



**MOTOR DE INDUCCION. DETECCION Y ANALISIS DE
VIBRACIONES EMPLEANDO ACELEROMETROS CON
TECNOLOGIA MEMS**

CARLOS MANUEL ECHEVERRIA GARCIA

ADRIANA MARCELA MEJIA RIVERO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2006**



**MOTOR DE INDUCCION. DETECCION Y ANALISIS DE
VIBRACIONES EMPLEANDO ACELEROMETROS CON
TECNOLOGIA MEMS**

**CARLOS MANUEL ECHEVERRIA GARCIA
ADRIANA MARCELA MEJIA RIVERO**

Trabajo de Investigación presentado como requisito parcial para optar al
título de Ingeniero Electrónico.

Director
JULIO AUGUSTO GELVEZ FIGUEREDO, MPE.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2006**

A Dios por brindarme el privilegio de aprender.

A mi padre (Q.E.P.D) y madre, a quien les pertenece este logro, gracias por el ejemplo que me dieron, por exigirme, apoyarme y amarme.

A toda mi familia, y a la UIS por los grandes profesores que tuve y por darme los grandes amigos que hoy tengo.

Adriana Marcela Mejía.

A mis padres, mis hermanos, familia y amigos por su paciencia y colaboración en la realización de este proyecto.

A los profesores que fueron de una u otra forma parte de mi formación moral y profesional y a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo.

Carlos Manuel Echeverría García.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica por permitirnos desarrollar este proyecto y facilitarnos las herramientas necesarias para este proceso. A nuestro Director de proyecto, MPE Julio A. Gélvez, por el gran apoyo que nos brindo, por guiarnos y creer en nosotros. A los profesores que colaboraron de una u otra forma para su finalización.

Los autores.

CONTENIDO

<i>INTRODUCCIÓN</i>	10
1. <i>MARCO TEORICO</i>	13
1.1. MOTORES DE INDUCCION	13
1.1.1. Tipos De Fallas En Motores De Inducción.....	16
1.1.2. Mantenimiento En Motores De Inducción.....	21
1.2. VIBRACIONES	23
1.2.1. Vibración En Sistemas Mecánicos.....	24
1.2.2. Clasificación Temporal Del Movimiento Vibratorio.....	27
2. ETAPAS DEL PROYECTO.....	31
2.1. ETAPA TRANSDUCTORA Y ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL	32
2.2. ETAPA DE ADQUISICION	34
2.3. REGISTRO Y PROCESAMIENTO (DESCRIPCION DEL SOFTWARE).....	38
2.3.1. Técnicas de Visualización para Análisis Posterior	45
2.3.2. Evaluación De Severidad.....	47
2.3.3. Descripción del Software.....	50
3. <i>ACELEROMETROS CON TECNOLOGIA MEMS</i>	52
3.1. PRINCIPIO FÍSICO DE FUNCIONAMIENTO.....	54
3.2. DESCRIPCION FISICA Y DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SENSOR	57
3.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL ACELEROMETRO.....	58
3.3.1. Rango de Trabajo	58
3.3.2. Ancho de Banda.....	60
3.3.3. Sensibilidad	60
3.3.4. Linealidad	61
3.3.5. Tiempo de Respuesta	62
3.4. CONSIDERACIONES DE MONTAJE.....	63
3.5. CALIBRACIÓN DEL ACELEROMETRO	64
3.6. DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO (PCB)	66
4. <i>SOFTWARE Y PRUEBAS</i>	68
4.1. SOFTWARE	68
4.2. PRUEBAS REALIZADAS	75
4.2.1. Pruebas simuladas	75
4.2.2. Conexiones realizadas.....	77
4.2.3. Pruebas con el acelerómetro MMA6231QR2 y la tarjeta de adquisición de datos DAQ PCI 6221	79
5. <i>MANUAL DEL USUARIO</i>	83
5.1. RECOMENDACIONES	83

5.2. UBICACIÓN Y FIJACIÓN DEL SENSOR.....	84
5.3. EJECUCION DEL PROGRAMA.....	85
5.3.1. Instalación De Software Y Hardware	85
5.3.2. Cargar El Programa	87
5.3.3. Análisis De La Señal.....	87
5.3.4. Posibles Formas de Analizar la Señal Visualizada	92
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99
ANEXOS.....	101
ANEXO A. HOJA DE DATOS DE MMA6233Q.....	102
ANEXO B. HOJA DE DATOS DAQ PCI 6221.	110
ANEXO C. TERMINALES DEL CONECTOR DAQ.....	117
ANEXO D. TABLA GUIA PARA EL DIAGNOSTICO DE VIBRACIONES.....	118
ANEXO E. GRAFICAS DE RESULTADOS PRUEBAS.	122

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1: Unidades en el sistema internacional	43
Tabla 2-2: Niveles de referencia para convertir SI a dB.....	44
Tabla 2-3: Tabla de severidad	50

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1-1 Tipos de Desbalances.....	19
FIGURA 1-2 Sistema Vibratorio Mecánico.....	25
FIGURA 1-3 Señal periódica No Armónica vista desde los tres planos tiempo, frecuencia y amplitud	29
FIGURA 2-1 Diagrama de bloques prototipo	31
FIGURA 2-2 Niveles de vibración	43
FIGURA 2-3 Diagrama de bloques del software.....	51
FIGURA 3-1 Estructura y circuito equivalente del Acelerómetro.....	56
FIGURA 3-2 Estructura y Diagrama de Bloques del Acelerómetro.....	57
FIGURA 3-3 Recomendación de Rango de acuerdo a la Aplicación.....	59
FIGURA 3-4 Gráfica de la Salida [V] Vs. La entrada [g]	62
FIGURA 3-5 Valores de Salida para Diferentes Posiciones del Acelerómetro.....	65
FIGURA 3-6 Diagrama de Conexiones Recomendado para El Acelerómetro.....	66
FIGURA 3-7 PCB Obtenido Utilizando versión prueba de EAGLE.....	67
FIGURA 4-1 Valores iniciales del programa	69
FIGURA 4-2 Diagrama de bloques que activa el botón virtual CONFIGURACION DE PARAMETROS	70
FIGURA 4-3 Panel frontal de VI principal y de “CANALES.vi”.....	71
FIGURA 4-4 Diagrama de bloques que activa el botón virtual.....	72
FIGURA 4-5 Escalamiento de la señal en Volts a aceleración en gravedades.....	73
FIGURA 4-6 Diagrama de bloques del Case Structure que se activa con “CAPTURAR SEÑAL”.....	74
FIGURA 4-7 Gráficas: Aceleración con respecto al tiempo, densidad espectral de potencia, y espectro de la señal.....	76
FIGURA 4-8 Gráfica de Orbitas.....	77
FIGURA 4-9 Ubicación del acelerómetro en el motor y velocidad de rotación medida	78
FIGURA 4-10 Conexión acelerómetro - DAQ	78
FIGURA 5-1 Posición y punto de ubicación empleado	85

TITULO: MOTOR DE INDUCCION. DETECCION Y ANALISIS DE VIBRACIONES EMPLEANDO ACELEROMETROS CON TECNOLOGIA MEMS.*

AUTORES: CARLOS MANUEL ECHEVERRIA GARCIA
ADRIANA MARCELA MEJIA RIVERO**

PALABRAS CLAVE: Instrumento Virtual, Mantenimiento Predictivo, Análisis de Vibraciones, Evaluación de Severidad, Acelerómetros con tecnología MEMS.

DESCRIPCION:

La construcción de instrumentos virtuales se ha convertido en una herramienta vital en el desarrollo de la industria debido a los altos costos y la poca flexibilidad de los instrumentos comerciales.

En este documento se describe el diseño y la implementación de un instrumento virtual de dos canales desarrollado en LabView 7.1 que permite, a partir de la adquisición y procesamiento de señales vibratorias transducidas a través de acelerómetros con tecnología MEMS de dos ejes, determinar la condición de funcionamiento y el análisis de fallas en máquinas rotativas. Es importante resaltar que actualmente la evaluación de vibraciones se ha convertido en una de las principales estrategias para el mantenimiento predictivo, ya que al ser un método no intrusivo, permite que todo el sistema sea monitoreado o vigilado sin necesidad de ocasionar una para que genere pérdidas y retrasos indeseados en cualquier proceso de producción.

El instrumento desarrollado cuenta con tres diferentes tipos de métodos para el análisis de la señal además de la evaluación de severidad, estas son: gráficas en el dominio del tiempo para cada uno de los ejes en valores de aceleración, velocidad y desplazamiento pico y RMS, gráficas en el dominio de la frecuencia obtenidas por medio de FFT para ambos ejes en aceleración, velocidad y desplazamiento en valores RMS y gráfica de órbitas en las cuales se relacionan las amplitudes de desplazamiento de ambos ejes. Para un estudio mucho más exhaustivo el prototipo incluye la opción de guardar y cargar una señal para comparar la evolución de una máquina determinada. La evaluación de severidad se realiza a partir de los valores RMS de velocidad obtenidos para cada uno de los ejes del análisis de la señal en el tiempo y de acuerdo a la norma ISO 2372.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones.
Director Julio Augusto Gelvez Figueredo.

TITLE: INDUCTION MOTOR. DETECTION AND ANALYSIS OF VIBRATIONS USING ACCELEROMETERS WITH MEMS TECHNOLOGY.*

AUTHORS: CARLOS MANUEL ECHEVERRIA GARCIA
ADRIANA MARCELA MEJIA RIVERO**

KEY WORDS: Virtual Instrument, Predictive Maintenance, Vibrations Analysis, Severity Evaluation, Accelerometers with MEMS Technology.

CONTENT:

The construction of virtual instruments has become a vital tool in the development of the industry due to the high costs and the little flexibility of the commercial instruments.

This document describes the design and the implementation of a virtual instrument of two channels developed in LabView 7.1 that allows, from the acquisition and convert vibratory signal processing through two axes accelerometers with MEMS technology, to determine the condition of operation and the analysis of faults in rotating machines. It is important to stand out that at the moment the evaluation of vibrations has become one of the main strategies for the predictive maintenance, since to the being a nonintrusive method, allows that all the system can be watched with no need to cause stops that generates undesired losses and delays in any process of production.

The developed instrument has three different methods for the analysis of the signal in addition to the severity evaluation, these is: graphs in the time domain for each one of the axes in values of acceleration, speed and displacement peak and RMS, graphs in the frequency domain by means of FFT for both axes in acceleration, speed and displacement in values RMS and graph of orbits in which the amplitude of displacement of both axes are related. For a much more exhaustive study the prototype includes the option to keep and to load a signal to compare the evolution of a certain machine. The severity evaluation is made from obtained values RMS of speed for each one of the axes of the signal analysis in the time and according to norm ISO 2372.

* Work for Graduation.

** Faculty of Physic-Mechanical Engineerings, School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineerings. Director Julio Augusto Gelvez Figueredo MPE.



INTRODUCCIÓN

Las máquinas eléctricas rotativas, y en particular los motores de inducción, son elementos primordiales en los procesos productivos industriales. La importancia que tienen en los diferentes procesos de producción hace necesario asegurar su continuidad operativa, con calidad, que garantice la seguridad de los trabajadores, el máximo tiempo de vida de los equipos y por tanto mejores resultados a la industria.

Los motores de inducción, en su mayoría, se encuentran en puntos críticos de los procesos industriales, anticipar las fallas y averías que se pueden presentar y programar la remoción del motor con el fin de realizar un mantenimiento predictivo, reducen de manera significativa los costos y evita generar un posible paro de la planta.

El aumento de competitividad a nivel internacional, y las exigencias de calidad, han motivado que las empresas destinen cada vez mayores recursos, tanto humanos como de material a sus planes de mantenimiento de equipos e instalaciones, donde los motores de inducción son pieza clave.

La finalidad de este proyecto, es el diseño y la construcción de un prototipo experimental que permita detectar y visualizar las vibraciones presentes en un motor de inducción, y emplear estas para realizar un análisis con el fin de establecer el estado de funcionamiento y las posibles fallas que se estén presentando.



La importancia de este prototipo radica en el método empleado para la evaluación del estado de la máquina a partir de vibraciones, ya que este, tiene la ventaja de ser no intrusivo además de ser intrínsecamente seguro, es decir, no es necesario realizar cambios indeseados en la actividad que se encuentre ejecutando el motor en el momento de la evaluación para obtener un diagnóstico acertado, esto en aplicaciones industriales quiere decir reducción de costos tanto de mantenimiento como de producción.

Por lo tanto con este trabajo se suministra a la Universidad Industrial de Santander, el prototipo desarrollado para ampliar el área de estudio en cuanto a los motores de inducción y el análisis de las fallas eléctricas y mecánicas que se refiere, además de la aplicación de los acelerómetros a la instrumentación industrial.

En este proyecto se emplean para su desarrollo acelerómetros con tecnología MEMS para realizar el sensado de la señal de vibración en la superficie del motor, una Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ) de la empresa National Instruments (NI), para la Adquisición, y el programa creado en el Software Labview 7.1. de NI, como herramienta para el procesamiento, visualización y análisis de la señal adquirida, el cual permite reemplazar instrumentos comerciales por instrumentos virtuales de igual o mayor calidad, a un mejor costo.

En el primer capítulo se encuentra una síntesis (útil para el entendimiento del trabajo desarrollado) de los conceptos básicos acerca de los Motores de inducción y algunas posibles fallas del mismo, una explicación general de las vibraciones, el por que y como se generan estas en un motor de inducción (y en las máquinas en general), y el posible comportamiento en



el tiempo de las señales vibratorias. Si el lector conoce los temas tratados en este capítulo, puede omitirlo, y pasar directamente al capítulo dos.

En el segundo capítulo se abordan los conceptos fundamentales del sensor (el principio físico de funcionamiento y la descripción del mismo), y todo lo relacionado con el uso de los acelerómetros con tecnología MEMS, (criterio de selección para el uso de estos en el sensado correcto de las señales vibratorias, montaje y calibración). El tercer capítulo hace una descripción detallada de las etapas que se siguieron para el desarrollo del prototipo. En el cuarto capítulo se explica el programa desarrollado y las pruebas finales realizadas al equipo. Finalmente en el capítulo 5 se muestra el manual diseñado para el usuario. Las observaciones, recomendaciones, y conclusiones, se consiguen en el último capítulo.



1. MARCO TEORICO

En el capítulo uno se explican los fundamentos teóricos relacionados con el trabajo desarrollado. Se presenta un resumen del sistema que va a ser sometido al análisis para el caso propuesto (Motores de Inducción, conceptos generales y algunas de las fallas que se pueden presentar), y la explicación de las vibraciones en sistemas mecánicos y su comportamiento en el tiempo.

1.1. MOTORES DE INDUCCION

Existen textos en los que se puede encontrar explicación detallada sobre los Motores de inducción en caso que se desee recordar su principio de funcionamiento, partes y aplicaciones.

Los conceptos básicos y las ecuaciones fundamentales para el análisis de los motores de inducción son:

❖ **Velocidad de rotación del campo magnético (Velocidad de sincronismo):** Es la velocidad a la cual gira el campo. Este campo se produce al aplicar un conjunto de voltajes trifásicos al estator haciendo que sobre este fluya un conjunto de corrientes.

$$n_{\text{sin } c} = \frac{120f_e}{P} \quad 1-1$$



f_e : Frecuencia del sistema en Hz.

P : Número de polos de la máquina.

- ❖ **Voltaje Inducido en el rotor:** El voltaje inducido en el rotor es producido por la acción del campo magnético rotacional sobre las barras y esta dado por la siguiente ecuación:

$$e_{ind} = (v \times B) \bullet l \quad 1-2$$

v : Velocidad de la barra con respecto al campo.

B : Vector de densidad de flujo magnético.

l : Longitud del conductor.

- ❖ **Deslizamiento del rotor:** El deslizamiento del motor se define como el movimiento relativo entre el rotor y los campos magnéticos y se puede expresar de dos maneras, como velocidad de deslizamiento o simplemente como deslizamiento, que es la velocidad relativa expresada en porcentaje o en una base por unidad. Las ecuaciones son las siguientes:

$$n_{des} = n_{sin c} - n_m \quad 1-3$$

$$s = \frac{n_{sin c} - n_m}{n_{sin c}} (\times 100\%) \quad 1-4$$

n_{des} : Velocidad de deslizamiento.

$n_{sin c}$: Velocidad de sincronismo.



n_m : Velocidad mecánica del motor.

Esta última ecuación también puede expresarse en términos de la velocidad angular ω .

Un motor de inducción puede acelerar hasta una velocidad cercana a la de sincronismo pero nunca podrá alcanzarla por completo debido al fenómeno de inducción en los conductores del rotor, de ser así, el voltaje inducido en el rotor sería igual a cero (velocidad de la barra con respecto al campo sería igual a cero) y por efectos de fricción el rotor se detendría.

❖ **Frecuencia eléctrica en el rotor:** La frecuencia del rotor es directamente proporcional a la diferencia entre la velocidad de campo magnético y la velocidad del rotor, esta puede ser expresada con la siguiente ecuación:

$$f_r = sf_e \quad \mathbf{1-5}$$

f_r : Frecuencia del rotor

f_e : Frecuencia del estator

Reemplazando en la 1-1 y 1-4 en 1-5 se obtiene,

$$f_r = \frac{P}{120} (n_{\text{sin } c} - n_m) \quad \mathbf{1-6}$$



- ❖ **Eficiencia:** La eficiencia de una máquina eléctrica se define como la capacidad de transformar la potencia eléctrica de entrada en potencia mecánica de salida y esta dada por la ecuación:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad 1-7$$

P_{out} : Potencia eléctrica de salida.

P_{in} : Potencia eléctrica de entrada.

Esta medida es de gran utilidad para el análisis de fallas en máquinas, ya que una baja eficiencia, es señal de posible deterioro.

1.1.1. Tipos De Fallas En Motores De Inducción

Los motores de inducción, como cualquier otro sistema electromecánico, están predispuestos a fallas y reparaciones que se producen debido a diferentes motivos ya sea por el ambiente de trabajo, edad, etc.

Algunos de los problemas que se pueden generar en este tipo de máquinas específicamente son:

- ❖ **Corrimiento del centro magnético:** Ocurre cuando el rotor no se encuentra situado correctamente con respecto al centro magnético del estator, esto puede suceder para cualquier dirección (axial o lateral). El nivel provocado por este tipo de problema es relativamente bajo y será prácticamente indetectable, podría



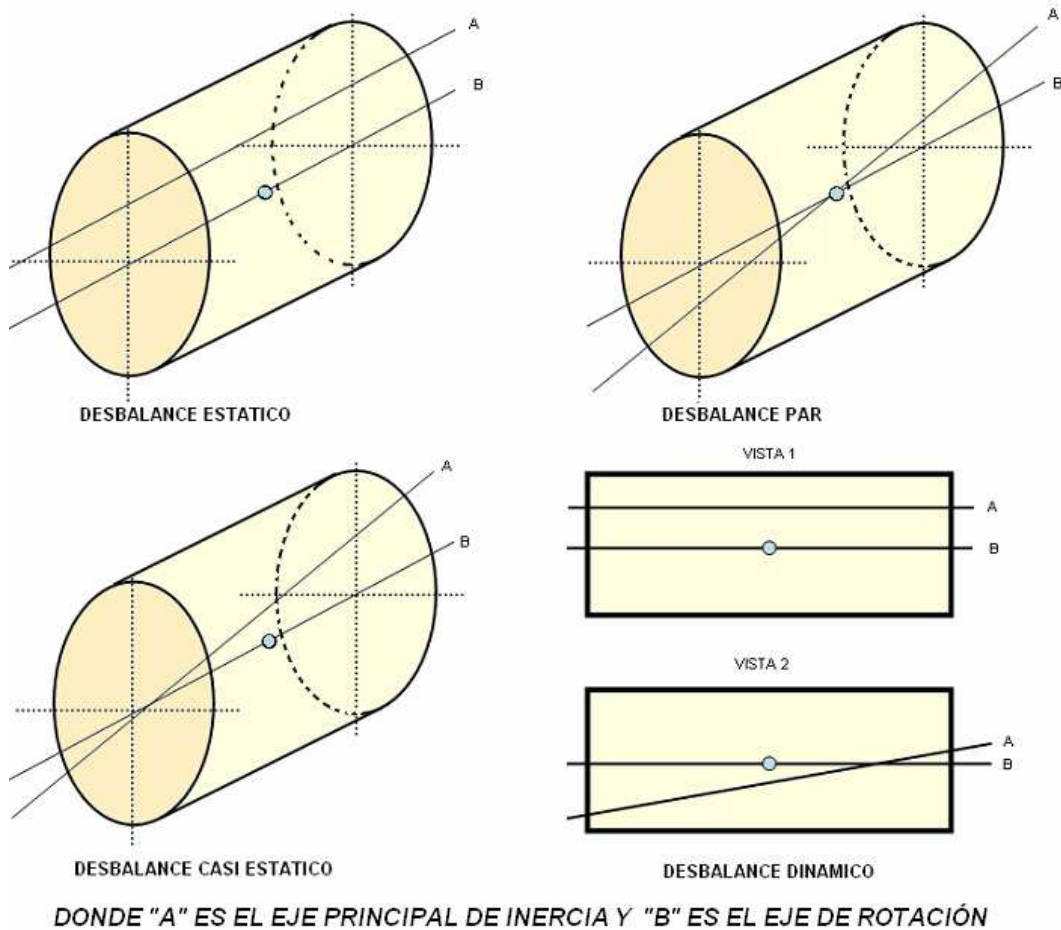
llegarse a conclusiones erróneas (problemas de soldadura mecánica, desalineamiento del eje, etc.).

- ❖ **Barras del rotor agrietadas o rotas:** este tipo de falla produce un desbalance eléctrico en el motor. Este problema provoca la modulación de la frecuencia de rotación del motor por el producto entre la frecuencia de deslizamiento y el número de polos.
- ❖ **Cortocircuito en el devanado del estator:** Puede presentar eventualmente espiras en corto, las cuales ocasionan una reducción en la velocidad de rotación y un incremento en la frecuencia de deslizamiento.
- ❖ **Deformaciones térmicas:** Si el rotor y el estator están mal aislados entre sí, se pueden presentar roces entre los dos originando un aumento en la temperatura del rotor y cuando este se somete a altas temperaturas es susceptible a que se deforme. Las deformaciones inicialmente son pequeñas, pero estas hacen que se generen fuerzas electromagnéticas desbalanceadas que suben el nivel de temperatura, haciendo que las deformaciones del rotor sean más severas.
- ❖ **Pulsos torsionales:** Este tipo de pulsos se genera cuando el campo magnético del rotor energiza los polos del estator, y siempre están presentes en mayor medida en los motores pero normalmente no representan peligro.



- ❖ **Desbalance mecánico:** Constituye una de las fuentes mas comunes en problemas de vibraciones, puede ser definido como la no coincidencia del eje de rotación y el eje longitudinal principal de inercia del rotor. Existen cuatro tipos de desbalances: estático, par, casi – estático y dinámico:
- **Desbalance estático:** ocurre cuando el eje longitudinal principal de inercia del rotor está desplazado paralelamente con respecto al eje de rotación.
 - **Desbalance par:** ocurre cuando el eje longitudinal principal de inercia del rotor intercepta al eje de rotación en el centro de masas del propio rotor.
 - **Desbalance casi-estático:** ocurre cuando el eje longitudinal principal de inercia del rotor intercepta al eje de rotación en un punto arbitrario, o sea, un punto que no coincide con el centro de masas del propio rotor.
 - **Desbalance dinámico:** ocurre cuando el eje longitudinal principal de inercia del rotor no intercepta al eje de rotación y tampoco es paralelo a éste.
- ❖ **Desalineamiento:** Es una de las causas más frecuentes de fallos en máquinas rotativas, y se debe al mal acople entre dos máquinas adheridas por sus ejes. Existen tres tipos de desalineamientos: paralelo, angular y mixto.

FIGURA 1-1 Tipos de Desbalances



Fuente: [1]

- ❖ **Pedestal cojo o blando:** Es el resultado de la deformación de la estructura de la máquina y es otra fuente considerable de generación de vibraciones.



- ❖ **Soltura mecánica:** Este problema se genera del deterioro de la condición de ensamblaje de los elementos mecánicos que han excedido las tolerancias de holgura o simplemente se han aflojado debido a la operación de la máquina.

- ❖ **Torbillos de aceite:** Este tipo de fallo normalmente se atribuye a diseño incorrecto del rodamiento, desgaste excesivo del rodamiento, y específicamente puede verse como un aumento de la presión del lubricante o un cambio de la viscosidad del aceite.

- ❖ **Soltura de la máquina respecto a su base:** Se debe a una mala fijación de la máquina sobre su base. Ocasiona vibraciones indeseadas en el sistema y en algunas situaciones estas pueden llegar a ser severas.

- ❖ **Holguras del cojinete:** Existen dos tipos de holguras: respecto al eje y respecto al alojamiento. La primera ocurre cuando el rodamiento está libre o suelto respecto al eje y la segunda acontece cuando el rodamiento se encuentra desajustado con relación a su alojamiento.

- ❖ **Problemas de resonancia:** En máquinas bien diseñadas, estos problemas son consecuencia de la resonancia de elementos no rotatorios como: pedestales, pisos, tuberías, cubiertas protectoras, etc. La resonancia contribuye e incrementa la amplitud de las vibraciones.



Los problemas o fallas anteriormente mencionados pueden ser detectados en su mayoría, por medio del análisis de vibraciones que es uno de los objetivos de este proyecto [1].

1.1.2. Mantenimiento En Motores De Inducción

El mantenimiento, es la estrategia fundamental con la cual se cuenta, para conservar las máquinas en el mejor estado posible y así evitar posibles averías que puedan detener en algún momento un proceso de producción en el cual éstas se encuentren involucradas ocasionando costos indeseados y pérdidas a corto y largo plazo.

Existen en la actualidad tres tipos de mantenimiento estos son:

- ❖ **Mantenimiento correctivo:** Se realiza cuando la máquina presenta alguna avería o falla, provoca la interrupción del proceso de producción. Es un método fácil de implementar, pero conlleva grandes costos debido al paro en la cadena productiva.

Esta forma de mantenimiento impide diagnosticar correctamente cual fue la causa que genero la avería, por lo general, existen infinidad de posibilidades y nunca ha sido llevado un debido seguimiento.

- ❖ **Mantenimiento preventivo planificado:** Consiste en realizar paradas planificadas que pueden ser definidas en base a recomendaciones del fabricante, frecuencia de fallos, métodos probabilísticos, etc., en las cuales generalmente los elementos que



son mas críticos y susceptibles a averiarse son sustituidos por otros nuevos. Por un lado esta estrategia permite el aumento en la calidad y seguridad del proceso de producción, pero por otro no aprovecha en su totalidad la vida útil de los elementos, puesto que estos son generalmente sustituidos cuando todavía se encuentran en buen estado, haciendo de este un mantenimiento efectivo pero poco eficiente debido a que ocasionalmente se incurre en gastos innecesarios.

- ❖ **Mantenimiento predictivo:** Consiste en supervisar la máquina y repararla justo en el momento en que esta lo justifique (comience a mostrar síntomas de falla o deterioro).

Esta última estrategia, es la de más difícil implementación ya que se hace necesaria una fuerte inversión inicial en equipos de medida, y formación de técnicos para la correcta interpretación de estas medidas. No obstante es la que proporciona mejores resultados en cuanto al proceso de producción se refiere (menor cantidad de paros), además permite un diagnostico eficaz del estado de las máquinas y de sus distintos elementos.

El mantenimiento predictivo, consta de tres etapas imprescindibles, estas son: Detección, Identificación y Corrección.

- **Detección:** Constituye el primer paso, se basa en el seguimiento de la evolución de uno o varios parámetros previamente seleccionados, de acuerdo a la información que estos provean sobre la condición de la máquina analizada.



- **Identificación:** Luego de que el problema o falla ha sido detectada se debe proceder a determinar la causa, es decir, identificar el elemento o elementos que la originaron.
- **Corrección:** Al ubicar el problema, se procede a planificar y ejecutar de un modo eficiente y eficaz los trabajos de reparación, haciendo que las pérdidas por mantenimiento sean mínimas.

1.2. VIBRACIONES

El buen estado de las máquinas y en general, el de cada uno de los elementos que componen un proceso es primordial para garantizar el alcance de cada uno de los objetivos para los cuales se esta operando, por lo tanto un buen diseño, proceso de selección de los componentes, y mantenimiento ayudan a que esto sea posible.

Cuando se habla específicamente de las máquinas se debe tener en cuenta que a pesar que el equipo sea seleccionado correctamente para la aplicación, y que esta haya tenido un cuidadoso proceso de fabricación, ensamble de cada una de sus partes, y montaje en el punto de operación, puede presentar cierto tipo de fallas debido a diferentes causas entre las cuales podemos resaltar características inherentes a todos los cuerpos, como es la frecuencia de resonancia de cada uno de los mecanismos y dispositivos que hacen parte de la máquina o sistema. Imperfecciones e incluso cambios en el estado original de estos elementos, conllevan a la presencia de fuerzas variables en el sistema, produciendo como resultado



un movimiento vibratorio en la estructura, es decir tanto en la máquina como en los puntos con los que se interrelaciona.

La señal de vibración capturada de una máquina significa la suma vectorial de la vibración de cada uno de sus componentes, estas señales poseen información importante sobre el estado en que se encuentra el equipo, de manera que se emplea como indicador para detectar y analizar problemas, mirar la evolución antes de que se produzca una falla y a su vez permite establecer que tan severa es. Para su medición se emplean equipos diseñados especialmente para cuantificar las amplitudes y frecuencias que describen el movimiento vibratorio.

