



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN**

**“ADQUISICIÓN DE VIBRACIONES MECÁNICAS DE UN MOTOR EN  
FUNCIONAMIENTO USANDO LABVIEW”**

### **TESINA DE SEMINARIO**

Previa a la obtención del Título de:

### **INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

### **ESPECIALIZACIÓN EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

Presentado por:

Douglas Steven Acosta Avecillas

Johannex Kingsiño Molina Jiménez

Guayaquil – Ecuador

2011

# AGRADECIMIENTO

Primero a Dios por permitirme estudiar en esta Universidad de prestigio. A mis padres por su constante apoyo y cariño. A mi esposa por estar siempre a mi lado en todo momento y de manera muy especial al Ing. Holger Cevallos por su colaboración en la realización de este trabajo.

**Douglas Acosta Avecillas**

# AGRADECIMIENTO

En primer lugar le agradezco a Dios por permitirme realizar este proyecto. A mi familia (Walter, Amalia, Johanna, María José y Raphael) por el apoyo que siempre me han dado, y finalmente a nuestro director por colaborarnos con el desarrollo de este proyecto.

**Johannex Molina Jiménez**

# DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios por ser quien ha estado a mi lado en todo momento, a mis queridos padres Marcelo y Laura por sus esfuerzos, sus consejos y su apoyo incondicional y de manera muy especial a mi esposa Patricia y mis hijas Fiorella y Amy.

**Douglas Acosta Avecillas.**

# DEDICATORIA

Son muchas las personas a las que me gustaría dedicar este trabajo y agradecer su amistad, apoyo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mi recuerdo y corazón (Lucia Espinoza), sin importar donde estén y si alguna vez llegan a leer estas palabras, quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones

**Johannex Molina Jiménez**

# **TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**Ing. Holger Cevallos**  
**PROFESOR DEL SEMINARIO**  
**DE GRADUACIÓN**

---

**Ing. Carlos Salazar**  
**PROFESOR DELEGADO**  
**DEL DECANO**

# DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de este Trabajo de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de exámenes y títulos profesionales de la ESPOL)

---

Douglas Steven Acosta Avecillas

---

Johannex Kingsiño Molina Jiménez

# RESUMEN

Este proyecto tiene la finalidad de mostrar la condición en que se encuentran las máquinas rotativas por medio del análisis de las vibraciones, que éstas producen cuando están en pleno funcionamiento.

Se realizó un programa de adquisición de datos mediante un software especializado en instrumentación virtual llamado LabVIEW 8.6 y sus módulos SignalExpress y Sound and Vibration Assistant, para que recepten las vibraciones del banco de pruebas, por medio de los acelerómetros piezoeléctricos colocados en puntos estratégicos.

Una vez adquirida la señal de aceleración, ésta es integrada para dar como resultado la velocidad, la cual mediante un espectro de frecuencias indica las posibles fallas mecánicas o eléctricas que se puedan encontrar en la maquinaria.

Según sea la severidad de las vibraciones se verá la conveniencia o no de la realización de alguna acción correctora. Como por ejemplo un mantenimiento predictivo que solucionaría el problema de manera rápida ya que se



conocería donde se origina la falla y con esto se disminuiría el riesgo de algún problema en el futuro como dejar al motor fuera de servicio y ocasionar pérdidas en la producción.

En un motor, las vibraciones son la mejor indicación de su condición mecánica aunque éstas pueden causar fisuras por fatiga, pérdida de efectividad de los sellos, ruido, desgaste, etc.

Las vibraciones están directamente relacionadas con la vida útil del motor de dos maneras; un bajo nivel de vibraciones indica que el motor funcionará correctamente durante mucho tiempo, en cambio un alto nivel de vibraciones indica que la máquina se dirige hacia alguna avería.

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	VIII
ÍNDICE GENERAL.....	X
ABREVIATURAS.....	XIII
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	XV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVIII
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO 1.....	1
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Antecedentes.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Objetivo General.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Objetivos Específicos.....</b>	<b>2</b>
<b>1.4 Justificación.....</b>	<b>3</b>
<b>1.5 Alcance y Limitaciones.....</b>	<b>3</b>
<b>1.6 Descripción del proyecto.....</b>	<b>4</b>
CAPÍTULO 2.....	7
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Fundamentos de vibraciones.....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Severidad de vibración.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2.1 Alcance.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2.2 Procedimiento de medición y condiciones de operación.....</b>	<b>13</b>

2.2.2.1	Equipos de medición .....	13
2.2.2.2	Puntos de medición.....	14
2.2.2.3	Condiciones de operación.....	14
2.2.3	Clasificación de las máquinas.....	15
2.2.3.1	Soportes de la máquina a ensayar .....	18
2.2.4	Evaluación de la severidad vibratoria .....	18
2.2.4.1	Calidad de la vibración .....	19
2.3	Análisis .....	20
2.4	Identificación de causas de vibraciones .....	25
2.4.1	Desequilibrio .....	27
2.4.2	Desalineación.....	29
2.4.3	Engranajes .....	33
2.4.4	Rodamientos .....	35
CAPÍTULO 3.....		39
3.	HERRAMIENTAS UTILIZADAS.....	39
3.1	NI LabVIEW .....	39
3.1.1	NI LabVIEW SignalExpress.....	40
3.1.2	NI Sound and Vibration Assistant .....	41
3.2	Acelerómetro PCB Piezoeléctrico 352C03 .....	42
3.3	Montaje Adhesivo .....	43
3.4	Cable BNC Modelo 003C10 PCB .....	44
3.5	Chasis NI cDAQ-9172.....	44
3.6	Módulo NI 9234 .....	46

CAPÍTULO 4 .....	47
<b>4. IMPLEMENTACION DEL SOFTWARE DESARROLLADO .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1. Pantalla Principal .....</b>	<b>47</b>
<b>4.2. Bloques.....</b>	<b>50</b>
<b>4.3. Importación de Señales.....</b>	<b>57</b>
<b>4.4. Análisis de Severidad .....</b>	<b>59</b>
<b>4.5. Análisis de las Señales.....</b>	<b>60</b>
<b>4.6. Creación de Variables Locales.....</b>	<b>63</b>
<b>4.7. Modificaciones del bloque Power Spectrum .....</b>	<b>65</b>
<b>4.8. Modificaciones del bloque Peak Search.....</b>	<b>66</b>
CAPÍTULO 5 .....	70
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>70</b>
<b>5.1. Espectro de motor en buen estado.....</b>	<b>71</b>
<b>5.2. Espectro de motor con desbalance .....</b>	<b>72</b>
<b>5.3. Espectro de motor con holgura mecánica .....</b>	<b>74</b>
<b>5.4. Espectro de motor con desalineación.....</b>	<b>75</b>
<b>5.5. Espectro de motor con falla de rodamientos .....</b>	<b>76</b>
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
ANEXOS	
BIBLIOGRAFÍA	

# ABREVIATURAS

LabVIEW	Laboratorio de Instrumentación Virtual de Bancos de Trabajos de Ingeniería
NI	National Instruments
DAQ	Adquisición de Datos
Hz	Hertz
HP	Caballos de fuerza
V	Voltaje
RPM	Revoluciones por minuto
A	Amperio
CPM	Ciclos por minuto
mm/s	Milímetros por segundos
ISO	Organización Internacional para la Estandarización
rev/s	Revoluciones por segundo
RMS	Raíz cuadrada del valor medio
Kw	Kilowatt
g	Energía de impulsos
NHV	Ruido, vibración y dureza

Vis	Instrumentos Virtuales
PCB	Picoculombio
mV	Milivoltio
dB	Decibeles
BNC	Bayonet Neill-Concelman
USB	Bus serial de Comunicación Universal
E/S	Entrada/salida
VDC	Voltaje de corriente continua
AC/DC	Corriente alterna/corriente continúa
m	Metros
IEPE	Sensores piezoeléctricos electrónicos integrados
cm	centímetros

## ÍNDICE DE IMÁGENES

Figura 1.1 Banco de Pruebas.....	5
Figura 1.2 La parte del software y electrónica del proyecto.....	6
Figura 2.1 Gráfica de la velocidad de un objeto que vibra. ....	9
Figura 2.2 Gráfica de la aceleración de un objeto que vibra.....	10
Figura 2.3 Puntos de medición .....	15
Figura 2.4 Toma de datos con transductor. ....	21
Figura 2.5 Sentido de toma de datos.....	23
Figura 2.6 Espectro de velocidad de un problema de desequilibrio. ....	28
Figura 2.7 Espectro de velocidad de un problema de desalineación. ....	29
Figura 2.8 Tipos de falta de alineación.....	31
Figura 2.8a Desalineación Angular .....	31
Figura 2.8b Desalineación Paralela .....	31
Figura 2.8c Rodamiento desalineado en el eje. ....	31
Figura 2.9 Falta de alineación en paralelo.....	32
Figura 2.10 Falta de alineación angular. ....	32
Figura 2.11 Rodamiento y casquillo mal alineados respecto al eje. ....	33
Figura 2.12 Espectro de velocidad de un problema de engranaje.....	34
Figura 2.13 Espectro de velocidad de un rodamiento defectuoso. ....	36
Figura 2.14 Frecuencias características de los rodamientos.....	36
Figura 3.1 Logo de LabVIEW .....	39

Figura 3.2 Entorno a NI LabVIEW SignalExpress .....	40
Figura 3.3 Entorno a Sound and Vibration Measurement Suite .....	41
Figura 3.4 Acelerómetro PCB Piezoeléctrico Modelo 352C03 .....	42
Figura 3.5 Variedad de configuraciones de montaje y sus efectos sobre la alta frecuencia. ....	43
Figura 3.6 Cable BNC 003C10 .....	44
Figura 3.7 Chasis cDAQ-9172 .....	45
Figura 3.8 Módulo NI 9234 .....	46
Figura 4.1 Pestaña de Señales de Vibración .....	48
Figura 4.2 Pestaña de Velocidad y Desplazamiento .....	48
Figura 4.3 Pestaña de Análisis .....	48
Figura 4.4 Pestaña de Reporte .....	49
Figura 4.5 Bloque DAQ Assistant .....	49
Figura 4.6 Bloque Split Signals .....	49
Figura 4.7 Bloque Convert from Dynamic Data .....	49
Figura 4.8 Bloque Index Array .....	50
Figura 4.9 Bloque Amplitude and Level .....	50
Figura 4.10 Bloque Vibration Level Velocity .....	51
Figura 4.11 Bloque Power Spectrum .....	51
Figura 4.12 Bloque Array Max & Min .....	52
Figura 4.13 Bloque Read From Measurement File Express .....	52
Figura 4.14 Programación en el MathScript Node .....	53
Figura 4.15 Bloque Peak Search .....	53
Figura 4.16 Bloque Number To Fractional String .....	55
Figura 4.17 Bloque Concatenate Strings .....	55
Figura 4.18 Bloque Format Into String .....	55
Figura 4.19 Lazo Case Structure .....	56
Figura 4.20 Bloque Sort 1D Array .....	56
Figura 4.21 Bloque Reverse 1D Array .....	56



Figura 4.22 Bloque Array Subset.....	57
Figura 4.23 Diagrama de bloques donde se importa la señal.....	57
Figura 4.24 Ventana de configuración de Read From Measurement.....	58
Figura 4.25 Diagrama de bloques del análisis de severidad.....	59
Figura 4.26 Diagrama de bloques de Análisis de las Señales.....	60
Figura 4.27 Ventana de configuración de DAQ Assistant .....	61
Figura 4.28 Diagrama de bloques de la programación .....	61
Figura 4.29 Ventana de configuración del Vibration Level .....	62
Figura 4.30 Diagrama de bloques .....	63
Figura 4.31 Como crear una variable local .....	63
Figura 4.32 Diagrama de bloques del reporte .....	64
Figura 4.33 Variable Local y Case Structure .....	64
Figura 4.34 Case Structure selectivo .....	65
Figura 4.35 Diagrama de bloques Power Spectrum.....	65
Figura 4.36 Diagrama de bloques Peak Search .....	66
Figura 4.37 Bloque MY PEAK SEARCH .....	66
Figura 4.38 Diagrama de bloques de Peak.....	67
Figura 4.39 Bloque Spectrum Peak Search.....	67
Figura 4.40 Diagrama de bloques Spectrum Peak Search .....	68
Figura 4.41 Diagrama de bloques Spectrum Peak Search .....	68
Figura 5.1 Espectro de motor en buen estado .....	71
Figura 5.2 Espectro de motor con desbalance.....	72
Figura 5.3 Amplitudes y Frecuencias del desbalance.....	73
Figura 5.4 Espectro de motor con Holgura mecánica .....	74
Figura 5.5 Amplitudes y Frecuencias de Holgura Mecánica .....	75
Figura 5.6 Espectro de motor con desalineación.....	75
Figura 5.7 Amplitudes y Frecuencias de desalineación.....	76
Figura 5.8 Espectro de motor con falla de rodamientos .....	76
Figura 5.9 Amplitudes y Frecuencias de fallas de rodamientos .....	77

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I. Rangos de severidad vibratoria para máquinas normales .....	17
Tabla II. Identificación del estado de la máquina	
Tabla III. Resumen de fallas en bombas centrífugas	
Tabla IV. Características de varios acoplamientos	
Tabla V. Criterio de severidad de vibración de acuerdo a las normas VDI 2056, ISO 2372 y BS 4675	
Tabla VI: Severidad del desbalance según: mechanical vibration practical machinery vibration analysis and predictive maintenance”	

# INTRODUCCIÓN

El mantenimiento todos los días está evolucionando, y con él, también se ha incrementado el uso de los instrumentos electrónicos de medición. Ahora vemos que empresas industriales de todo nivel, están complementando su visión de realizar mantenimientos correctivos y preventivos para asegurar disponibilidad, con un mantenimiento proactivo que contempla conceptos relativamente nuevos tales como confiabilidad (mantenimiento predictivo), mantenimiento basado en condición, aseguramiento de la calidad del mantenimiento.

