceite	121	119	98.34%	69	65	94.02%

CAPITULO 6

Resultados experimentales

6.1 Base de datos

La base de datos que se utilizó para realizar las pruebas finales es independiente a la base de datos que se manejó durante el entrenamiento, ya que las órbitas simuladas se les agregó diferentes niveles de ruido.

Las señales simuladas se realizaron con la adición de ruido gaussiano, dicho ruido empezó con el 5% y fue incrementado de 5% en 5% hasta llegar a 45% de ruido, con el objeto de medir el rendimiento y la tasa de confusión de la red neuronal.

La base de datos de prueba está constituida por 335 patrones de los cuales 5 patrones corresponden a un motor en buen estado, 90 patrones a motores con desbalance, 160 patrones tienen el fallo de remolino de aceite y 80 patrones con desalineamiento. Cada una de las señales cuenta con 256 muestras de las cuales la mitad (128) corresponden al eje X y la otra mitad al eje Y, quedándonos una matriz de 256×335 para realizar pruebas.

6.2 Pruebas de reconocimiento

Una base de datos experimentales se construyó y se utilizó para validar el rendimiento del sistema propuesto como parte de un proceso de recuperación. Esta base de datos se construyó utilizando diferentes tipos de motores, con diferentes niveles de ruido y diversos niveles de falla. Es importante

remarcar que esta base de datos se vio agravado por diferentes mediciones de motor a comparación con las utilizadas en la base de datos del proceso de aprendizaje. En este caso, el tamaño de la base de datos fue de 335 patrones de fallo, de los cuales se dividieron como sigue: 80 patrones de desequilibrio, 90 patrones de desalineamiento, 5 patrones de motores en buen estado y 160 patrones de motores con remolino de aceite.

La red neuronal se ha creado usando la base de datos de entrenamiento y se puso a prueba con la base de datos experimental con patrones de desequilibrio y diferentes intensidades. En la evaluación se extrajeron las señales de los motores reales con historia de fracaso. La tabla muestra los resultados del proceso de recuperación de la base de datos propuesta. Un segundo experimento se usa la base de datos experimental contaminada con ruido gaussiano que tienen resultados interesantes, en los que un bajo porcentaje de patrones son mal clasificados.

Tabla 6.1. Resultados del reconocimiento de los patrones orbitales con la base de datos que están contaminados con ruido gaussiano del 5 al 15%.

Falla del Motor	Número de patrones	5%		10%		15%	
		Patrones recordados	Eficiencia	Patrones recordados	Eficiencia	Patrones recordados	Eficiencia
Buen estado	5	5	100%	5	100%	5	100%
Desbalance	90	89	98.88%	90	100%	88	97.77%
Desalineamiento	80	80	100%	79	98.75%	79	98.75 %
Remolino de Aceite	160	159	99.38%	160	100%	159	99.38%

Tabla 6.2. Resultados del reconocimiento de los patrones orbitales con la base de datos que están contaminados con ruido gaussiano del 20 al 30%.

Falla del Motor	Número de patrones	20%		25%		30%	
		Patrones recordados	Eficiencia	Patrones recordados	Eficiencia	Patrones recordados	Eficiencia
Buen estado	5	5	100%	5	100%	4	80%
Desbalance	90	89	98.88%	90	100%	87	96.66%
Desalineamiento	80	80	100%	75	93.75%	78	97.50%
Remolino de Aceite	160	159	99.38%	157	98.125%	158	98.75%

Tabla 6.3. Resultados del reconocimiento de los patrones orbitales con la base de datos que están contaminados con ruido gaussiano del 35 al 45%.

Falla del Motor	Número de patrones	35%		40%		45%	
		Patrones recordados	Eficiencia	Patrones recordados	Eficiencia	Patrones recordados	Eficiencia
Buen estado	5	5	100%	4	80%	3	60%
Desbalance	90	87	96.66%	85	94.44%	75	83.33%
Desalineamiento	80	78	97.5%	76	95%	70	87.50%
Remolino de Aceite	160	153	95.62%	130	81.25%	150	93.75%

6.3 Discusiones y Trabajo Futuro

Como se puede observar los datos que se mostraron en las tablas del último capítulo se nota que el porcentaje del error es mínimo, esto se logra utilizando la arquitectura adecuada de la red neuronal, sin importar la cantidad de ruido que se les incorpore a cada una de las señales.