1.2.1. Vibración En Sistemas Mecánicos

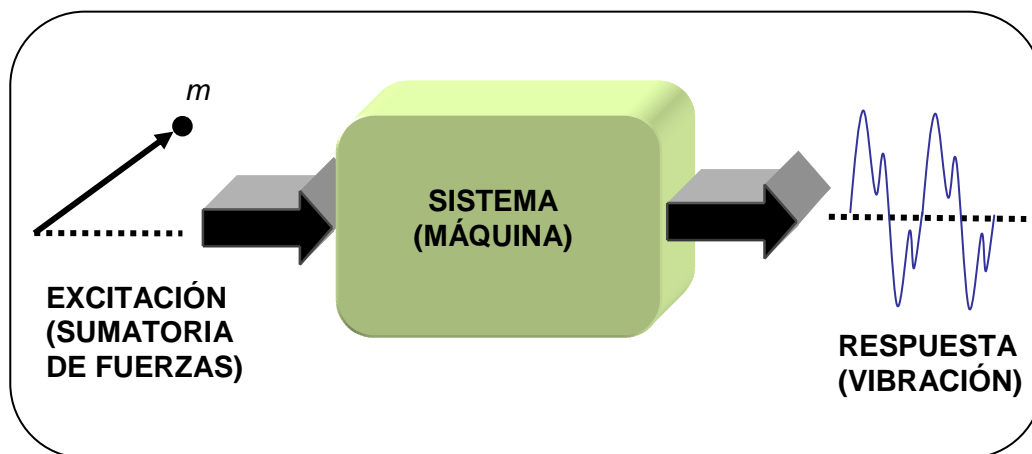
Las vibraciones que se presentan en los sistemas mecánicos se definen como Vibraciones Mecánicas y su comportamiento esta descrito por el *desplazamiento del centro de masa* del elemento o partícula (cuerpo rígido cuando se trata de máquinas), alrededor del punto de equilibrio de este, hasta una posición máxima, debido a que la energía que se produce por las fuerzas presentes se transforma en movimientos oscilatorios. Es decir la vibración es la respuesta del sistema a la excitación producida por las fuerzas que actúan sobre esta, y a las características del sistema, que depende directamente de la movilidad que este tenga.

Se puede entonces representar el movimiento oscilatorio como un sistema de entrada o excitación (sumatoria de las fuerzas) y salida (vibración mecánica), como se muestra en la FIGURA 1-2.

- ❖ **Excitación:** Es la estimulación al sistema externa o inherente a ella que produce el movimiento oscilatorio característico de la vibración.

Existen diferentes fuentes de excitación, la primera de ellas es la que se debe a las fuerzas externas, principalmente son las producidas por fallas mecánicas, y eléctricas, (errores en el diseño, montaje, acoplamiento, operación, entre otras) y que pueden producir fallas por fatiga en los elementos que integran el sistema, por lo cual su detección son el objeto de este proyecto. El segundo tipo de fuente de excitación es la causada por las fuerzas inherentes al sistema mecánico, ocasionado por las características individuales de los elementos que lo conforman (resonancia).

FIGURA 1-2 Sistema Vibratorio Mecánico



Fuente: *Autores*

La sumatoria de fuerzas excitadoras, debido a los cambios en el tiempo, se puede considerar como un vector rotatorio. Mientras existan



estas fuerzas y aun cuando exista amortiguamiento en el sistema, suministran la energía necesaria para que se produzca la vibración. Cada una de las fuerzas tiene una amplitud y una frecuencia que las caracteriza.

- ❖ **Sistema Mecánico:** Son elementos interconectados entre si, para cumplir una función dada, un ejemplo de esto son las máquinas. Para un análisis matemático, sería necesario la caracterización del sistema de manera que por medio de un modelo físico-matemático se pueda conocer las ecuaciones que producen el movimiento.

Debido a la complejidad que esto implica, ya que sería necesario el conocimiento de cada uno de las partes que lo conforman, y las características físicas que los describen, se reduce a analizar por medio de patrones preestablecidos la causa de las vibraciones, y el efecto que este produce sobre el sistema mecánico.

- ❖ **Respuesta:** Es el movimiento vibratorio y depende de la excitación y de las propiedades del sistema, las cuales determinan que tipo de salida se pueda tener y por lo tanto el método de análisis que se va a realizar.

Según la excitación las respuestas se pueden clasificar en tres tipos de vibraciones, vibración libre que es cuando la excitación actúa solamente en las condiciones iniciales del movimiento (excitación instantánea); la vibración forzada que sucede cuando la excitación es constante, (excitación constante), y las vibraciones paramétricas que



son causadas por la variación en el tiempo de uno o mas parámetros del sistema.

1.2.2. Clasificación Temporal Del Movimiento Vibratorio

Las vibraciones se pueden clasificar de acuerdo a su comportamiento en el tiempo de la siguiente manera:

- ❖ **Vibraciones Periódicas:** Las vibraciones Periódicas son las que se repiten cada cierto intervalo de tiempo T , este intervalo de tiempo T se denomina periodo y el inverso de este es la frecuencia de oscilación ($f=1/T$).

Se pueden clasificar a su vez las oscilaciones periódicas en Armónicas y No Armónicas.

- ❖ **Vibraciones Periódicas Armónicas:** Son la forma mas simple de oscilación y son aquellas que se pueden representar por medio de una función sinusoidal.

$$Y(t) = Y \text{sen}(\omega t + \varphi)$$

Donde $\omega = \frac{2\pi}{T}$,

$$f = \frac{\omega}{2\pi},$$

Y Es la amplitud de la vibración,

φ Es la fase de la vibración,

f Es la frecuencia de oscilación y



T El periodo con el que esta se repite.

Vibraciones Periódicas No Armónicas: Son las que se representan por medio de series de Fourier. Mediante este teorema se puede descomponer cualquier función periódica en la suma de funciones senoidales y cosenoidales relacionadas armónicamente. Esto hace referencia a la descomposición de la señal en la sumatoria de señales sinusoidales, cada una con una amplitud y frecuencia diferente y que es múltiplo de la frecuencia fundamental de la vibración.

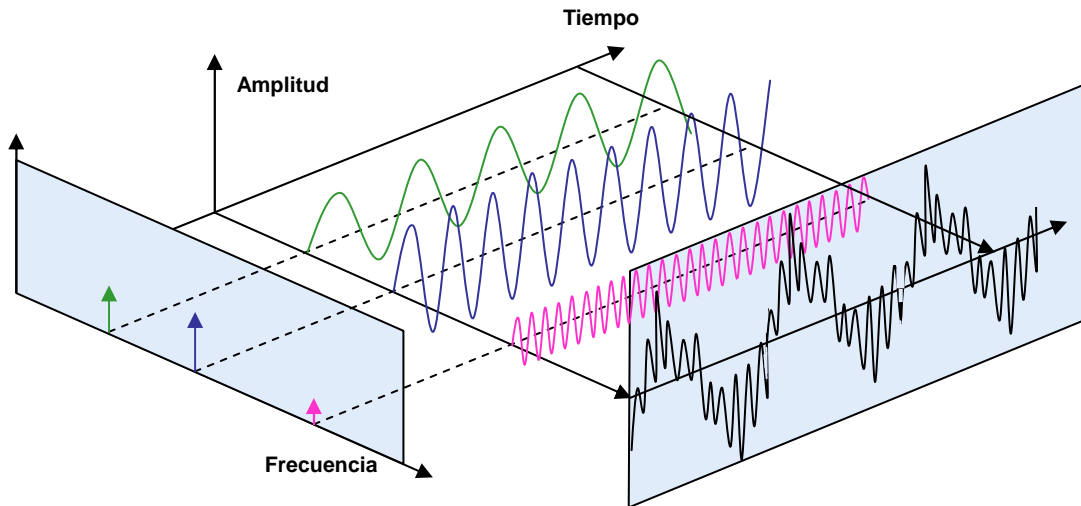
El espectro se conoce como el conjunto de las diferentes señales, representadas en un plano X-Y donde el eje X es la frecuencia de las señales relacionadas armónicamente, y en el eje Y se muestran los valores de amplitud.

En la FIGURA 1-3. se puede observar una señal periódica No Armónica, vista desde los tres planos, tiempo, frecuencia y amplitud.

Vibraciones No Periódicas: Como su nombre lo dice no tiene un comportamiento periódico, por lo tanto en lugar de emplear Series se utiliza la Integral o Transformada de Fourier. Este tipo de representación se puede emplear para cualquier señal que sea real.

Para emplear la transformada de Fourier se necesita que la señal cumpla con las condiciones de Dirichlet [3]:

FIGURA 1-3 Señal periódica No Armónica vista desde los tres planos tiempo, frecuencia y amplitud



Fuente: Autores

- Debe ser absolutamente integrable.

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad \mathbf{1-8}$$

- Que la amplitud de la oscilación sea finita.
- Que tenga un número finito de discontinuidades y cada una sea finita.



Las vibraciones No Periódicas se clasifican en determinísticas y aleatorias:

Señales Aleatorias: Son aquellas que presentan movimientos en ciclos que nunca se repiten, por lo cual el periodo será tendiente a infinito y la frecuencia fundamental a cero. Este tipo de oscilaciones se analizan por medio de la Transformada de Fourier y están compuestas por infinitas funciones senoides y cosenoidales. Debido a esto el espectro que se obtiene, está representado por infinitas componentes de frecuencia formando un espectro continuo y se conoce como densidad espectral de frecuencia.

En las oscilaciones aleatorias es posible conocer el rango de la señal, el valor máximo y el valor mínimo, que va a alcanzar el centro de masa cuando realiza el desplazamiento, y aunque no los llegue a alcanzar se sabe que nunca va a sobrepasar los límites definidos.

Si se desea conocer más acerca de las vibraciones aleatorias su clasificación y formas de caracterizarla se recomienda al lector recurrir a los textos de Tratamiento de señales.

Señales Determinísticas: Son debidas a fenómenos previsible y se puede determinar para cualquier instante de tiempo, por lo tanto se pueden modelar por una función de tiempo continuo $y(t)$. Como ejemplo se puede nombrar el caso del comportamiento transitorio que puede tener la señal obtenida en el instante del arranque del motor [2].



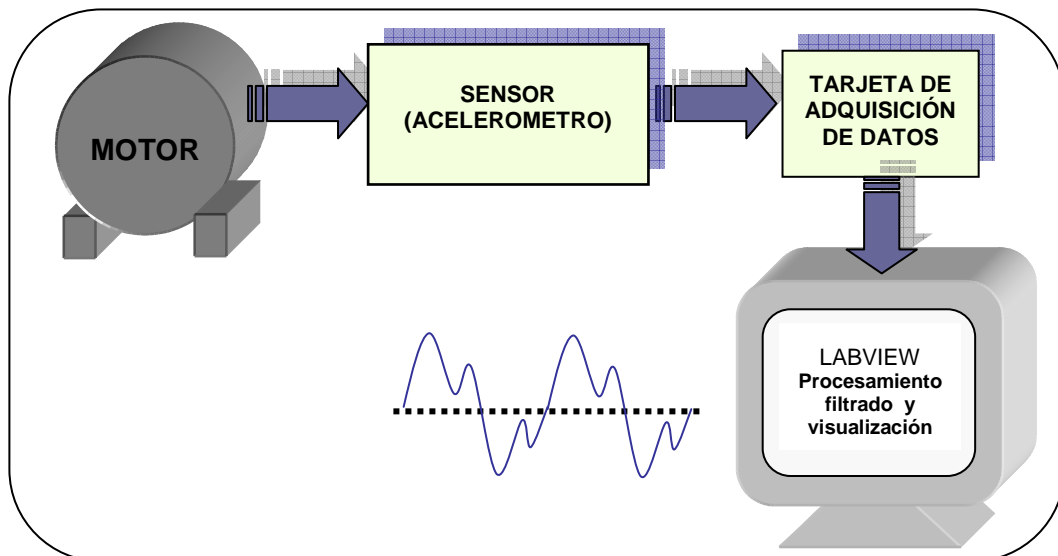
2. ETAPAS DEL PROYECTO

En este capítulo se explican cada una de las etapas que fueron necesarias para realizar el prototipo para la detección y análisis de las vibraciones en motores de inducción. Las etapas desarrolladas son las siguientes:

- ❖ transducción y acondicionamiento de la señal
- ❖ adquisición
- ❖ registro y procesamiento

En FIGURA 2-1 se muestra el diagrama general de las etapas implementadas.

FIGURA 2-1 *Diagrama de bloques prototipo*



Fuente: Los Autores



2.1. ETAPA TRASNSDUCTORA Y ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

Debido a que los movimientos vibratorios se producen como consecuencia de las fuerzas entre los elementos, las piezas que conforman la máquina estarán cambiando de posición y forma, causando variaciones en la presión del aire que rodea el equipo, y que al propagarse afecta a los objetos cercanos. Estas variaciones ante el oído humano pueden ser percibidas como sonido debido a la perturbación que estas producen en la membrana del tímpano.

Por lo tanto, se han definido dos métodos para medir las vibraciones en las máquinas, el primero de estos es a través del sonido es decir la medición de la onda vibro acústica que viaja a través del aire, y tiene que como ventaja que al realizarse la medición de esta, se sienten las vibraciones de todos los puntos del motor, pero con la desventaja que el medio en que se realiza el trabajo aporta sonidos al ambiente, que pueden llegar a ser bastante significativos, afectando notoriamente el análisis, por lo cual no es aconsejable emplear este método, a menos que se garantice que no habrán perturbaciones en el aire que afecten la señal generada por la máquina objeto de la medición.

El segundo método a considerar es la medición de la vibración en la superficie de la máquina, este método a diferencia del anterior se debe realizar de manera discreta, es decir en algunos puntos del motor, debido a que es necesario el contacto entre el transductor empleado y la máquina. Este método es el que ha sido seleccionado para este proyecto



ya que se reduce al punto de ser despreciable en la medición el ruido producido por el medio que rodea al equipo.

Para esta etapa se emplea un transductor o sensor capaz de medir aceleración, velocidad o desplazamiento, para convertirlo en una magnitud eléctrica. El sensado es la etapa más importante debido a que en esta se basan las demás partes de la medición.

Los factores que se deben tener en cuenta para el sensado de la señal de vibración son:

- ❖ Elegir correctamente el punto y dirección de la ubicación del sensor.
- ❖ Fijar correctamente el sensor.
- ❖ Tener en cuenta que la Manipulación y el Manejo del sensor puede influir significativamente en el estado del mismo, (para mas especificación remitirse al ANEXO A, ELECTRO STATIC DISCHARGE (ESD)).
- ❖ Elegir adecuadamente las características del sensor (sensibilidad, rango de frecuencia y masa del sensor entre otras), teniendo en cuenta el sistema vibratorio a analizar.

Dependiendo del tipo de sensor que se emplee, es necesario hacer un acondicionamiento de la señal por medio de instrumentación electrónica auxiliar, como amplificación o transducción a señal eléctrica, para poder realizar su análisis. Debido a que se emplean acelerómetros con



tecnología MEMS, permite que la señal sea transmitida al computador sin necesidad de realizar una preamplificación, es decir con este tipo de sensores se reduce a realizar el filtrado que se sugiere en la hoja de datos del acelerómetro en uso, MMA6233Q, (ANEXO A).

2.2. ETAPA DE ADQUISICION

Después de realizar la transducción del movimiento vibratorio a una señal eléctrica se procede a realizar la adquisición de la señal. En esta etapa se emplea como medio para la adquisición y transmisión una *Tarjeta de Adquisición de Datos* (DAQ). Se escogió este tipo de adquisición por confiabilidad en el tratamiento de los datos y por simplicidad para la aplicación.

Se estudiaron las DAQ comerciales y a su vez con las que cuenta La escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad Industrial de Santander, la cual tiene una serie de tarjetas DAQ, de la empresa NATIONAL INSTRUMENTS (NI), entre las cuales podemos encontrar la PCI1200, y la PCI 6221 entre otras. Se analizaron sus hojas de datos y propiedades principales. Como resultado la tarjeta seleccionada fue la DAQ NI-PCI 6221 (hoja de datos ANEXO B).

Las características que se tuvieron en cuenta para la selección de la DAQ fueron las siguientes:



- ❖ Se debe tener en cuenta que tipo de señales entrega el transductor y cual es el procesamiento que se le va a realizar a la señal una vez se tenga en el PC.

- ❖ El uso de los acelerómetros MEMS y la selección correcta de la DAQ, permite que se reduzca la etapa de acondicionamiento de la señal, debido a que la señal arrojada por el sensor maneja un rango de valores de magnitud aptos para ser transmitidos a la tarjeta, de igual forma la tarjeta debe percibir cambios mínimos de frecuencia y amplitud.

Para determinar el rango de valores de voltaje a la salida del sensor se tiene en cuenta lo siguiente:

- Para una alimentación de 3.3V, aceleración de cero g (g es la aceleración de la gravedad en la tierra, $9,81 \text{ m/s}^2$), el voltaje de salida es 1,65V.

- Como se describe en el siguiente capítulo, el acelerómetro seleccionado mide hasta 10 g de aceleración y tiene una sensibilidad de 120mV/g, (por cada g que varíe a la entrada la tensión de salida varia 120mV).

- Por lo tanto el valor máximo de magnitud que varia alrededor del voltaje de salida a cero g (1,65V), es:

$$120\text{mV/g} \cdot 10\text{g} = 1,2 \text{ V}$$



- El rango de magnitudes de la señal análoga al movimiento vibratorio que se tiene a las salidas del transductor es:

$$\text{VOLTAJE MINIMO: } 1.65\text{V}-1.2\text{V}=\mathbf{0.45\text{V}}$$

$$\text{VOLTAJE MAXIMO: } 1.65\text{V}+1.2\text{V}=\mathbf{2.85\text{V}}$$

- ❖ El acelerómetro entrega al usuario como salida para cada uno de sus ejes una señal de tensión variable en el tiempo referenciada a tierra, se busca que la tarjeta de adquisición de datos permita emplear esta señal como entrada sin necesidad de realizar una conversión análoga digital previa. La tarjeta, debe disponer de entradas analógicas e internamente realizar la conversión A/D.

Para realizar la conversión de la señal análoga (que ingresa a la DAQ) a digital se tiene en cuenta lo siguiente:

- **Frecuencia de muestreo:** Indica cuantos valores de amplitud, o muestras se toman por unidad de tiempo de una señal continua para generar una señal discreta, es decir para la conversión de la señal análoga a digital. La frecuencia de muestreo es de 250kS/s [S: Samples o Muestras] cuando se emplea un canal, si se usa mas de uno la frecuencia se divide por el número de canales que se estén usando.
- **Teorema de Nyquist:** El teorema de Nyquist expresa que al momento de muestrear una forma de onda, o señal análoga, la



frecuencia a la que se realiza el muestreo debe ser como mínimo el doble de la frecuencia máxima que se va a muestrear, de manera que el muestreo sea efectivo.

Si la frecuencia de muestreo es mayor, es decir el número de muestras que se realice por segundo; la conversión análoga digital será más exacta, se tendrá una señal resultante de mayor calidad y a su vez requerirá un mayor ancho de banda, con el beneficio que se tiene una mejor señal al ser reconstruida.

Ahora bien, conociendo que el ancho de banda que tiene el acelerómetro MMA6233Q es de 900Hz, se sabe que la frecuencia máxima que se va a muestrear va a ser esta, debido a que él maneja internamente un filtro pasa bajas de un polo, por lo cual la *frecuencia mínima de muestreo* que puede tener la tarjeta es:

$$\text{FRECUENCIA DE NYQUIST: } 900\text{Hz} * 2 = \mathbf{1800\text{Hz}}$$

- **Resolución digital:** Este parámetro indica cual es el rango de los valores de amplitud, es decir el rango de las muestras. La tarjeta NI-PCI6221, tiene una resolución digital 16 bits, por lo tanto se tiene la posibilidad de tomar 2^{16} valores de amplitud, es decir, 65536 valores. Es importante aclarar que el número de escalones de la codificación de la señal de tensión establece la relación señal/ruido, de manera que este factor influye sobre el error en la cuantificación, y por lo tanto la distorsión en la señal. La resolución es importante cuando se selecciona la tarjeta ya que la calidad de la



señal y la velocidad de transferencia de datos (bits transmitidos por unidad de tiempo) dependen de esta.

2.3. REGISTRO Y PROCESAMIENTO (DESCRIPCION DEL SOFTWARE)

Para realizar esta etapa, se selecciona un software que sea compatible con la tarjeta (DAQ) PCI-6221, se selecciono entre las posibles opciones el uso de **Labview 7.1** debido a que la Universidad Industrial de Santander tiene la licencia para trabajo de esta herramienta virtual.

En esta etapa se realiza el registro y valoración de las características y parámetros. Las variables que se eligen para medir se escogen de acuerdo al objetivo de la medición, dependiendo del sistema que se va a analizar y la información que se desee obtener de él.

Para medir el nivel y describir la vibración, se debe definir que magnitud física se va a cuantificar. Para poder realizar esto es necesario primero entender los términos que se van a manejar.

Características de la vibración: son las magnitudes mediante las cuales se puede definir una vibración, tales como *Amplitud* o intensidad de la vibración, *Frecuencia* o ritmo de la vibración, *Fase* o posición relativa con respecto a una señal de referencia.

Parámetros: son los que usan para denotar las Amplitudes, y para este análisis son usados la *aceleración*, *velocidad* y/o *desplazamiento*. Se



define, el desplazamiento como la longitud de la trayectoria entre su posición inicial hasta su posición final; la velocidad como la variación del desplazamiento en el tiempo y la aceleración la variación de la velocidad respecto al tiempo. Se puede relacionar la amplitud de la aceleración, la velocidad y el desplazamiento a través de la frecuencia.

Observando las unidades de cada uno de los parámetros, se puede ver la siguiente relación:

Desplazamiento $[m]$

Velocidad $[m] \times \left[\frac{1}{s} \right]$

Aceleración $\left[[m] \times \left[\frac{1}{s} \right] \right] \times \left[\frac{1}{s} \right]$

Frecuencia $\left[Hz = \left[\frac{1}{s} \right] \right]$.

Otra manera de mostrar es suponiendo que la vibración esta representada por un movimiento armónico dado por

Desplazamiento $y(t) = a \sin(\omega t)$

Por lo cual las amplitudes se definen de la siguiente manera:

Desplazamiento: $|y(t)| = a$

Velocidad: $\left| \dot{y}(t) \right| = \omega |y(t)| = a\omega$



Aceleración: $\left| \dot{y}(t) \right| = \omega^2 |y(t)| = a \omega^2$

Donde $\omega = 2\pi \times f$

f : Frecuencia de vibración

Esto permite mostrar que la amplitud esta relacionada con la frecuencia de la vibración.

Si se analiza la densidad espectral de las tres funciones se observa, que cada una de ellas muestra valores más significativos de amplitud dependiendo de la frecuencia.

Cuando se analiza el desplazamiento se observa que las amplitudes son mayores cuando las frecuencias son bajas y a medida que aumenta la frecuencia de la oscilación la amplitud de los desplazamientos va a ser menor, esto se debe a las características físicas y mecánicas del sistema, ya que a una frecuencia baja la trayectoria que puede recorrer el sistema (cuerpo vibrante) es mayor que cuando este vibra a una frecuencia alta, es decir que cuando la frecuencia del movimiento aumenta el cuerpo va a tender a realizar un menor recorrido alrededor de su posición de equilibrio para que la oscilación sea completa a la frecuencia establecida.

A pesar de que no todas las vibraciones son armónicas existe la ventaja de que desde que sea real la señal se puede representar a través de la Serie o la Integral de Fourier (la sumatoria de infinitas senoides, en el caso de funciones aleatorias).

Expresando ahora la vibración como un movimiento aleatorio; el desplazamiento esta representado por:



$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(\omega_n t + \varphi_n)$$

Derivando el desplazamiento se obtiene la velocidad y aceleración respectivamente:

$$\dot{y}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \omega_n \cos(\omega_n t + \varphi_n)$$

$$\ddot{y}(t) = -\sum_{n=1}^{\infty} a_n \omega_n^2 \text{sen}(\omega_n t + \varphi_n)$$

Teniendo claro que la amplitud del movimiento va a ser mayor a bajas frecuencias y va a disminuir con el aumento de frecuencia, la amplitud de la velocidad va a arrojar la misma cantidad de información para todas las frecuencias, es decir que va a tener un comportamiento en los picos de amplitud aproximadamente estable para todas sus componentes ya que la amplitud máxima para cada una de estas va a estar definida por la amplitud del desplazamiento multiplicada por la frecuencia, $a\omega$. (Aumenta la frecuencia - disminuye amplitud). De igual forma se puede analizar la aceleración, la amplitud de esta depende de la amplitud del desplazamiento multiplicada por la frecuencia de este al cuadrado $a\omega^2$, se observa que a mayor frecuencia la amplitud de la aceleración aumenta.

Es importante conocer esto ya que el usuario puede analizar cada uno de estos parámetros y analizar el de mayor conveniencia para la falla que se este analizando.



Los niveles son las diferentes formas como se puede valorar la amplitud de una vibración, existen cuatro formas, que se muestran en la FIGURA 2-2. y son las siguientes:

- ❖ **Valor Pico-Pico:** El valor pico a pico es la diferencia del valor pico positivo mas alto, y el valor pico negativo mas bajo. Por lo general se emplea este valor para medir desplazamiento.
- ❖ **Valor Pico:** La amplitud máxima que se mide a partir de la posición de equilibrio, se emplea para medir niveles en movimiento de corta duración (como impactos o arranque del motor), por lo que no se tiene en cuenta el historial de la vibración en el tiempo.
- ❖ **Valor Medio:** es el promedio en el tiempo de la vibración, en este se usa la historia que ha tenido la función en un periodo el tiempo, pero no se emplea normalmente porque no esta relacionado con una magnitud física en especial.

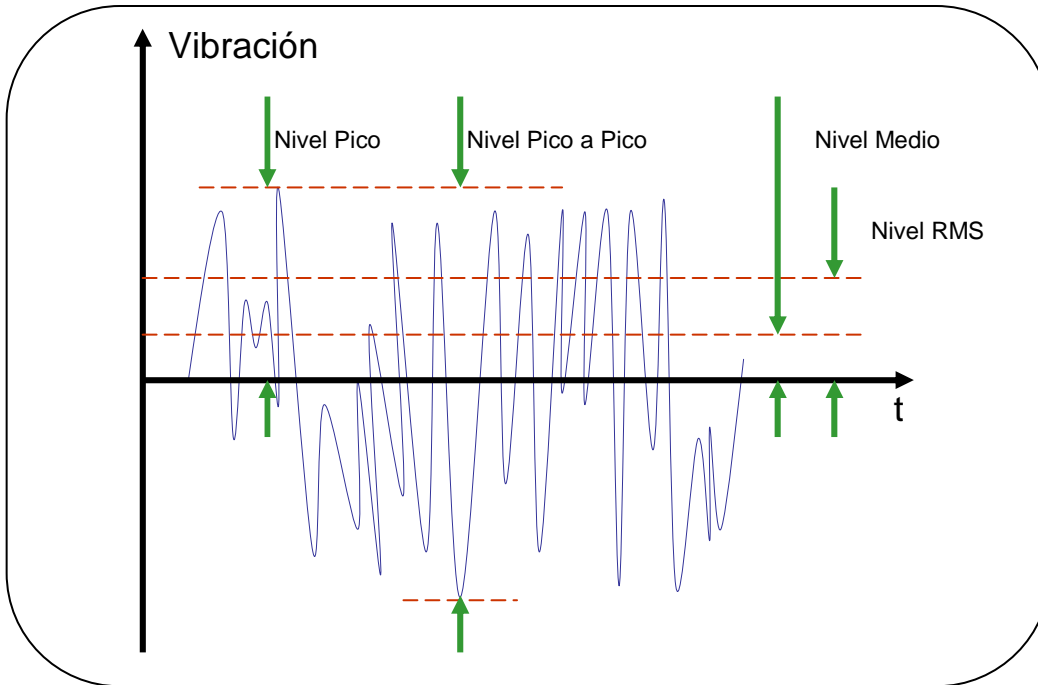
$$\text{Valor Medio: } Y(t) = 1/T \int_0^T y(t) dt$$

- ❖ **Valor Eficaz o Valor RMS (Root Mean Square):** el valor RMS de las señales vibratorias, es el que brinda más información y por lo tanto el empleado para realizar el análisis. Este tiene en cuenta la historia de la vibración en el tiempo y el valor de amplitud que se halla está relacionado con la energía de modo que permite ver la **severidad** de la vibración, o dicho de otra forma, muestra que tan destructiva puede ser para la maquinaria.



$$\text{Valor RMS: } Y_{rms} = \sqrt{1/T \int_0^T y^2(t) dt}$$

FIGURA 2-2 Niveles de vibración



Fuente: Los Autores

Para expresar los valores de vibración, se puede emplear diversas unidades, pero según la norma *ISO 1000* se debe emplear para expresar dichos parámetros en el Sistema Internacional, SI:

Tabla 2-1: Unidades en el sistema internacional

MAGNITUD	UNIDADES
Desplazamiento	<i>m, mm, μm</i>
Velocidad	<i>m, mm/s</i>



Aceleración

m/s^2 , g's (9,809 m/s^2)

Fuente: [1]

Para representar amplitudes también se puede emplear el logaritmo en base 10 de la relación entre el nivel que se mide y un nivel de referencia, de esta forma se obtiene el valor en decibeles [dB]; esta unidad logarítmica carece de dimensiones.

Para el espectro de frecuencias se puede emplear cualquiera de las formas, por medio del sistema internacional o empleando la medida en dB.

Los niveles de referencia admitidos por la norma ISO R 1683 para obtener los valores de vibración en la unidad logarítmica [dB], son las siguientes:

Tabla 2-2: Niveles de referencia para convertir SI a dB

MAGNITUD	REFERENCIA
<i>Aceleración en las vibraciones</i>	$10^{-6} m/s^2$
<i>Velocidad de las vibraciones</i>	$10^{-9} m/s$

Fuente [1]

Las vibraciones se pueden observar en los dos dominios básicos, el dominio del *tiempo* y el dominio de la *frecuencia*. Empleando estos dos dominios se pueden realizar diferentes técnicas para la visualización y posterior análisis de las vibraciones [2].



2.3.1. Técnicas de Visualización para Análisis Posterior

Este proyecto permite *visualizar* de tres formas distintas las señales de vibración y cada una de ellas permite realizar un análisis diferente, existen más, pero se seleccionaron estas debido a que son las que arrojan más información y son las más empleadas por los especialistas en esta área.