El alto costo de instrumentos comerciales para la recolección y análisis de vibraciones, así como su arquitectura compacta y cerrada ha llevado a buscar nuevas alternativas. Los instrumentos basados en sistemas de adquisición de datos constituyen una herramienta poderosa para el desarrollo de instrumentos más económicos y flexibles, haciendo a la tecnología como la principal aliada en la gestión del mantenimiento.

# CAPÍTULO 1

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 Antecedentes

La mayoría de las industrias buscan cada vez más productividad y necesitan que sus máquinas estén funcionando al 100% todo el tiempo y que la producción no pare. Por eso se han incluido dentro de los programas de mantenimiento, el mantenimiento predictivo que utiliza el monitoreo y análisis de las vibraciones con el fin de establecer cuál es el estado de salud mecánica de las máquinas y en particular de sus elementos más críticos para de esta manera poder prevenir fallas catastróficas.

Todas las máquinas vibran, con independencia de su antigüedad o modernidad, el desarrollo de fallos provoca variaciones de los niveles de vibraciones originando componentes que lo caracterizan

unívocamente en espectro, mostrando la amplitud de dichos componentes acerca de la severidad de los defectos.

Siendo el objetivo de este proyecto, desarrollar e implementar un analizador virtual de vibraciones usando LabVIEW.

## **1.2 Objetivo General**

Desarrollar un instrumento virtual que detecte vibraciones en uno o cuatro canales simultáneamente, que deba calcular espectro de frecuencias, formas de onda y almacenar datos para el posterior análisis.

## **1.3 Objetivos Específicos**

Desarrollar un sistema de adquisición de datos para la lectura, cálculo y registro de vibraciones.

Simular tres tipos de fallas comunes que generen vibraciones en máquinas rotativas.

Interpretar los datos obtenidos para la muestra gráfica y numérica de los resultados.

## **1.4 Justificación**

Todos los motores emiten una cierta vibración natural se encuentren en buen o mal estado. Estas vibraciones van modificándose conforme una o varias fallas van ocurriendo en el tiempo, siendo el uso o desuso de estos el origen que genera un desgaste en sus piezas internas que se desencadenan en problemas.

El cambio de la vibración natural se puede detectar desde que comienza y con ello realizar el mantenimiento correspondiente incluso mucho antes que se llegue a presentar la falla.

La adquisición de equipos de análisis de vibraciones es relativamente alto comparado con la facilidad y costos de software y hardware que nos ofrece National Instruments.

## **1.5 Alcance y Limitaciones**

El presente trabajo pretende detectar de una manera sencilla, rápida, eficiente y con los equipos del Laboratorio de Instrumentación Industrial, diferentes fallas de origen mecánico originadas en el banco de pruebas de vibraciones.

La vibración generada en el banco de pruebas es capturada con un acelerómetro piezoeléctrico y analizada en el espectro de frecuencias del software LabVIEW.

De manera que los componentes necesarios para el funcionamiento de este sistema son: un acelerómetro piezoeléctrico axial marca PCB, una tarjeta de adquisición de datos NI9234 con la respectiva CompactDaq NI cDAQ-9172, un banco de pruebas para generación de vibraciones y LabVIEW.

Una gran ventaja del sistema que se está desarrollando es la capacidad de expansión que tiene la plataforma de programación y de hardware ya que aumentándole una base de datos y otra tarjeta de adquisición, se amplía la detección de fallas y el registro de las mismas.

## **1.6 Descripción del proyecto**

Nuestro proyecto de sistema de adquisición de vibraciones consta de 3 partes fundamentales que son: mecánica, electrónica y software. En la parte mecánica está constituida por el banco de pruebas conformado por un motor monofásico marca TEKNO con los siguientes datos de placa: 60 HZ, 0.5HP, 110 V, 3450 RPM y 2.1 A. Tres chumaceras marca KDF con cajera #P205 con sus

respectivos rodamientos modelo UC205-16 con graseras incluidas; dos en perfecto estado y uno dañado, un eje de acero inoxidable de 40 cm, un acople flexible con amortiguador marca Lovejoy y un disco de acero inoxidable con agujeros a 90° para simular desbalance y un perno de 5/8 para ajustar el disco y 4 pernos de 5/8 con sus respectivos anillos para la fijación en las chumaceras del banco de pruebas y 4 pernos 5/16 para el anclaje del motor en la base del banco, un cilindro de acrílico para generar falla, un interruptor, un tomacorriente, una extensión, una cinta doble faz y el banco con 91 cm de Alto, 31 cm ancho y 85 cm de largo.



Figura 1.1 Banco de Pruebas



En la parte electrónica se encuentra conformada cuatro transductores piezoeléctricos, un módulo NI 9234, un chasis cDAQ-9172 y finalmente en la parte de software se encuentra el programa LabVIEW y sus módulos SignalExpress y Sound and Vibration Assistant.



Figura 1.2 La parte del software y electrónica del proyecto

# CAPÍTULO 2

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Fundamentos de vibraciones

La vibración es el movimiento de vaivén de una máquina o elemento de ella en cualquier dirección del espacio desde su posición de equilibrio.

Generalmente, la causa de la vibración reside en problemas mecánicos como son: desequilibrio de elementos rotativos; desalineación en acoplamientos; engranajes desgastados o dañados; rodamientos deteriorados; fuerzas aerodinámicas o hidráulicas, y problemas eléctricos.

Estas causas como se puede suponer son fuerzas que cambian de dirección o de intensidad, estas fuerzas son debidas al movimiento rotativo de las piezas de la máquina, aunque cada uno de los problemas se detecta estudiando las características de vibración.

Las características más importantes son: frecuencia, desplazamiento, velocidad, aceleración, spike energy (energía de impulsos).

La frecuencia es una característica simple y significativa en este análisis. Se define como el número de ciclos completos en un período de tiempo. La unidad característica es cpm (ciclos por minuto). Existe una relación importante entre frecuencia y velocidad angular de los elementos rotativos. La correspondencia entre cpm y rpm (ciclos por minuto-revoluciones por minuto) identificará el problema y la pieza responsable de la vibración. Esta relación es debida a que las fuerzas cambian de dirección y amplitud de acuerdo a la velocidad de giro. Los diferentes problemas son detectados por las frecuencias iguales a la velocidad de giro o bien múltiplos suyos. Cada tipo de problema muestra una frecuencia de vibración distinta.

La amplitud de la vibración indica la importancia, gravedad del problema, esta característica da una idea de la condición de la máquina. Se podrá medir la amplitud de desplazamiento, velocidad o aceleración. La velocidad de vibración tiene en cuenta el desplazamiento y la frecuencia, es por tanto un indicador directo de la severidad de vibración. La severidad de vibración es indicada de

una forma más precisa midiendo la velocidad, aceleración o desplazamiento según el intervalo de frecuencias entre la que tiene lugar, así para bajas frecuencias, por debajo de 600 cpm, se toman medidas de desplazamiento. En el intervalo entre 600 y 60.000 cpm, se mide velocidad, y para altas frecuencia, mayores a 60.000 cpm, se toman aceleraciones.

La velocidad es otra característica importante en la vibración, gráficamente se puede ver en la figura 2.1.

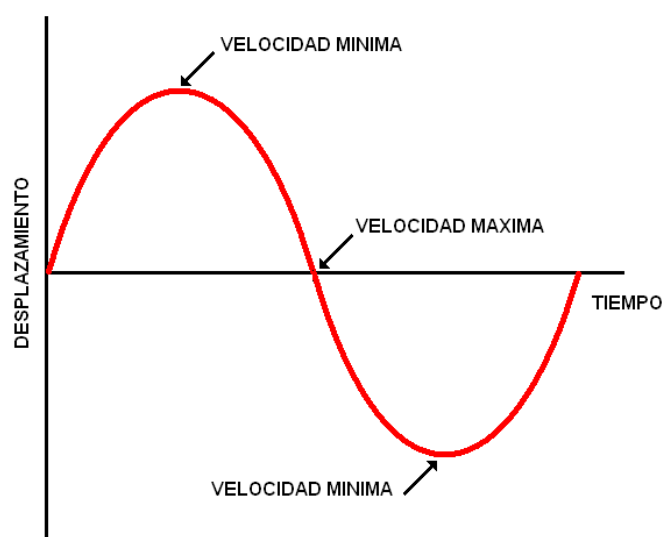


Figura 2.1 Gráfica de la velocidad de un objeto que vibra.

Se mide la velocidad de pico mayor de todo el recorrido que realiza el elemento al vibrar. La unidad es mm/s. El cambio de esta característica trae consigo un cambio de aceleración. La velocidad tiene una relación directa con la severidad de vibración, por este

motivo es el parámetro que siempre se mide. Las vibraciones que tienen lugar entre 600 y 60.000 cpm se analizan teniendo en cuenta el valor de la velocidad. La aceleración está relacionada con la fuerza que provoca la vibración, algunas de ellas se producen a altas frecuencias, aunque velocidad y desplazamiento sean pequeños. En la figura 2.2, se puede ver la aceleración de vibración.

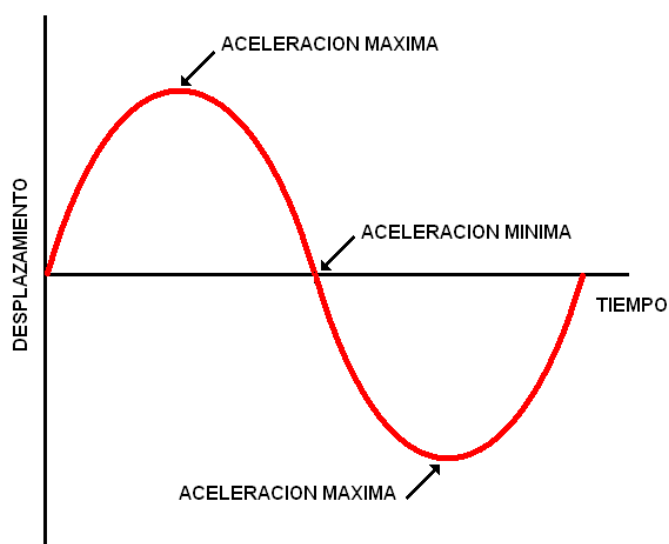


Figura 2.2 Gráfica de la aceleración de un objeto que vibra.

El spike energy o energía de impulsos proporciona información importante a la hora de analizar vibraciones. Este parámetro mide los impulsos de energía de vibración de breve duración y, por lo tanto, de alta frecuencia.

Pueden ser impulsos debidos a: Defectos en la superficie de elementos de rodamientos o engranajes. Rozamiento, impacto,

contacto entre metal-metal en máquinas rotativas. Fugas de vapor o de aire a alta presión. Cavitación debida a turbulencia en fluidos.

Sin este parámetro es muy difícil detectar engranajes o rodamientos defectuosos. Con esta medida se encuentran rápidamente las vibraciones a altas frecuencias provocadas por estos defectos. El valor de spike energy es básicamente una medida de aceleración, pero tiene como unidad g-SE.

## **2.2 Severidad de vibración**

ISO 2372: Vibraciones mecánicas de máquinas que operan con velocidades entre 10 y 200 (rev/s). Bases para especificar estándares de evaluación.

Este es un estándar general para máquinas rotatorias diseñado para evaluar principalmente la severidad vibratoria de máquinas en el taller o en los ensayos de aceptación de máquinas.

Las especificaciones vibratorias para ensayos de aceptación de máquinas nuevas o reparadas garantizan al comprador que el equipo está estadísticamente normal o con buena salud inicial.

### **2.2.1 Alcance**

Este estándar internacional define bases y reglas específicas a emplear en la evaluación de la vibración mecánica de máquinas que operan entre 10 y 200 (rev/s). Las vibraciones consideradas por este estándar para evaluar la severidad de las vibraciones son aquéllas medidas en la superficie de la máquinas, sobre sus descansos o en los puntos de montaje, en el rango de frecuencias de 10 a 1000 Hz. Es claro que las vibraciones medidas en la superficie de la máquina sólo pueden proveer una indicación de los esfuerzos vibratorios dentro de la máquina, y no necesariamente reflejarán los esfuerzos reales de las partes críticas, ni tampoco asegurarán que no ocurran excesivos esfuerzos vibratorios, debidos por ejemplo, a resonancias locales. En particular, las vibraciones torsionales de las partes rotatorias no siempre generarán vibraciones medibles en la superficie de la máquina.

## **2.2.2 Procedimiento de medición y condiciones de operación**

### **2.2.2.1 Equipos de medición**

Antes de realizar las mediciones se debe asegurar que el instrumento de medición entregará el valor RMS de la velocidad vibratoria en el rango de frecuencias de 10 a 1000 Hz. Además, se debe verificar que el instrumento y sensor de vibraciones soportarán las condiciones ambientales tales como:

- Temperatura
- Campos magnéticos
- Longitud del cable
- Orientación del sensor

Especial atención debe ponerse en que el sensor esté correctamente montado y que su presencia no altere las vibraciones de la máquina.



### **2.2.2.2 Puntos de medición**

Hay al menos un punto en la máquina (descansos) donde es importante conocer si existe una vibración significativa. Otro punto importante es en los pies de la máquina, es decir, en los puntos de unión a la fundación.

Las mediciones deben ser realizadas sobre cada descanso principal de la máquina, en las direcciones radiales (vertical y horizontal) y en la dirección axial. Se debe asegurar que las medidas representen la vibración de la caja de los descansos y no incluyan una resonancia local.

### **2.2.2.3 Condiciones de operación**

Las mediciones deben realizarse cuando el rotor y los descansos principales han alcanzado sus temperaturas estacionarias de trabajo y con la máquina funcionando bajo condiciones nominales, como voltaje, flujo, presión, carga. En máquinas con velocidad variable, las mediciones deberían realizarse en las condiciones extremas. Los

valores medidos máximos serán considerados representativos de la severidad de la vibración.