Como se sabe en la industria existen diversas maquinarias trabajando a la par, todas estas generan vibraciones provocando que al momento de que se midan las señales a través de los acelerómetros piezoeléctricos el ruido de otra máquina se mezcle con el propio haciendo que la señal se contamine, tomando en cuenta este hecho, es que el experimento y la simulación de los patrones se realizaron con un incremento del 5% de ruido (empezando con el 5% hasta llegar al 45% de ruido) para asemejar las condiciones que se pueden encontrar en la realidad, siendo un factor importante el ruido, ya que conforme el ruido aumenta las señales se distorsionan provocando que el porcentaje de error vaya en aumento dependiendo del tipo de falla con los que se comparan.

Una de las desventajas con las que cuenta nuestro sistema es que el ajuste del número de neuronas se debe de hacer manualmente, consumiendo un poco de tiempo en lo que se encuentra la arquitectura correcta.

En un futuro se podrían hacer mejoras al trabajo entre ellas se encuentran:

- Realizar un algoritmo neuroevolutivo para que el ajuste de las neuronas se haga de forma automática entregándonos mejores resultados además de ahorrar tiempo.

- Crear un sistema cliente servidor donde al usuario final únicamente se le notifique el tipo de falla y los posibles componentes del motor que produzcan esas fallas.
- Crear un sistema de reconocimiento de fallas mediante puntos particulares de las órbitas, aumentando la eficiencia de reconocimiento sin importar la cantidad de ruido gaussiano.
- Utilizar la extracción de rasgos con el fin de minimizar los tiempos de identificación de fallas.
- Detectar dos o más fallas que se encuentren mezcladas en una órbita.

Conclusiones

1. Se cumplieron los objetivos, tanto general como en los específicos, planteados y mencionados en el capítulo 1, a su vez quedo demostrada la hipótesis, ya que no solo se pudieron modelar las fallas mediante las señales que capturan los acelerómetros piezoeléctricos, sino que también se pudieron modelar las órbitas que generan cada una de las fallas y mediante un clasificador (red neuronal) se pudieron identificar dichas fallas.
2. Mediante el hardware que se diseñó en este trabajo se brinda una opción más a la industria de poder realizar un programa de mantenimiento a sus motores con un costo bajo y sin la necesidad de contar con un experto en vibraciones.
3. En la actualidad los sistemas de detección de fallas utilizan preprocesamiento de señales difíciles de realizar o los algoritmos de detección de fallas que utilizan suelen ser complicados para el usuario, a comparación del algoritmo de preprocesamiento y el algoritmo de detección de fallas que se utilizó en este trabajo.
4. El análisis de fallas de señales reales, mediante el análisis de órbitas, nos permitió conocer cómo es que se forman las órbitas y por lo tanto, crear un software que es capaz de simular las fallas mediante puntos de coordenadas y que estos últimos se guarden en un archivo de texto para poder elaborar bases de datos de prueba o de experimentación con diversos niveles de ruido.
5. Mediante el diseño de una red neuronal como clasificador se observó que el porcentaje de error en las pruebas experimentales es mínimo además de que sin importar el número de fallas que se quieran identificar lo único que se deberá hacer es aumentar o disminuir el número de neuronas de la capa intermedia.