Es importante aclarar que para poder emplear la herramienta y realizar el análisis la persona encargada debe tener en cuenta los siguientes criterios:

- ❖ Experiencia y Conocimientos sobre las diferentes técnicas para la detección de fallas y conocimiento de los estándares preestablecidos y normas. Con esta información y las gráficas, debe ser capaz de extraer la mayor cantidad de información posible para poder determinar la falla que se puede estar presentando.
- ❖ Conocimiento sobre fallas mecánicas y los síntomas.
- ❖ Estudiar los sucesos precedentes al cambio del funcionamiento de la máquina, cualquier modificación puede haber influido o generado la falla.
- ❖ Conocimiento previo de la máquina con la que se esta trabajando.

Los tres tipos de análisis que se pueden realizar son:



- ❖ **Análisis espectral:** La vibración se registra como una señal eléctrica proporcional al fenómeno mecánico, los transductores que para este caso son los acelerómetros, son los encargados de esta etapa, y la señal que se obtiene a la salida de este se encuentran primordialmente en el dominio del tiempo. Para poder obtener la señal en el dominio de la frecuencia es necesario una transformación del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia empleando de la transformada de Fourier, de forma que se muestra cada una de estas componentes en ese dominio.

El análisis espectral consiste en el estudio de la *grafica del espectro* (amplitud vs. frecuencia). La frecuencia indica según la técnica de análisis de fallas que es lo que esta mal en el equipo y por medio de la amplitud que tan severo es el daño. Esto se debe a que las fuerzas que se producen dentro del motor presentan una frecuencia y una amplitud que las caracteriza, como se menciona en el capítulo anterior estas fuerzas son las causantes de la vibración, por lo cual existe relación entre la frecuencia y el tipo de daño presentado.

Con este tipo de análisis se pueden detectar fallas como el desbalanceo de rotores, solturas mecánicas, desalineamientos, y problemas en los rodamientos

- ❖ **Análisis en el dominio del tiempo:** El análisis en el dominio del tiempo, es el análisis que se le realiza a la forma de onda, para esto se efectúa el *grafico de la amplitud de la vibración contra tiempo*, y suele emplearse cuando dos o mas errores tienen un comportamiento parecido en frecuencia, es decir los errores se reflejan en el espectro a



una misma frecuencia de manera que dificulta la detección del fallo solo con este tipo de visualización. La forma de onda va a ser diferente para los espectros parecidos, por lo tanto ayuda a definir las posibles causas de falla. Se emplea cuando se presentan simultáneamente dos o más de los siguientes errores: desbalance, flexión del eje, desalineamiento y por supuesto alguna resonancia que se este reflejando, causando cambios en el espectro.

- ❖ **Análisis de órbitas:** El análisis de orbitas consiste en el análisis de la *grafica de la amplitud de la vibración de $x(t)$ con respecto a $y(t)$* para una frecuencia a la vez, donde $x(t)$ es la señal adquirida por el canal 1 es decir por el eje horizontal, y $y(t)$ la señal adquirida en el canal 2, eje vertical. Se suele emplear para analizar rozamientos, resonancias, entre otras.

Las otras técnicas que existen son: análisis de fase, análisis de los promedios sincrónicos en el tiempo, análisis de desmodulaciones en amplitud, análisis de vibración en partidas y paradas y análisis de coherencia, entre otras [4] [5].

2.3.2. Evaluación De Severidad

Además de las técnicas por medio del análisis de las graficas se implementa la evaluación por severidad, que es la determinación de los valores admisibles para la vibración y por tanto la condición mecánica y eléctrica de la máquina. Para realizar esta evaluación existen diferentes estándares, para el caso de las máquinas que se van a evaluar y los



puntos de medición seleccionados se emplea la norma ISO 2372:” Vibraciones mecánicas de máquinas que operan con velocidades entre 10 y 200 (rev/s). Base para especificar estándares de evaluación”. El rango de frecuencias de las vibraciones para las que se emplea esta norma es entre 10 a 1000 Hz, rango dentro del cual esta el ancho de banda que por defecto maneja el acelerómetro (900Hz).

Este tipo de medición se realiza cuando el motor se encuentra en condiciones de trabajo nominales (voltaje, flujo, presión y carga), y ha alcanzado una temperatura estable.

La clasificación de la máquina se realiza de acuerdo a la potencia que esta maneje, el tipo de montaje que se empleo, si el soporte que tiene es rígido o flexible, y el uso que se le este dando. La CLASE I es en la que se encuentran los motores pequeños, hasta 15kW, y a mayor CLASE el motor funciona a mayor potencia. Las clases que existen se presentan en el manual de usuario diseñado (capitulo 4), de manera que el experto que este empleando la herramienta seleccione con que tipo de máquina esta trabajando. Según la norma ISO 2372 y basados en consideraciones teóricas y experiencias practicas (comportamiento de la señal en frecuencia, entre otros), el valor empleado para determinar la severidad es el valor RMS de la velocidad.

Cuando se presenta en un cambio en el nivel de vibración a razón de 1:1.6, se considera que a ocurrido un cambio significativo en el señal análoga al movimiento que se esta analizando, es decir cuando se produce una variación del 60% del valor RMS de la Velocidad de la vibración.



Cada vez que se efectúan dos cambios de nivel, se produce un cambio en la condición de la máquina ($1.6 * 1.6 = 2.56$), es decir cuando la vibración aumenta 2.56 veces. Para evaluar cualitativamente la condición de la máquina existen cuatro parámetros que indican bajo que condición esta operando, estos parámetros son:

- ❖ **A:** NORMAL o BUENA

- ❖ **B:** ADMISIBLE o SATISFACTORIA

- ❖ **C:** LIMITE o INSATISFACTORIA

- ❖ **D:** NO PERMISIBLE o INACEPTABLE

Si la evaluación cualitativa muestra un nivel NORMAL de operación, quiere decir que la máquina puede seguir operando a largo plazo de la manera que lo esta haciendo, de esta forma, no va a producir daños en los componentes de la máquina. Así, es claro que a medida que el resultado varíe en forma desfavorable, los componentes se pueden ven comprometidos hasta el punto de poder ser crítico el daño. Está en criterio del experto y su conocimiento en la máquina, la decisión a tomar sobre esta [6].

La tabla sugerida por la norma ISO 2372 que relaciona las clases y los parámetros para la evaluación (cualitativa), es la siguiente:



Tabla 2-3: Tabla de severidad

RANGO DE VELOCIDAD EFECTIVA RMS (mm/s)	TIPOS DE MÁQUINAS			
	CLASE I	CLASE II	CLASE III	CLASE IV
0,18-0,28	A	A	A	A
0,28-0,45				
0,45-0,71				
0,71-1,12	B	B	B	A
1,12-1,8				
1,8-2,8	C	C	C	B
2,8-4,5				
4,5-7,1	D	D	D	C
7,1-11,2				
11,2-18				
18-28	D	D	D	D
28-45				

Fuente: [6]

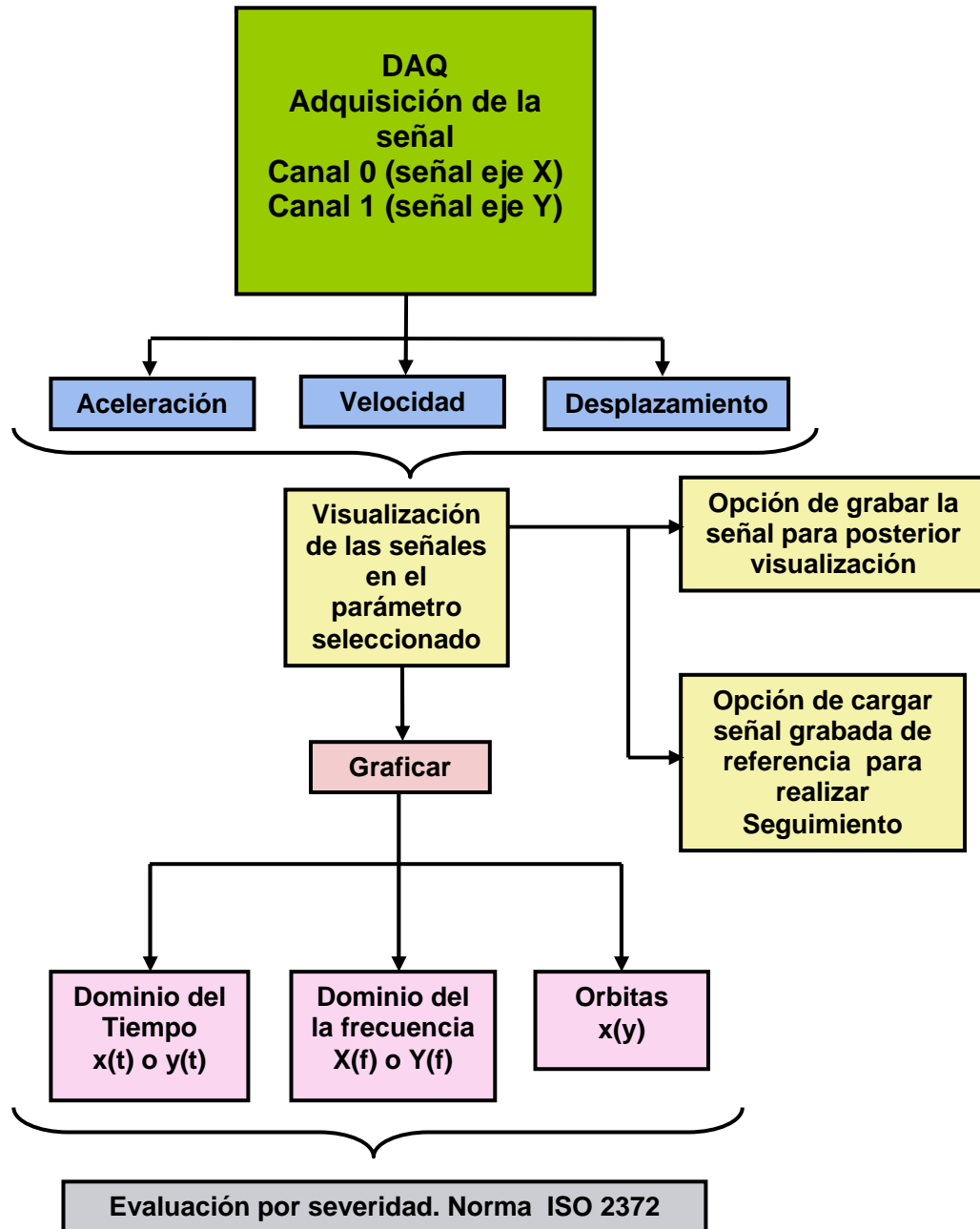
2.3.3. Descripción del Software

Basado en la explicación anterior se desarrolla el programa, que se describe en forma breve en el diagrama de bloques de la FIGURA 2-3.

Para poder entender el programa es necesario primero conocer a fondo el funcionamiento y rangos de trabajo del acelerómetro, por lo tanto, el programa y las pruebas realizadas se explican en el Capítulo 4. Por otro lado la explicación de cómo se usa el programa se puede encontrar en el Manual de usuario, Capítulo 5.



FIGURA 2-3 Diagrama de bloques del software



Fuente: Autores



3. ACELEROMETROS CON TECNOLOGIA MEMS

Los Sistemas Microelectromecánicos o MEMS por sus siglas en inglés (MicroElectroMechanical Systems), tiene sus inicios a finales de la década de los 90 y se puede ver como un sistema donde se combinan diversos módulos de dispositivos integrados (Mecánicos, eléctricos y electrónicos).

El proceso de fabricación de estos dispositivos se hace utilizando fundamentalmente las mismas técnicas de elaboración de circuitos integrados (CI ó IC por sus siglas en inglés) y sus dimensiones pueden variar de los micrómetros a los milímetros. Poseen la ventaja de tener todas las cualidades de los transductores tradicionales con la versatilidad que les da su tamaño reducido, además de la capacidad de funcionar individual o colectivamente (arreglos de varios sistemas MEMS para la realización de funciones mucho más complejas).

El futuro de esta tecnología es muy prometedor ya que esta se ha convertido en una de las áreas tecnológicas de más rápido crecimiento de la industria proyectando una razón de crecimiento por año del 10 al 20%, esto se debe a la tendencia actual de transformar los transductores tradicionales de estado sólido (sensores o actuadores) en sistemas de este tipo (MEMS), generando a su vez, gran interés en su desarrollo.

A pesar de la gran expectativa que esta tecnología genera, aún se encuentra en desarrollo y requiere superar algunos percances (mejora de confiabilidad y rendimiento) para poder convertirse en una opción atractiva para muchas aplicaciones de uso comercial. Algunas de las aplicaciones



que actualmente se pueden encontrar son: acelerómetros, sensores de presión, químicos, magnéticos y de flujo, micro-óptica, bombas de fluido, etc.

Los acelerómetros MEMS se encuentran entre los primeros productos de este tipo que fueron desarrollados. Mejorados con el transcurrir del tiempo en rendimiento, costo, capacidad de producción y confiabilidad han logrado abrirse un espacio en la industria especialmente en la automotriz (activadores de airbag), siendo esta la de mayor incidencia en su evolución.

A diferencia de los acelerómetros piezoeléctricos y piezoresistivos, los dispositivos MEMS ofrecen una respuesta de carga estática real y pueden ser altamente precisos y sensibles. Las principales características de este tipo de dispositivos son: alta estabilidad, sensibilidad a baja temperatura, tensión de salida lineal, bajo consumo de energía, precios razonables además de su tamaño reducido y poco peso.

Actualmente en el mercado se dispone de gran variedad de fabricantes, rangos de aceleración, anchos de banda, encapsulados, etc., que se escogen de acuerdo a la aplicación, conveniencia o fin específico que se desee trabajar.



3.1. PRINCIPIO FÍSICO DE FUNCIONAMIENTO

El acelerómetro capacitivo se basa en el sistema Masa - Resorte, el cual consiste en una masa m suspendida mediante un soporte elástico de constante elástica k a un marco fijo y que se somete a los efectos de la aceleración que se desea medir. A partir de las mediciones de desplazamiento de esta masa, es posible determinar la aceleración a la cual esta es sometida.

La frecuencia de resonancia no amortiguada o frecuencia natural del sistema se encuentra caracterizada por la siguiente ecuación:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad 2-1$$

Así mismo el factor de calidad en la resonancia esta dado por:

$$Q = \frac{\sqrt{km}}{b} \quad 2-2$$

Donde b representa el factor de amortiguamiento de la oscilación producido por la fricción de la masa con el aire.

Como el desplazamiento de la masa sigue a la fuerza exterior (y por ende a la aceleración ya que esta es proporcional a la fuerza), prácticamente sin retraso es necesario asegurar para el diseño del sensor que la frecuencia máxima esperada para la aceleración no supere la frecuencia natural del



sistema. Para conocer el desplazamiento de la masa, y en consecuencia su aceleración, utilizamos la ley de hooke:

$$y = \frac{F}{k} \quad \text{2-3}$$

Si $F = ma$ y $k = \omega_0^2 m$ de la ecuación 2-1 al reemplazar en 2-3 se obtiene la siguiente relación:

$$y = \frac{a}{\omega_0^2} \quad \text{2-4}$$

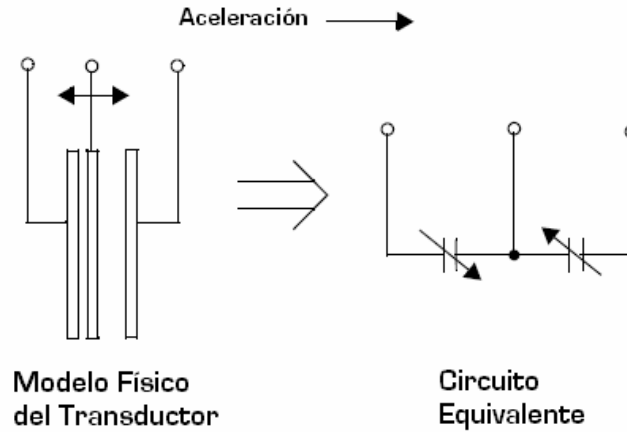
De esta relación se puede deducir que un acelerómetro diseñado para responder velozmente a cambios de aceleración (frecuencia natural alta), tendrá una amplitud a la salida pequeña ya que estas dos magnitudes son inversamente proporcionales.

La posición de la masa se obtiene midiendo la variación de la capacitancia entre la masa y un electrodo fijo. La configuración mas comúnmente usada es la capacitancia diferencial, en la cual existen dos electrodos fijos y uno móvil. La capacitancia entre los dos electrodos fijos es siempre constante mientras que la capacidad que existe entre el electrodo móvil y cualquiera de los otros dos electrodos varía con respecto a su posición.

Gráficamente tenemos:



FIGURA 3-1 Estructura y circuito equivalente del Acelerómetro



Fuente: Freescale Hoja de Datos MMA6233Q

Suponiendo un voltaje aplicado $+V_s$ en el electrodo de la izquierda y $-V_s$ en el electrodo de la derecha, y tomando como salida el terminal ubicado entre las dos capacitancias se obtiene la siguiente ecuación:

$$V_o = -V_s + \frac{C_1}{C_1 + C_2} (2V_s) = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} V_s \quad \mathbf{2-5}$$

Si las áreas de los capacitores fueran iguales entonces se tendría:

$$V_o = \frac{G_1 - G_2}{G_1 + G_2} V_s \quad \mathbf{2-6}$$

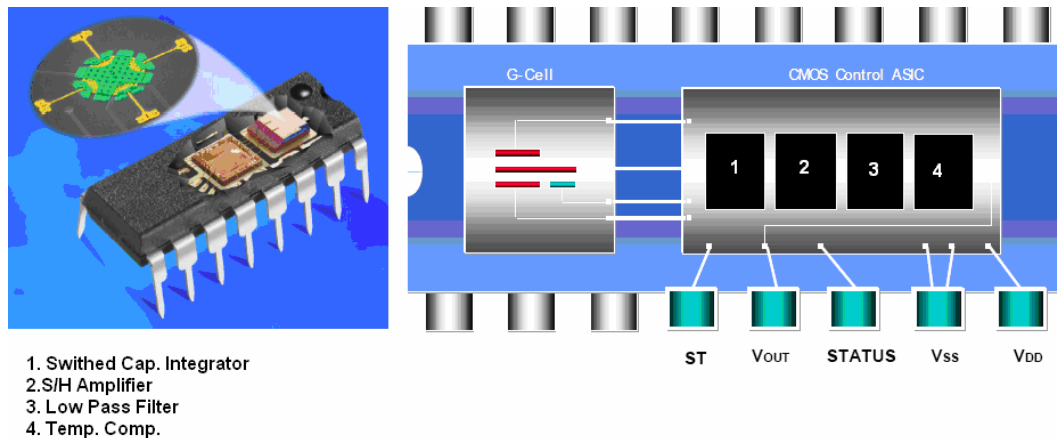
Donde G_1 y G_2 son la separaciones entre las placas de los respectivos capacitores. Con esta ecuación se puede observar la variación lineal del voltaje de salida con respecto a la diferencia de las separaciones.



3.2. DESCRIPCION FISICA Y DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SENSOR

El acelerómetro MEMS de freescale, internamente, contiene dos integrados. El primero de ellos representa la celda de gravedad o celda g donde el termino g se refiere a la gravedad e la tierra (Elemento ampliado en la FIGURA de la derecha) y el segundo es el encapsulado de control, que convierte el movimiento de la celda en una señal eléctrica.

FIGURA 3-2 Estructura y Diagrama de Bloques del Acelerómetro



Fuente: freescale

El dispositivo funciona de la siguiente manera: la celda g es el elemento encargado de sensar las variación de aceleración por medio de cambios en la capacitancia. El cambio en la capacidad es reconocido luego por el bloque de control y este es convertido en un valor de tensión que representa las variaciones de aceleración.



Los pines del dispositivo serán descritos a continuación:

- ❖ **El pin ST (Self-Test):** Este pin puede ser usado para comprobar la sensibilidad y el funcionamiento del acelerómetro.
- ❖ **El Pin STATUS:** Es usado para verificar el correcto funcionamiento del acelerómetro. Es una salida lógica normalmente en bajo que cambia de estado en el momento que el sensor presente algún tipo de falla.
- ❖ **V_{SS}:** conexión de puesta a tierra
- ❖ **V_{DD}:** conexión a la fuente de alimentación.
- ❖ **V_{OUT}:** Voltaje de salida.

3.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN DEL ACELEROMETRO

En este tema se exponen las características más importantes para la adecuada selección de un acelerómetro MEMS. Todas ellas fueron obtenidas por medio del fabricante del sensor y documentos sobre aplicaciones a fines.

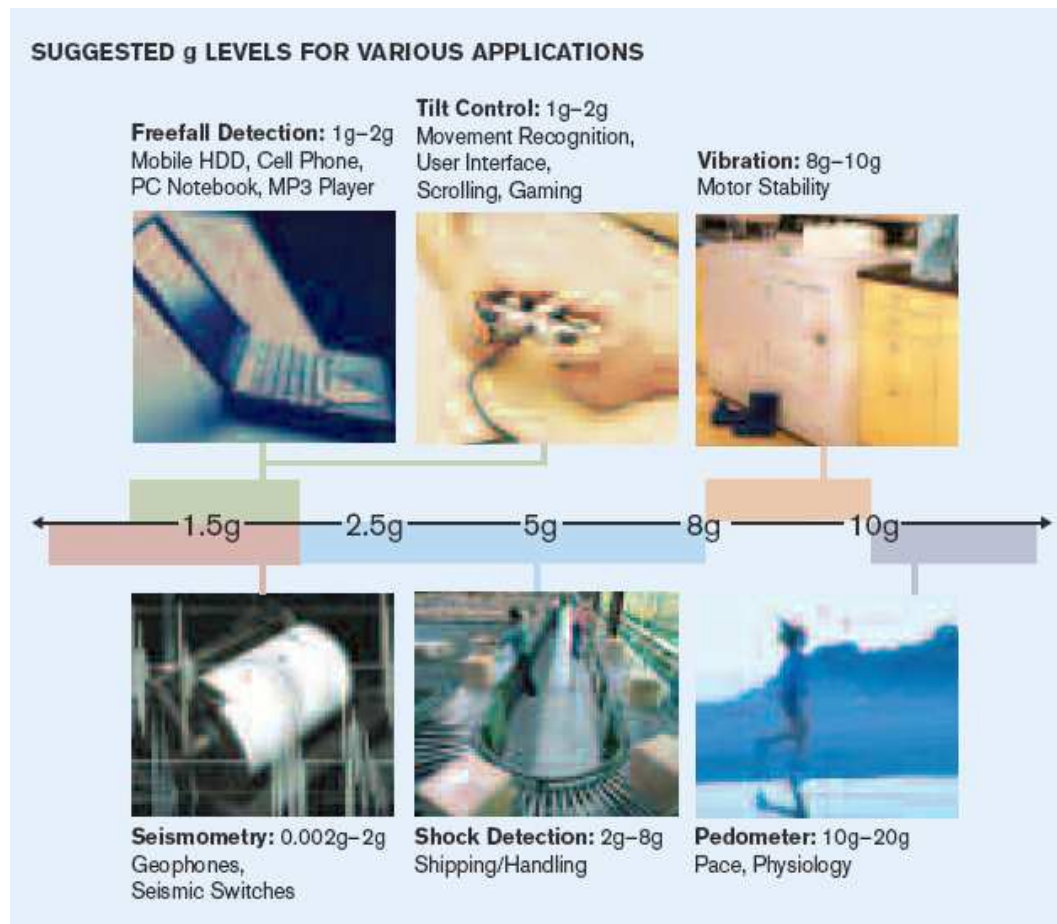
3.3.1. Rango de Trabajo

El rango de trabajo es la máxima aceleración que el dispositivo puede medir. Esta limitado por el margen de movimiento de los electrodos que conforman la celda de gravedad y depende del tipo de aplicación para la cual el sensor vaya a ser utilizado.



La elección de este rango se hizo basada en la recomendación del fabricante según se resume en la FIGURA 3-3.

FIGURA 3-3 Recomendación de Rango de acuerdo a la Aplicación



Fuente: Freescale

El MMA6233Q de freescale cuenta con un rango de aceleración de hasta 10 g y cumple con la recomendación del fabricante. Acelerómetros con rangos menores pueden ser usados dado que esta es la primera



experiencia en este tipo de aplicación se prefiere hacer caso a las sugerencias dadas por el fabricante.

3.3.2. Ancho de Banda

Esta limitado por ω_0 , ya que se requiere que la frecuencia máxima esperada para la aceleración debe ser mucho menor que este valor. Esta condición puede ser expresada de la siguiente manera:

$$10f_{\max} \leq \frac{\omega_0}{2\pi} \quad 2-7$$

Donde f_{\max} es el ancho de banda del sensor.

Para el caso de análisis de vibraciones en motores de inducción se recomienda el uso de acelerómetros con un ancho de banda entre 1 y 5 Khz. [1] [7], dependiendo de su velocidad de giro (frecuencia fundamental). El acelerómetro escogido para la realización de este trabajo, tiene un ancho de banda igual a 900 Hz., rango más que suficiente para análisis de fallas en motores de baja potencia.

3.3.3. Sensibilidad

Es la razón entre la salida y la entrada del sensor en este caso particular:



$$S = \frac{V_o}{a} \quad 2-8$$

La sensibilidad del sensor debe ser seleccionada de acuerdo a los niveles de vibración a los cuales este sea expuesto (Aceleración), a mayor sensibilidad mayor resolución (el rango de amplitudes de la tensión a la salida del sensor va a tener un mayor valor). Para el caso particular de análisis de vibración en motores de inducción, el acelerómetro seleccionado cuenta con un valor de sensibilidad de 120 mV/g (a temperatura ambiente, 25 grados centígrados y voltaje de alimentación 3.3 Voltios) que es un valor suficientemente alto para obtener una buena lectura de datos.

La sensibilidad del sensor variara linealmente dependiendo del voltaje de alimentación, esta afirmación se puede constatar en la hoja de datos del dispositivo [ANEXO A].

3.3.4. Linealidad

Es una de las características más importantes a la hora de seleccionar un sensor. Linealidad implica que las variaciones que se presenten a la salida serán proporcionales a variaciones presentes en la entrada.

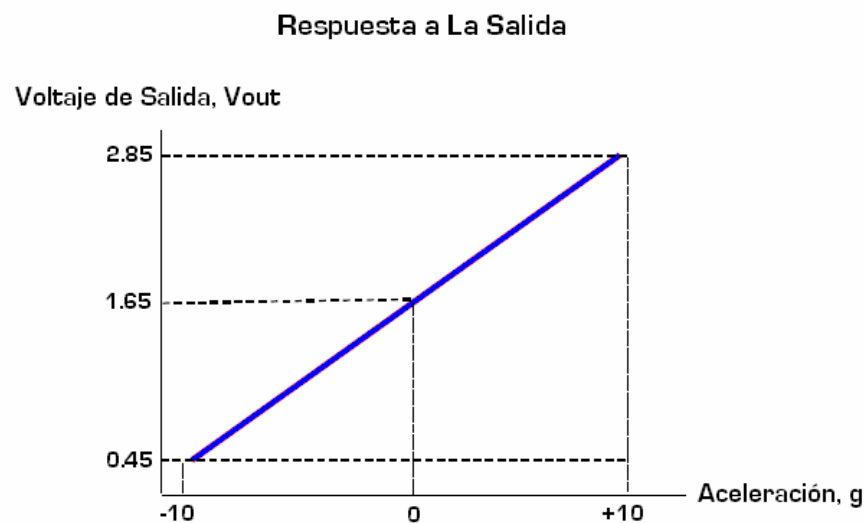
Para el MMA6233Q (acelerómetro seleccionado para esta aplicación) si la fuente de alimentación se encuentra dentro del rango entre 2.7 y 3.6 V, el dispositivo funcionará como un acelerómetro lineal completamente



calibrado. Más allá de estos límites el dispositivo puede funcionar como dispositivo lineal pero no es posible garantizar su calibración.

La siguiente es la gráfica de respuesta a la salida del MMA6233Q de freescale:

FIGURA 3-4 Gráfica de la Salida [V] Vs. La entrada [g]



Fuente: Freescale

3.3.5. Tiempo de Respuesta

El tiempo de respuesta se define como el tiempo que pasa desde que una entrada es recibida por el sensor hasta que esta es transducida y enviada a la salida.

El tiempo de respuesta del acelerómetro seleccionado MMA6233Q es de 0.7 ms, tiempo bastante bueno para la captación de datos en el análisis de vibración.



La información completa de las características del sensor se presenta en el ANEXO A.

3.4. CONSIDERACIONES DE MONTAJE

El elemento sensor es la principal fuente de error en una medición ya que este es la interfase entre la variable a medir y el instrumento de medición, por tanto es primordial obtener el montaje más adecuado para el acelerómetro.

La mejor zona para la ubicación del acelerómetro es aquella que mejor refleje las vibraciones de la máquina, generalmente esta zona es aquella que se encuentra cercana a los apoyos.

Otro factor importante en el montaje del sensor es la fijación de este sobre la superficie de medición. Existen diversos tipos de elementos o sustancias para fijar el sensor, por ejemplo el perno de acero, la cera de abeja, dispositivos magnéticos, pegamentos, etc., a continuación se describirán algunos de ellos.

- ❖ **Montaje con perno de acero:** Generalmente se emplea para el monitoreo permanente de máquinas y estructuras. Garantiza el óptimo desempeño del acelerómetro por lo que deberá ser usado siempre que sea posible.

- ❖ **Montaje con cera de abeja:** Es un método de fijación comúnmente utilizado para realizar mediciones en superficies



donde no es posible taladrar, se caracteriza por ser un montaje fácil y rápido de hacer.

- ❖ **Montaje con dispositivo magnético:** Para este montaje se requiere la mínima rugosidad posible y una zona totalmente limpia sobre la superficie de medición. Se recomienda para ensayos preliminares o durante la ubicación de posibles puntos de medida.

El montaje elegido para el sensor dependerá de las necesidades del usuario y de las facilidades que la máquina ofrezca para su colocación [1].