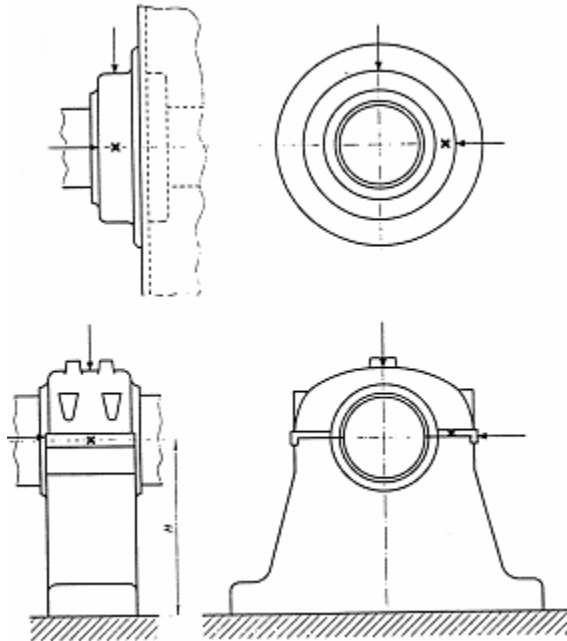


Figura 2.3 Puntos de medición

### 2.2.3 Clasificación de las máquinas

En este estándar, las máquinas se clasifican según la potencia, el tipo de montaje utilizado y el uso de la máquina. Las clasificaciones se muestran a continuación para las máquinas que giran entre 10 y 200 (rev/s).

- CLASE I: Máquinas pequeñas con potencia menor a 15 KW.

- CLASE II: Máquinas de tamaño mediano con potencia entre 15 y 75 KW, o máquinas rígidamente montadas hasta 300 KW.
- CLASE III: Máquinas grandes con potencia sobre 300 KW, montadas en soportes rígidos.
- CLASE IV: Máquinas grandes con potencia sobre 300 KW, montadas en soportes flexibles.
- CLASE V: Máquinas y sistemas conductores con fuerzas de inercia desbalanceadas debido al movimiento recíproco de alguno de sus elementos), montadas en fundaciones las cuales son relativamente rígidas en la dirección de la medición de la vibración.
- CLASE VI: Máquinas con fuerzas de inercia desbalanceadas, montadas en fundaciones las cuales son relativamente elásticas en la dirección de la medición de la vibración, tales como harneros vibratorios, máquinas centrífugas, molinos, etc.

La siguiente tabla para las máquinas de clase I a IV es apropiada para la mayoría de las aplicaciones de acuerdo a la experiencia. Las máquinas de clase V y VI, son difíciles

de clasificarlas debido a que ellas varían considerablemente sus características vibratorias.

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	B
1,12 - 1,8				
1,8 - 2,8	C	C	B	B
2,8 - 4,5				
4,5 - 7,1	D	D	C	C
7,1 - 11,2				
11,2 - 18			D	D
18 - 28				

Tabla I. Calidad de la vibración

### **2.2.3.1 Soportes de la máquina a ensayar**

Dos tipos de soportes se utilizan para clasificar la severidad vibratoria. Para un soporte flexible, la frecuencia fundamental del sistema soporte-máquina es más baja que su frecuencia principal de excitación (en la mayoría de los casos es la frecuencia de rotación), es decir, máquinas que giran sobre su primera velocidad crítica. Para un soporte rígido, la frecuencia fundamental del sistema soporte-máquina es mayor que su frecuencia principal de excitación.

### **2.2.4 Evaluación de la severidad vibratoria**

Basándose en consideraciones teóricas y experiencias prácticas, se define como unidad de medida para cuantificar la severidad vibratoria el valor RMS de la velocidad de la vibración. Vibraciones con el mismo valor RMS de la velocidad en la banda de frecuencias de 10 a 1000 Hz se considera que tienen igual severidad vibratoria. Este estándar considera que se produce un cambio significativo en la respuesta vibratoria cuando esta cambia en la razón 1:1.6, como se aprecia en la tabla I. Es decir, se estima que

se produce un cambio en el nivel vibratorio, cuando las vibraciones varían en un 60 % aproximadamente. También se puede observar de la tabla I que se produce un cambio en la condición de la máquina cada vez que se producen dos cambios en el nivel vibratorio de la máquina ( $1.6 * 1.6 = 2.56$ ), es decir, cuando la vibración aumenta en aproximadamente 2.5 veces.

#### **2.2.4.1 Calidad de la vibración**

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

**A: Buena**

**B: Satisfactoria**

**C: Insatisfactoria**

**D: Inaceptable**

Debe tenerse presente que esta es una evaluación cualitativa. Un nivel vibratorio BUENO significa que este nivel vibratorio le permitirá a la máquina funcionar en el largo plazo libre de problemas. Es decir, la vibración no disminuirá la vida nominal esperada en los componentes de la máquina.

Por otro lado, un nivel vibratorio INACEPTABLE significa que la vida especificada para los elementos de la máquina disminuirá significativamente.

### **2.3 Análisis**

La esencia del estudio de vibraciones es realizar el análisis de las mismas. El análisis de datos consta de dos etapas: adquisición e interpretación de los datos obtenidos al medir la vibración de la máquina. El fin a alcanzar es determinar las condiciones mecánicas del equipo y detectar posibles fallos específicos, mecánicos o funcionales.

La adquisición de datos es el primer y principal paso a dar para hacer un análisis de vibraciones. Los datos a tomar, desplazamiento, velocidad o aceleración dependerán de la velocidad de la máquina, de acuerdo con su relación equivalente de frecuencia ( $\text{rpm}=\text{cpm}$ ). Así, para bajas rpm, (bajos cpm), se tomarán datos de desplazamientos. Para velocidades que estén dentro del orden de 600 y 60.000 rpm, se medirán velocidades. Y para los que sean de orden superior, los datos a tomar serán aceleraciones.



Figura 2.4 Toma de datos con transductor.

Pasos a seguir en la adquisición de datos:

- Determinación de las características de diseño y funcionamiento de la máquina, como son: velocidad de rotación de la máquina, tipo de rodamiento, engranaje y condiciones del entorno en que esté situada como es el tipo de apoyo, acoplamientos, ruido, etc. También habrá que tener en cuenta las condiciones de funcionamiento como velocidad y cargas entre otras que normalmente afectarán a las mediciones de vibración.
- Determinación de la finalidad de la vibración que podrá incluir:
- Medidas de rutina para detectaren un momento determinado un posible fallo y determinar las causas que lo originan.



- Medidas para crear un histórico de datos y con él obtener un valor de base, sobre el que estará el valor de vibración que deba tener la máquina cuando sus condiciones de trabajo sean normales.
- Toma de datos antes y después de una reparación, la medida de antes pondrá de manifiesto el problema, elemento defectuoso y será más eficaz así su reparación. Después de la reparación se tomarán medidas que indiquen la evolución del elemento sustituido o la corrección del defecto existente.
- Selección de los parámetros de medición: desplazamiento, velocidad, aceleración, spike energy. Ellos determinarán el transductor a utilizar.
- Determinación de posición y dirección de las medidas con los transductores, la vibración se tomará generalmente en rodamientos de la máquina o puntos donde sea más probable un fallo por acoplamiento, equilibrio, puntos donde se transmitan las fuerzas vibratorias.

Los tres sentidos principales en una medición son: horizontal, vertical y axial. Sentidos radiales son: horizontal y vertical, y se toman con eje del transductor a  $90^{\circ}$ ; respecto al eje de rotación.

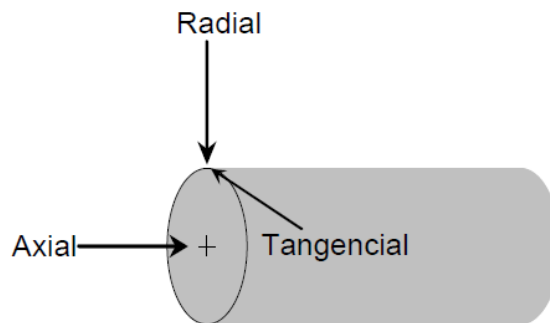


Figura 2.5 Sentido de toma de datos.

- Selección del instrumento de medición y transductores.
- Determinación del tipo específico de datos requeridos para la interpretación de las medidas realizadas. Así se ahorrará tiempo a la hora de realizar las medidas y se obtendrá de estas, información más útil en el análisis.
- Los datos obtenidos pueden ser: valores de magnitud total, espectro de frecuencias amplitud-frecuencia que indica el tipo de problema existente, amplitud-tiempo para vibraciones transitorias rápidas o vibraciones muy lentas, spike energy en rodamientos, engranajes y problemas de cavitación.
- Toma de datos. Paso esencial en el análisis, precisa de atención y fiabilidad de las medidas tomadas.

A la hora de la adquisición de datos es importante tener en cuenta:

- Secuencias de medición, tomar datos correctos y lo más rápido posible, evitan tiempo perdido.

- Lugar de toma de datos siempre será el mismo, con el transductor unido de una forma firme, para la veracidad de los datos.
- Seguimiento de la máquina, es decir, mantener un contacto con los operarios que trabajan con ella y los de mantenimiento, ellos serán las personas que conocen de cerca la máquina.
- Controlar el entorno exterior de la máquina, aspecto, ruido.
- Atender tendencias inesperadas. Estar preparado para tomar más datos, medidas cuando pueda haber signos de algún problema.
- Mantener sólo datos coherentes, tomados con precisión.
- Comparar con máquinas similares y en igual forma de trabajo.

Por tanto, se puede decir que la toma de datos es un paso esencial para un buen análisis de vibraciones. Para una buena interpretación de los datos es necesario tener unos datos fiables que hayan sido tomados de una forma metódica y precisa. Así podrá hacerse un diagnóstico de algún problema lo más exacto posible.

## 2.4 Identificación de causas de vibraciones

Una vez obtenidos de una forma metódica y precisa los datos de vibraciones de una máquina donde se ha detectado un problema, es necesario identificar cual ha sido su causa y así buscar la forma y momento de reparación más eficiente, es decir, que elimine el fallo y su coste económico sea el mínimo posible.

Un defecto puede localizarse al comparar las amplitudes de las vibraciones tomadas. Normalmente una máquina que funciona correctamente tiene valores que suelen seguir una línea con tendencia ligeramente ascendente o constante. Cuando en algún momento los valores aumentan o la tendencia asciende de una forma inesperada, se puede pensar en la presencia de algún problema.

Generalmente los valores de amplitud que se comparan son los de velocidad, una vez observado que esta ha aumentado de una forma inesperada, es importante comparar los valores de la energía de impulsos (g), estos valores indicarán la gravedad del problema. Así un fallo puede detectarse al encontrar una tendencia de velocidad ascendente de forma imprevista y unos valores del parámetro g altos. También es posible que existiendo un problema haya valores de spike energy altos y de repente disminuyan y poco a poco

aumenten, esto puede dar lugar a un fallo total, donde la máquina deje de funcionar. Valores altos de spike energy pueden ser indicadores en la mayor parte de los casos de problemas de rodamientos, acoplamientos y en los casos más extraños de problemas hidráulicos.

Generalmente la máxima amplitud de vibración se da en los puntos donde se localiza el problema, aunque muchas veces la vibración es transmitida a otros puntos de la máquina aunque en ellos no se encuentre el problema. El análisis de las gráficas puede indicar el tipo de defecto existente, pero muy pocas veces aparecen problemas únicos y por tanto espectros donde se refleje un defecto claramente. La experiencia y el conocimiento de la máquina son dos factores fundamentales a la hora de identificar la causa que produce una vibración importante.

Es esencial una vez corregido el problema seguir la evolución de la reparación, de esta forma se conocerá si realmente existía el defecto, si estaba situado en el punto con máxima vibración y lo que es más importante, seguir la evolución tras la reparación y asegurarse que el problema ha desaparecido.

El estudio de los datos de vibraciones, de sus espectros es la base para encontrar las causas y la forma de corregir el defecto que ellas

indican. Sólo es importante prestar especial atención a las vibraciones que vayan acompañadas de otros efectos como ruido, pérdida de aceite o cualquier fallo, o bien los valores de amplitudes que sean excesivos comparados con otros en funcionamiento correcto, en esos casos se analizará la forma de los espectros que identificarán las causas de los problemas.

Los problemas mecánicos más comunes en las máquinas que producen vibraciones son desequilibrio entre ejes, falta de alineación de acoplamientos, defectos en rodamientos y engranajes y problemas eléctricos. A continuación se pueden ver la forma de identificar estos problemas analizando los datos y espectros de vibraciones.

### **2.4.1 Desequilibrio**

Esta es una de las causas más probable de que exista vibración en las máquinas, en casi todos los elementos es fácil encontrar un pico en el gráfico de amplitud frente a frecuencia, que denote un pequeño desequilibrio.

Como se puede ver en el siguiente gráfico (Figura 2.6) hay un pico en una frecuencia que coincide con la velocidad de giro.

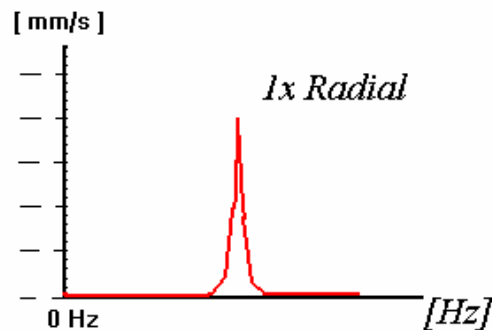
*Espectro característico:*

Figura 2.6 Espectro de velocidad de un problema de desequilibrio.

Para conocer la cantidad de desequilibrio hay que encontrar la amplitud de la vibración en la frecuencia igual a 1 x rpm. La amplitud es proporcional a la cantidad de desequilibrio. Normalmente, la amplitud de vibración es mayor en sentido radial (horizontal y vertical) en las máquinas con ejes horizontales, aunque la forma de la gráfica sea igual en los tres sentidos.

Como se ha dicho antes, para analizar datos de vibraciones son tan importantes la experiencia y el conocimiento de la máquina como los datos tomados en ella. Cuando aparece un pico en frecuencia igual a 1 x rpm. El desequilibrio no es la única causa posible, la desalineación también puede producir picos a esta frecuencia. Al aparecer vibraciones en

esta frecuencia como otras causas posibles están los engranajes o poleas excéntricas, falta de alineamiento o eje torcido si hay alta vibración axial, bandas en mal estado (si coincide con sus rpm), resonancia o problemas eléctricos, en estos casos además del pico a frecuencia de 1 x rpm habrá vibraciones en otras frecuencias.