Referencias

- [1] A-MAQ S.A., Análisis de Maquinaria, Tutorial de Vibraciones para Mantenimiento Mecánico, Enero 2005.
- [2] Benbouzid, M. E. H., A Review of Induction Motors Signatura Análisis as a Médium for Fault Detection, IEEE, Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 5, Octubre 2000, pp. 984 – 993.
- [3] Carvajal, F., Ramírez J., Arcos L., Diagnóstico en Línea y Fuera de Línea de Motores de Inducción de Baja, Mediana y Alta Tensión., Boletín IEE. Marzo 1999, pp. 90-96.
- [4] Commtest, The Revolution, Beginner’s Guide to Machine Vibration, Commtest, The Revolution, Junio 2006.
- [5] Davaney Michael J., Levent Eren, Detecting Motor Bearing Faults, IEEE, Instrumentation & Measurement Magazine, Diciembre 2004.
- [6] Estupiñan P. Edgar, Saavedra Pedro, Técnicas de Diagnóstico para el Análisis de Vibraciones de Rodamientos, Universidad de Concepción Chile, 2006.
- [7] Forland, Clair, Why Phase Information is Important for Diagnosing Machinery Problems. Orbit., Bently Nevada Corporation, 1999. pp. 29 – 31.
- [8] Hua Su, Hill to Chong, Condition Monitoring for Electrical Failures in Induction Machina using Neural Network Modelling of Vibration Signal, IEEE, Internacional Conference on Computational Intelligence for Measurement System and Applications, Italia, Julio 2005, pp. 156 – 161.
- [9] Jaime Fonseca Beatriz Adriana, Detección de Fallas en Motores de Inducción, mediante Análisis de Vibraciones, Tesis, Centro de Investigación, CIC-IPN, México, Junio 2006.
- [10] JFG DE Freitas, Al Stevens, AP Gaylard, JN Ridley, CF Landy, Identification of Vibration Structures and Fault Detection Using Neural Networks, IEEE, paper 0-7803-3210. Mayo 1996.
- [11] Kulichevsky R., Sacchi M., Ghiselli A. Martín, Medición y Análisis de Vibraciones: Una Herramienta para la Predicción y Evaluación de Fallas en Maquinarias, Estudio y Ensayo de Componentes Estructurales U. A. ENDE – Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina. Julio 2000.
- [12] Kyung-Ho Ha, Jun-Pyo Hong, Guy-Tak Kim, Ki-Chan Chang, Ju Lee, Orbital Analisis of Rotor Due to Electromagnetic Force for SWitched Reluctante Motor, IEEE, Transactions On Magnetics, Vol 36, No. 4. Julio 2000. pp. 1407 – 1411.
- [13] National Instruments, LabVIEW, “A Graphical Programming Language to Create Applications”, National Instruments, USA, 2002.
- [14] Nei Brito Jorge, Pederiva Robson, A Hybrid Neural/Expert System to Diagnose Problems in Induction Motors, UFSJ – UNICAMP. Brazil. Abril 2004.

- [15] National Instruments, Order Analysis Toolkit User Manual, Reliability World Latin América 2013.
- [16] Nelson Saavedra Pedro, La Medición y Análisis de las Vibraciones como técnica de Inspección de Equipos y Componentes, Aplicaciones, Normativas y Certificación, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Concepción Chile. Abril 2003.
- [17] Nelson Saavedra Pedro, Estupiñán P. Edgar, Impacto del Mantenimiento Proactivo en la Productividad, Universidad de Concepción Chile. Junio 2004.
- [18] Nelson Saavedra Pedro, Molina Vicuña Cristián, La Evolución y Perspectiva del Mantenimiento Predictivo proactivo en la Industria, VI Congreso Panamericano de Ingeniería de mantenimiento. Septiembre 2004. México.
- [19] O. Duque, M. Pérez, D. Moríñigo, Detección de Fallos en Motores de Inducción alimentados por Convertidor empleando el Análisis del Espectro de la Corriente de Alimentación, XVI Reunión de Grupos de Investigación de Ingeniería Eléctrica (XVIRGIIE), Mallorca, España. Abril 2006
- [20] Palomino Marín Evelio, La Medición y el Análisis de Vibraciones en el Diagnóstico de Máquinas Rotatorias, División de Ingeniería de las Vibraciones y Diagnóstico. Cuba 2000.
- [21] Parra Suárez O. A., Palomino Marín Evelio, Calibración de un filtro antialiasing para la medición de vibraciones en maquinarias y estructuras, Centro de Estudios e Innovación y Mantenimiento. División de Ingeniería de las Vibraciones y Diagnóstico, Cuba 2000
- [22] PatentView / EP392185, Patent of Automatic Orbit Analysis Using Neural Network
- [23] Pintor Borobia Jesús Ma., Elementos de Máquinas y Vibraciones, Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales, Universidad Pública de Navarra. 2000.
- [24] R. Hilera José, Martínez Víctor J., Redes Neuronales Artificiales, Fundamentos, Modelos y Aplicaciones, Editorial Alfaomega. 2000.
- [25] Royo Jesús A., Rabanaque Gloria, Torres Fernando, Análisis de Vibraciones e Interpretación de datos, DIDYF Universidad de Zaragoza, Guemisa. Junio 2006
- [26] Shi Dongfeng, Qu Lianfsheng, Bao Ming, Instantaneous purified Orbit: A new Tool for Análisis of Nonstationary Vibration of Rotor System, Internacional Journal of Rotating Machinery 2001, Vol. 7, No. 2. pp. 105 – 115
- [27] Sanna Pöyhönen, Support Vector Machine Based Classification in Condition Monitoring of Induction Motors, Helsinki University of Technology Control Engineering Laboratory, Report 141, Espoo. Junio 2004.
- [28] Santamaría Hólek Ricardo, Aspectos Clave para un Exitoso Programa de Monitoreo de Vibraciones y la Norma ISO 13374-1, Reliability World Latin América 2005.
- [29] Schefter Cornelius, Girdhar Paresh, Machinery Vibration Analysis & Predictive Maintenance, Editorial Elsevier 2004.
- [30] Siam – FLEX, Sistema Avanzado de Monitoreo Flexible Módulo Palas, Laboratorio de Vibraciones Mecánicas, Universidad de Concepción, Chile 2005