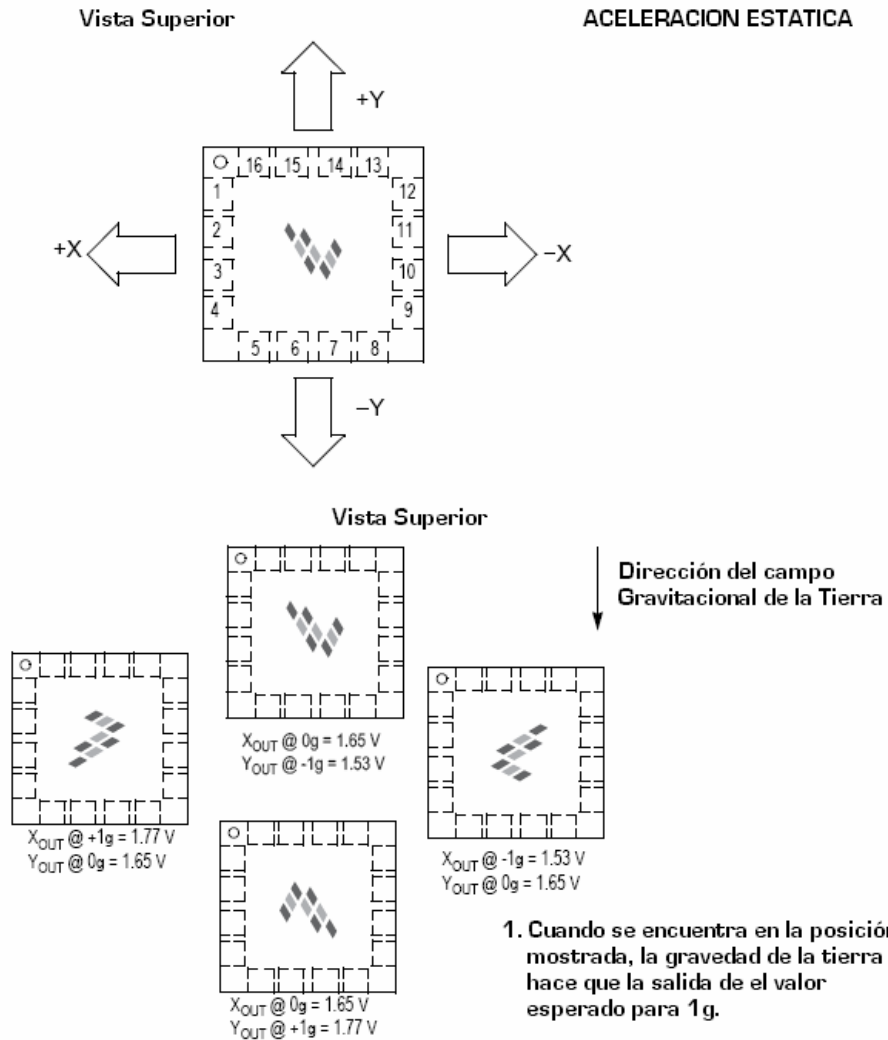
3.5. CALIBRACIÓN DEL ACELEROMETRO

El acelerómetro seleccionado es un dispositivo calibrado en fábrica y en el cual únicamente es necesario garantizar que la alimentación del mismo se encuentre dentro del rango indicado por la hoja de datos, para evitar el uso de alimentación externa, como fuentes o baterías (que pueden presentar pequeñas oscilaciones debido a el diseño interno o cambios al descargarse respectivamente), se elige alimentar el sensor con una de las salidas analógicas de la DAQ, la cual alimenta el sensor en el momento de cargar el programa.

Para comprobar que el dispositivo se encuentra bien calibrado es realizando las pruebas propuestas por el fabricante. Esta se muestra en la FIGURA 3-5. Para cada una de las posiciones indicadas en la figura se muestra el valor de salida de voltaje del sensor que depende de la aceleración a la cual los ejes se encuentran sometidos en ese momento.



FIGURA 3-5 Valores de Salida para Diferentes Posiciones del Acelerómetro



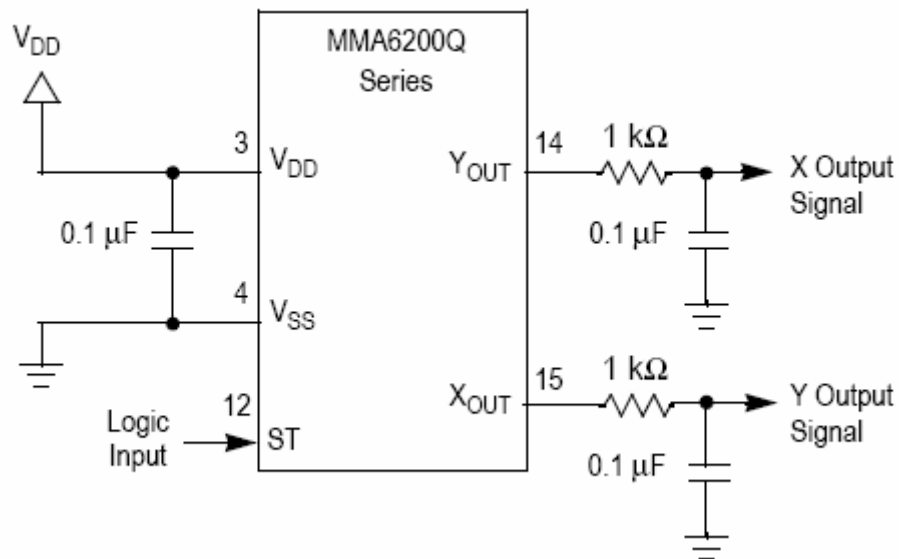
Fuente: Freescale Hoja de Datos MMA6233Q



3.6. DISEÑO DEL CIRCUITO IMPRESO (PCB)

El diseño de PCB para el acelerómetro se realizó en base a las recomendaciones dadas por el fabricante en su hoja de datos. El diagrama sugerido para el montaje se muestra en la FIGURA 3-6.

FIGURA 3-6 Diagrama de Conexiones Recomendado para El Acelerómetro



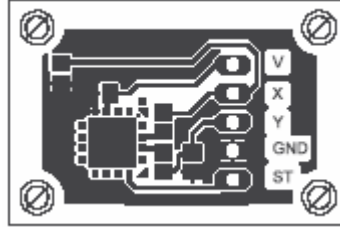
Fuente: Freescale Hoja de Datos MMA6233Q

Donde V_{DD} se toma desde la salida analógica “a0” de la tarjeta de adquisición de datos.

Empleando la versión de prueba del programa EAGLE disponible en Internet como herramienta para el diseño de PCB, se obtuvo finalmente el diagrama que se muestra en la FIGURA 3-7.



FIGURA 3-7 PCB Obtenido Utilizando versión prueba de EAGLE



Fuente: Los Autores



4. SOFTWARE Y PRUEBAS

En este capítulo se encuentran: la explicación del software que se diseñó en este trabajo, las pruebas y resultados obtenidos al probar el prototipo.

4.1. SOFTWARE

El diseño del programa se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Lo primero que se realiza en el programa es definir los valores establecidos por defecto (variables, gráficas, parámetros, botones, etc.) necesarios a la hora de iniciar la ejecución del programa. Para definir las propiedades iniciales se emplean nodos de propiedad. Los valores por defecto son los siguientes (FIGURA 4-1):

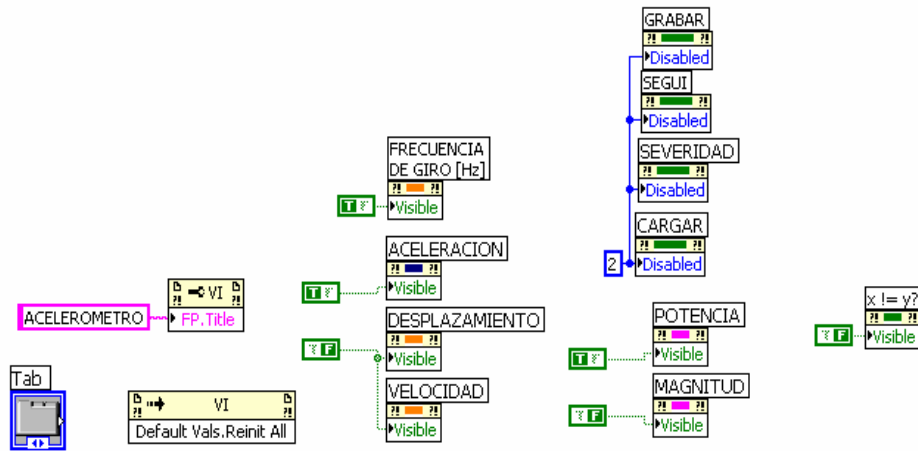
- ❖ Se reinician todos los valores que maneja el VI.
- ❖ El nombre de la ventana del VI va a ser ACELEROMETRO.
- ❖ En el panel frontal son visibles, todas las referencias que tienen la propiedad "Visible" habilitada por una constante de verdad.
- ❖ Los botones del panel frontal de GRABAR, SEGURIDAD, CARGAR y SEVERIDAD se encuentran deshabilitados.

2. El siguiente paso es realizar un *while loop*, dentro de este lazo se encuentra todo el programa desarrollado y se activa al ejecutar el VI y se desactiva con el botón salir o con el botón detener VI.

3. El primer bloque que se diseña dentro del *while loop* es el que permite seleccionar los parámetros de la adquisición y análisis de la

señal. Se crea en el panel frontal un botón virtual llamado CONFIGURACION DE PARAMETROS (diagrama de bloques se muestra en la FIGURA 4-2). Para correr el programa se deben seleccionar este botón, el cual a su interior abre el subVI “CANALES.vi”, por medio del cual se selecciona:

FIGURA 4-1 Valores iniciales del programa



Fuente: Autores

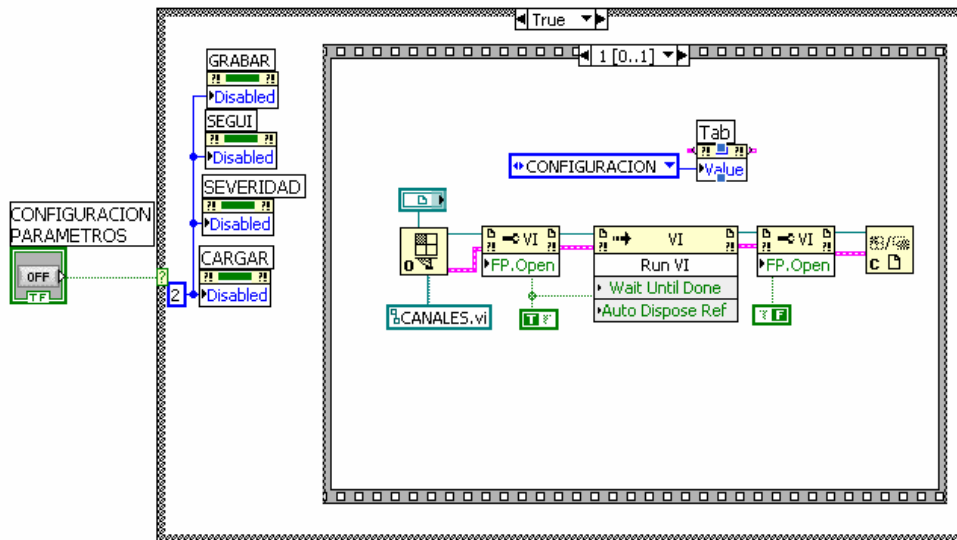
- ❖ El valor de la frecuencia y el número de muestras, que, como son variables de control, permiten al usuario modificarlas desde el panel frontal (para definir la frecuencia de muestreo).
- ❖ El número de canales. Puede ser un canal o los dos canales a la vez, dependiendo del análisis que se requiera hacer.
- ❖ Tipo de ventana (Para evitar las discontinuidades al principio y al final de los bloques analizados). Esta opción se deja visible porque los equipos comerciales utilizados para medir vibraciones tienen disponible esta elección. La más usada por los expertos en el análisis de vibraciones es la que trae por defecto el programa, la ventana Hanning. Se utiliza cuando se va a determinar la transformada rápida de Fourier y la densidad espectral de frecuencia.

❖ Unidades para describir la amplitud del espectro (SI o dB).

Los paneles frontales del VI principal y de CANALES.vi se muestran en la FIGURA 4-3.

4. Después de dar aceptar en el la ventana de configuración de parámetros y salir de esta, el programa espera a que se cambie el estado del botón virtual “ENCENDER” (en nombre de este en el diagrama de bloques es “adquirir”). EL diagrama de bloques se muestra en la FIGURA 4-4. Cuando se activa el case, se empieza a adquirir la señal, a través de la tarjeta de adquisición de datos (función *DAQ Assistant*), empleando los valores de las variables globales que se definieron en la configuración de parámetros.

FIGURA 4-2 Diagrama de bloques que activa el botón virtual CONFIGURACION DE PARAMETROS



Fuente: Autores

5. Dentro del *DAQ Assistant* (representación virtual de la tarjeta de adquisición de datos) es necesario definir cuales pines se emplearon (el diagrama de los terminales de conexión de la tarjeta se puede ver en el ANEXO C), para la aplicación fueron:

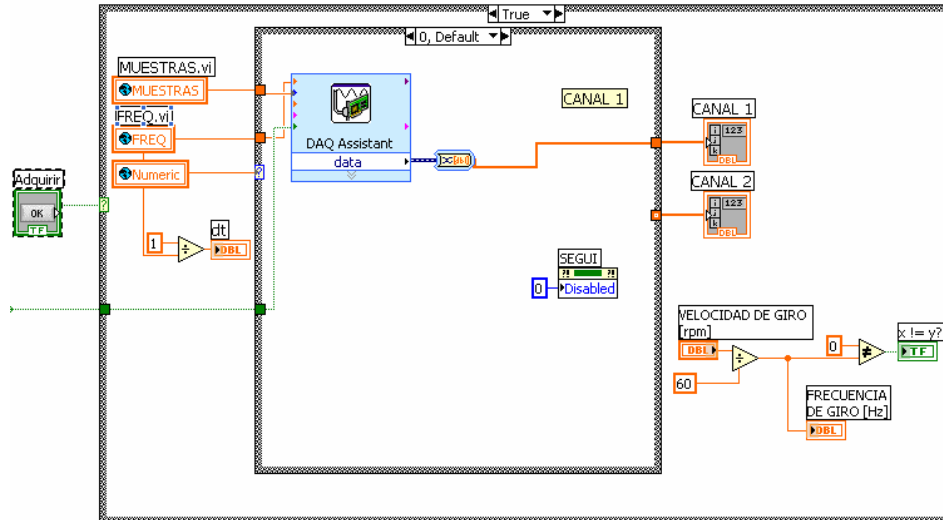
- ❖ **ai0**: Entrada analógica cero A esta se conecta el Voltaje de salida del acelerómetro en el eje X (**PIN 68**)
- ❖ **ai1**: A esta se conecta el Voltaje de salida del acelerómetro en el eje Y (**PIN 33**)
- ❖ **ai GND**: Es la tierra que se emplea para referenciar las señales que arroja el sensor (**PIN 67**)
- ❖ **ao0**: Esta es la salida que se emplea para alimentar el sensor a 3.3V. (**PIN 22**)

FIGURA 4-3 Panel frontal de VI principal y de “CANALES.vi”



Fuente: Autores

FIGURA 4-4 Diagrama de bloques que activa el botón virtual



Fuente: autores

Además de definir las entradas y salidas que se van a usar, se realiza el escalamiento para transformar la señal en Volts a aceleración en g's. FIGURA 4-5.

6. Después de salir de la DAQ se envía a un arreglo o matriz en donde se escriben los datos mientras se habilita la opción que los grafica.

7. Para que se enciendan los osciloscopios virtuales y los indicadores que aparecen en el panel frontal, se debe seleccionar el botón virtual “CAPTURAR SEÑAL” (FIGURA 4-6). Cuando este se selecciona se activa el *Case Structure* donde se encuentran:

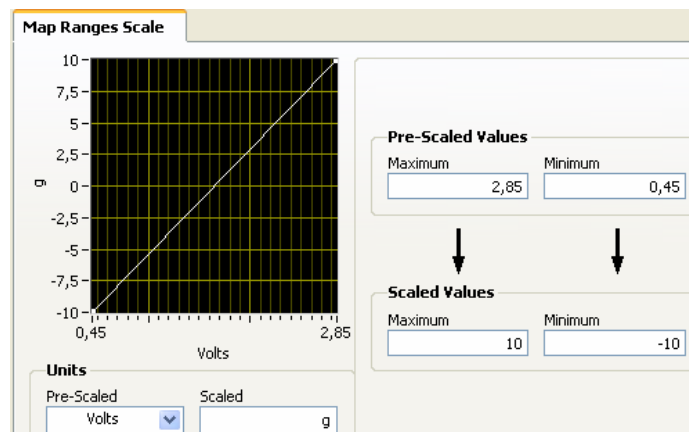
- ❖ Un *Case Structure* de tres casos. En el Caso 1 y 2 (eje X y eje Y respectivamente) el *array* correspondiente al canal analizado (“CANAL 1”, para eje X, y “CANAL 2” para el eje Y) se lleva a un generador de forma de onda, a partir del cual se gráfica la

aceleración y se determinan y trazan la densidad espectral de potencia, y espectro (por medio de funciones de Labview 7.1). Finalmente en el Caso 3 se realiza la gráfica de X con respecto a Y.

- ❖ Dentro del *Case Structure* que se activa también se encuentra el subVI “integral” diseñado por los autores que integra la aceleración (de la vibración), para determinar la velocidad y este a su vez se integra nuevamente para determinar el desplazamiento (para cada eje). De este subVI se toman las salidas para graficar el desplazamiento y la velocidad, además de los valores pico y RMS, entre ellos el más relevante es el de velocidad, ya que este es el medio para obtener el análisis de severidad.

Si se selecciona de nuevo este botón se va a detener la captura. En el osciloscopio permanecerá el ultimo ciclo de muestras graficadas. Esto se emplea para facilitar la evaluación por comparación (cuando se carga una señal que ha sido previamente almacenada).

FIGURA 4-5 Escalamiento de la señal en Volts a aceleración en gravedades

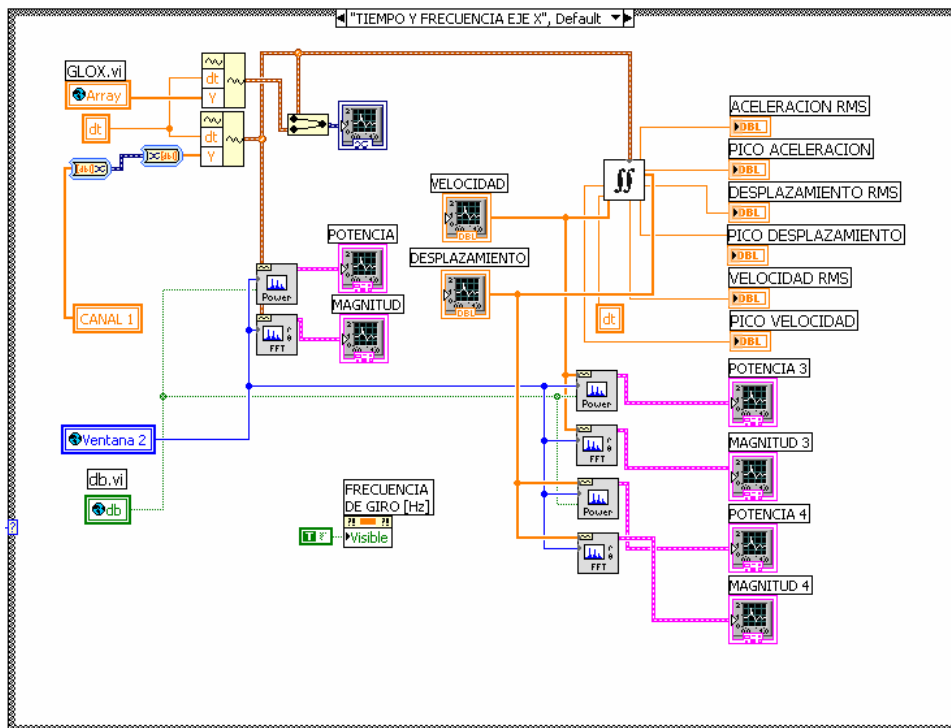


Fuente: Autores

9. En el panel frontal del VI se puede activar el botón virtual “EVALUAR SEVERIDAD”, este internamente activa un *Case Structure* que abre el subVI de “SEVERIDAD.vi”. Este subVI costa de una serie de comparadores (diferentes subvi) que se realizaron basados en la tabla 2-3, estos confrontan el valor RMS de la velocidad obtenido con los rangos establecidos y determina la condición de la máquina.

10. Para grabar la señal que se esta capturando se debe activar el botón virtual “GRABAR SEÑAL”. Para realizar esta función se diseño un subVI llamado “guardar” en el que se almacenan los datos de la señal en el tiempo dentro de una tabla en formato Excel.

FIGURA 4-6 Diagrama de bloques del Case Structure que se activa con “CAPTURAR SEÑAL”



Fuente: Autores



11. La señal que se almacena se puede cargar de nuevo. Para activar el subVI “ABRIR.vi” diseñado con este objetivo, se selecciona el botón virtual “CARGAR SEÑAL”, el subVI permite abrir el archivo de Excel que se desea volver a graficar. Después de realizar la selección el grafica los datos en el mismo osciloscopio virtual que aparece la señal que se esta capturando, pero en un color diferente.

12. Para detener el VI se crea un botón virtual en el panel frontal con el fin de evitar un paro forzado cuando se desee detener el programa.

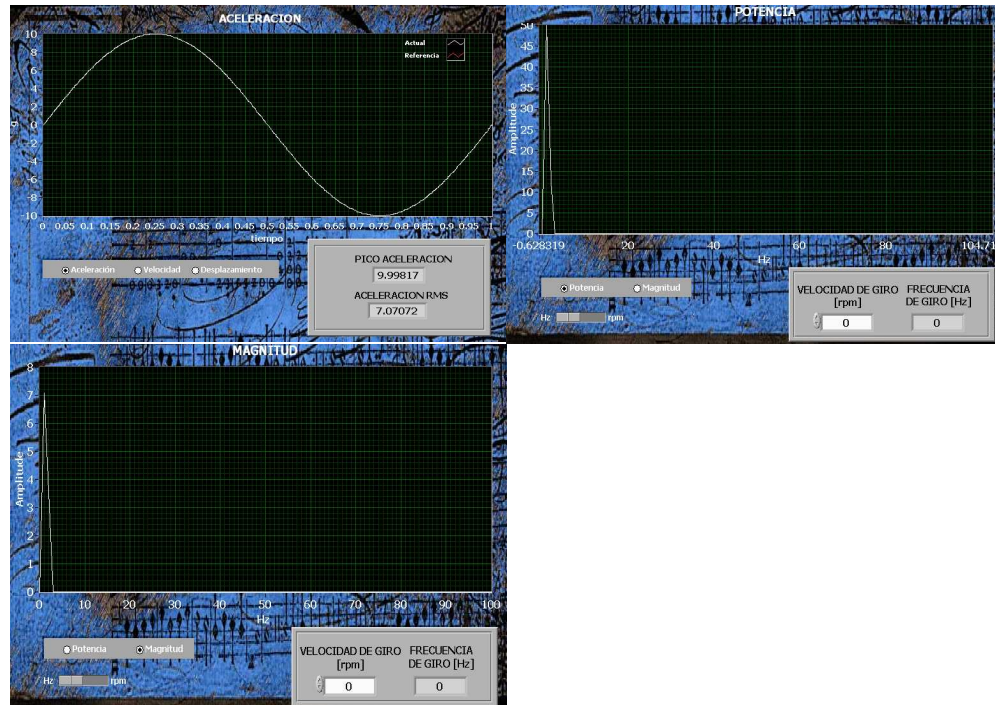
13. Por ultimo se diseña un subVI que se activa al seleccionar el botón virtual “SALIR”, donde se muestran los créditos.

4.2. PRUEBAS REALIZADAS

4.2.1. Pruebas simuladas

Antes de proceder a realizar pruebas con el acelerómetro se opto por simular la tarjeta de adquisición de datos DAQ PCI 6221 con el Measurement & Automation de National Instruments. Las señales simuladas fueron (por defecto) dos ondas sinusoidales de amplitud 10 V y frecuencia de 1 Hz. Las pruebas se hicieron para uno y dos canales respectivamente, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

FIGURA 4-7 Gráficas: Aceleración con respecto al tiempo, densidad espectral de potencia, y espectro de la señal

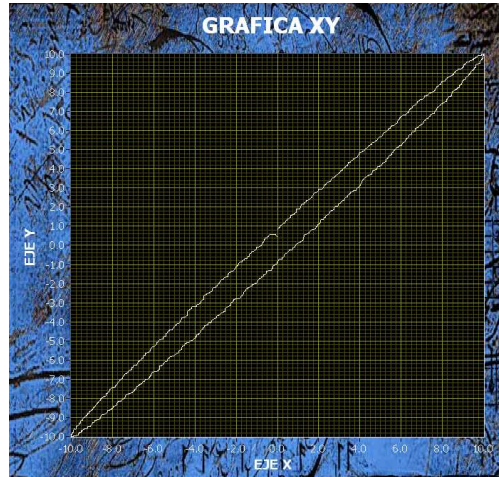


Fuente: Autores

La primera prueba realizada se hizo para un solo canal, los parámetros de configuración utilizados para esta prueba se muestran en la FIGURA 4-3. Los resultados obtenidos para un canal se observan en la FIGURA 4-7, donde se verifica que la señal después de procesada tiene igual amplitud y frecuencia que la que se generó en la DAQ. De igual forma se verificó que la velocidad y desplazamiento eran las esperadas.

La señal simulada para los dos ejes de medición se emplea para comprobar la gráfica de X con respecto a Y o de orbitas, que se observa en la FIGURA 4-8.

FIGURA 4-8 Gráfica de Orbitas



Fuente: Autores

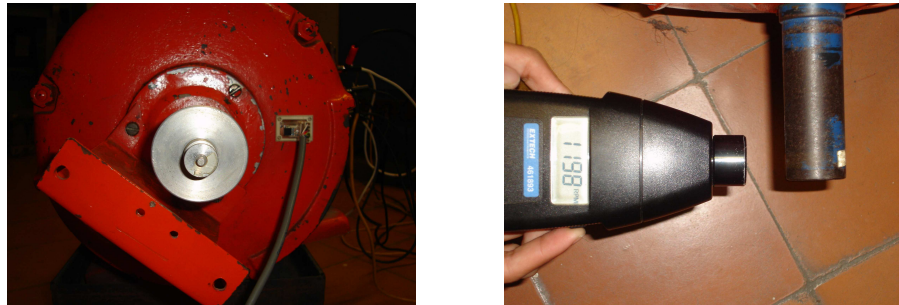
Después de realizada la simulación y comprobar que los resultados son los esperados se procede a realizar las conexiones para realizar las pruebas.

4.2.2. Conexiones realizadas

Para realizar las pruebas se trabajo con uno de los motores trifásicos con los que cuenta la escuela, se espera a futuro poder realizar pruebas con las máquinas que están siendo instaladas en el laboratorio de máquinas eléctricas.

Luego de conectar un motor de inducción trifásico de rotor devanado en delta a la red de 60 Hz por medio de un autotransformador para el arranque, se fija el acelerómetro a la carcasa del motor para la toma de medidas.

FIGURA 4-9 *Ubicación del acelerómetro en el motor y velocidad de rotación medida*



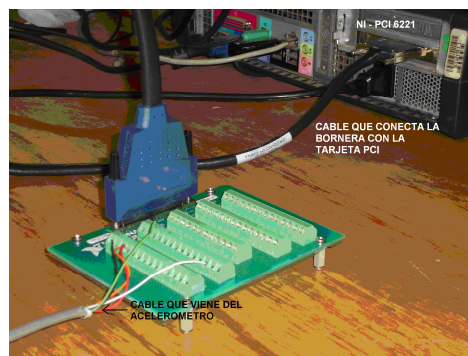
Fuente: Autores

El motor seleccionado trabaja a una potencia de 4kW, y la velocidad de rotación medida fue de 1198rpm.

Después medir el valor RMS en varios puntos del motor se ubico y fijo el sensor en el punto donde la velocidad en RMS era mayor. FIGURA 4-9. Para la ubicación se tiene en cuenta indicación dada en la sección 5.2.

El acelerómetro se conecta por medio de un cable blindado a la bornera de NI en los pines seleccionados, la cual a su vez realiza la conexión a la tarjeta de adquisición de datos (FIGURA 4-10).

FIGURA 4-10 *Conexión acelerómetro - DAQ*



Fuente: Autores



4.2.3. Pruebas con el acelerómetro MMA6231QR2 y la tarjeta de adquisición de datos DAQ PCI 6221

Las gráficas de las pruebas realizadas se pueden encontrar en el ANEXO E. Por simplicidad se muestran solo las gráficas obtenidas para la aceleración ya que con estas se puede mostrar el funcionamiento del equipo. Es importante no olvidar que el eje X es el eje Vertical y el Eje Y es el eje Horizontal de acuerdo a la posición que se selecciono del sensor.

EQUIPO FUNCIONANDO NORMALMENTE: Después de realizar todo lo descrito anteriormente, se tomaron datos con el Analizador sobre el funcionamiento normal del motor Los resultados obtenidos fueron los siguientes.

Eje X: En las FIGURAS E-1, E-2, se muestran los resultados de las pruebas en el eje X de la aceleración velocidad y desplazamiento las gráficas resultantes de las pruebas.

En la FIGURAS E-2 se pueden identificar una componente de frecuencia significativamente altas con respecto a las demás, esta se encuentra ubicada a 660 Hz aproximadamente, esto se debe a que el motor no se encuentra en buen estado y muestra con esto posibles fallas en los rodamientos. Aparecen otras componentes pero no tan significativas como esta.

Eje Y: En este eje se puede observar que la única componente significativa en el espectro esta ubicada a 20 Hz que es precisamente la frecuencia de rotación del motor. Los resultados obtenidos hasta el



momento son los esperados. Las gráficas se pueden ver en las FIGURAS E-3 y E-4.