### 2.4.2 Desalineación

Es un problema muy común debido a la dificultad que supone alinear dos ejes y sus rodamientos de forma que no se originen fuerzas que produzcan vibraciones. La forma de vibración de un eje torcido es similar a la de una mala alineación angular.

*Espectro característico:*

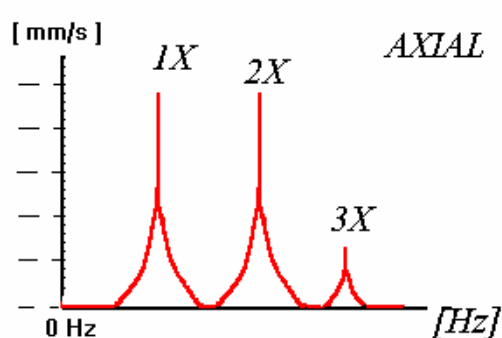
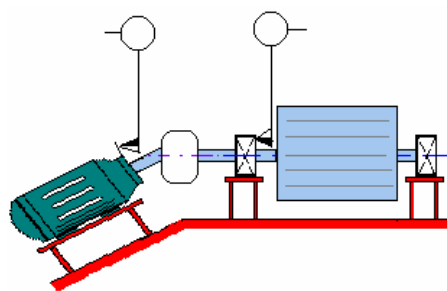


Figura 2.7 Espectro de velocidad de un problema de desalineación.

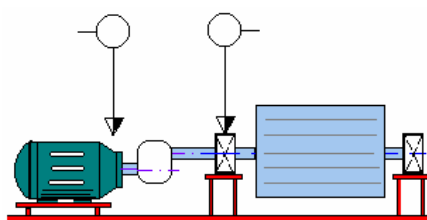


Para reconocer una vibración debida a una desalineación en la gráfica se pueden ver picos a frecuencias iguales a la velocidad de giro del eje, de dos o tres veces esta velocidad en situaciones donde este problema sea grave. Un ejemplo del espectro de este problema se observa en la figura 2.7, la forma de la gráfica será similar en las tres direcciones, variando únicamente la amplitud. Igual que en todos los casos, la amplitud es proporcional a la gravedad del defecto, aquí de desalineación. Este fallo puede presentar alta vibración en sentido axial además de radial. Así siempre que exista una alta vibración en axial y radial, y si la axial es mayor que la mitad de la radial puede existir un problema de desalineación o ejes torcidos.

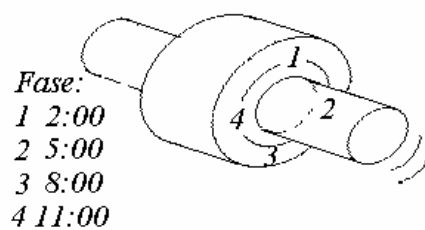
En la figura 2.8 se pueden ver los tres tipos básicos de desalineación, en paralelo, angular y rodamiento desalineado en el eje.



a. Desalineación Angular



b. Desalineación Paralela



c. Rodamiento desalineado en el eje.

Figura 2.8 Tipos de falta de alineación.

La falta de alineación en paralelo, figura 2.9, produce sobre todo vibración en dirección radial con frecuencia igual al doble de la velocidad de giro del eje.

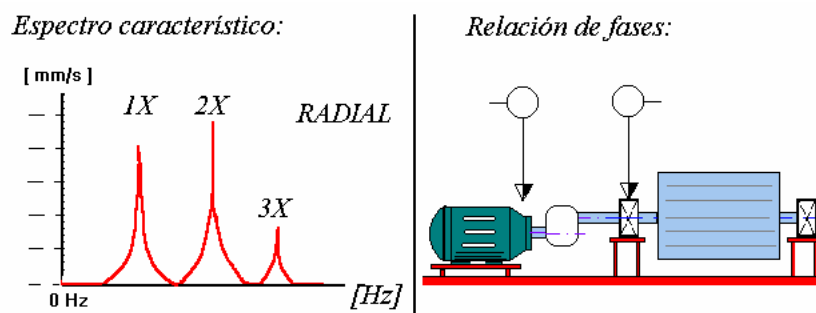


Figura 2.9 Falta de alineación en paralelo.

La falta de alineación angular, representada en la figura 2.10, da vibración en dirección axial en los dos ejes a una frecuencia igual a 1 x rpm.

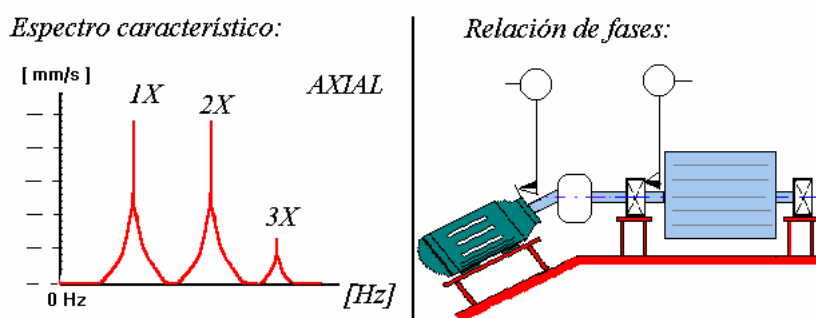


Figura 2.10 Falta de alineación angular.

Las condiciones de una desalineación no siempre llevan consigo un acoplamiento.

Una desalineación entre eje y su rodamiento, figura 2.11, es un ejemplo usual de este defecto y que sólo se elimina corrigiendo la colocación del rodamiento.

Un casquillo mal alineado con su eje, como se ve en la figura 2.11 no crea vibración importante, a menos que además exista un problema de desequilibrio, este defecto sería el que produciría una falta de alineación.

### 2.4.3 Engranajes

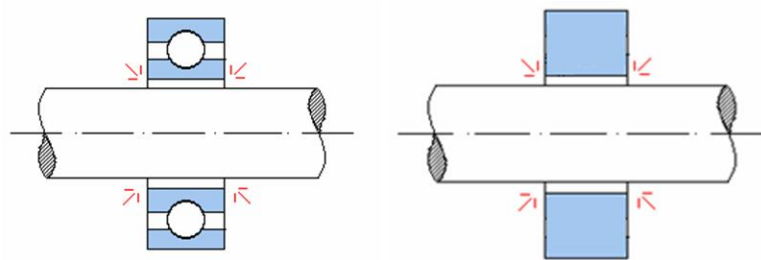


Figura 2.11 Rodamiento y casquillo mal alineados respecto al eje.

Este defecto se puede observar al encontrar picos a frecuencias que coinciden con múltiplos enteros de la velocidad de giro del engranaje que falla, además existirá vibración de amplitud menor de forma simétrica a la frecuencia del engranaje. En la figura 2.12 se pueden observar picos de valor importante a frecuencias que son múltiplos de la velocidad de giro de un piñón, de forma

simétrica a estos picos existen otros de valor muy pequeño y separados una distancia igual a la velocidad de giro.

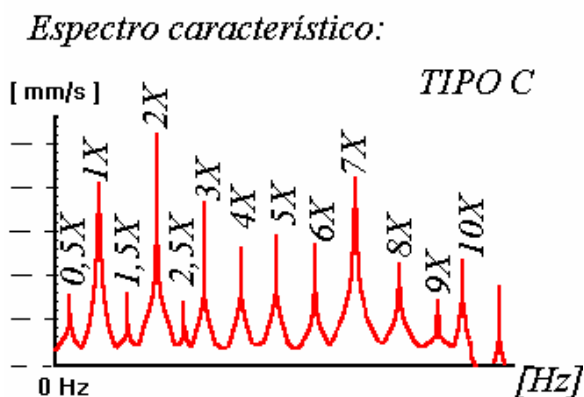


Figura 2.12 Espectro de velocidad de un problema de engranaje.

Los problemas de engrane que dan esta vibración son: desgaste excesivo de los dientes, inexactitud de los dientes, fallos de lubricación, elementos extraños entre dientes. Las vibraciones causadas por defectos de engranajes pueden ser detectadas en varios puntos de las máquinas. Esta es una característica que diferencia una gráfica causada por un engranaje con poca carga y la vibración producida por un rodamiento, ya que el diagrama de amplitud frente a frecuencia puede dar lugar a confusión cuando la carga del piñón es baja.

Tanto el fallo de engranaje como el de un rodamiento, llevan consigo también la aparición de ruido.

#### **2.4.4 Rodamientos**

Fallos en elementos del rodamiento dan vibración a unas frecuencias altas no relacionadas con la velocidad de rotación y de amplitud también aleatoria. A continuación, en la figura 2.13 se pueden observar los espectros de velocidad de un rodamiento de bolas defectuoso.

Es relativamente fácil reconocer este fallo a ver la gráfica de amplitud-frecuencia, ya que se caracteriza por tener muchos picos juntos a altas frecuencias y de amplitud variable que dependerá de la gravedad del problema. La frecuencia a la que se produce la máxima amplitud puede dar una idea del elemento defectuoso del rodamiento. Los defectos en elementos rodantes, pistas de rodamiento o jaula de retención generan fuerzas que se transmiten al alojamiento y estructura que les rodea.

*Espectro característico:*

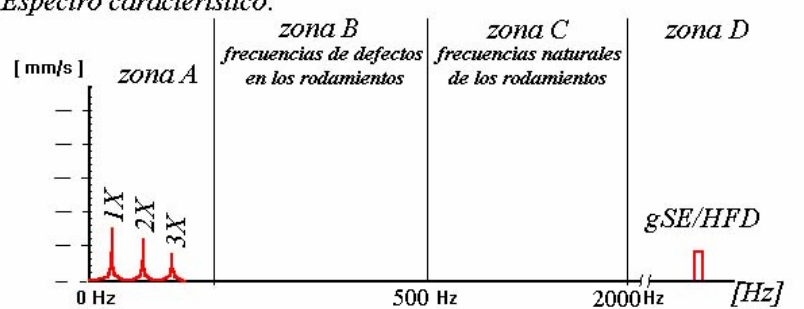
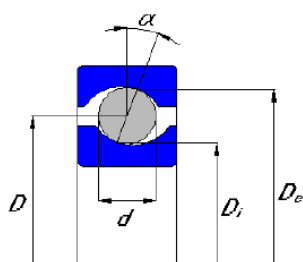


Figura 2.13 Espectro de velocidad de un rodamiento defectuoso.



$\alpha$ : ángulo de contacto.  
 $D$ : diámetro primitivo.  
 $d$ : diámetro del cuerpo rodante.

$$D_i = D - d \cdot \cos \alpha = D \cdot \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$D_e = D + d \cdot \cos \alpha = D \cdot \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

Frecuencia de deterioro del aro exterior	$BPF0 = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left( 1 - \frac{d}{D} \cdot \cos \alpha \right)$
Frecuencia de deterioro del aro interior	$BPFI = \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left( 1 + \frac{d}{D} \cdot \cos \alpha \right)$
Frecuencia de deterioro de un elemento rodante	$BDF = \frac{D}{d} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 \cdot \cos^2 \alpha \right)$
Frecuencia de deterioro de la jaula	$FTF = \frac{1}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left( 1 - \frac{d}{D} \cdot \cos \alpha \right)$

Figura 2.14 Frecuencias características de los rodamientos.

Para detectar que tipo de fallo existe se ha de obtener la frecuencia a la que la amplitud es mayor y comparar con las calculadas según las fórmulas dadas en la figura 2.14.

Cuando esta es la causa de la vibración es importantísimo conocer el valor de spike energy, con este parámetro se puede intuir la gravedad del problema. La gráfica que representa g-frecuencia indica que la vibración del rodamiento a alta frecuencia es inestable y generada al azar.

Así el estado de la máquina se identifica según la Tabla II (Ver Anexos)

El fallo de un rodamiento se detecta sólo en la medida realizada en él, es decir, no se transmitirá al resto de los puntos de la máquina. Exteriormente el rodamiento defectuoso se notará por el exceso de ruido.

Los rodamientos son elementos importantes en la máquina y cuyo fallo puede dar problemas más graves, por eso es necesario tener un especial cuidado con ellos. Pueden fallar por errores en el montaje, lubricación inadecuada, defectos internos en la fabricación, corriente eléctrica, desalineación, rodamiento no preparado para la carga que soporta. Estas son las causas más comunes de fallo.

Por tanto, el análisis de vibraciones es una técnica, que aunque no exacta, es capaz de encontrar fallos en



máquinas, anticipándose a la avería. Las ventajas de realizar este tipo de mantenimiento son la desaparición de fallos repentinos en los equipos estudiados, conocimiento del estado de la máquina en cada momento. Así se disminuyen los costes económicos por reparaciones imprevistas, paro en el proceso de producción, cambios de elementos que todavía pueden seguir funcionando, aumento de la eficiencia y disminución de costes de una parada, además de todo esto, ayuda a mejorar el mantenimiento preventivo a realizar en la fábrica. Detrás de todo esto las ventajas que ofrece este estudio son sobre todo de tipo económico, de seguridad frente a averías repentinas.

# CAPÍTULO 3

## 3. HERRAMIENTAS UTILIZADAS

### 3.1 NI LabVIEW

LabVIEW es un entorno de programación gráfica usado por miles de ingenieros e investigadores para desarrollar sistemas sofisticados de medida, pruebas y control usando íconos gráficos e intuitivos y cables que parecen un diagrama de flujo. Ofrece una integración incomparable con miles de dispositivos de hardware y brinda cientos de bibliotecas integradas para análisis avanzado y visualización de datos, todo para crear instrumentación virtual.



Figura 3.1 Logo de LabVIEW

### 3.1.1 NI LabVIEW SignalExpress

NI LabVIEW SignalExpress es un software de medidas interactivo para adquirir, analizar y presentar datos rápidamente desde cientos de dispositivos e instrumentos de adquisición de datos sin requerir de programación.