- [31] Sitao Wu, Tommy W. S. Chow, Induction Machine Fault Detection Using SOM – Based RBF Neural Networks, IEEE, Transactions on Industrial Electronics, Vol. 51, No. 1, Febrero, 2004, pp. 183 – 194.
- [32] SKF Microlog, Colector de datos / analizador FFT portátil Serie GX, 2006
- [33] Tian Han, Bo-Sukk Yang, Jong Moon Lee, A new Condition Monitoring and Fault Diagnosis System of Induction Motors using Artificial Intelligence Algorithms, IEEE, 0-7803-8987-5/05, 2055. pp. 1967 – 1974.
- [34] Tranter Jason, The Challenges of Automated Spectral Analysis, 18th International Maintenance Conference, IMC-2003. pp. 1 – 14.
- [35] U. Eehalt, R. Markert, Eric Hann, Rotor Contact – Measured Motion Patterns, Advances in Vibration Control and Diagnostics, 2006 Polimetrica International Scientific Publisher. Monza / Italy. pp. 83 , 98.
- [36] Villada Ferna, Cavid Diego R., Diagnóstico de Fallas en Motores de Inducción mediante la Aplicación de Redes Neuronales Artificiales, Información Tecnológica – Vol. 18, No. 2 2007.
- [37] Walter N. Alerich, Control de Motores Eléctricos, teoría y aplicaciones, Editorial Diana, 1^{era} Edición, México 1972.
- [38] Wang, W.J. Wavelet for Detecting Mechanical Faults with High Sensitivity. Mechanical System and Signal Processing, vol. 15. Junio 2001.
- [39] Análisis causa raíz mediante vibraciones a compresor aerzen de tornillo, disponible en: <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/30485/1/GarciaGzles.pdf> [Consulta: 28 de mayo del 2013]
- [40] Análisis del comportamiento vibratorio de distintos tipos de fijación de transductores piezoeléctricos, disponible en: <http://acustica.unileon.es/wp-content/uploads/2012/10/AN%C3%81LISIS-DEL-COMPORTAMIENTO-VIBRATORIO-DE-DISTINTOS-TIPOS-DE-FIJACI%C3%93N-DE-TRANSDUCTORES-PIEZOEL%C3%89CTRICOS.pdf> [Consulta: 21 de octubre de 2013]
- [41] Definición de Adquisición de datos, disponible en: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/> [Consulta: 21 de noviembre de 2013]
- [42] Definición de Transductor en el diccionario de la Real Academia Española disponible en: <http://www.rae.es/>
- [43] RENOVETEC, Los objetivos del mantenimiento, 2013, <http://www.ingenieriadelmantenimiento.com/index.php/5-la-ingenieria-del-mantenimiento> [Consulta: 28 de marzo de 2014]