Órbitas (Gráfica XY): En esta gráfica se puede observar la forma ovalada de la relación de amplitudes entre ambos ejes, este análisis sirve como complemento de los dos anteriores. (FIGURA E-5)

Se inducen fallas sobre el motor para mostrar como cambia el espectro y la señal en el tiempo. Todas las pruebas, tanto las del motor en estado normal como las de de las fallas generadas se compararon con un analizador de espectros comercial con el que la escuela de ingeniería mecánica cuenta, y los resultados fueron los esperados. Las componentes de frecuencia que aparecieron fueron las mismas con valores de amplitud muy similares. Se deduce que estas variaciones se deben a la ubicación los sensores.

FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR SIN UNA DE LAS FASES: se retiro una de las fases del motor para observar si sucede lo esperado en tiempo y frecuencia.

Eje X: En el espectro de la señal se puede verificar el cambio de la señal en el tiempo y la aparición de una componente significativamente alta en comparación a las demás incluso superando aquella a la frecuencia de 660Hz. Esta componente según los estándares se debe a la ausencia de una de las fases. Los resultados se pueden observar en las FIGURAS E-6 y E-7.

Eje Y: En frecuencia se observan componentes en el segundo y tercer armónico de la frecuencia de la red, además del pico de 20 y 660Hz,



poco significativo comparado con el de 120 Hz (FIGURA E-8). Ocurren cambios en la forma de onda FIGURA E-9.

Órbitas: La gráfica de órbitas obtenida cambia significativamente con respecto a la obtenida en normal funcionamiento, haciendo evidente una falla en el sistema (motor). (FIGURA E-10)

ROZAMIENTO SOBRE EL EJE DEL MOTOR: Para inducir esta falla se ejerce una presión sobre el eje del motor.

Eje X: en esta gráfica se observa como aumentan las componentes relacionadas con las altas frecuencias debido a que los rodamientos se están viendo afectados. De igual forma existe cambio de la forma de onda debido a que parecen componentes a altas frecuencias. FIGURA E-11 y E-12.

Eje Y: en este eje aumentan también las componentes a altas frecuencias y sigue apareciendo de forma significativa el primer armónico de la frecuencia de giro del motor. FIGURA E-13 y E-14

Órbitas: cambia la forma de la órbita con respecto de la forma obtenida en estado normal. FIGURA E-15.

En el anexo E se muestra también los resultados cuando se realiza un desbalance por corrientes. Los resultados en estas pruebas fueron de igual forma comprobados con el analizador de espectros de la escuela de Ingeniería mecánica. (FIGURA E-16, E-17, E-18, E-19, E-20).

En este anexo también se encuentran los valores PICO y RMS obtenidos, y los resultados de la evaluación de severidad (TABLA E-1).



En esta evaluación se puede ver que el motor no se encuentra dentro del rango normal. Esto se debe en gran parte a los rodamientos y a que el motor se encuentra en una base móvil.

No se realizaron pruebas con el motor acoplado debido a que en el momento la escuela esta realizando renovaciones al laboratorio de máquinas eléctricas.



5. MANUAL DEL USUARIO

Mediante esta herramienta se pueden medir las vibraciones en los motores de inducción, empleando como transductores acelerómetros con tecnología MEMS (MMA6233Q,) y Labview 7.1(o versiones superiores) como software para el análisis y visualización de las señales de vibración y la tarjeta de adquisición de datos NI-PCI 6221 de la empresa NATIONAL INSTRUMENTS. En este manual se explica como emplear la herramienta y de manera breve se describe como interpretar algunos de los posibles resultados.

5.1. RECOMENDACIONES

Se recomienda al usuario leer todo el **MANUAL DEL USUARIO** y la hoja de datos de cada uno de los implementos usados para la ejecución de este proyecto, esto con el fin de evitar algún daño o error en la manipulación de las partes. No obstante, más adelante se menciona como instalar cada una de las partes que conforman el prototipo.

Si se desea cambiar alguno de los componentes de hardware como tarjeta de adquisición o sensor deben considerarse de vista los criterios de selección para el prototipo implementado.

Para emplear esta herramienta para el análisis de fallas, el usuario debe tener conocimientos previos sobre el tema.



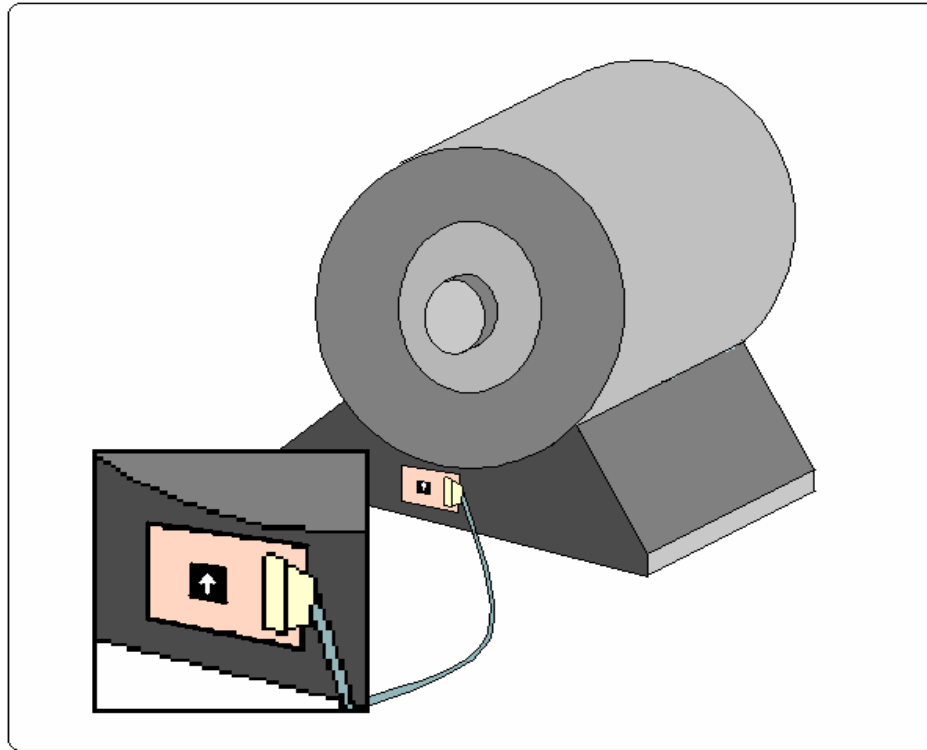
5.2. UBICACIÓN Y FIJACIÓN DEL SENSOR

Como el sensor consta de dos acelerómetros integrados en uno, uno de ellos mide el movimiento en el eje X y el otro el movimiento en el eje Y, facilita la ubicación ya que no es necesario calcular que los sensores estén uno a 90° del otro (esto es necesario para poder ejecutar el análisis). Antes de realizar la fijación del sensor a la máquina se necesita que se encuentre el punto en el que las vibraciones son mas fuertes, es decir se evalúan varios puntos y se mira para qué posición el valor RMS es mayor. Los puntos de medición mas empleados para la obtención de medidas de vibración son los apoyos del motor y en ocasiones los puntos cercanos a los rodamientos

El prototipo esta configurado para que el sensor trabaje en posición vertical, (con la flecha hacia arriba), si se cambia esta forma de ubicación, va a aparecer una componente DC, en la grafica de tiempo, cosa que no se desea. La forma de ubicarlo se muestra en la FIGURA 5-1.

Para fijar el sensor se pueden emplear varios métodos, entre ellos esta fijar la baquelita en la que se esta montado el acelerómetro, directamente con algún adhesivo que permita despegarlo de nuevo, como la silicona, esto se puede realizar debido a que el circuito como tal es muy liviano y de tamaño reducido y, por lo tanto fácil de fijar. Otra forma seria perforando la superficie del motor y atornillando el circuito a la superficie. No es práctico a menos que se desee dejar el sensor para realizar monitoreo constante de la máquina.

FIGURA 5-1 *Posición y punto de ubicación empleado*



Fuente: Autores

5.3. EJECUCION DEL PROGRAMA

Para la ejecución del programa es necesaria por recomendación de la empresa NATIONAL INSTRUMENTS una memoria RAM de mínimo 512MB, para evitar problemas en la adquisición de la señal.

5.3.1. Instalación De Software Y Hardware

Para realizar la instalación del software y hardware empleados en la herramienta de medición de vibraciones se deben seguir los siguientes pasos:



- i. Instalar software:** Instalar en el computador el software de NATIONAL INSTRUMENTS (NI), Labview 7.1 por medio del CD instalador que se adquiere al momento de comprar la licencia.
- ii. Instalar hardware:** Después de tener el software se procede a instalar la parte de hardware que se va a emplear en el computador, la tarjeta de adquisición de datos (DAQ) NI PCI 6221. Al colocar la DAQ en la Board de computador el software (Labview) la reconoce automáticamente.
- iii. Probar el estado de la tarjeta:** Lo siguiente a realizar es cerciorarse que la DAQ este en buen estado, para eso se utiliza un programa que se encuentra dentro de los que instala automáticamente el Labview que se llama “Measurement & Automation Explorer”, al abrir este se puede observar una ventana de nombre “Configuration”; dentro de esta se debe seleccionar en “Devices and Interfaces”, la opción de “NI-DAQmx Devices” donde a su vez se escoge “NI PCI 6221: “Dev1””. Ahí existe la opción de realizarle una prueba a la tarjeta para ver si esta funcionando de forma correcta y puede ser empleada para la adquisición; para realizarla se debe hacer clic en “Self-Test” y de esta manera conocer si la tarjeta pasa la prueba o no. Antes de cargar el programa se debe configurar en la misma sección donde se encuentra Self-Test, la tarjeta de adquisición de datos para que suministre el voltaje de alimentación DC al sensor en una de sus salidas (ao0), para ello, se pulsa sobre el botón Test Panels, que activa una ventana en donde se selecciona la opción Analog Output en la que finalmente se encuentra Output voltage donde este voltaje



puede configurarse (3.3 V), para actualizar estos datos en la tarjeta se pulsa el botón update.

Con esto se finaliza la instalación de software y hardware.

5.3.2. Cargar El Programa

La herramienta incluye el CD donde se encuentra el programa que se debe ejecutar. Para realizar esto se debe copiar del CD la carpeta con el nombre **DETECTOR DE VIBRACIONES** en el escritorio del PC, dentro de esta carpeta se selecciona el programa llamado “**DETECTOR DE VIBRACIONES.vi**”. Una vez se realiza el punto anterior se tiene el programa cargado y ejecutado.

5.3.3. Análisis De La Señal

Antes de realizar el análisis es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- ❖ Es posible tener espectros similares para diferentes tipos de fallas, por lo tanto puede suceder que se confunda el tipo de falla que se presenta. Es recomendable visualizar para estos casos la señal en tiempo y analizar su comportamiento.
- ❖ Se pueden observar picos en las componentes de frecuencia que no se esperan, puede ser útil variar la frecuencia del motor ya que pueden ser reflejos de la frecuencia de resonancia de algunos de los componentes de la maquina.



- ❖ Para el análisis es necesario conocer la velocidad con la que está girando el motor

Considerando lo anterior se selecciona en la pantalla la opción, **CONFIGURACION DE PARAMETROS**.

Configuración de los parámetros de adquisición: después de hacer clic en CONFIGURACION DE PARAMETROS se carga una pantalla en la que se debe configurar la frecuencia de muestreo, el número de muestras, el número de canales y seleccionar de la unidad en que se va a expresar el espectro.

- ❖ **Frecuencia y número de muestras:** permite si la persona lo desea cambiar la frecuencia y número de muestras, pero por defecto el programa arroja unos valores preestablecidos.
- ❖ **Numero de canales:** En esta misma pantalla se establece con que número de canales va a trabajar, si con uno o con dos canales.
- ❖ **Un Canal:** La posibilidad de un solo canal implica visualizar la señal (de la aceleración, velocidad o desplazamiento) solo para el eje horizontal X. Se emplea un solo canal cuando se desea realizar un **ANALISIS EN TIEMPO Y ANALISIS EN FRECUENCIA**. Se realizan simultáneamente las gráficas en tiempo y en frecuencia estas se grafican simultáneamente para facilitar el análisis. De igual forma se muestran el valor RMS, valor PICO, entre otros valores que son empleados también como parámetros para evaluar las vibraciones.



- ❖ **Dos canales:** Se opta por trabajar con los dos canales cuando se va a realizar el **ANALISIS DE ORBITAS**, o se desea visualizar las señales tanto en el eje horizontal X, como en el eje vertical Y.
- ❖ **Unidades de la magnitud del espectro:** las unidades en las que puede expresar el espectro son en dB o lineal (Sistema Internacional de medidas).

Una vez se seleccionan estos parámetros se da clic en ACEPTAR para pasar a la ventana de visualización.

Encender el Módulo de visualización: Para encender el modulo de visualización se debe seleccionar el botón virtual ENCENDER. Una vez encendido se puede iniciar la captura de la señal.

Capturar la señal: el botón virtual con el nombre CAPTURAR SEÑAL muestra la señal que se esta adquiriendo en el osciloscopio. Si se hace clic de nuevo sobre el se suspende la adquisición y se visualiza el ultimo tramo de tiempo adquirido.

Selección del parámetro a analizar: Existe la opción de elegir con que parámetro se va a analizar la señal, puede ser *aceleración*, *velocidad* o *desplazamiento*. Para la selección se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- ❖ **Aceleración:** Este parámetro se debe emplear cuando se van a analizar las componentes a altas frecuencias.
- ❖ **Velocidad:** El espectro en frecuencia de la velocidad muestra la misma cantidad de información para todas sus componentes, es



decir que se puede emplear para realizar una valoración general del comportamiento de la maquina para el ancho de banda en el que se esta trabajando.

- ❖ **Desplazamiento:** se recomienda emplear el desplazamiento cuando se desea tener mayor información del las componentes a baja frecuencia.

Seguimiento: Para efectuar seguimiento al comportamiento de un motor se puede cargar, la señal de referencia o simplemente los datos que desea usar para realizar la comparación (cuando se realiza un historial del comportamiento del motor), de manera que se va a visualizar la señal almacenada en el mismo osciloscopio virtual con la señal que se esta capturando. Si desea pausar la captura (sostener o congelar la señal) para realizar el análisis, se debe hacer clic en el botón virtual CAPTURAR SEÑAL.

Para realizar el seguimiento al comportamiento de un motor se realizan los siguientes pasos:

- ❖ **Guardar la señal que se esta adquiriendo:** Esta función se emplea para dos cosas. La primera para grabar la SEÑAL DE REFERENCIA (se debe tomar cuando el motor se encuentra en buen estado), y la segunda cuando se desea tener un historial del comportamiento de la maquina. Al momento de archivar es importante que se establezca un orden, ya que el programa guarda los datos con fecha de realización pero el nombre y la carpeta lo define el usuario. En la carpeta donde se encuentra el programa (DETECTOR DE VIBRACIONES), se encuentra una carpeta de nombre **SEGUIMIENTO**, se recomienda al usuario para evitar



confusiones o perder información emplear esta carpeta para guardar los datos, y a su vez crear dentro de esta una carpeta para cada motor que se trabaja.

- ❖ **Cargar señal de referencia:** Se emplea para buscar la función antes guardada, simplemente seleccionando el archivo el programa carga automáticamente la señal en tiempo y frecuencia.

Evaluación de Severidad: se debe hacer clic en el botón virtual SEVERIDAD. En la ventana que aparece se debe escoger la CLASE del motor con el que se va a trabajar. Las clases son las siguientes:

- ❖ **CLASE I:** Máquinas pequeñas con potencia menor a 15kW.
- ❖ **CLASE II:** Máquinas de tamaño mediano entre 15 y 75kW o maquinas rígidamente montadas hasta 300kW.
- ❖ **CLASE III:** Máquinas grandes con potencia sobre 300kW, montadas en soportes rígidos.
- ❖ **CLASE IV:** Máquinas grandes con potencia sobre 300kW, montadas en soportes flexibles (alta velocidad). [1], [6].

El analizador determina la condición de la maquina. La evaluación es cualitativa, y se clasifica en:

- ❖ **NORMAL:** La maquina se encuentra funcionando correctamente. Todas sus partes están en buen estado, o por lo menos no están generando fallas aún.



- ❖ **ADMISIBLE:** El motor funciona bien, pero existe la posibilidad de que se este presentando una falla, debe realizarse un chequeo periódico para evitar que se produzcan fallas graves
- ❖ **LIMITE:** En este punto se debe evaluar la maquina, no es recomendable que funcione de esta manera.
- ❖ **NO PERMISIBLE:** Se debe suspender el uso de la maquina para realizar una revisión de sus partes anclajes y acoples.

Este estudio se debe complementar con el análisis de la señal en tiempo y frecuencia.

5.3.4. Posibles Formas de Analizar la Señal Visualizada

En esta sección se presentan el posible comportamiento de la señal en frecuencia para algunas de las fallas que puede presentar la máquina basado en estándares preestablecidos [1].

- ❖ **Desbalance mecánico:** produce una componente a la frecuencia de giro del rotor.
- ❖ **Eje Combado:** Es un tipo de desbalance reconocible por la aparición del primer y segundo armónico.
- ❖ **Desalineamiento:** genera tres armónicas de la frecuencia de rotación. Se puede presentar según los siguiente:
 - Si las componentes se presentan en eje x (horizontal), el desalineamiento puede estar en el plano vertical



- Si se presentan cuando se analiza en el eje y, el desalineamiento puede estar en el plano horizontal.

- ❖ **Corrimiento del centro magnético:** Para identificarlo se observa en el espectro componentes de frecuencia a la frecuencia de línea es decir 60Hz para el caso de Colombia y a la frecuencia de operación del motor.

- ❖ **Barras rotas:** Genera niveles de vibración altos a la primera y segunda armónica de la velocidad de rotación de la máquina y si se realiza zoom alrededor del valor de frecuencia de rotación se puede observar la modulación de esta frecuencia, debida a el producto de la frecuencia de deslizamiento y el número de polos.

- ❖ **Corto circuito en el devanado del estator (polos):** esta falla hace que aumente la frecuencia de deslizamiento. En el espectro se observan bandas laterales a la frecuencia de deslizamiento multiplicada por el número de polos

- ❖ **Deformaciones térmicas:** se identifica a través del incremento de las vibraciones a la frecuencia de rotación, estas vibraciones aumentan a medida que existe un aumento de temperatura y se pueden confundir con el Desbalance. Se identifica en caso de que el problema de Desbalance se corrija y se siga presentando la vibración.

- ❖ **Pulsos torsionales:** la vibración producida por esto normalmente es baja y no presenta amenaza para la máquina. Puede excitar



frecuencias de resonancia cercanas al doble de la frecuencia de de línea.

- ❖ **Pedestal cojo o blando:** se generan niveles de vibración a la primera y segunda armónica. Para determinar bien si el problema es por esta causa, se debe observar las variaciones de la vibración mientras se aflojan y se aprietan los pernos de anclaje de la máquina.
- ❖ **Torbellinos de aceite:** las componentes de estas vibraciones pueden ser ubicadas a frecuencias entre el 45 y 50 % de la frecuencia de rotación.
- ❖ **Soltura mecánica:** se pueden presentar los cuatro primeros armónicos y se puede verificar generando golpes en la base de la maquina.
- ❖ **Resonancia:** la resonancia amplifica la amplitud de la vibración de 10 a 30 veces respecto a los niveles de vibraciones que caracterizan a la máquina cuando no presenta resonancia. La mayoría de veces la resonancia se debe a los elementos no rotatorios.

Se puede para complementar el análisis mirar los siguientes porcentajes de probabilidad de las causas de falla:

- 40% de los problemas se debe a desbalanceo
- 20% debido a desalineamiento (en máquinas acopladas)



- 20% debido a resonancias
- 10% debido a los rodamientos
- 10% debido a otras causas

Si se desea complementar esta información, y aplicar para otros tipos de máquinas se puede ir al ANEXO D, en el cual encontrará un resumen de los tipos de fallas eléctricas y mecánicas más comunes.



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este prototipo se desarrolló con el fin de sensar y adquirir las señales de vibración presentes en los motores de inducción (o cualquier tipo de maquina rotatoria), y visualizarlas mediante una interfaz en el computador para poder realizar un análisis y que permitan la detección de fallas por medio de estándares preestablecidos.

Las características del sensor como rango de operación, sensibilidad, linealidad y ancho de banda permiten caracterizar el movimiento vibratorio correctamente. De igual forma se comprobó que el sensor está calibrado de forma correcta, brindando confiabilidad para realizar las mediciones. Por lo tanto se concluye que el sensor fue seleccionado de forma correcta para la aplicación. Si se desea tener un mayor ancho de banda en el sensor este puede ser reemplazado por otro que contenga las características deseadas.

En la etapa de adquisición se prefirió trabajar con una tarjeta de adquisición de datos debido a la simplicidad que esto implica. Además de garantizar un correcto muestreo y digitalización de la señal de forma sencilla, permite pensar a futuro en utilizar el prototipo para sensar varias máquinas de forma simultánea, ya que esta consta de varias entradas analógicas que permiten realizar esta mejora; lógicamente esta implicaría modificar en cierta forma el programa desarrollado para poder aplicar esta función. De igual forma existe la posibilidad de modificar la etapa de adquisición si se desea, siempre y cuando se garanticen las características que tiene la señal al ser empleada la DAQ.



Para el análisis de vibraciones en máquinas rotativas, se evalúan los picos (Magnitud Vibración) en cada una de las frecuencias del espectro para determinar estado de funcionamiento, las fallas presentes y la severidad de estas, por lo tanto, a pesar de que las gráficas y valores determinados por el programa son cuantitativos, la evaluación o análisis que se debe realizar es cualitativa y se ejecuta por medio de la comparación de los resultados con estándares preestablecidos y normas que indican que falla se esta presentando y la condición mecánica y eléctrica en la que se encuentra. El software permite visualizar, para la evaluación, la gráfica de órbitas, las gráficas en tiempo y frecuencia (Espectro), valores RMS y PICO de la aceleración, velocidad y desplazamiento; en los ejes horizontal y vertical.

Las pruebas realizadas permiten constatar el correcto funcionamiento del prototipo corroborando la acertada elección de cada una de las etapas y los elementos que las conforman.

El equipo presenta varias ventajas sobre equipos comerciales para la detección de vibraciones. A diferencia del dispositivo implementado, la mayoría de dispositivos disponibles en el mercado permite analizar únicamente una señal a la vez. Las ventajas que provee el uso de acelerómetros MEMS para la transducción de la señal sobre los acelerómetros usados habitualmente en la industria (acelerómetros piezoeléctricos), linealidad, tamaño, precio además de no requerir calibración (siempre y cuando se encuentre alimentado dentro del rango de voltaje sugerido en la hoja de datos). El prototipo diseñado permite realizar un historial de funcionamiento para cada una de las máquinas monitoreadas, ya que este permite guardar y cargar un patrón de referencia para comparar con cada nueva medición y realizar un mejor y más completo análisis. El costo del diseño e implementación



del prototipo es mucho menor al costo de un equipo comercial con funciones similares.

Debido a su estructura (construcción por módulos), el mantenimiento del equipo es de bajo costo, es decir que si alguno de los componentes o partes (hardware), llega a fallar puede ser reemplazado con facilidad sin modificar las características del prototipo.

Los motores de inducción objeto del estudio trabajan a bajas velocidades, por lo tanto un acelerómetro con el ancho de banda seleccionado permite observar suficientes armónicos para obtener un correcto análisis de fallas.

Se puede sugerir como recomendación la modificación del prototipo para realizar una herramienta mucho más robusta para la detección de fallas, agregar el eje axial (aunque con los dos ejes implementados es suficiente) y modificar el software para que de manera automática e inteligente el dispositivo determine las fallas que se estén presentando en la máquina.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PALOMINO MARIN, Evelio. *“La Medición y el análisis de vibraciones en el diagnóstico de máquinas rotatorias”*. Centro de estudios Innovación y mantenimiento. Cuba: División de ingeniería de las vibraciones y diagnostico, 1997.
- [2] GARCIA, Alfonso. *“Vibraciones mecánicas, modulo I”*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander, Escuela de Ingeniería Mecánica, 1995.
- [3] *“La transformada de fourier”*. [citado: Septiembre 11 de 2006]. Lenguaje de Marcas de Hipertexto. Disponible desde: http://www.arrakis.es/~ppriego/fourier/transf_f.htm
- [4] SAAVEDRA, Pedro Nelson. *“La medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación”*. Facultad de Ingeniería - Universidad de Concepción Chile. [citado: Julio 13 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: <http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/CONFCHILE.pdf>
- [5] ESTUPIÑAN E. SAN MARTIN C. SOLALIGUE R. *“Diseño e implementación de un analizador virtual de vibraciones mecánicas”*. [citado: Junio 23 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: <http://www.scielo.cl/pdf/rfacing/v14n1/ART02.pdf>
- [6] *“Evaluación de la severidad vibratoria”*. Universidad de Concepción. Laboratorio de Vibraciones Mecánicas. Concepción, Chile: Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería 2002. [citado: Octubre 4 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: <http://www.dim.udec.cl/lvm/archivos/severidad.PDF>
- [7] KULICHEVSKY, R.; SACCHI, M.; MARTIN GHISELLI, A. *“Medición y análisis de vibraciones: una herramienta para la predicción y evaluación de fallas en maquinarias”*. U. A. ENDE- Comisión Nacional de Energía Atómica. San Martín, Buenos Aires, Argentina.
- [8] CHAPMAN, Stephen J. *“Máquinas Eléctricas 3º Edición”*. Bogotá, Colombia: Mc Graw Hill, 2000. 387 - 396p.
- [9] Freescale Support. Disponible desde: www.freescale.com



- [10] *“Diseño de un acelerómetro basado en tecnología MEMS”*. Universidad de Sevilla, Escuela Superior de Ingenieros, Departamento de Ing. Electrónica. [citado: Octubre 18 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: http://www.gte.us.es/ASIGN/SEA/practica_sea.pdf
- [11] AMENDOLA, L. *“Sistemas expertos monitoreo de condiciones en máquinas rotativas”*. Departamento de proyectos de Ingeniería. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. [citado: Julio 13 de 2006]. Portable Document Format. Disponible desde: http://www.confabilidad.net/art_05/predictivo/pdm_08.pdf



ANEXOS



ANEXO A. HOJA DE DATOS DE MMA6233Q.

Freescale Semiconductor
Technical Data

MMA6231Q
Rev 1, 05/2005

±10g Dual Axis Micromachined Accelerometer

The MMA6200 series of low cost capacitive micromachined accelerometers feature signal conditioning, a 1-pole low pass filter and temperature compensation. Zero-g offset full scale span and filter cut-off are factory set and require no external devices. A full system self-test capability verifies system functionality.

Features

- Low Noise
- Low Cost
- Low Power
- 2.7 V to 3.6 V Operation
- 6mm x 6mm x 1.98 mm QFN
- Integral Signal Conditioning with Low Pass Filter
- Linear Output
- Ratiometric Performance
- Self-Test
- Robust Design, High Shocks Survivability

Typical Applications

- Pedometer
- Appliance Control
- Impact Monitoring
- Vibration Monitoring and Recording
- Position & Motion Sensing
- Freefall Detection
- Smart Portable Electronics

MMA6231Q
MMA6233Q

MMA6230Q Series: X-Y AXIS
SENSITIVITY MICROMACHINED
ACCELEROMETER
±10 g



16-LEAD
QFN
CASE 1477-01

ORDERING INFORMATION

Device Name	Bandwidth Response	I _{DD}	Case No.	Package
MMA6231Q	300 Hz	1.2 mA	1477-01	QFN-16, Tube
MMA6231QR2	300 Hz	1.2 mA	1477-01	QFN-16, Tape & Reel
MMA6233Q	900 Hz	2.2 mA	1477-01	QFN-16, Tube
MMA6233QR2	900 Hz	2.2 mA	1477-01	QFN-16, Tape & Reel

Top View

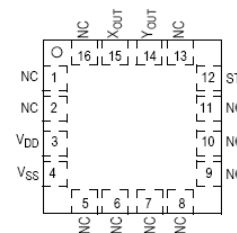


Figure 1. Pin Connections

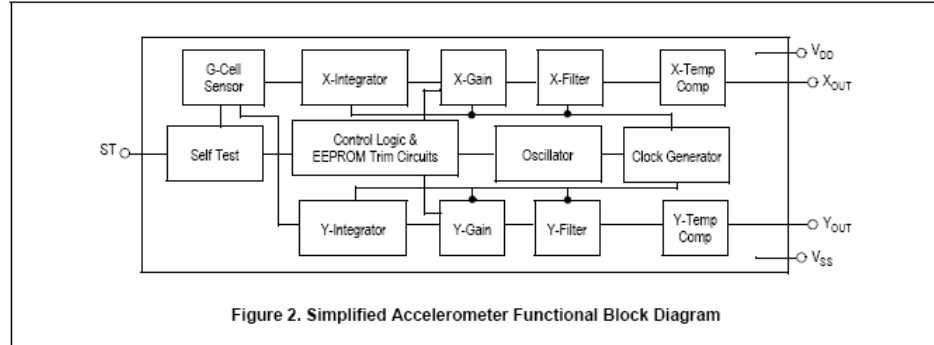


Figure 2. Simplified Accelerometer Functional Block Diagram

Table 1. Maximum Ratings

(Maximum ratings are the limits to which the device can be exposed without causing permanent damage.)

Rating	Symbol	Value	Unit
Maximum Acceleration (all axis)	g_{max}	± 2000	g
Supply Voltage	V_{DD}	-0.3 to +3.6	V
Drop Test ⁽¹⁾	D_{drop}	1.2	m
Storage Temperature Range	T_{stg}	-40 to +125	°C

1. Dropped onto concrete surface from any axis.

ELECTRO STATIC DISCHARGE (ESD)

WARNING: This device is sensitive to electrostatic discharge.

Although the Freescale accelerometers contain internal 2 kV ESD protection circuitry, extra precaution must be taken by the user to protect the chip from ESD. A charge of over 2000 volts can accumulate on the human body or associated test equipment. A charge of this magnitude can alter the

performance or cause failure of the chip. When handling the accelerometer, proper ESD precautions should be followed to avoid exposing the device to discharges which may be detrimental to its performance.