Con soporte incluido para cientos de instrumentos de adquisición de datos modulares y autónomos, usted puede rápidamente automatizar sus aplicaciones de registro de datos y control de instrumentos.



Figura 3.2 Entorno a NI LabVIEW SignalExpress

### 3.1.2 NI Sound and Vibration Assistant

NI Sound and Vibration Assistant es un software interactivo y autónomo para rápidamente adquirir, analizar y registrar datos acústicos, de ruido y vibración. Con una flexible biblioteca de medidas basada en configuración y capacidad de análisis abierto, el Sound and Vibration Assistant está diseñado para rápida captura de datos a través de un enfoque de medidas único basado en software para crear aplicaciones personalizadas.

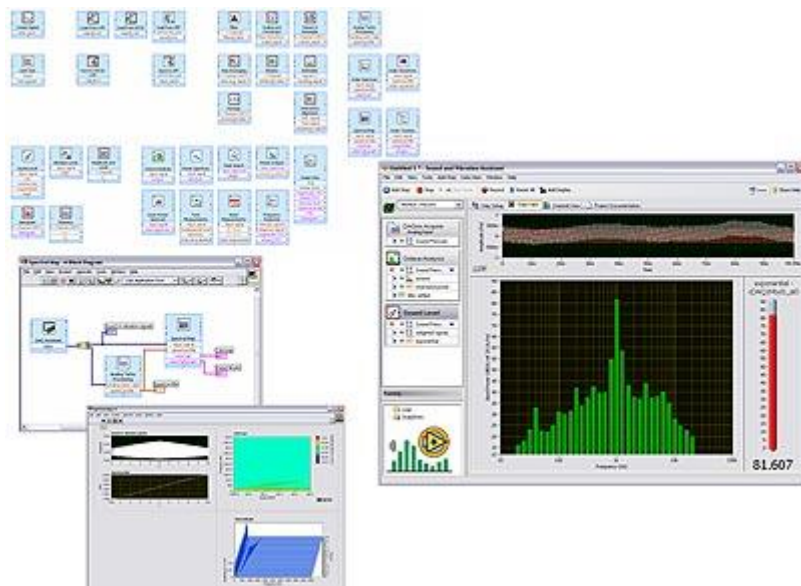


Figura 3.3 Entorno a NI Sound and Vibration Assistant

### 3.2 Acelerómetro PCB Piezoeléctrico 352C03

Acelerómetro de precisión para satisfacer a la medida exacta de la vibración, choque, la aceleración y el movimiento de seguimiento, control y aplicaciones de pruebas.



Figura 3.4 Acelerómetro PCB Piezoeléctrico Modelo 352C03

De uso general, de cerámica del esquileo ICP ® Accel., 10 mV / g, 0,5 a 10k Hz, 10-32 CONN lado.

- Sensibilidad: ( $\pm 10\%$ ) de 10 mV / g (1,02 mV / (m/s<sup>2</sup>))
- Rango de medición:  $\pm 500$  pk g ( $\pm 4,900$  m/s<sup>2</sup>pk)
- Resolución de banda ancha (1 a 10000 Hz) RMS 0,0005 g (0.005 m/s<sup>2</sup> RMS)
- Rango de frecuencia: ( $\pm 5\%$ ) 0,5 a 10000 Hz
- Peso: 0.20 onzas (5.8 gramos)

### 3.3 Montaje Adhesivo

El montaje adhesivo se recomienda para prevenir que el adhesivo dañe la base del acelerómetro. La mayoría de las bases de montaje adhesivo a disposición de PCB también proporcionan el aislamiento eléctrico, que elimina el ruido potencial pick-up y los problemas de bucle de tierra. El tipo de adhesivo recomendado depende de la aplicación en particular. Petro Cera (disponible en PCB) ofrece una muy conveniente, fácilmente extraíbles para su uso a temperatura ambiente. Dos partes de epóxidos ofrecen rigidez, que mantiene la respuesta de alta frecuencia y un montaje permanente.

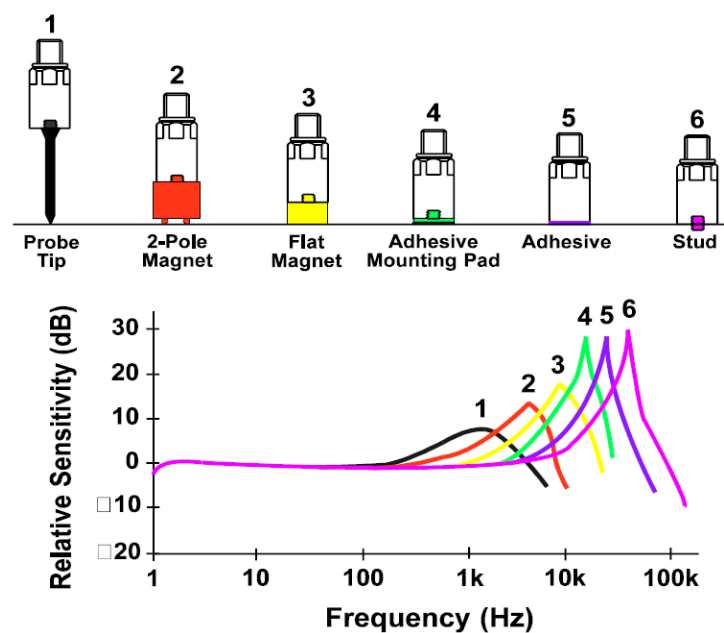


Figura 3.5 Variedad de configuraciones de montaje y sus efectos sobre la alta frecuencia.

### 3.4 Cable BNC Modelo 003C10 PCB

Un cable en el cual permite conectar el acelerómetro piezoeléctrico con el módulo NI 9234, Tiene bajo nivel de ruido de 10 pies (3 m), conjunto de cables, 10-32 conector coaxial al conector BNC.



Figura 3.6 Cable BNC 003C10

### 3.5 Chasis NI cDAQ-9172

El NI cDAQ-9172 es el chasis NI CompactDAQ legado. Dos chasis actualizado, el NI cDAQ-9174 y el cDAQ-9178, ofrecen un superconjunto de características al cDAQ-9172 legado. Las nuevas características incluyen líneas de disparo BNC integradas (cDAQ-9178 únicamente), la habilidad para ejecutar módulos de entrada analógica a diferentes velocidades en el mismo chasis, cuatro contadores de uso general y conexiones USB y de energía actualizadas. NI recomienda usar el nuevo chasis para los nuevos

sistemas así como para duplicar sistemas de pruebas construidos en el chasis NI CompactDAQ original.

El cDAQ-9172 es un chasis NI CompactDAQ de ocho ranuras que puede soportar hasta ocho módulos de E/S de la Serie C. Este chasis compatible con USB 2.0 opera en 11 a 30 VDC e incluye un convertidor de potencia AC/DC y un cable USB de 1.8 m.

El cDAQ-9172 tiene dos chips de contador/temporizador de 32 bits integrados al chasis. Con un módulo de E/S digital correlacionado e instalado en la ranura 5 o 6 del chasis, usted puede tener acceso a toda la funcionalidad del chip de contador/temporizador incluyendo conteo de eventos, generación o medida de ancho de pulso y codificadores de cuadratura.



Figura 3.7 Chasis cDAQ-9172



### 3.6 Módulo NI 9234

El 9234 de National Instruments es un módulo de cuatro canales de la Serie C para adquisición de señal dinámica para realizar medidas de frecuencia de audio de alta precisión desde sensores piezoeléctricos electrónicos integrados (IEPE) y no IEPE con sistemas NI CompactDAQ o CompactRIO. El NI 9234 proporciona rango dinámico de 102 dB e incorpora acondicionamiento de señales IEPE seleccionable por software para acelerómetros y micrófonos. Los cuatro canales de entrada digitalizan señales simultáneamente a rangos de hasta 51.2 kHz por canal con filtros integrados anti-aliasing que ajustan automáticamente su rango de muestreo.



Figura 3.8 Módulo NI 9234

# CAPÍTULO 4

## 4. IMPLEMENTACION DEL SOFTWARE DESARROLLADO

En este capítulo se dará una explicación del programa realizado en LabVIEW, detallando cada elemento usado e indicando su función.

### 4.1. Pantalla Principal

En la pantalla principal de nuestro proyecto se seleccionan los acelerómetros que vamos a usar para hacer el análisis de vibraciones mediante pestañas o tabs, como se puede observar en la figura 4.1 hay 5 pestañas, la pestaña final es la del reporte que se lo hace después de haber hecho el análisis y 4 pestañas restantes son de los acelerómetros y cada una de ellas contiene 3 pestañas más que son:

- Señales de vibración
- Velocidad y desplazamiento
- Análisis

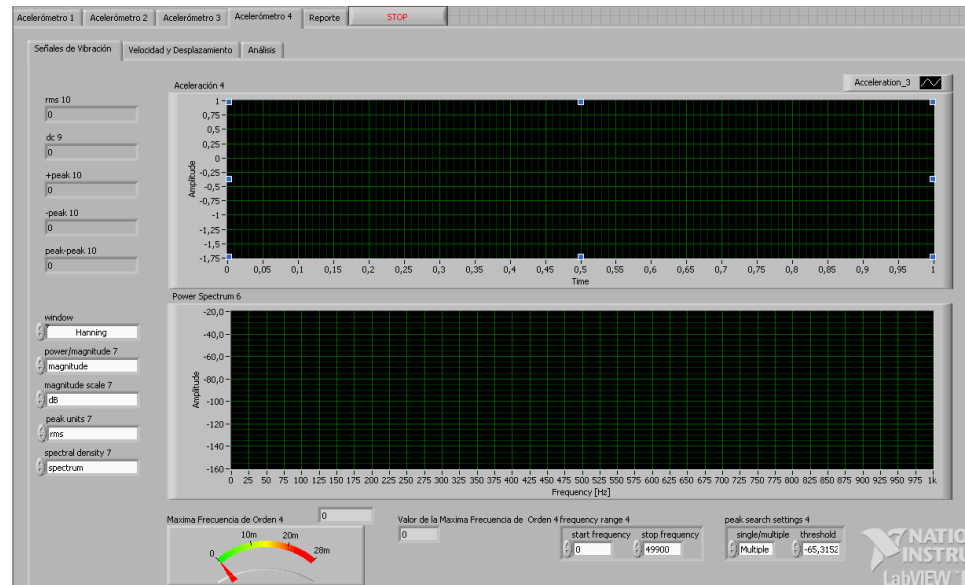


Figura 4.1 Pestaña de Señales de Vibración

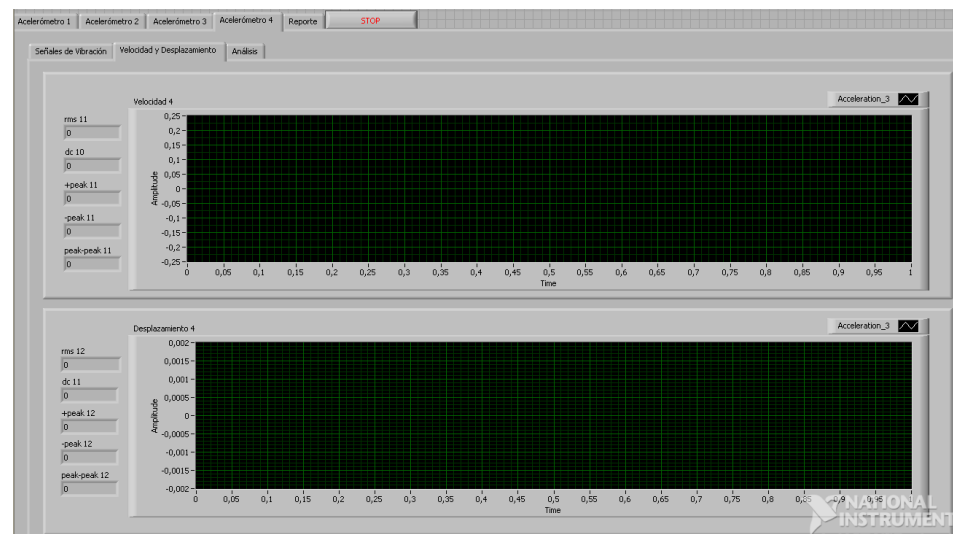


Figura 4.2 Pestaña de Velocidad y Desplazamiento

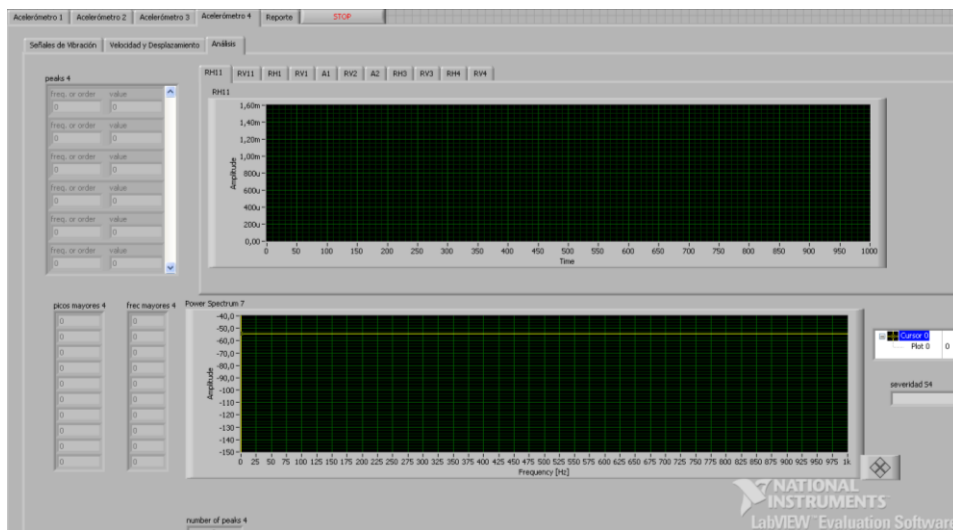


Figura 4.3 Pestaña de Análisis

En esta pestaña al realizar el Reporte se considera a continuación la Tabla III. (Ver Anexos)