Table 2. Operating Characteristics

Unless otherwise noted: $-20^{\circ}\text{C} \leq T_A \leq 85^{\circ}\text{C}$, $3.0\text{ V} \leq V_{DD} \leq 3.6\text{ V}$, Acceleration = 0g, Loaded output ⁽¹⁾

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Operating Range ⁽²⁾					
Supply Voltage ⁽³⁾	V_{DD}	2.7	3.3	3.6	V
Supply Current					
MMA6231Q	I_{DD}	—	1.2	1.5	mA
MMA6233Q	I_{DD}	—	2.2	3.0	mA
Operating Temperature Range	T_A	-20	—	+85	$^{\circ}\text{C}$
Acceleration Range	g_{FS}	—	10	—	g
Output Signal					
Zero g ($T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $V_{DD} = 3.3\text{ V}$) ⁽⁴⁾	V_{OFF}	1.485	1.65	1.815	V
Zero g	V_{OFF}, T_A	—	2.0	—	$\text{mg}/^{\circ}\text{C}$
Sensitivity ($T_A = 25^{\circ}\text{C}$, $V_{DD} = 3.3\text{ V}$)	S	111	120	129	mV/g
Sensitivity	S, T_A	—	0.015	—	$\%/^{\circ}\text{C}$
Bandwidth Response					
MMA6231Q	f_{3dB}	—	300	—	Hz
MMA6233Q	f_{3dB}	—	900	—	Hz
Nonlinearity	NL _{OUT}	-1.0	—	+1.0	% FSO
Noise					
MMA6231Q RMS (0.1 Hz – 1 kHz)	n_{RMS}	—	0.7	—	mV_{rms}
MMA6233Q RMS (0.1 Hz – 1 kHz)	n_{RMS}	—	0.6	—	
Power Spectral Density RMS (0.1 Hz – 1 kHz)					
MMA6231Q	n_{PSD}	—	50	—	$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
MMA6233Q	n_{PSD}	—	30	—	
Self-Test					
Output Response	g_{ST}	2.0	—	—	g
Input Low	V_{IL}	—	—	$0.3 V_{DD}$	V
Input High	V_{IH}	$0.7 V_{DD}$	—	V_{DD}	V
Pull-Down Resistance ⁽⁵⁾	R_{PO}	43	57	71	$\text{k}\Omega$
Response Time ⁽⁶⁾	t_{ST}	—	2.0	—	ms
Output Stage Performance					
Full-Scale Output Range ($I_{OUT} = 200\ \mu\text{A}$)	V_{FSO}	$V_{SS} + 0.25$	—	$V_{DD} - 0.25$	V
Capacitive Load Drive ⁽⁷⁾	C_L	—	—	100	pF
Output Impedance	Z_O	—	50	300	Ω
Power-Up Response Time					
MMA6231Q	$t_{RESPONSE}$	—	2.0	—	ms
MMA6233Q	$t_{RESPONSE}$	—	0.7	—	ms
Mechanical Characteristics					
Transverse Sensitivity ⁽⁸⁾	V_{ZX}, YX, ZY	-5.0	—	+5.0	% FSO

1. For a loaded output, the measurements are observed after an RC filter consisting of a 1.0 k Ω resistor and a 0.1 μF capacitor to ground.
2. These limits define the range of operation for which the part will meet specification.
3. Within the supply range of 2.7 and 3.6 V, the device operates as a fully calibrated linear accelerometer. Beyond these supply limits the device may operate as a linear device but is not guaranteed to be in calibration.
4. The device can measure both + and - acceleration. With no input acceleration the output is at midsupply. For positive acceleration the output will increase above $V_{DD}/2$. For negative acceleration, the output will decrease below $V_{DD}/2$.
5. The digital input pin has an internal pull-down resistance to prevent inadvertent self-test initiation due to external board level leakages.
6. Time for the output to reach 90% of its final value after a self-test is initiated.
7. Preserves phase margin (60 $^{\circ}$) to guarantee output amplifier stability.
8. A measure of the device's ability to reject an acceleration applied 90 $^{\circ}$ from the true axis of sensitivity.

MMA6231Q



PRINCIPLE OF OPERATION

The Freescale accelerometer is a surface-micromachined integrated-circuit accelerometer.

The device consists of a surface micromachined capacitive sensing cell (g-cell) and a signal conditioning ASIC contained in a single integrated circuit package. The sensing element is sealed hermetically at the wafer level using a bulk micromachined *cap* wafer.

The g-cell is a mechanical structure formed from semiconductor materials (polysilicon) using semiconductor processes (masking and etching). It can be modeled as a set of beams attached to a movable central mass that moves between fixed beams. The movable beams can be deflected from their rest position by subjecting the system to an acceleration (Figure 3).

As the beams attached to the central mass move, the distance from them to the fixed beams on one side will increase by the same amount that the distance to the fixed beams on the other side decreases. The change in distance is a measure of acceleration.

The g-cell plates form two back-to-back capacitors (Figure 4). As the center plate moves with acceleration, the distance between the plates changes and each capacitor's value will change, ($C = \epsilon A/d$). Where A is the area of the plate, ϵ is the dielectric constant, and D is the distance between the plates.

The ASIC uses switched capacitor techniques to measure the g-cell capacitors and extract the acceleration data from the difference between the two capacitors. The ASIC also signal conditions and filters (switched capacitor) the signal, providing a high level output voltage that is ratiometric and proportional to acceleration.

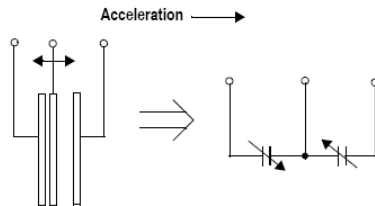


Figure 3. Transducer Physical Model

Figure 4. Equivalent Circuit Model

SPECIAL FEATURES

Filtering

These Freescale accelerometers contain an onboard single-pole switched capacitor filter. Because the filter is realized using switched capacitor techniques, there is no requirement for external passive components (resistors and capacitors) to set the cut-off frequency.

Self-Test

The sensor provides a self-test feature allowing the verification of the mechanical and electrical integrity of the accelerometer at any time before or after installation. A fourth *plate* is used in the g-cell as a self-test plate. When a logic high input to the self-test pin is applied, a calibrated potential is applied across the self-test plate and the moveable plate. The resulting electrostatic force ($F_e = \frac{1}{2} AV^2/d^2$) causes the center plate to deflect. The resultant deflection is measured by the accelerometer's ASIC and a proportional output voltage results. This procedure assures both the mechanical (g-cell) and electronic sections of the accelerometer are functioning.

Freescale accelerometers include fault detection circuitry and a fault latch. Parity of the EEPROM bits becomes odd in number.

Self-test is disabled when EEPROM parity error occurs.

Ratiometricity

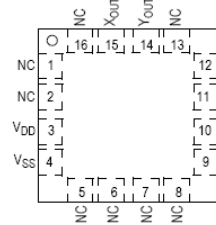
Ratiometricity simply means the output offset voltage and sensitivity will scale linearly with applied supply voltage. That is, as supply voltage is increased, the sensitivity and offset increase linearly; as supply voltage decreases, offset and sensitivity decrease linearly. This is a key feature when interfacing to a microcontroller or an A/D converter because it provides system level cancellation of supply induced errors in the analog to digital conversion process.



BASIC CONNECTIONS

Pinout Description

Top View



Pin No.	Pin Name	Description
1, 5-7, 13, 16	N/C	No internal connection. Leave unconnected.
14	Y _{OUT}	Output voltage of the accelerometer. Y Direction.
15	X _{OUT}	Output voltage of the accelerometer. X Direction.
3	V _{DD}	Power supply input.
4	V _{SS}	The power supply ground.
2, 8-11	N/C	Used for factory trim. Leave unconnected.
12	ST	Logic input pin used to initiate self-test.

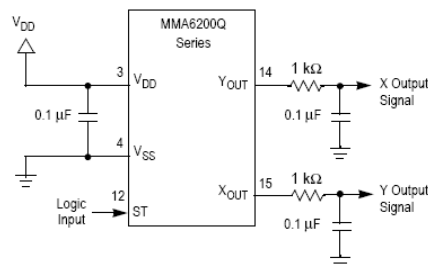


Figure 5. Accelerometer with Recommended Connection Diagram

PCB Layout

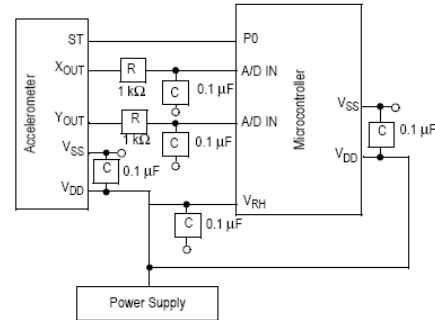
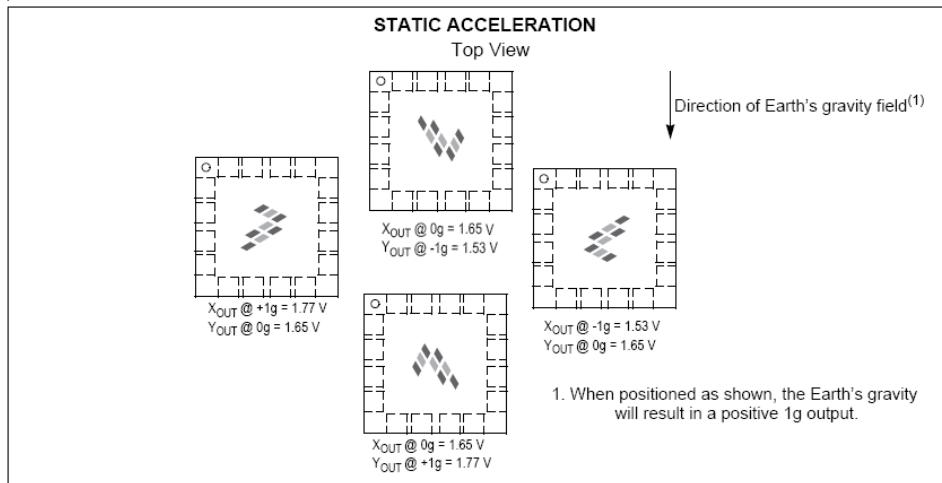
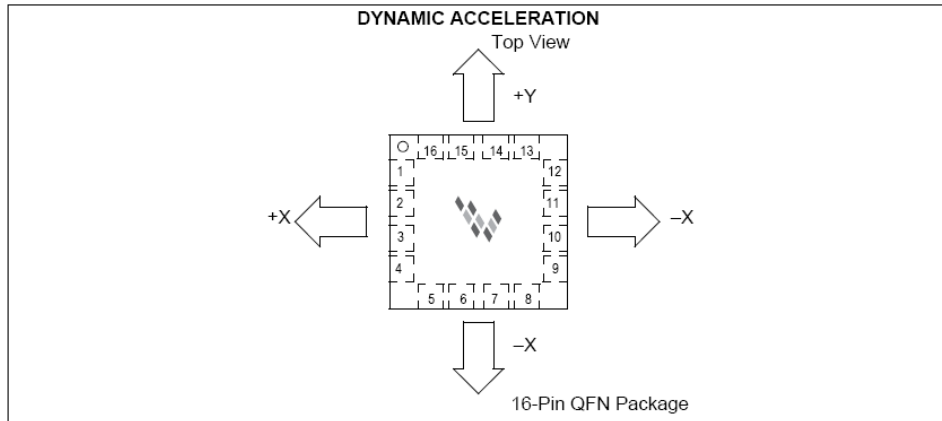


Figure 6. Recommend PCB Layout for Interfacing Accelerometer to Microcontroller

NOTES:

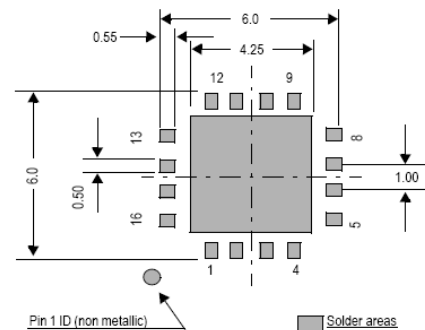
1. Use 0.1 μF capacitor on V_{DD} to decouple the power source.
2. Physical coupling distance of the accelerometer to the microcontroller should be minimal.
3. Flag underneath package is connected to ground.
4. Place a ground plane beneath the accelerometer to reduce noise, the ground plane should be attached to all of the open ended terminals shown in Figure 6.
5. Use an RC filter with 1.0 kΩ and 0.1 μF on the outputs of the accelerometer to minimize clock noise (from the switched capacitor filter circuit).
6. PCB layout of power and ground should not couple power supply noise.
7. Accelerometer and microcontroller should not be a high current path.
8. A/D sampling rate and any external power supply switching frequency should be selected such that they do not interfere with the internal accelerometer sampling frequency (16 kHz for Low I_{DD} and 52 kHz for Standard I_{DD} for the sampling frequency). This will prevent aliasing errors.



MINIMUM RECOMMENDED FOOTPRINT FOR SURFACE MOUNTED APPLICATIONS

Surface mount board layout is a critical portion of the total design. The footprint for the surface mount packages must be the correct size to ensure proper solder connection interface between the board and the package.

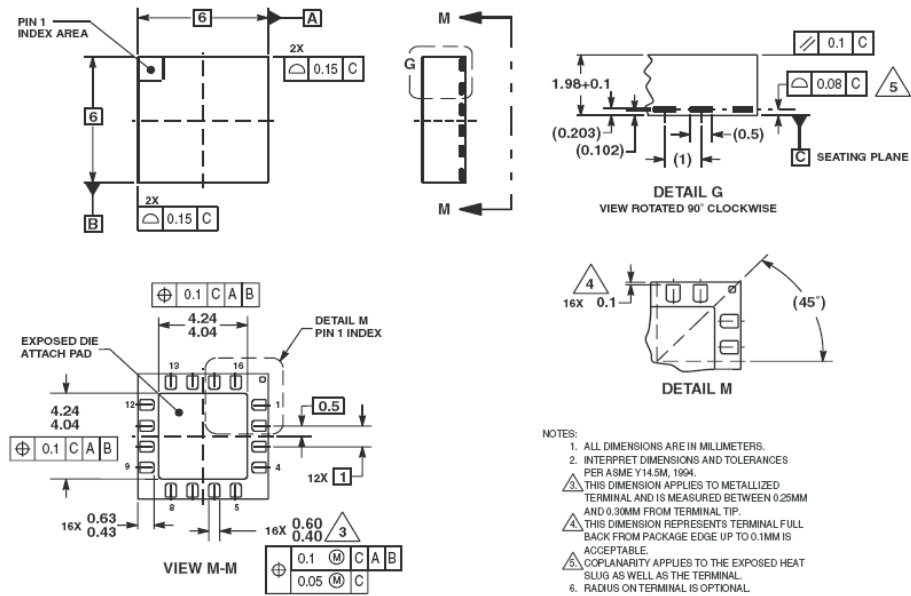
With the correct footprint, the packages will self-align when subjected to a solder reflow process. It is always recommended to design boards with a solder mask layer to avoid bridging and shorting between solder pads.



MMA6231Q



PACKAGE DIMENSIONS



CASE 1477-01
ISSUE O
16-LEAD QFN

MMA6231Q

Sensors
Freescale Semiconductor

7



How to Reach Us:

Home Page:
www.freescale.com

E-mail:
support@freescale.com

USA/Europe or Locations Not Listed:
Freescale Semiconductor
Technical Information Center, CH370
1300 N. Alma School Road
Chandler, Arizona 85224
+1-800-521-6274 or +1-480-768-2130
support@freescale.com

Europe, Middle East, and Africa:
Freescale Halbleiter Deutschland GmbH
Technical Information Center
Schatzbogen 7
81829 Muenchen, Germany
+44 1296 380 456 (English)
+46 8 52200080 (English)
+49 89 92103 559 (German)
+33 1 69 35 48 48 (French)
support@freescale.com

Japan:
Freescale Semiconductor Japan Ltd.
Headquarters
ARCO Tower 15F
1-8-1, Shimo-Meguro, Meguro-ku,
Tokyo 153-0064
Japan
0120 191014 or +81 3 5437 9125
support.japan@freescale.com

Asia/Pacific:
Freescale Semiconductor Hong Kong Ltd.
Technical Information Center
2 Dai King Street
Tai Po Industrial Estate
Tai Po, N. T., Hong Kong
+800 2666 8080
support.asia@freescale.com

For Literature Requests Only:
Freescale Semiconductor Literature Distribution Center
P.O. Box 5405
Denver, Colorado 80217
1-800-441-2447 or 303-675-2140
Fax: 303-675-2150
LDCForFreescaleSemiconductor@hibbertgroup.com

Information in this document is provided solely to enable system and software implementers to use Freescale Semiconductor products. There are no express or implied copyright licenses granted hereunder to design or fabricate any integrated circuits or integrated circuits based on the information in this document.

Freescale Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Freescale Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Freescale Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters that may be provided in Freescale Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals", must be validated for each customer application by customer's technical experts. Freescale Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Freescale Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Freescale Semiconductor product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Freescale Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Freescale Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Freescale Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part.

Freescale™ and the Freescale logo are trademarks of Freescale Semiconductor, Inc. All other product or service names are the property of their respective owners.
© Freescale Semiconductor, Inc. 2005. All rights reserved.

MMA6231Q
Rev. 1
05/2005





ANEXO B. HOJA DE DATOS DAQ PCI 6221.

Low-Cost M Series Multifunction DAQ – 16-Bit, 250 kS/s, up to 80 Analog Inputs

NI M Series – Low-Cost

- NI recommends high-speed M Series for 5X faster sampling rates or high-accuracy M Series for 4X higher resolution
- 16, 32, or 80 analog inputs at 16-bit, 250 kS/s
- Up to 4 analog outputs at 16 bits, 833 kS/s (6 μ s full-scale settling time)
- Programmable input range (± 10 , ± 5 , ± 1 , ± 0.2 V) per channel
- Up to 48 TTL/CMOS digital I/O lines (up to 32 hardware-timed at 1 MHz)
- Two 32-bit, 80 MHz counter/timers
- Digital triggering
- NI-MCal calibration technology for improved measurement accuracy
- 6 DMA channels for fast data throughput
- Available lifetime warranty and calibration services

Operating Systems

- Windows 2000/XP
- Mac OS X
- Linux®

Recommended Software

- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- Measurement Studio

Other Compatible Software

- SignalExpress
- VI Logger
- Visual Studio .NET
- C/C++/C#

Measurement Services

- Software (included)¹
- NI-DAQmx driver software
- Measurement & Automation Explorer configuration utility
- VI Logger Lite data-logging software

¹Mac OS X users must download NI-DAQmx Base driver.

Lifetime Warranties NEW!



Family	Bus	Analog Inputs	Analog Input Resolution (bits)	Analog Outputs	Output Resolution (bits)	Max Output Rate (kS/s)	Analog Output Range (V)	Digital I/O	Correlated (clocked) DIO
NI 6220	PCI, PXI	16	16	–	–	–	–	24	8, up to 1 MHz
NI 6221	PCI, PXI	16	16	2	16	833	± 10	24	8, up to 1 MHz
NI 6221 (37-Pin) ¹	PCI	16	16	2	16	833	± 10	10	2, up to 1 MHz
NI 6224	PCI, PXI	32	16	–	–	–	–	48	32, up to 1 MHz
NI 6225	PCI, PXI	80	16	2	16	833	± 10	24	8, up to 1 MHz
NI 6229	PCI, PXI	32	16	4	16	833	± 10	48	32, up to 1 MHz

¹ 37-Pin multifunction DAQ devices are not compatible with NI SCC or SCXI platforms.

Table 1. Low-Cost M Series Selection Guide

Overview and Applications

National Instruments M Series low-cost multifunction data acquisition (DAQ) devices provide optimized functionality for cost-sensitive applications. Low-cost M Series devices have up to 80 analog inputs, 48 digital I/O lines, four analog outputs, two counter/timers, and digital triggering. All low-cost M Series devices are available with lifetime warranties and additional calibration services. Low-cost M Series devices have a one-year calibration interval. For better accuracy, faster speeds, and an extended 2-year calibration service, consider the high-speed and high-accuracy M Series devices.

M Series for Test

For test, you can use 16-bit, 250 kS/s analog inputs and 1 MHz digital lines in conjunction with NI signal conditioning for applications including data logging and sensor measurements. Low-cost M Series devices are compatible with National Instruments SCC and SCXI signal conditioning platforms, which provide amplification, filtering, and power for virtually every type of sensor. These platforms also are compliant with IEEE 1451.4 smart transducer electronic data sheet (TEDS) sensors, which provide digital storage for sensor data sheet information.





Low-Cost M Series Multifunction DAQ – 16-Bit, 250 kS/s, up to 80 Analog Inputs

M Series for Control

M Series digital lines can drive 24 mA for relay and actuator control. With up to four analog outputs, two 80 MHz counter/timers, and six DMA channels, M Series devices can execute multiple control loops simultaneously. Low-cost M Series devices also have direct support for encoder measurements, protected digital lines, and digital debounce filters for control applications. With up to 80 analog inputs, 32 clocked digital lines at rates of 1 MHz, and four analog outputs, you can execute multiple control loops with a single device. For higher-count control loops, you can use M Series devices in conjunction and tightly synchronized with National Instruments analog output devices for 64 or more loops.

M Series for Design

You can use the wide range of I/O – from 80 analog inputs to 48 digital lines – to measure and verify prototype designs. M Series devices and National Instruments SignalExpress interactive measurement software bring benchtop measurements to the PC. With NI SignalExpress interactive configuration-based steps, you can quickly create design verification tests. The fast acquisition and generation rates of low-cost M Series devices along with SignalExpress provide on-the-fly design analysis. You can convert your tested and verified SignalExpress projects to NI LabVIEW applications for immediate M Series DAQ use and bridge the gap between test, control, and design applications.

Hybrid-Slot-Compatible PXI Modules

PXI M Series modules are hybrid-slot-compatible so that you can use them in both PXI slots and the hybrid slots found in new PXI Express chassis. The PXI Systems Alliance specifies that hybrid-slot-compatible PXI modules use modified slot connectors to mechanically fit in both PXI slots and hybrid slots. This mechanical change:

- Provides compatibility to past, current, and future PXI chassis
- Maintains existing product specifications
- Requires no software changes (application or driver)
- Maintains speed and capability of all PXI communication (PXI Express signaling is not provided)

However, hybrid-slot-compatible PXI modules do not include the pins used to implement PXI local bus communication, which is used for backplane SCXI control from the right most PXI slot in PXI/SCXI combination chassis (PXI-1010, PXI-1011, PXI-1050, and PXI-1052). For these applications, NI provides unmodified PXI M Series modules that maintain the required local bus capabilities. Refer to SCXI Control of PXI/SCXI Combination Chassis section within Ordering Information for part numbers.

Simultaneous and Intelligent Data Acquisition

When you need to obtain performance from a data acquisition device beyond the capabilities of a multifunction DAQ device, National Instruments provides simultaneous sampling with NI S Series and intelligent DAQ with NI R Series. The S Series architecture dedicates an ADC per channel to provide higher aggregate sampling rates compared to multiplexed devices. S Series devices are ideal for applications including IF digitization, transient recording, ultrasound and sonar testing, and high-energy physics.

The multifunction R Series data acquisition devices contain a 1M/3M gate FPGA that is reconfigurable using the NI LabVIEW FPGA Module. Multifunction R Series devices have up to eight independent 16-bit analog inputs with up to 200 kHz simultaneous sampling, up to eight independent 16-bit analog outputs with up to 1 MHz simultaneous update rates, and up to 96 digital I/O lines configurable at rates up to 40 MHz. You can customize these devices to develop capabilities such as complete control over the synchronization and timing of all signals and operations; user-defined onboard decision-making logic; and digital lines individually configurable as input, output, counter/timers, PWM, flexible encoder inputs, or user-defined communication protocols.

Recommended Accessories

Signal conditioning is required for sensor measurements or voltage inputs greater than 10 V. National Instruments SCXI is a versatile, high-performance signal conditioning platform optimized for high-channel-count applications. NI SCC provides portable, flexible signal conditioning options on a per-channel basis. Visit ni.com/sigcon for resources on available NI signal conditioning.

The new National Instruments PCI-6221 (37-Pin) is the first M Series device to offer the 37-pin D-Sub connector that lowers connectivity cost by 80 percent. The D-Sub connector makes the NI PCI-6221 (37-Pin) ideal for OEM applications. For applications that do not require signal conditioning, refer to Table 2 for recommended cabling and accessories.

Recommended Training and Services

All M Series devices are available with additional warranty and calibration services. Choose from the one-year extended warranty, lifetime warranty, or lifetime warranty with one basic calibration service. For new data acquisition programmers, NI recommends the "Data Acquisition: 7 Steps to Success Tutorial Kit." This tutorial kit helps shorten development time for data acquisition applications by describing the various stages of getting started with data acquisition applications including system definition, setup, test, and application programming.

BUY ONLINE at ni.com or CALL (800) 813 3693 (U.S.)



Low-Cost M Series Multifunction DAQ – 16-Bit, 250 kS/s, up to 80 Analog Inputs

Recommended Software

National Instruments measurement services software, built around NI-DAQmx driver software, includes intuitive application programming interfaces, configuration tools, I/O assistants, and other tools designed to reduce system setup, configuration, and development time. National Instruments recommends using the latest version of NI-DAQmx driver software for application development in National Instruments LabVIEW, LabWindows/CVI, and Measurement Studio. To obtain the latest version

of NI-DAQmx, visit ni.com/support/daq/versions. Mac OS X users can program M Series devices with NI-DAQmx Base driver software. M Series devices are compatible with the following versions (or later) of NI application software – LabVIEW, LabWindows/CVI, or Measurement Studio versions 7.x; SignalExpress 1.x; VI Logger 2.0; or LabVIEW with the LabVIEW Real-Time Module 7.1. M Series devices are not compatible with the Traditional NI-DAQ (Legacy) driver.

M Series	Feature	Connect to...	Connector ¹	Cable ²	Cable Adapter	Accessory
68-pin devices	Noise-reducing	SCC portable signal conditioning	0 or 1	SHC68-68-EPM	–	See ni.com/sigcom or SCC-68
	Noise-reducing	SCXI high-performance signal conditioning	0 only	SHC68-68-EPM	–	See ni.com/sigcom
	Noise-reducing	Screw terminals	0 or 1	SHC68-68-EPM	–	SCC-68, SCB-68, or TBX-68
	Noise-reducing	Screw terminals (PXI only)	0 only	–	–	TB-2706
	Noise-reducing	BNC terminal block	0 or 1	SHC68-68-EPM	–	BNC-2110, BNC-2111, BNC-2120, or BNC-2090
	Noise-reducing	50-pin connector	0 or 1	SHC68-68-EPM	68M-50F-MIO	Custom-built or third-party
	Basic shielding	Screw terminals	0 or 1	SHC68-68	–	SCB-68, CB-68LP or CB-68LPR
	Low-cost	Screw terminals	0 or 1	RC68-68	–	CB-68LP or CB-68LPR
	Custom connectivity	Board mounting connectors	0 or 1	SHC68-68-EPM	–	PCB mounting connectors
	Custom connectivity	68-pin female connector	0 or 1	SHC68-68M-EPM	–	Custom-built or third-party
37-pin devices	Custom connectivity	Unterminated	0 or 1	SHC68-NFS	–	Custom-built or third-party
	Low-cost	Screw terminals	0 only	SH37F-37M-1	–	CB-37FH, CB-37FV
	Low-cost	Screw terminals	0 only	–	–	CB-37F-LP

¹Connector 0 is found on all M Series devices. 0 and 1 require two cables and accessories and are available on NI 6224, NI 6225, and NI 6229 devices.
²For NI 6225, use SHC68-68-EPM on connector 0 and SHC68-68 on connector 1.

Table 2. Recommended Accessories

Ordering Information

PCI

NI PCI-6220.....	779065-01
NI PCI-6221.....	779066-01
NI PCI-6221 (37-Pin).....	779418-01
NI PCI-6224.....	779067-01
NI PCI-6225.....	779295-01
NI PCI-6229.....	779068-01

PXI

NI PXI-6220.....	779112-01
NI PXI-6221.....	779629-01
NI PXI-6224.....	779114-01
NI PXI-6225.....	779296-01
NI PXI-6229.....	779630-01

Includes data acquisition driver software.

SCXI Control of PXI/SCXI Combination Chassis

NI PXI-6221.....	779113-01
NI PXI-6229.....	779115-01

Data Acquisition Services

Data Acquisition: 7 Steps to Success.....	779489-01
1-Year Extended Warranty.....	960431-01
Lifetime Ltd Warranty.....	960432-01
Lifetime Ltd Warranty and 1 Basic Calibration.....	960433-01

BUY NOW!

For complete product specifications, pricing, and accessory information, call (800) 813 3693 (U.S.) or go to ni.com/daq.

BUY ONLINE at ni.com or CALL (800) 813 3693 (U.S.)



NI Services and Support



NI has the services and support to meet your needs around the globe and through the application life cycle – from planning and development through deployment and ongoing maintenance. We offer services and service levels to meet customer requirements in research, design, validation, and manufacturing. Visit ni.com/services.

Training and Certification

NI training is the fastest, most certain route to productivity with our products. NI training can shorten your learning curve, save development time, and reduce maintenance costs over the application life cycle. We schedule instructor-led courses in cities worldwide, or we can hold a course at your facility. We also offer a professional certification program that identifies individuals who have high levels of skill and knowledge on using NI products. Visit ni.com/training.

Professional Services

Our Professional Services Team is comprised of NI applications engineers, NI Consulting Services, and a worldwide National Instruments Alliance Partner program of more than 600 independent consultants and

integrators. Services range from start-up assistance to turnkey system integration. Visit ni.com/alliance.



OEM Support

We offer design-in consulting and product integration assistance if you want to use our products for OEM applications. For information about special pricing and services for OEM customers, visit ni.com/oem.

Local Sales and Technical Support

In offices worldwide, our staff is local to the country, giving you access to engineers who speak your language. NI delivers industry-leading technical support through online knowledge bases, our applications engineers, and access to 14,000 measurement and automation professionals within NI Developer Exchange forums. Find immediate answers to your questions at ni.com/support.

We also offer service programs that provide automatic upgrades to your application development environment and higher levels of technical support. Visit ni.com/ssp.