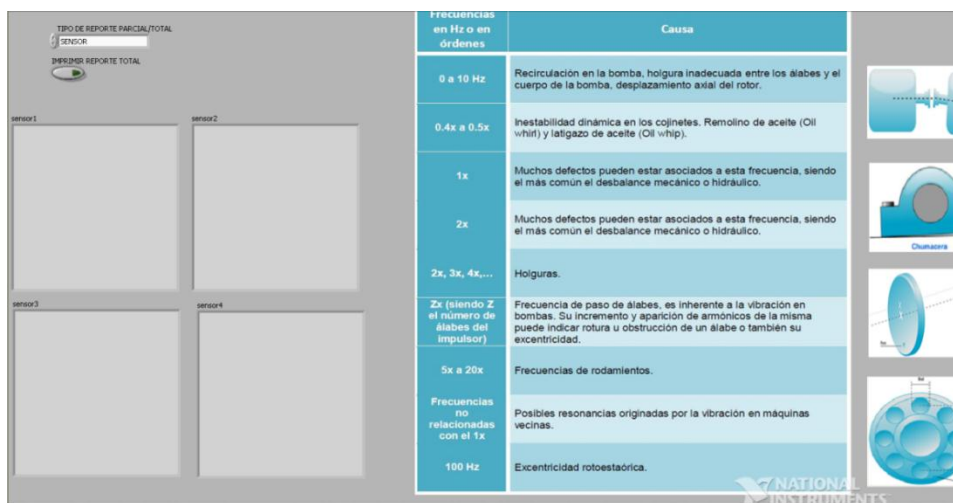


Figura 4.4 Pestaña de Reporte

## 4.2. Bloques

A continuación se detalla cada uno de los bloques y para que se sirven dentro de la programación:

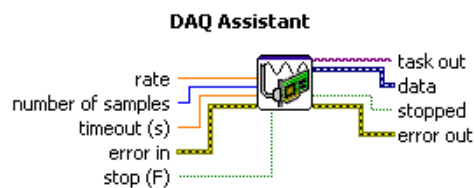


Figura 4.5 Bloque DAQ Assistant

Mediante el bloque de DAQ Assistant podemos realizar fácilmente la adquisición de los datos eligiendo el tipo de tarjeta NI 9234 a utilizar y el puerto que se esté utilizando (a0, a1, a2, a3) así como también el tipo de muestreo que será continuo.



Figura 4.6 Bloque Split Signals

El bloque Split Signals se encarga de extraer varias señales provenientes del DAQ Assistant esta señales tiene un orden definido previamente en el DAQ Assistant.



Figura 4.7 Bloque Convert from Dynamic Data

El bloque Convert from Dynamic Data se encarga de convertir un dato dinámico en un dato de tipo arreglo.

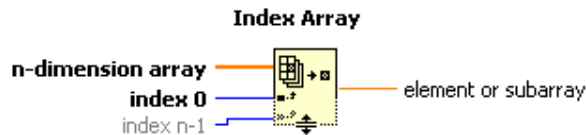


Figura 4.8 Bloque Index Array

El bloque de Index Array devuelve un elemento de un arreglo.

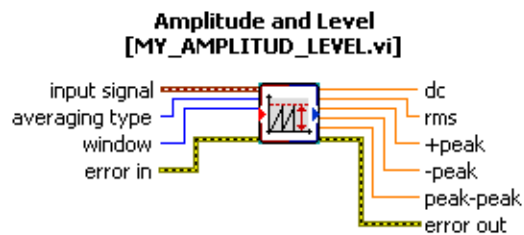


Figura 4.9 Bloque Amplitude and Level

El bloque Amplitude and Level es el encargado de dar los valores dc, rms, +peak, -peak, peak-peak de la señal ingresada input signal. Este bloque ha sido modificado internamente para agregarle las entradas de averaging type y window por esta modificación hemos tenido que re-nombrar este bloque MY\_AMPLITUDE\_LEVEL y guardarlo en la carpeta donde se tiene guardado toda la aplicación y así invocar a este bloque cuando se ejecute el programa.

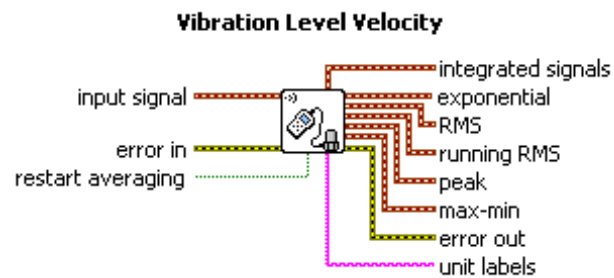


Figura 4.10 Bloque Vibration Level Velocity

El bloque de Vibration Level (Velocity/Position) lo utilizamos para integrar la señal de entrada de aceleración input signal y obtener la velocidad y desplazamiento.

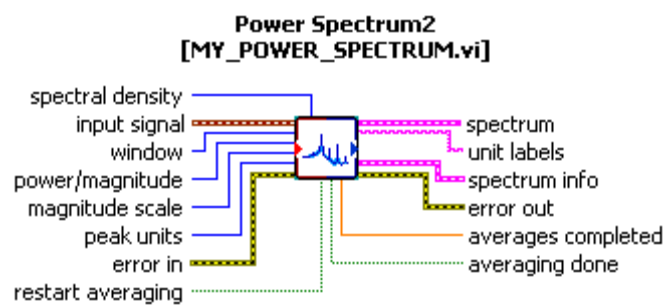


Figura 4.11 Bloque Power Spectrum

El bloque de Power Spectrum es el encargado de presentarnos el espectro de magnitud de la señal adquirida. Este bloque ha sido modificado internamente para poder cambiar fácilmente valores como spectral density, window, power/magnitude, magnitude scale, peak units por esta modificación hemos tenido que re-nombrar este bloque MY\_POWER\_SPECTRUM y guardarlo en la carpeta donde

se tiene guardado toda la aplicación y así invocar a este bloque cuando se ejecute el programa.

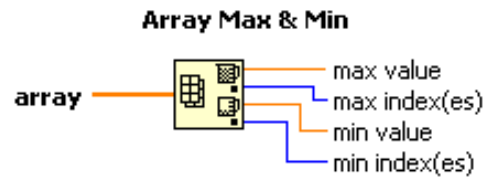


Figura 4.12 Bloque Array Max & Min

El bloque de Array Max & Min retorna el valor máximo o mínimo de un arreglo así como también el índice correspondiente a determinado valor.

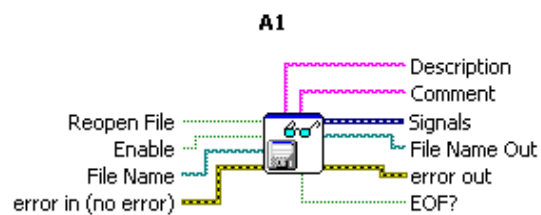


Figura 4.13 Bloque Read From Measurement File Express

Este bloque Read From Measurement File Express lee los datos de un archivo con extensión .lvm y los muestra como gráfico, estos archivos se encuentran guardados en la carpeta donde se tiene guardado toda la aplicación.



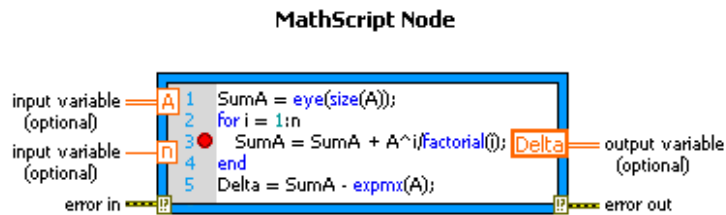


Figura 4.14 Programación en el MathScript Node

El MathScript Node es utilizado para realizar una programación sencilla basada en lenguaje C, aquí se evalúan las entradas y mediante el algoritmo que se desarrolle internamente se toma alguna decisión.

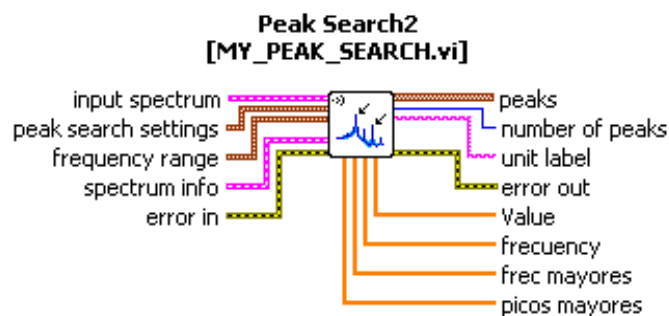


Figura 4.15 Bloque Peak Search

El bloque de Peak Search es el encargado de buscar los picos del espectro de magnitud (peaks), también nos da el número de picos encontrados (number of peaks), el pico más alto (Value) con su respectiva frecuencia (frequency), los diez mayores picos (picos mayores) con sus respectivas frecuencias (frec mayores). Este bloque ha sido modificado internamente para poder cambiar fácilmente valores como frequency search settings, frequency

range, por esta modificación hemos tenido que re-nombrar este bloque MY\_PEAK\_SEARCH y guardarlo en la carpeta donde se tiene guardado toda la aplicación y así invocar a este bloque cuando se ejecute el programa.

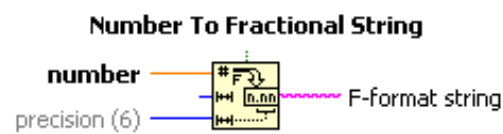


Figura 4.16 Bloque Number To Fractional String

El bloque de Number To Fractional String es el encargado de convertir un número a una fracción pero con el formato de string.

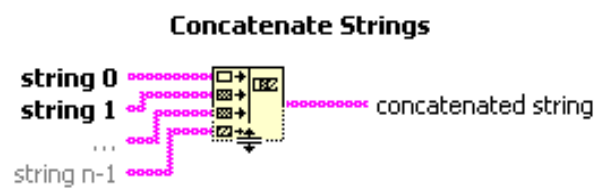


Figura 4.17 Bloque Concatenate Strings

El bloque de Concatenate Strings es el en cargado de concatenar distintos strings para realizar alguna presentación de datos

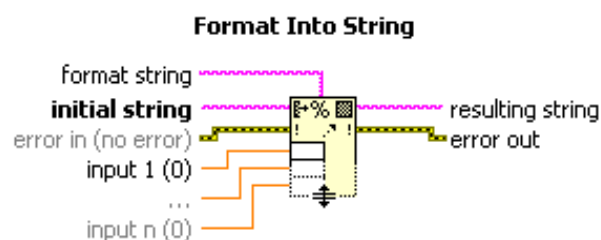


Figura 4.18 Bloque Format Into String

El bloque de Format Into String podemos generar un reporte de datos mediante el ingreso de los Strings.

### Case Structure

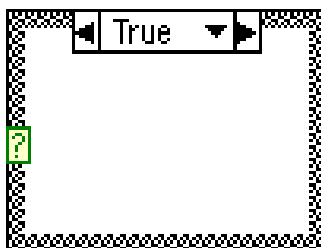


Figura 4.19 Lazo Case Structure

El lazo de Case Structure permite escoger una opción o un caso dependiendo de cuál se desea

### Sort 1D Array



Figura 4.20 Bloque Sort 1D Array

El bloque de Sort 1D Array ordena un arreglo en orden ascendente.

### Reverse 1D Array



Figura 4.21 Bloque Reverse 1D Array

El bloque de Reverse 1D Array invierte el orden de un arreglo.

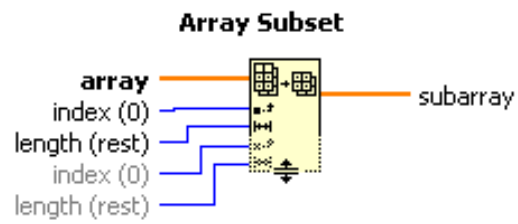


Figura 4.22 Bloque Array Subset

El bloque de Array Subset retorna un sub-arreglo de un arreglo entrante.

### 4.3. Importación de Señales

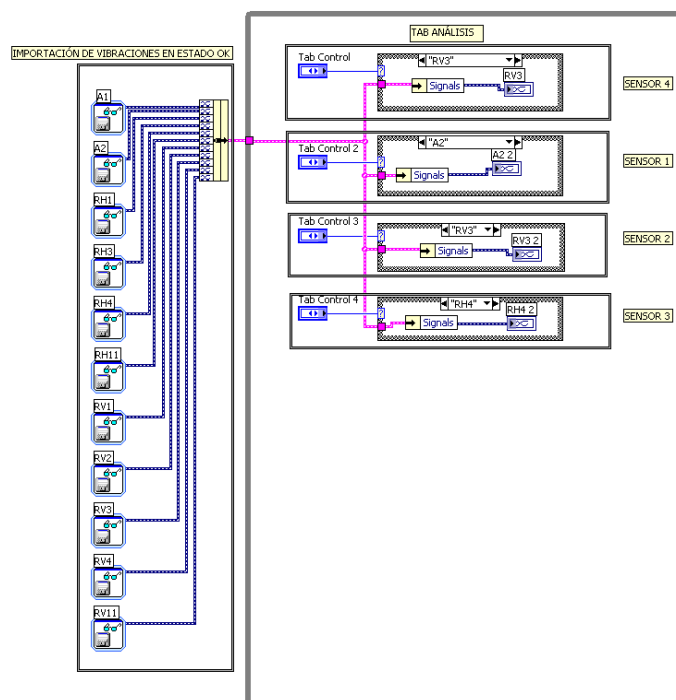


Figura 4.23 Diagrama de bloques donde se importa la señal

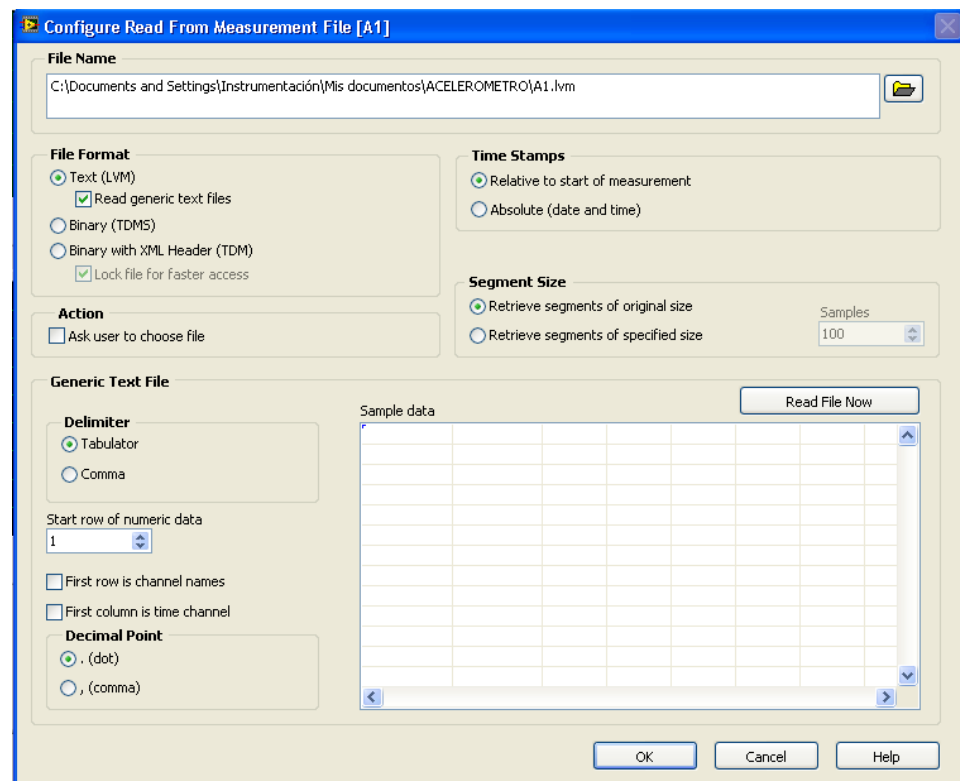


Figura 4.24 Ventana de configuración de Read From Measurement

En el lado izquierdo se presentan algunos Read From Measurement File Express mediante los cuales adquirimos las señales guardadas de vibración del motor cuando se encuentra en condiciones óptimas, estas señales ingresan en un Bundle para luego pasar a ser llamadas en cada uno de los Tabs correspondientes, escogidas por un UnBundle y a su vez graficadas en cada uno de los casos.

#### 4.4. Análisis de Severidad

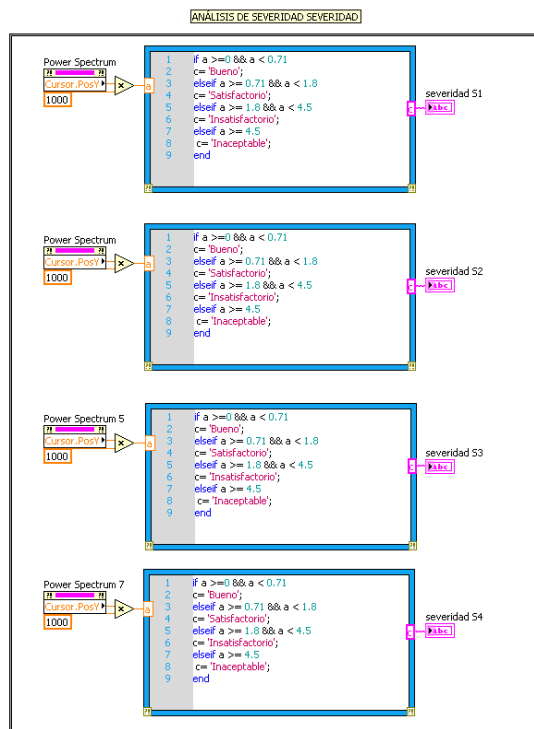


Figura 4.25 Diagrama de bloques del análisis de severidad

La severidad se analiza utilizando los datos de amplitud (eje “y”) del Power Spectrum lo multiplicamos por un factor de 1000 y analizamos ese valor para determinar cuál sería el estado del motor de acuerdo a un rango de valores dados por la norma ISO2372.

## 4.5. Análisis de las Señales

Debido a que el análisis de las cuatro señales son las mismas solo se hará el estudio de la programación de una de ellas.

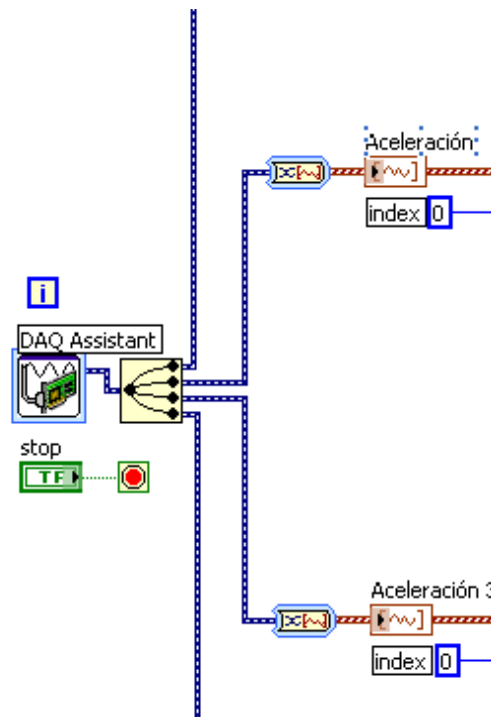


Figura 4.26 Diagrama de bloques de Análisis de las Señales

Primero utilizamos el DAQ Assistant y lo configuramos para adquirir las señales deseadas del módulo NI 9234, después escogemos cada una de ellas con el Split Signals.

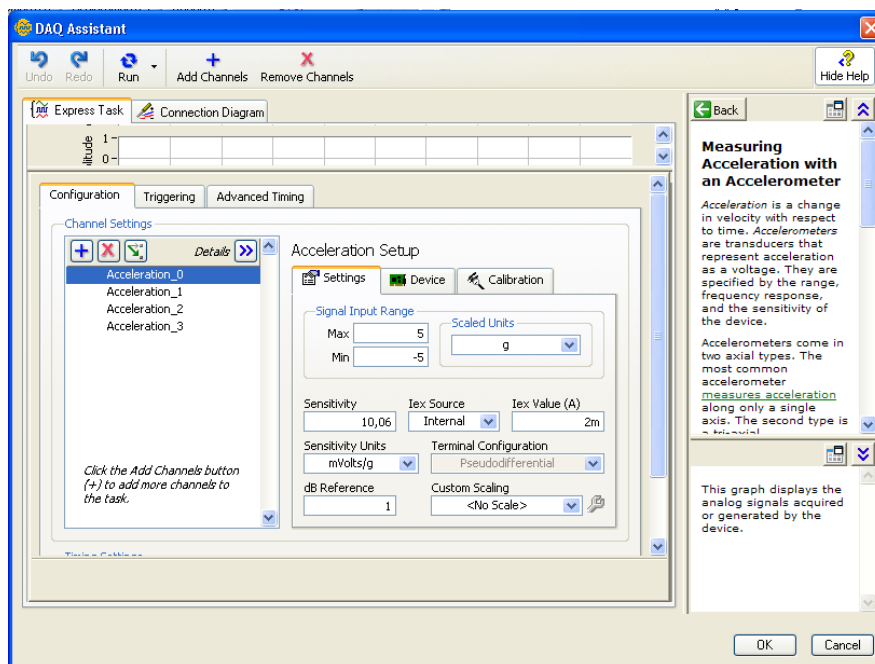


Figura 4.27 Ventana de configuración del DAQ Assistant

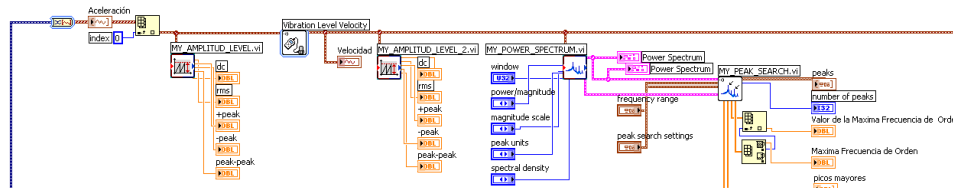


Figura 4.28 Diagrama de bloques de la programación

Una vez que hemos adquirido la señal de aceleración ese dato dinámico es transformado en un arreglo, después será graficado y se procederá a muestrear esa señal escogiendo sus primeros valores que van cambiando al través del tiempo. Utilizando el bloque de MY\_AMPLITUD\_LEVEL determinamos los valores dc, rms, +peak, -peak y peak-peak de la señal de aceleración.



Con el bloque de Vibration\_Level\_Velocity utilizo una de sus funciones la cual me ayuda a integrar la señal de aceleración para de esta manera obtener la velocidad, después se grafica la señal, se determinan los niveles de amplitud con el bloque de MY\_AMPLITUD\_LEVEL para determinar nuevamente los valores dc, rms, +peak, -peak y peak-peak. Después utilizamos el bloque de MY\_POWER\_SPECTRUM para determinar el espectro de magnitud de la señal de velocidad y a su vez utilizamos el bloque de MY\_PEAK\_SEARCH para encontrar los picos de la señal, los diez picos más altos con sus respectivas frecuencias, el pico más alto de todos con sus respectivas frecuencias y el número total de picos.

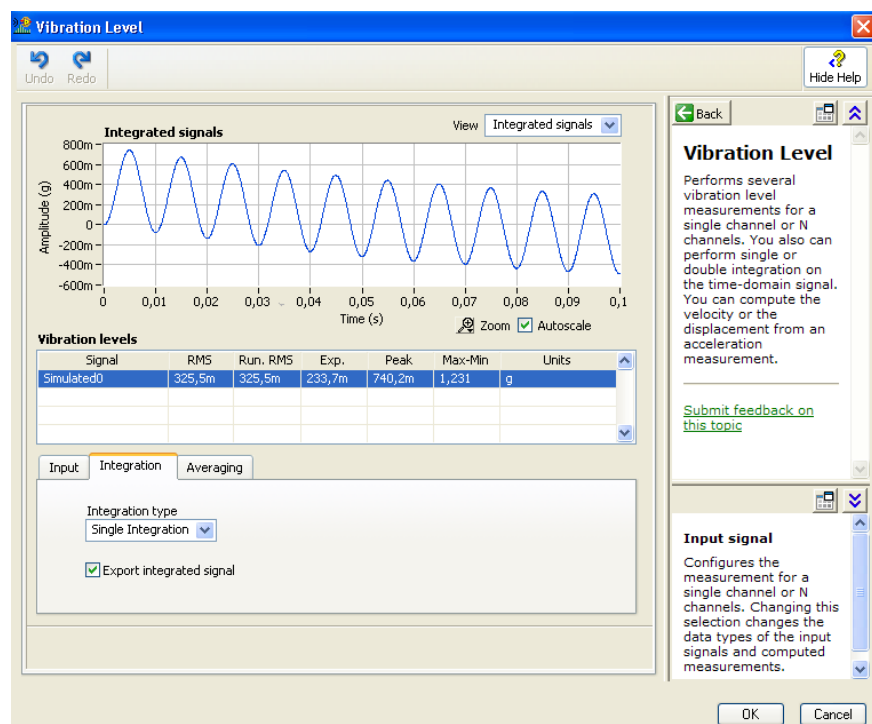


Figura 4.29 Ventana de configuración del Vibration Level

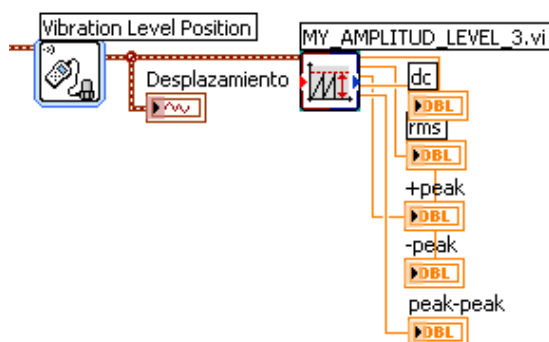


Figura 4.30 Diagrama de bloques

A continuación se procede a utilizar nuevamente el bloque de Vibration\_Level\_Position para integrar la señal de velocidad y encontrar la señal de desplazamiento, después se lo grafica y se utiliza el bloque de MY\_AMPLITUD\_LEVEL para determinar nuevamente los valores dc, rms, +peak, -peak y peak-peak.

#### 4.6. Creación de Variables Locales

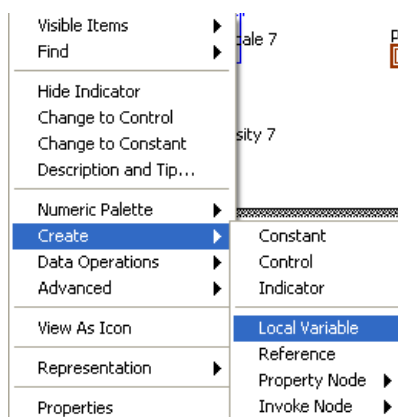


Figura 4.31 Como crear una variable local

Para la creación de variables locales hacemos clic derecho en uno de los elementos de salida de algún bloque que se desee analizar, luego Create y finalmente damos clic en Local Variable.

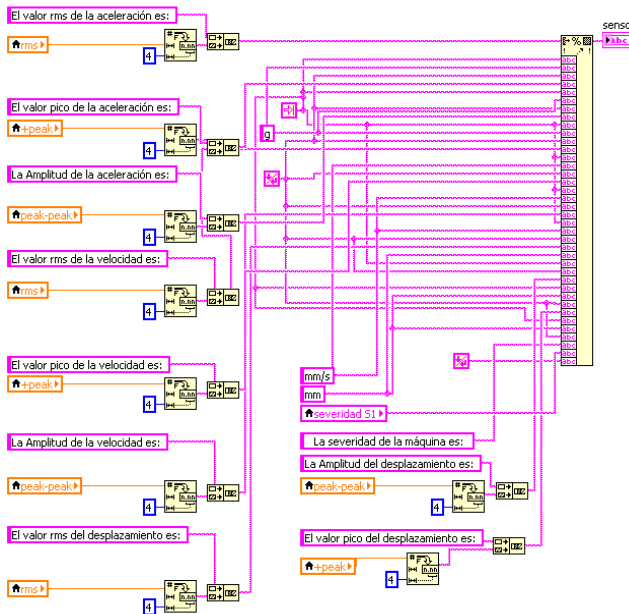


Figura 4.32 Diagrama de bloques del reporte

Utilizamos las Local Variable para luego generar un reporte, estas variables locales pasan por el bloque de Number To Fractional String y luego se las concatena con sus respectivos Strings, para luego finalmente generar un reporte de datos.