Hardware Services

NI Factory Installation Services

NI Factory Installation Services (FIS) is the fastest and easiest way to use your PXI or PXI/SCXI combination systems right out of the box. Trained NI technicians install the software and hardware and configure the system to your specifications. NI extends the standard warranty by one year on hardware components (controllers, chassis, modules) purchased with FIS. To use FIS, simply configure your system online with ni.com/pxiadvisor.

Calibration Services

NI recognizes the need to maintain properly calibrated devices for high-accuracy measurements. We provide manual calibration procedures, services to recalibrate your products, and automated calibration software specifically designed for use by metrology laboratories. Visit ni.com/calibration.

Repair and Extended Warranty

NI provides complete repair services for our products. Express repair and advance replacement services are also available. We offer extended warranties to help you meet project life-cycle requirements. Visit ni.com/services.



ni.com • (800) 813 3693

National Instruments • info@ni.com



351342A-01

2006-6943-301-101-D

© 2006 National Instruments Corporation. All rights reserved. CVI, DAQPad, LabVIEW, Measurement Studio, National Instruments, National Instruments Alliance Partner, NI, ni.com, and SCXI are trademarks of National Instruments. Linux® is the registered trademark of Linus Torvalds in the U.S. and other countries. Other product and company names listed are trademarks or trade names of their respective companies. A National Instruments Alliance Partner is a business entity independent from NI and has no agency, partnership, or joint-venture relationship with NI.



Data Acquisition and Signal Conditioning Driver Software Options

NI-DAQmx

- Compatible with more than 200 DAQ devices
- Full-featured driver software for Windows and Linux®
- High-performance driver engine
- Fast single-point and multithreaded I/O
- Automatic code generation with DAQ Assistant
- Virtual channels for simple measurement configuration
- Multiple-device synchronization
- Optimized integration with LabVIEW VIs and analysis
- API for LabVIEW, ANSI C, Visual Studio .NET, and Visual Basic
- FREE data-logging software included

NI-DAQmx Base

- Compatible with more than 80 DAQ devices
- Multiplatform driver for Linux, Mac OS X, RTX, Pocket PC, and Windows
- Subset of NI-DAQmx functionality
- Similar programming interface to NI-DAQmx
- Basic DAQ driver for LabVIEW and ANSI C

Measurement Hardware DDK

- Custom-driver development tools
- Register-level programming interface
- Designed for OEM customers
- Data acquisition for virtually any OS



Overview

The quality of the driver software is just as important as the quality of the measurement hardware. National Instruments offers three levels of data acquisition software, each with its own unique offering. The result is a complete offering of DAQ software to simplify use of NI data acquisition hardware in any application.



Three Levels of DAQ Driver Software

1. NI-DAQmx is full-featured, high-performance driver software that maximizes productivity and performance through an intuitive programming interface and added software.
2. NI-DAQmx Base is a basic multiplatform DAQ driver with a subset of NI-DAQmx functionality. It is the best option for applications on Mac OS X, RTX, and Pocket PC.
3. Measurement Hardware DDK is a development kit for the creation of custom drivers using register-level programming.

Note: Not all drivers work with all devices. Visit ni.com/support/daq/versions to check compatibility.

NI-DAQmx Driver Software

NI-DAQmx is full-featured, high-performance driver software that maximizes productivity and performance through an intuitive programming interface and included measurement services. It supports broad ranges of programming languages, devices, buses, sensors, and even mixed-signal types. NI-DAQmx is the best option almost every time for Windows and Linux development.

Note: National Instruments recommends using the latest version of NI-DAQmx driver software for application development in NI LabVIEW, LabWindows/CVI, and Measurement Studio 7.x or later on Windows and Linux.

Included Measurement Services¹

NI-DAQmx includes a collection of measurement services designed to save data acquisition system developers time and money. A few of these services include:

Measurement & Automation Explorer (MAX) – Software for configuring, calibrating, testing, and managing your hardware.

DAQ Assistant – Software for creating configuration-based data acquisition tasks and automatic code generation in popular application development environments.

VI Logger Lite – FREE software specifically designed for basic data-logging applications.

NI Device Monitor – Software that provides a true plug-and-play experience for developers using USB DAQ modules.

¹Windows version only.





Data Acquisition and Signal Conditioning Driver Software Options

NI-DAQmx Base Driver Software

NI-DAQmx Base offers a subset of NI-DAQmx functionality on Windows, Linux, Mac OS X, RTX, and Pocket PC OSs. This driver software includes ready-to-use LabVIEW VIs and C function examples similar to those included in the full-featured NI-DAQmx software.

National Instruments built NI-DAQmx Base driver software using the NI Measurement Hardware DDK and developed the software almost entirely in the multiplatform LabVIEW graphical development environment. This lightweight, agile architecture makes it possible to quickly develop NI-DAQmx Base for additional OSs and devices in the future.

NI-DAQmx Base is the best choice for applications on Mac OS X, RTX, and Pocket PC.

Developers creating applications for Windows or Linux-based systems should consider using the latest in full-featured NI-DAQmx.

Measurement Hardware DDK

The Measurement Hardware DDK provides development tools and a register-level programming interface for the development of custom driver software. The Measurement Hardware DDK, designed for OEM customers developing applications that require nonstandard OSs, provides access to the full device register map and offers examples for completing common measurement and control functions. The Measurement Hardware DDK works with a selection of multifunction, analog output, digital I/O, and counter/timer I/O devices, including M Series, E Series, and S Series devices. Standard phone and e-mail support are not available for Measurement Hardware DDK users.

Developers considering the Measurement Hardware DDK should also study the advantages of industry-leading NI-DAQmx and NI-DAQmx Base software.

	NI-DAQmx High-Performance Multithreaded Driver	NI-DAQmx Base Multiplatform Register-Level Interface	Measurement Hardware DDK Custom Driver Development Tools
Bus and OS Support			
PCI/PXI	Linux, Windows 2000/NT/XP	Linux, Mac OS X, RTX ⁴	Linux, Mac OS X, VxWorks ² , QNX ²
USB ¹	Windows 2000/XP	Linux, Mac OS X	—
PCMCIA	Windows 2000/NT/XP	Pocket PC/WinCE	Pocket PC/WinCE
CompactFlash	—	Pocket PC/WinCE	—
Programming Languages			
Programming languages	LabVIEW, C/C++, Microsoft Visual Basic .NET and C#	LabVIEW, C/C++	LabVIEW, C/C++
LabVIEW interface	Complete polymorphic VIs and property nodes	Limited NI-DAQmx polymorphic VIs	Register-level VIs
Additional Measurement Services			
Development speed	●	○	○
DAQ Assistant code generation	● ³	—	—
Multithreaded I/O performance	●	—	—
Driver footprint	○	○	●
Test panels	●	○	—
Automatic sensor scaling	●	—	—
Single programming interface for all hardware and I/O types	●	●	—
Measurement examples	>200	≈30	≈30
Hardware			
M Series	●	●	●
S Series	●	●	●
E Series	●	●	●
B Series	●	●	●
USB DAQ	●	●	—
SC Series	●	—	—
SCXI	●	—	—
DSA	●	—	●
Digital I/O	●	●	●
Timing I/O	●	—	—
AO	●	●	●

KEY: ● Best, ○ Better, ○ Good, ● All or many devices supported.
¹USB DAQ and devices use NI-DAQmx. ²With third-party software. ³Windows only. ⁴LabVIEW only.

For the latest information on applicable devices and OSs or new features, visit ni.com/daq/software.

BUY ONLINE at ni.com or CALL (800) 813 3693 (U.S.)



NI Services and Support



NI has the services and support to meet your needs around the globe and through the application life cycle – from planning and development through deployment and ongoing maintenance. We offer services and service levels to meet customer requirements in research, design, validation, and manufacturing. Visit ni.com/services.

Local Sales and Technical Support

In offices worldwide, our staff is local to the country, giving you access to engineers who speak your language. NI delivers industry-leading technical support through online knowledge bases, our applications engineers, and access to 14,000 measurement and automation professionals within NI Developer Exchange forums. Find immediate answers to your questions at ni.com/support.

Training and Certification

NI training is the fastest, most certain route to productivity with our tools. NI training can shorten your learning curve, save development time, and reduce maintenance costs over the application life cycle. We schedule instructor-led courses in cities worldwide, or we can hold a course at your facility. We also offer a professional certification program that identifies individuals who have high levels of skill and knowledge on using NI products. Visit ni.com/training.



Professional Services

Our Professional Services Team is comprised of NI applications engineers, NI Consulting Services, and a worldwide National Instruments Alliance Partner program of more than 600 independent consultants and integrators. Services range from start-up assistance to turnkey system integration. Visit ni.com/alliance.

Software Service Programs

NI offers service programs that provide automatic upgrades to your application development environment and higher levels of technical support. Our service programs ensure that you always have the latest advances in productivity and receive live, on-demand access to NI applications engineers through phone and e-mail to assist in developing your solutions. Service programs are cost-effective and simplify software purchasing as an annual, fixed cost, making it easier to plan and budget than intermittent individual upgrades. You also receive discounts for our training courses and materials. For details, visit ni.com/ssp.

Basic Service Level

- Upgrades purchased separately
- Support by NI applications engineers, R&D engineers, partners, and community members through online Developer Exchange
- Access to KnowledgeBase, example code, troubleshooting wizards, solutions, and white papers

Standard Service Level

- Automatic upgrades included
- All the benefits of Basic Service
- Support by NI applications engineers through direct phone or e-mail access
- 10 percent discount on training courses and materials

Premier Service Level

- All the benefits of Standard Service
- Support by NI senior applications engineers through direct phone or e-mail access with extended hours of operation



ni.com • (800) 813 3693

National Instruments • info@ni.com



© 2006 National Instruments Corporation. All rights reserved. CVI, LabVIEW, Measurement Studio, National Instruments, National Instruments Alliance Partner, NI, ni.com, and NI-DAQ are trademarks of National Instruments. Linux® is the registered trademark of Linus Torvalds in the U.S. and other countries. Other product and company names listed are trademarks or trade names of their respective companies. A National Instruments Alliance Partner is a business entity independent from NI and has no agency, partnership, or joint-venture relationship with NI.

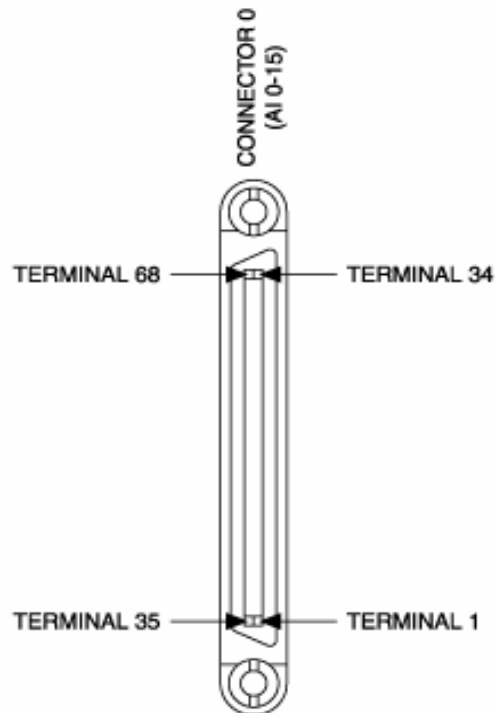
ANEXO C. TERMINALES DEL CONECTOR DAQ.

Terminales de la DAQ. Pines de conexión

NI 6221 (68-Pin)

AI 0	68	34	AI 8
AI GND	67	33	AI 1
AI 9	66	32	AI GND
AI 2	65	31	AI 10
AI GND	64	30	AI 3
AI 11	63	29	AI GND
AI SENSE	62	28	AI 4
AI 12	61	27	AI GND
AI 5	60	26	AI 13
AI GND	59	25	AI 6
AI 14	58	24	AI GND
AI 7	57	23	AI 15
AI GND	56	22	AO 0
AO GND	55	21	AO 1
AO GND	54	20	NC
D GND	53	19	P0.4
P0.0	52	18	D GND
P0.5	51	17	P0.1
D GND	50	16	P0.6
P0.2	49	15	D GND
P0.7	48	14	+5 V
P0.3	47	13	D GND
PFI 11/P2.3	46	12	D GND
PFI 10/P2.2	45	11	PFI 0/P1.0
D GND	44	10	PFI 1/P1.1
PFI 2/P1.2	43	9	D GND
PFI 3/P1.3	42	8	+5 V
PFI 4/P1.4	41	7	D GND
PFI 13/P2.5	40	6	PFI 5/P1.5
PFI 15/P2.7	39	5	PFI 6/P1.6
PFI 7/P1.7	38	4	D GND
PFI 8/P2.0	37	3	PFI 9/P2.1
D GND	36	2	PFI 12/P2.4
D GND	35	1	PFI 14/P2.6

NC = No Connect





ANEXO D. TABLA GUIA PARA EL DIAGNOSTICO DE VIBRACIONES.

TABLE 6.0 - ILLUSTRATED VIBRATION DIAGNOSTIC CHART

PROBLEM SOURCE	TYPICAL SPECTRUM	PHASE RELATIONSHIP	REMARKS
MASS UNBALANCE A. FORCE UNBALANCE			Force Unbalance will be in-phase and steady. Amplitude due to unbalance will increase by the square of speed (3X speed increase = 9X higher vibration) 1X RPM always present and normally dominates spectrum. Can be corrected by placement of only one balance weight in one plane at Rotor center of gravity (CG).
B. COUPLE UNBALANCE			Couple Unbalance tends toward 180° out-of-phase on same shaft. 1X always present and normally dominates spectrum. Amplitude varies with square of increasing speed. May cause high axial vibrations as well as radial. Correction requires placement of balance weights in at least 2 planes. Note that approx. 180° phase difference should exist between OB & IB horizontals as well as OB & IB verticals.
C. OVERHUNG ROTOR UNBALANCE			Overhung Rotor Unbalance causes high 1X RPM in both Axial and Radial directions. Axial readings tend to be in-phase whereas radial phase readings might be unsteady. Overhung rotors often have both force and couple unbalance, each of which will likely require correction.
ECCENTRIC ROTOR			Eccentricity occurs when center of rotation is offset from geometric centerline of a sheave, gear, bearing, motor armature, etc. Largest vibration occurs at 1X RPM of eccentric component in a direction thru centers of the two rotors. Comparative horizontal and vertical phase readings usually differ either by 0° or by 180° (each of which indicate straight-line motion). Attempts to balance eccentric rotor often result in reducing vibration in one direction, but increasing it in the other radial direction (depending on amount of eccentricity).
BENT SHAFT			Bent shaft problems cause high axial vibration with axial phase differences tending toward 180° on the same machine component. Dominant vibration normally at 1X if bent near shaft center, but at 2X if bent near the coupling. (Be careful to account for transducer orientation for each axial measurement if you reverse probe direction.)
MISALIGNMENT A. ANGULAR MISALIGNMENT			Angular Misalignment is characterized by high axial vibration, 180° out-of-phase across the coupling. Typically will have high axial vibration with both 1X and 2X RPM. However, not unusual for either 1X, 2X or 3X to dominate. These symptoms may also indicate coupling problems as well.
B. PARALLEL MISALIGNMENT			Offset Misalignment has similar vibration symptoms to Angular, but shows high radial vibration which approaches 180° out-of-phase across coupling. 2X often larger than 1X, but its height relative to 1X is often dictated by coupling type and construction. When either Angular or Radial Misalignment becomes severe, can generate either high amplitude peaks at much higher harmonics (4X-8X) or even a whole series of high frequency harmonics similar in appearance to mechanical looseness. Coupling construction will often greatly influence shape of spectrum when misalignment is severe.
C. MISALIGNED BEARING COCKED ON SHAFT			Cocked Bearing will generate considerable axial vibration. Will cause Twisting Motion with approximately 180° phase shift top to bottom and/or side to side as measured in axial direction of same bearing housing. Attempts to align coupling or balance the rotor will not alleviate problem. Bearing must be removed and correctly installed.
RESONANCE			Resonance occurs when a Forcing Frequency coincides with a System Natural Frequency, and can cause dramatic amplitude amplification, which can result in premature, or even catastrophic failure. This may be a natural frequency of the rotor, but can often originate from support frame, foundation, gearbox or even drive belt. If a rotor is at or near resonance, it will be almost impossible to balance due to the great phase shift it experiences (90° at resonance, nearly 180° when passes thru). Often requires changing natural frequency location. Natural Frequencies do not change with a change in speed which helps facilitate their identification.
MECHANICAL LOOSENESS			Mechanical Looseness is indicated by either Type A, B or C spectra. Type A is caused by Structural looseness, weariness of machine feet, baseplate or foundation, also by deteriorated grouting, loose hold-down bolts at the base, and distortion of the frame or base (i.e. soft foot). Phase analysis may reveal approx. 180° phase difference between vertical measurements on machine foot, baseplate and base itself. Type B is generally caused by loose pillowblock bolts, cracks in frame structure or bearing pedestal. Type C is normally generated by improper fit between component parts to dynamic forces from rotor. Causes a truncation of time waveform. Type C is often caused by a bearing liner loose in its cap, excessive clearance in either a sleeve or rolling element bearing, or a loose impeller on a shaft. Type CX Phase is often unstable and may vary widely from one measurement to next, particularly if rotor shifts position on shaft from one startup to next. Mechanical Looseness is often highly directional and may cause noticeably different readings, if compare levels at 30° increments in radial direction all the way around one bearing housing. Also, note that looseness will often cause subharmonic multiples at exactly 1/2 or 1/3 RPM (5X, 1.5X, 2.5X, etc.).



TABLE 6.0 - ILLUSTRATED VIBRATION DIAGNOSTIC CHART


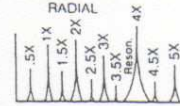

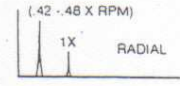

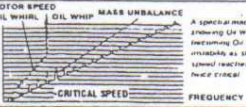
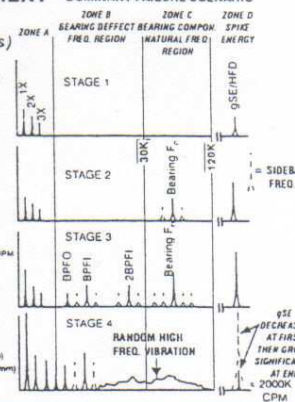



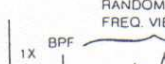
PROBLEM SOURCE	TYPICAL SPECTRUM	REMARKS
ROTOR RUB 		Rotor Rub produces similar spectra to Mechanical Looseness when rotating parts contact stationary components. Rub may be either partial or throughout the whole revolution. Usually generates a series of frequencies, often exciting one or more resonances. Often excites integer fraction subharmonics of running speed (1/2, 1/3, 1/4, 1/5, ... 1/n), depending on location of rotor natural frequencies. Rotor rub can excite many high frequencies (similar to wide-band noise when chalk is dragged along a blackboard). It can be very serious and of short duration if caused by shaft contacting bearing babbit; but less serious when shaft rubbing a seal, an agitator blade rubbing the wall of a tank, or a coupling guard pressing against a shaft.
SLEEVE BEARINGS A. WEAR/CLEARANCE PROBLEMS		Later stages of sleeve bearing wear are normally evidenced by presence of whole series of running speed harmonics (up to 10 or 20). Wiped sleeve bearings often will allow high vertical amplitudes compared to horizontal. Sleeve bearings with excessive clearance may allow a minor unbalance and/or misalignment to cause high vibration which would be much lower if bearing clearances were to spec.
B. OIL WHIRL INSTABILITY 		Oil Whirl instability occurs at .42 - .48X RPM and is often quite severe. Considered excessive when amplitude exceeds 50% of bearing clearances. Oil Whirl is an oil film excited vibration where deviations in normal operating conditions (eccentricity angle and eccentricity ratio) cause oil wedge to "push" shaft around within bearing. Destabilizing force in direction of rotation results in a whirl (or precession). Whirl is inherently unstable since it increases centrifugal forces which increase whirl forces. Can cause oil to no longer support shaft, or can become unstable when whirl frequency coincides with a rotor natural frequency. Changes in oil viscosity, lube pressure and external preloads can affect oil whirl.
C. OIL WHIP INSTABILITY 		Oil Whip may occur if machine operated at or above 2X rotor critical frequency. When rotor brought up to twice critical speed, whirl will be very close to rotor critical and may cause excessive vibration that oil film may no longer be capable of supporting. Whirl speed will actually "lock onto" rotor critical and this point will not pass thru it even if machine brought to higher and higher speeds.
ROLLING ELEMENT BEARINGS (4 Failure Phases)		4 ROLLING ELEMENT BEARING FAILURE STAGES STAGE 1: Earliest indications of bearing problems appear in ultrasonic frequencies ranging from approximately 20,000 - 60,000 Hz (1,200,000 - 3,600,000 CPM). These are frequencies evaluated by Spike Energy (gSE), HFD(g) and Shock Pulse (dB). For example, spike energy may first appear at about .25 gSE in Stage 1 (actual value depending on measurement location and machine speed). STAGE 2: Slight bearing defects begin to "ring" bearing component natural frequencies (L) which predominantly occur in 30K - 120K CPM range. Sideband frequencies appear above and below natural frequency peak at end of Stage 2. Spike energy grows (for example, from 25 to 50 gSE). STAGE 3: Bearing defect frequencies and harmonics appear (see page entitled "Rolling Element Bearing Defect Frequencies"). When wear progresses, more defect frequency harmonics appear and number of sidebands grow, both around these and around bearing natural frequencies. Spike energy continues to increase (for example, from .5 to over 1 gSE). Wear is now usually visible and may extend throughout periphery of bearing, particularly when well formed sidebands accompany bearing defect frequency harmonics. Replace bearings now. STAGE 4: Towards the end, amplitude of 1X RPM or even effected if it grows, and normally causes growth of many running speed harmonics. Discrete bearing defect and component natural frequencies actually begin to "disappear" and are replaced by random, broad band high frequency "noise floor". In addition, amplitudes of both high frequency noise floor and spike energy may in fact decrease; but just prior to failure, spike energy will usually grow to excessive amplitudes.
HYDRAULIC AND AERODYNAMIC FORCES		Blade Pass Frequency (BPF) = No. of Blades (or Vanes) X RPM. This frequency is inherent in pumps, fans and compressors, and normally does not present a problem. However, large amplitude BPF (and harmonics) can be generated in pump if gap between rotating vanes and stationary diffusers is not kept equal all way around. Also, BPF (or harmonic) sometimes can coincide with a system natural frequency causing high vibration. High BPF can be generated if impeller wear ring seizes on shaft or if welds, latching diffusers fail. Also, high BPF can be caused by abrupt bends in pipe (or duct), obstructions which disturb flow, or if pump or fan rotor is positioned eccentrically within housing.
A. BLADE PASS & VANE PASS		
B. FLOW TURBULENCE		Flow Turbulence often occurs in blowers due to variations in pressure or velocity of the air passing thru the fan or connected ductwork. This flow disruption causes turbulence which will generate random, low frequency vibration, typically in the range of 50 to 2000 CPM.
C. CAVITATION		Cavitation normally generates random, higher frequency broadband energy which is sometimes superimposed with blade pass frequency harmonics. Normally indicates insufficient suction pressure (starvation). Cavitation can be quite destructive to pump materials if left uncorrected. It can particularly work impeller vanes. When present, it often sounds as if "gravel" is passing thru pump.



TABLE 6.0 - ILLUSTRATED VIBRATION DIAGNOSTIC CHART

PROBLEM SOURCE	TYPICAL SPECTRUM	REMARKS
GEARS		
A. NORMAL SPECTRUM		Normal Spectrum shows 1X and 2X RPM, along with Gear Mesh Frequency (GMF). GMF commonly will have running speed sidebands around it. All peaks are of low amplitude, and no natural frequencies of gears are excited.
B. TOOTH WEAR		Key indicator of Tooth Wear is excitation of Gear Natural Frequency along with sidebands around it spaced at the running speed of the bad gear. Gear Mesh Frequency (GMF) may or may not change in amplitude, although high amplitude sidebands surrounding GMF usually occur when wear is noticeable. Sidebands may be better wear indicator than GMF frequencies themselves.
C. TOOTH LOAD		Gear Mesh Frequencies are often very sensitive to load. High GMF amplitudes do not necessarily indicate a problem, particularly if sideband frequencies remain low level and no gear natural frequencies are excited. Each Analysis should be performed with system at maximum operating load.
D. GEAR ECCENTRICITY AND BACKLASH		Fairly high amplitude sidebands around GMF often suggest gear eccentricity, backlash, or non-parallel shafts which allow the rotation of one gear to "modulate" the running speed of the other. The gear with the problem is indicated by the spacing of the sideband frequencies. Improper backlash normally excites GMF and Gear Natural Frequency, both of which will be sidebanded at 1X RPM. GMF amplitudes will often decrease with increasing load if backlash is the problem.
E. GEAR MISALIGNMENT		Gear Misalignment almost always excites second order or higher GMF harmonics which are sidebanded at running speed. Often will show only small amplitude 1X GMF, but much higher levels at 2X or 3X GMF. Important to set FMAX high enough to capture at least 2 GMF harmonics if transducer system has the capability.
F. CRACKED/BROKEN TOOTH		A Cracked or Broken Tooth will generate a high amplitude at 1X RPM of this gear, plus it will excite gear natural frequency (fn) sidebanded at its running speed. It is best detected in Time Waveform which will show a pronounced spike every time the problem tooth tries to mesh with teeth on the mating gear. Time between impacts (Δ) will correspond to 1/3 speed of gear with the problem. Amplitudes of Impact Spikes in Time Waveform often will be much higher than that of 1X RPM in FFT.
G. HUNTING TOOTH PROBLEMS		Hunting Tooth Frequency (HTF) is particularly effective for detecting faults on both the gear and pinion that might have occurred during the manufacturing process or due to mishandling. It can cause quite high vibration, but since it occurs at low frequencies predominately less than 600 CPM, it is often missed. A gear set with this tooth repeat problem normally emits a "growling" sound from the drive. The maximum effect occurs when the faulty pinion and gear teeth both enter mesh at the same time (on some drives, this may occur only 1 of every 10 to 20 revolutions, depending on the HTF formula). Note that TGEAR and TPINION refer to number of teeth on gear and pinion, respectively. Ne = number of unique assembly phases for a given tooth combination which equals the product of prime factors common to the number of teeth on each gear.
BEAT VIBRATION		
	<p>TWO FREQUENCIES 180° OUT OF PHASE</p> <p>TWO FREQUENCIES IN PHASE</p> <p>BEAT FREQUENCY GENERATED BY TWO FREQUENCIES ABOVE</p> <p>MINIMUM VIBRATION OCCURS WHEN 2 FREQUENCIES ARE 180° OUT OF PHASE</p> <p>MAXIMUM VIBRATION OCCURS WHEN 2 FREQUENCIES ARE IN PHASE</p> <p>WIDE BAND SPECTRUM</p> <p>ZOOM SPECTRUM</p>	<p>A Beat Frequency is the result of two closely spaced frequencies going into and out of synchronization with one another. The wideband spectrum normally will show one peak pulsating up and down. When you zoom into this peak (lower spectrum), it actually shows two closely spaced peaks. The difference in these two peaks (F₁, F₂) is the beat frequency which itself appears in the wideband spectrum. The beat frequency is not commonly seen in normal frequency range measurements since it is inherently low frequency, usually ranging from only approximately 5 to 100 CPM.</p> <p>Maximum vibration will result when the time waveform of one frequency (F₁) comes into phase with other frequency (F₂). Minimum vibration occurs when waveforms of these two frequencies line up 180° out of phase.</p>



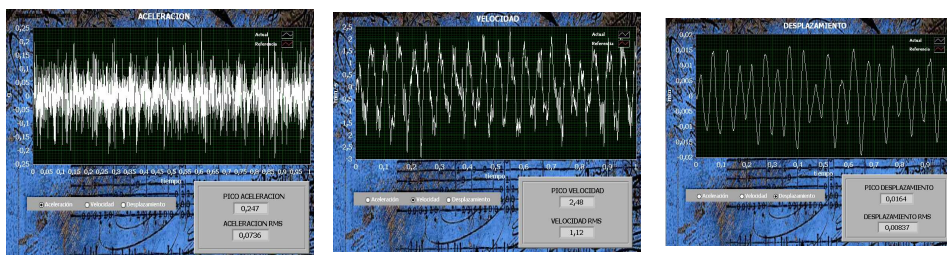
TABLE 6.0 - ILLUSTRATED VIBRATION DIAGNOSTIC CHART

PROBLEM SOURCE	TYPICAL SPECTRUM	REMARKS
BELT DRIVE PROBLEMS		
A. WORN, LOOSE OR MISMATCHED BELTS		<p>BELT FREQ = $\frac{2.142 \times \text{PULLEY RPM} \times \text{PITCH DIAM}}{\text{BELT LENGTH}}$</p> <p>TIMING BELT FREQ = BELT FREQ \times # BELT TEETH</p> <p>PULLEY RPM \times # PULLEY TEETH</p> <p>Belt frequencies are below the RPM of either the motor or the driven machine. When they are worn, loose or mismatched, they normally cause 3 to 4 multiples of belt frequency. Often 2X belt freq is the dominant peak. Amplitudes are normally unsteady, sometimes pulsing with either driver or driven RPM. On timing belt drives, wear or pulley misalignment is indicated by high amplitudes of the Timing Belt Frequency.</p>
B. BELT/SHEAVE MISALIGNMENT		Misalignment of sheaves produces high vibration at 1X RPM predominantly in the axial direction. The ratio of amplitudes of driver to driven RPM depends on where the data is taken as well as on relative mass and frame stiffness. Often with sheave misalignment, the highest axial vibration on the motor will be at 1an RPM.
C. ECCENTRIC SHEAVES		Eccentric and/or unbalanced sheaves cause high vibration at 1X RPM of this sheave. The amplitude is normally highest in line with the belts, and should show up on both driver and driven bearings. It is sometimes possible to balance eccentric sheaves by attaching washers to taper lock bolts. However, even if balanced, the eccentricity will still induce vibration and reversible fatigue stresses in the belt.
D. BELT RESONANCE		Belt Resonance can cause high amplitudes if the belt natural frequency should happen to approach or coincide with either the motor or driven RPM. Belt natural frequency can be altered by changing either the belt tension or length. Can be detected by loosening and then releasing belt while measuring response on sheaves or bearings.
ELECTRICAL PROBLEMS		
A. STATOR ECCENTRICITY, SHORTED LAMINATIONS AND LOOSE IRON		Stator problems generate high vibration at 2X line frequency (2FL). Stator eccentricity produces uneven stationary air gap between rotor and stator which produces very directional vibration. Differential Air Gap should not exceed 5% for induction motors and 10% for synchronous motors. Soft foot and warped bases can produce an eccentric stator. Loose iron is due to stator support weakness or looseness. Shorted stator laminations can cause uneven, localized heating which can bow motor shaft. Produces thermally-induced vibration which can significantly grow with operating time.
B. ECCENTRIC ROTOR (Variable Air Gap)	<p>F_L = Electrical Line Freq. N_s = Synchron. Speed = $\frac{120F_L}{P}$ F_r = Slip Freq. = N_s - RPM F_p = Pole Pass Freq. = $F_r \times P$ P = # Poles</p>	Eccentric Rotors produce a rotating variable air gap between rotor and stator which induces pulsating vibration (normally between 2FL and closest running speed harmonic). Often requires "zoom" spectrum to separate 2FL and running speed harmonic. Eccentric rotors generate 2FL surrounded by Pole Pass Frequency sidebands (FP), as well as FP sidebands around running speed. FP appears itself at low frequency. (Pole Pass Frequency = Slip Frequency \times # Poles). Common values of FP range from approx. 20 to 120 CPM (.30 - 2.0 Hz).
C. ROTOR PROBLEMS		Broken or Cracked rotor bars or shorting rings, bad joints between rotor bars and shorting rings, or shorted rotor laminations will produce high 1X running speed vibration with pole pass frequency sidebands (FP). In addition, cracked rotor bars often will generate FP sidebands around the third, fourth and fifth running speed harmonics. Loose rotor bars are indicated by 2X line freq (2FL) sidebands surrounding Rotor Bar Pass Frequency (RBPF) and/or its harmonics (RBPF = Number of Bars \times RPM). Often will cause high levels at 2X RBPF, with only a small amplitude at 1X RBPF.
D. PHASING PROBLEM (Loose Connector)		Phasing problems due to loose or broken connectors can cause excessive vibration at 2X Line Freq (2FL) which will have sidebands around it at 1/3 Line Freq (1/3 FL). Levels at 2FL can exceed 1.0 insec if left uncorrected. This is particularly a problem if the defective connector is only sporadically making contact and periodically not.
E. SYNCHRONOUS MOTORS (Loose Stator Coils)		Loose stator coils in synchronous motors will generate fairly high vibration at Coil Pass Freq (CPF) which equals number of stator coils \times RPM (# Stator Coils = # Poles \times Coils/Pole). The Coil Pass Frequency will be surrounded by 1X RPM sidebands.
F. DC MOTOR PROBLEMS		DC motor problems can be detected by higher than normal amplitudes at SCR Firing Freq (6F1) and harmonics. These problems include broken field windings, bad SCRs and loose connections. Other problems including loose or blown fuses and shorted control cards can cause high amplitude peaks at 1X thru 5X Line Frequencies (3600 - 18,000 CPM).

ANEXO E. GRAFICAS DE RESULTADOS PRUEBAS.

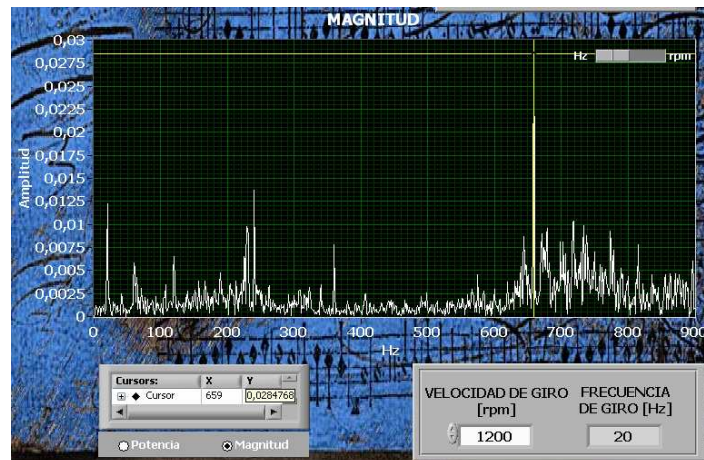
GRÁFICAS CUANDO EL MOTOR ESTA EN ESTADO NORMAL

FIGURA E-1. Señal de aceleración, velocidad y desplazamiento en el tiempo adquirida por el sensor en el Eje X. Motor estado normal.



Fuente: Autores

FIGURA E- 2. Espectro de la aceleración señal adquirida (Eje X). Motor estado normal.



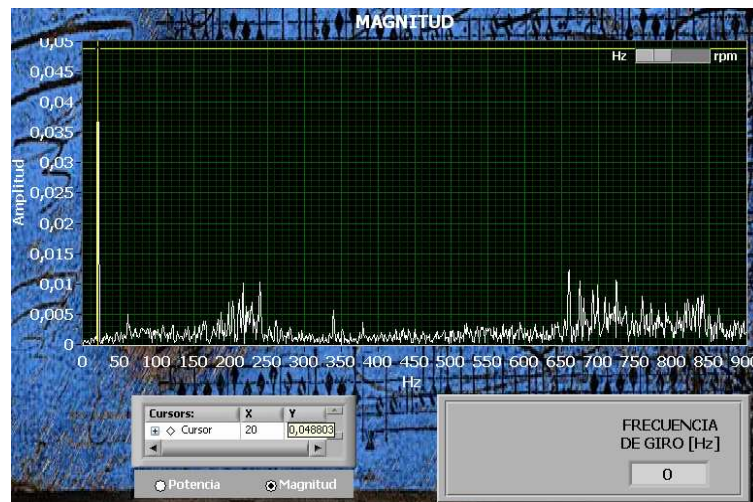
Fuente: Autores

FIGURA E-3. Señal de Aceleración en el tiempo adquirida por el sensor en el Eje Y. Motor estado normal



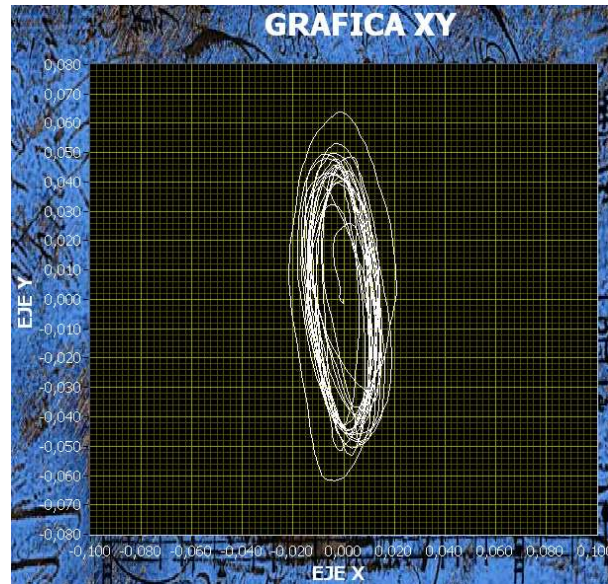
Fuente: Autores

FIGURA E-4. Espectro de la señal de aceleración Adquirida (Eje Y). Motor estado normal



Fuente: Autores

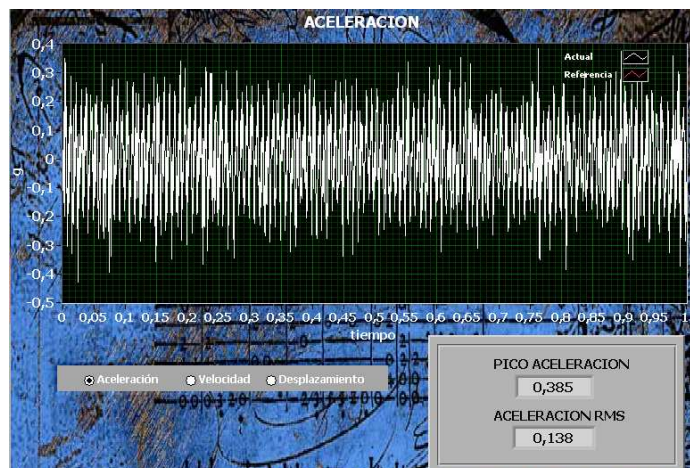
FIGURA E-5 Gráfica de Órbitas (Relación entre las amplitudes del desplazamiento en los dos ejes). Motor estado normal



Fuente: Autores

FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR SIN UNA DE LAS FASES

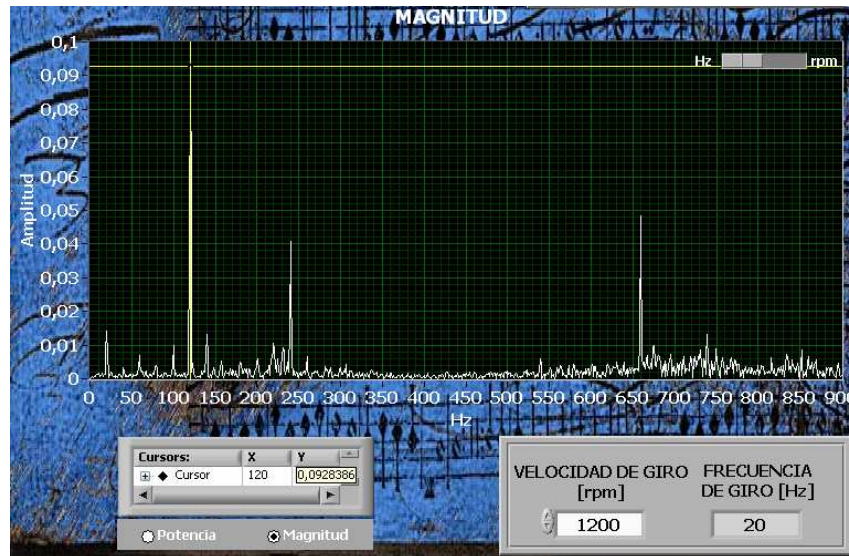
FIGURA E-6. Señal de Aceleración en el tiempo adquirida por el sensor en el Eje X. Motor sin una fase



Fuente: Autores

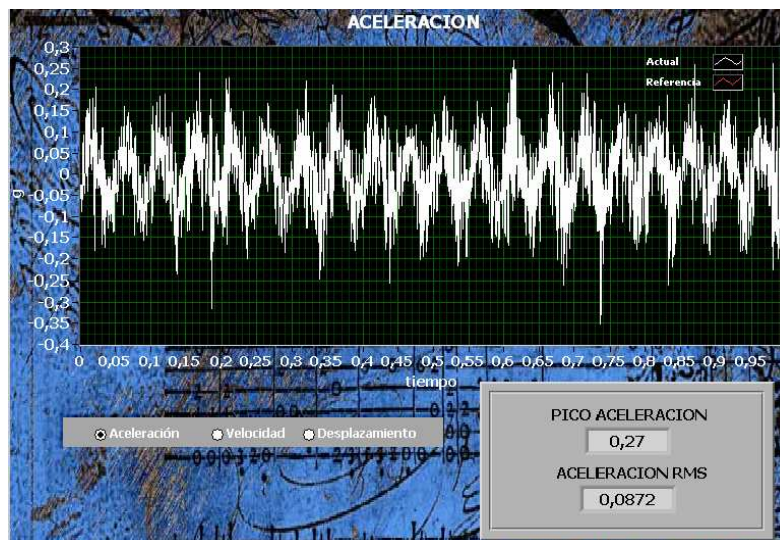


FIGURA E-7. Espectro de la señal de aceleración Adquirida (Eje X). Motor sin una fase.



Fuente: Autores

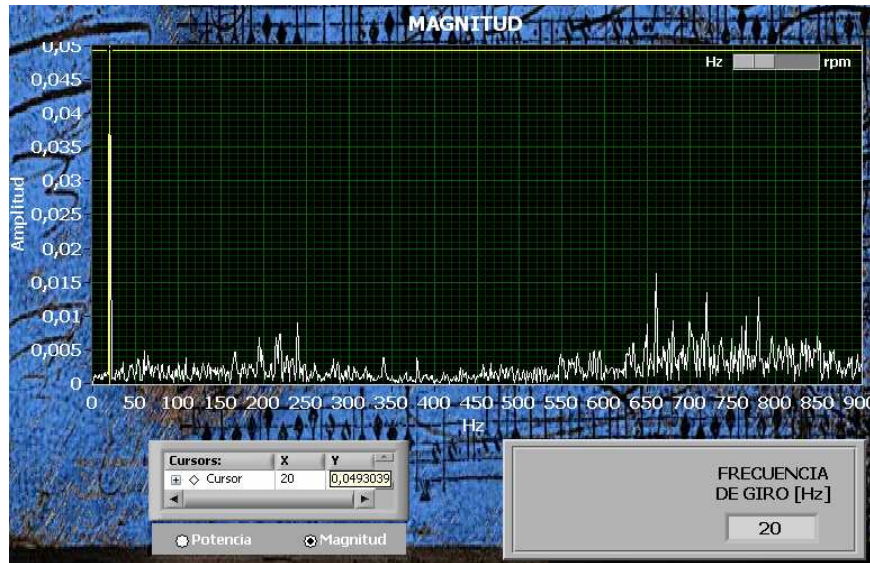
FIGURA E-8. Señal de Aceleración en el tiempo adquirida por el sensor en el Eje Y. Motor sin una fase



Fuente: Autores



FIGURA E-9. Espectro de la Señal de aceleración Adquirida (Eje Y). Motor sin una fase.



Fuente: Autores

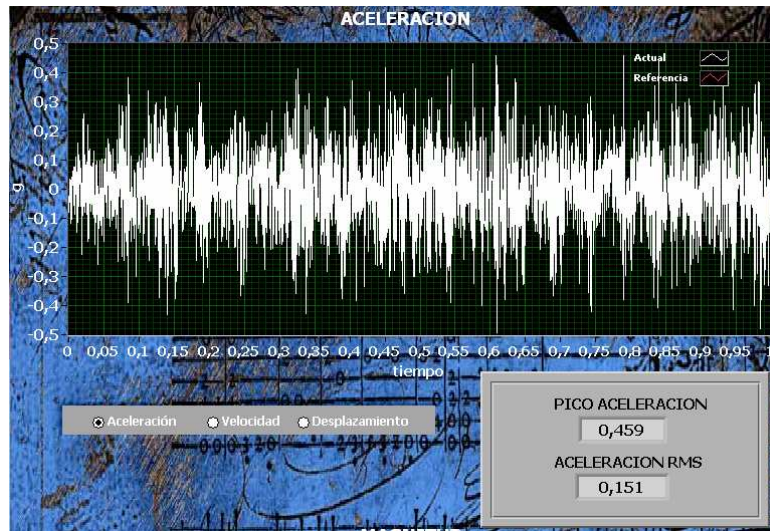
FIGURA E-10. Gráfica de Órbitas. Motor sin una fase



Fuente: Autores

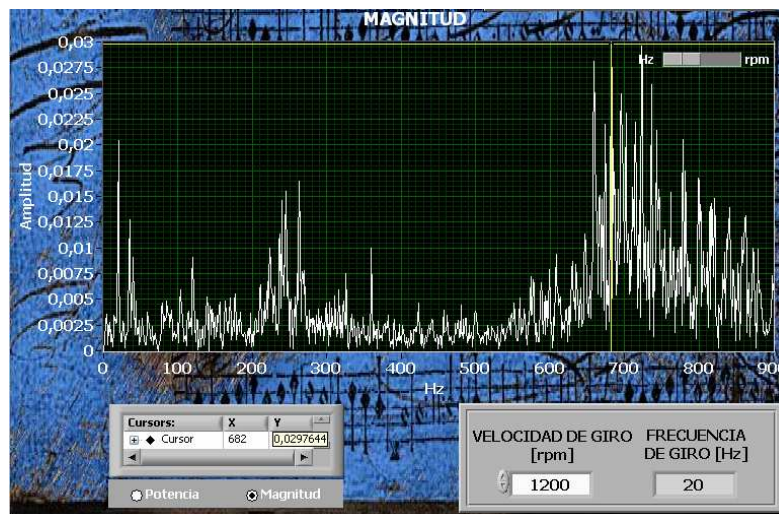
ROZAMIENTO EN EL EJE DEL MOTOR

FIGURA E-11. Señal de Aceleración en el tiempo adquirida por el sensor en el Eje X. Rozamiento sobre el eje.



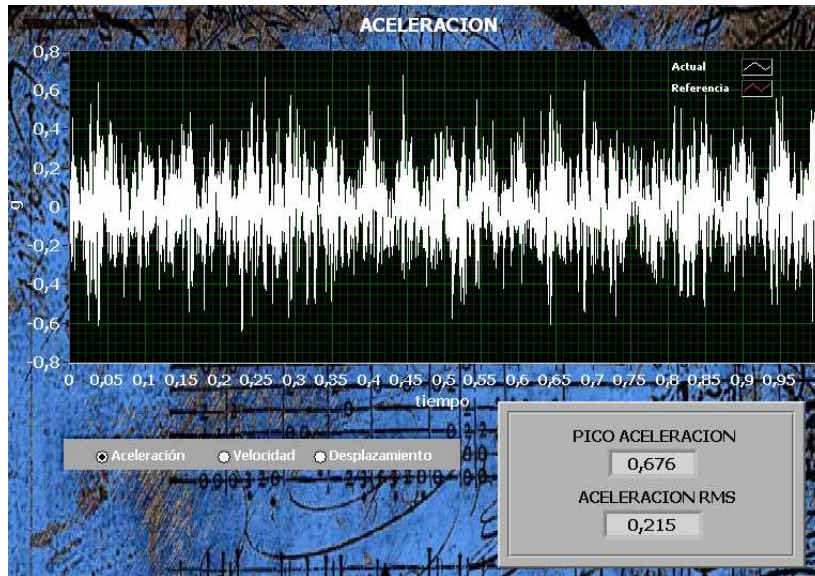
Fuente: Autores

FIGURA E-12. Espectro de la Señal de aceleración Adquirida (Eje X). Rozamiento sobre el eje.



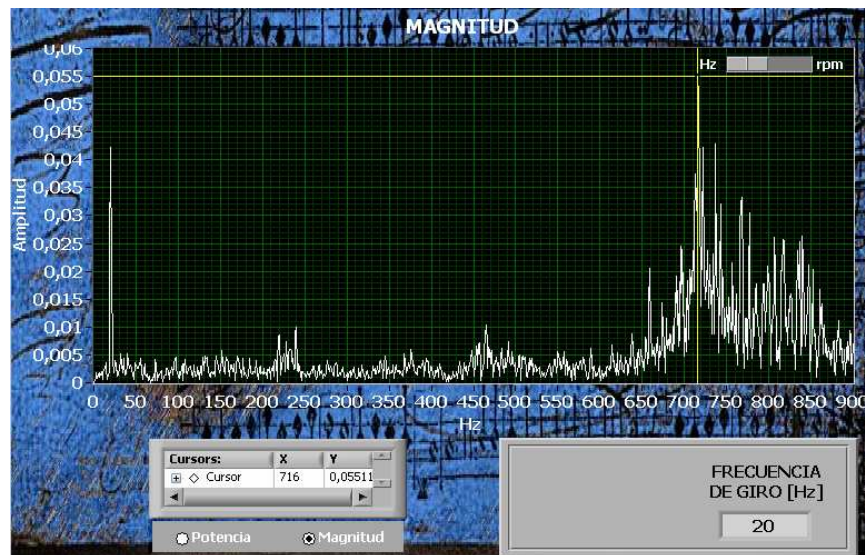
Fuente: Autores

FIGURA E-13. Señal de Aceleración en el tiempo adquirida por el sensor en el Eje Y. Rozamiento sobre el eje.



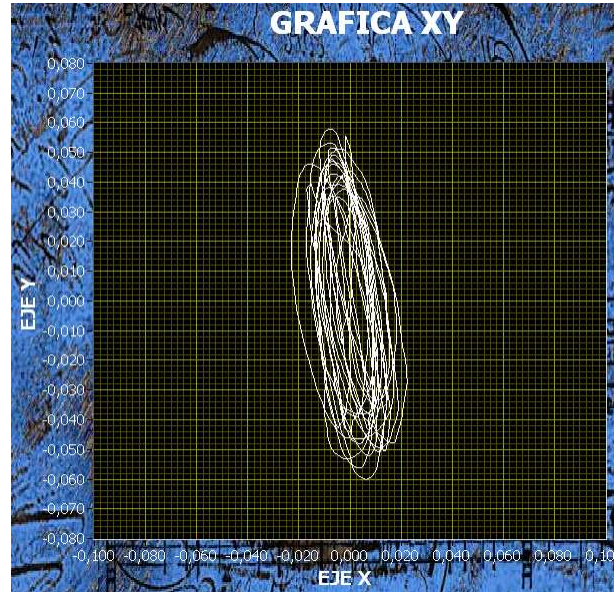
Fuente: Autores

FIGURA E-14. Espectro de la Señal aceleración Adquirida (Eje Y). Rozamiento sobre el eje.



Fuente: Autores

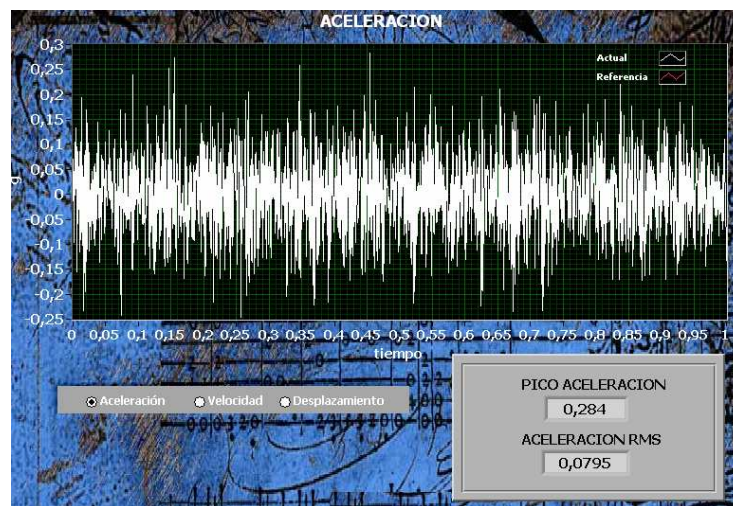
FIGURA E-15. Gráfica de Órbitas. Rozamiento sobre el eje.



Fuente: Autores

DESBALANCE DE CORRIENTES

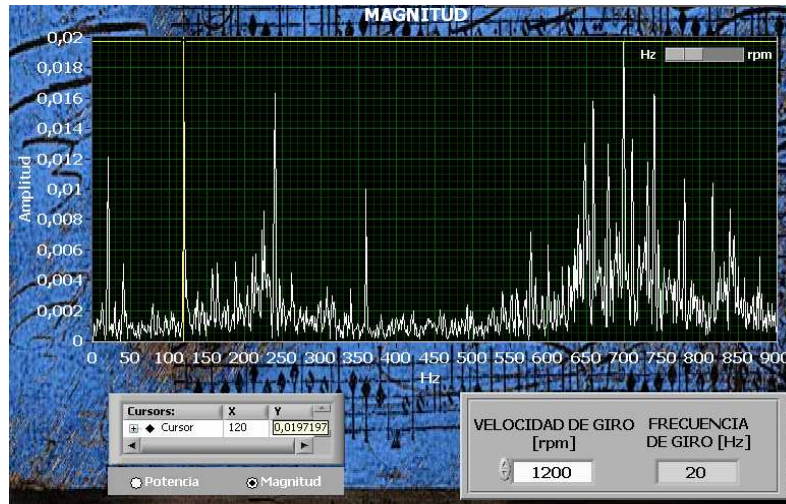
FIGURA E-16. Señal de Aceleración en el tiempo adquirida por el sensor en el Eje X. Desbalance de corrientes.



Fuente: Autores

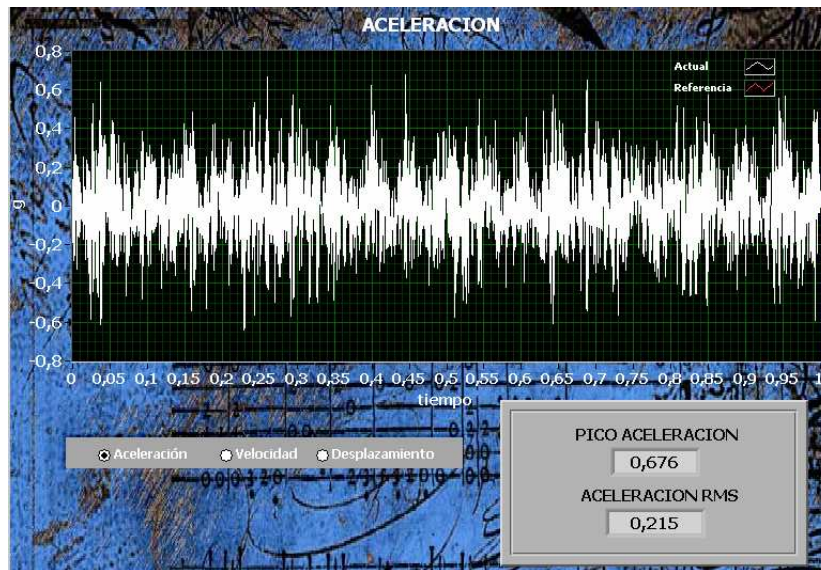


FIGURA E-17. Espectro de la Señal de aceleración Adquirida (Eje X). Desbalance de corrientes.



Fuente: Autores

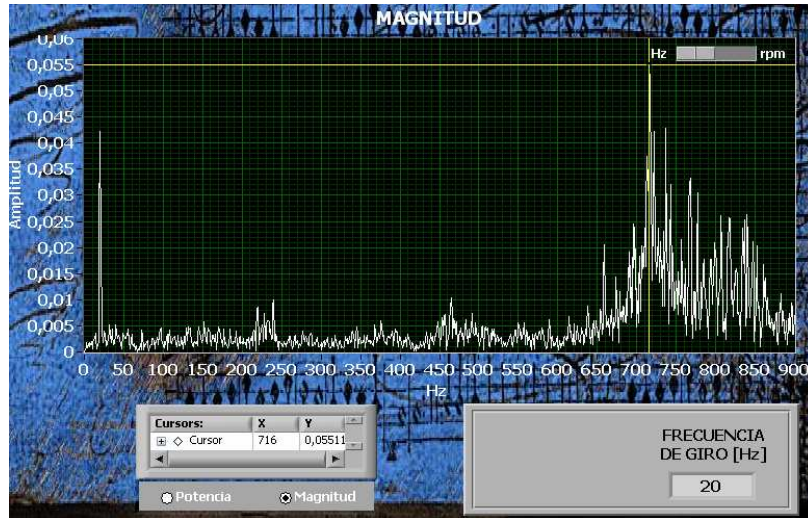
FIGURA E-18. Señal de Aceleración en el tiempo adquirida por el sensor en el Eje Y. Desbalance de corrientes.



Fuente: Autores

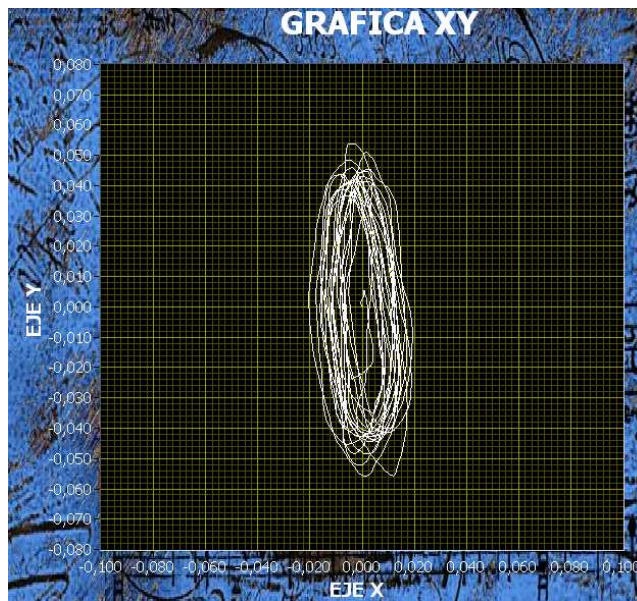


FIGURA E-19. Espectro de la Señal de aceleración Adquirida (Eje Y). Desbalance de corrientes.



Fuente: Autores

FIGURA E-20. Gráfica de Órbitas. Desbalance de corrientes.



Fuente: Autores



Tabla E-1. Valores PICO Y RMS (Resultados de la evaluación de severidad) de las pruebas realizadas

ESTADO DEL MOTOR	ACELERACIÓN X PICO	VELOCIDAD X PICO	DESPLAZAMIENTO X PICO
NORMAL	0.247	2.48	0.16
SIN UNA FASE	0.385	4.11	0.0243
DESBALANCE POR CORRIENTE	0.284	2.62	0.0211
DESBALANCE CARGA	0.459	4.18	0.032

ESTADO DEL MOTOR	ACELERACIÓN Y PICO	VELOCIDAD Y PICO	DESPLAZAMIENTO Y PICO
NORMAL	0.259	6.52	0.0469
SIN UNA FASE	0.27	7.45	0.543
DESBALANCE POR CORRIENTE	0.676	7.01	0.0552
DESBALANCE CARGA	0.676	7.01	0.552

ESTADO DEL MOTOR	ACELERACIÓN X RMS	VELOCIDAD X RMS	DESPLAZAMIENTO X RMS
NORMAL	0.0736	1.12 ADMISIBLE	0.00837
SIN UNA FASE	0.138	1.74 ADMISIBLE	0.00973
DESBALANCE POR CORRIENTE	0.795	1.14 ADMISIBLE	0.00911
DESBALANCE CARGA	0.151	1.94 LIMITE	0.015

ESTADO DEL MOTOR	ACELERACIÓN Y RMS	VELOCIDAD Y RMS	DESPLAZAMIENTO Y RMS
NORMAL	0.059	3.77 LIMITE	0.0302
SIN UNA FASE	0.0872	3.87 LIMITE	0.031
DESBALANCE POR CORRIENTE	0.215	3.46 LIMITE	0.0275
DESBALANCE CARGA	0.215	3.46 LIMITE	0.0275

Fuente: Autores