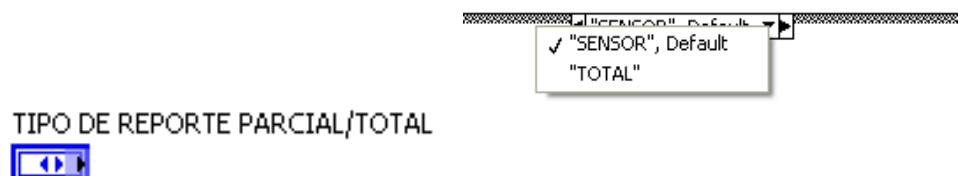


Figura 4.33 Variable Local y Case Structure

Se ha utilizado los Case Structure para generar el tipo de reporte es decir se puede generar un reporte Total o Parcial.



Figura 4.34 Case Structure selectivo

Si se genera un reporte parcial se puede escoger el tipo de sensor a utilizar (sensor1, sensor2, sensor3, sensor4).

#### 4.7. Modificaciones del bloque Power Spectrum

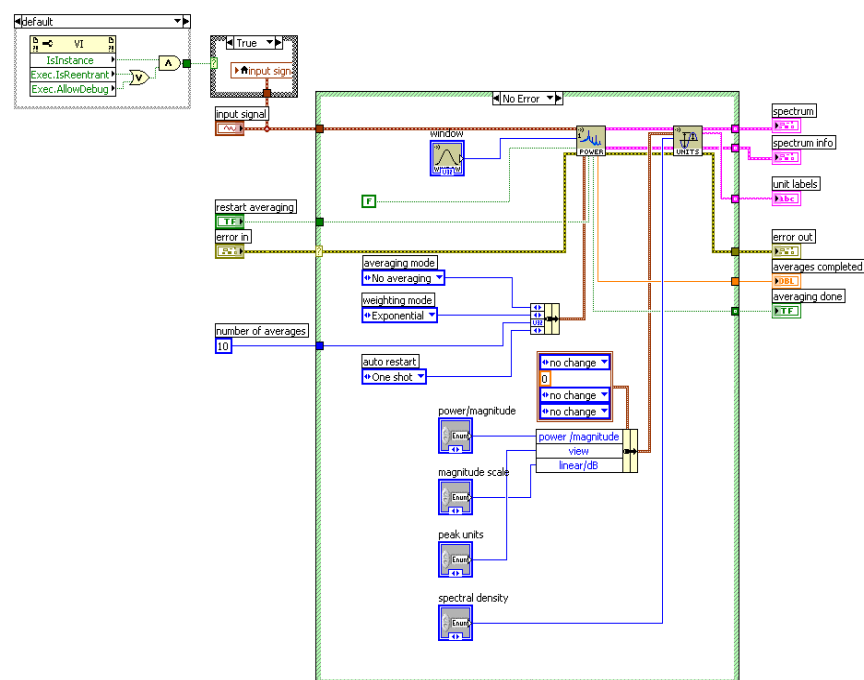


Figura 4.35 Diagrama de bloques Power Spectrum

Dentro de este bloque se procedió a colocar un text ring para: power/magnitude, magnitude scale, peak units, spectral density y así poder controlarlo desde el panel frontal.

#### 4.8. Modificaciones del bloque Peak Search

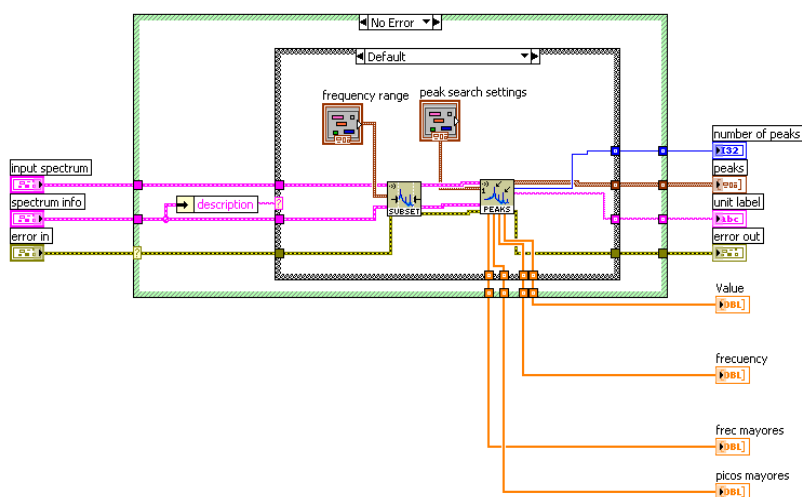


Figura 4.36 Diagrama de bloques Peak Search

Debido a que se los datos de amplitud y frecuencia no se los podía tratar de manera independiente cada uno se procedió a la modificación del bloque de PEAK SEARCH



Figura 4.37 Bloque MY PEAK SEARCH

En el interior de este bloque se encuentra un bloque llamado Peak al cual se le ha agregado las salidas de pico más alto (Value) con su respectiva frecuencia (frequency), los diez mayores picos (picos mayores) con sus respectivas frecuencias (frec mayores). Adicionalmente se ingresó dentro del bloque de Peak para modificarlo internamente.

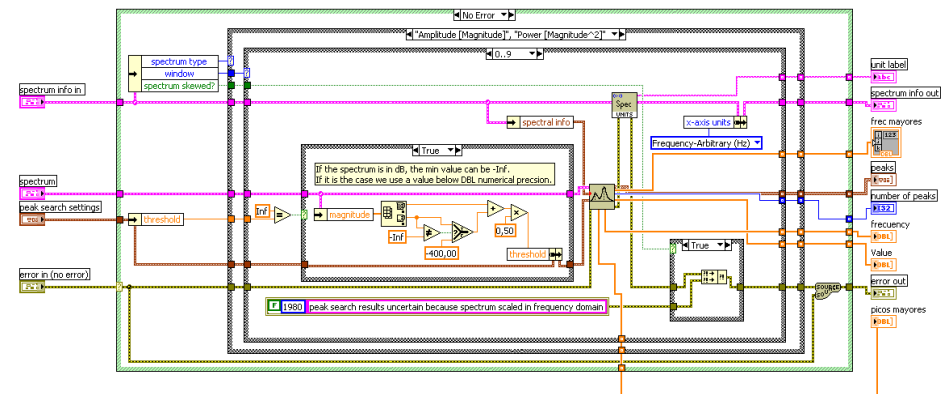


Figura 4.38 Diagrama de bloques de Peak

Dentro del bloque de Peak se muestra su diagrama de bloques, y se aprecia que están las salidas antes mencionadas. Ingresamos nuevamente al bloque Spectrum\_Peak\_Search



Figura 4.39 Bloque Spectrum Peak Search

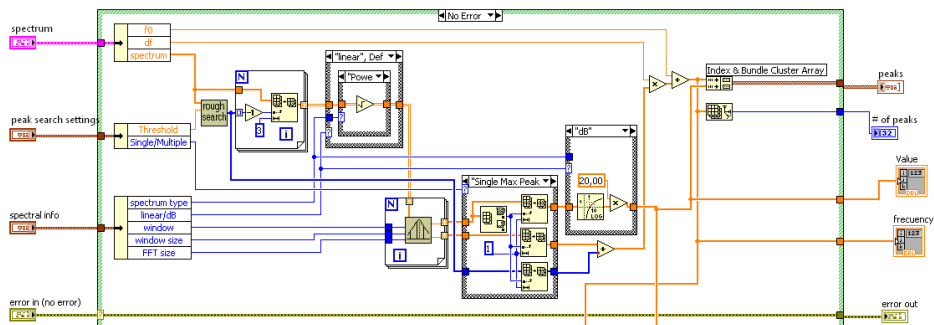


Figura 4.40 Diagrama de bloques Spectrum Peak Search

Dentro de este bloque podemos escoger independientemente los valores de frecuencia (frequency) y de amplitud (Value)

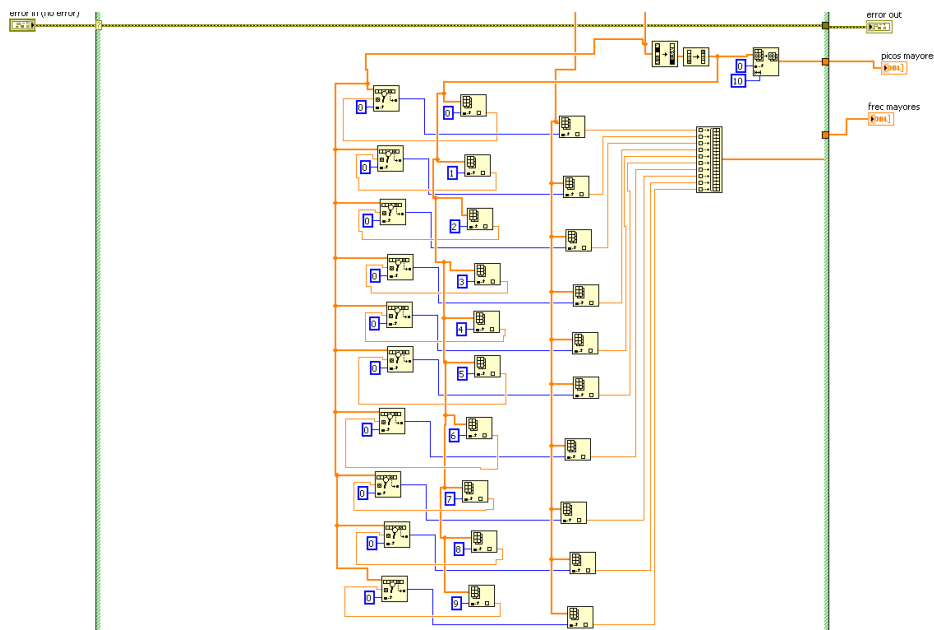


Figura 4.41 Diagrama de bloques Spectrum Peak Search

Para determinar las diez amplitudes más altas y sus respectivas frecuencias, se escogió los valores de amplitud, luego se los ordeno de mayor a menor, luego se los invierte para tenerlos

ordenados de menor a mayor de ahí se procede a crear un sub-arreglo de diez elementos con su salida tipo arreglo (picos mayores). La frecuencia de cada uno de esas amplitudes de la determinó escogiendo cada uno de los valores de amplitud de menor a mayor, después se busca esos valores en el arreglo de las amplitudes y determinamos le índice de ese elemento, después mediante este índice buscamos y escogemos la frecuencia correspondiente a las diez mayores amplitudes. Finalmente ingresamos estos valores de frecuencias en un Build Array y lo ponemos en una salida tipo arreglo llamada (frec mayores)



# CAPÍTULO 5

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de realizar la construcción del banco de pruebas para poder generar y detectar cuatro fallas típicas en un motor eléctrico en funcionamiento y montar los 4 sensores de aceleración en el motor para medir la vibración generada, aplicamos el software desarrollado en LabVIEW y empezamos a realizar la toma de datos.

El primer paso hacia las pruebas es: ajustar, acoplar, alinear y acomodar las partes que constituyen la planta para el correcto funcionamiento.

El software es de gran ayuda en este punto ya que en tiempo real, pudimos reducir las vibraciones en ciertos puntos hasta un (Micras) de amplitud.

Una vez adquiridas las muestras (vibraciones) de la planta en estado normal, son mostradas de color verde (Espectro) en la pantalla de

Análisis de LabVIEW para su posterior comparación con los futuros espectros con fallas.

### 5.1. Espectro de motor en buen estado

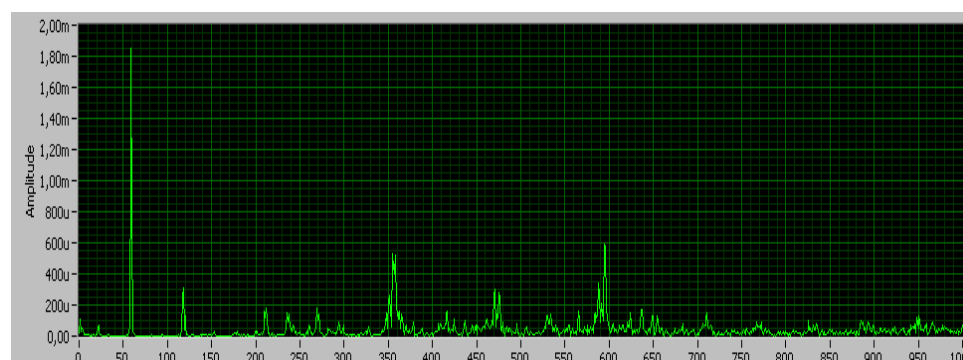


Figura 5.1 Espectro de motor en buen estado

Todas las máquinas generan vibraciones como parte normal de su actividad, sin embargo cuando falla alguno de sus componentes, las características de estas vibraciones cambian, permitiendo mediante un estudio detallado identificar el lugar y el tipo de falla que se está presentando, facilitando así, su rápida reparación y mantenimiento, en nuestro caso originaremos dichos problemas y analizaremos su espectro de frecuencias.

En la figura 5.1 tenemos el espectro del motor en buen estado, notamos que a 1X rpm (58Hz) con alrededor de 1.8mm de amplitud, identificamos la velocidad de giro del motor, dicha información nos indica que existe un ligero desbalance, el resto de picos son ruidos

armónicos de elementos externos como luces fluorescentes, motores eléctrico, equipos de cómputo cerca, etc.

El motor se encuentra en etapa satisfactoria de vibración y no tiene fallas debido a la baja amplitud de vibraciones.

## 5.2. Espectro de motor con desbalance

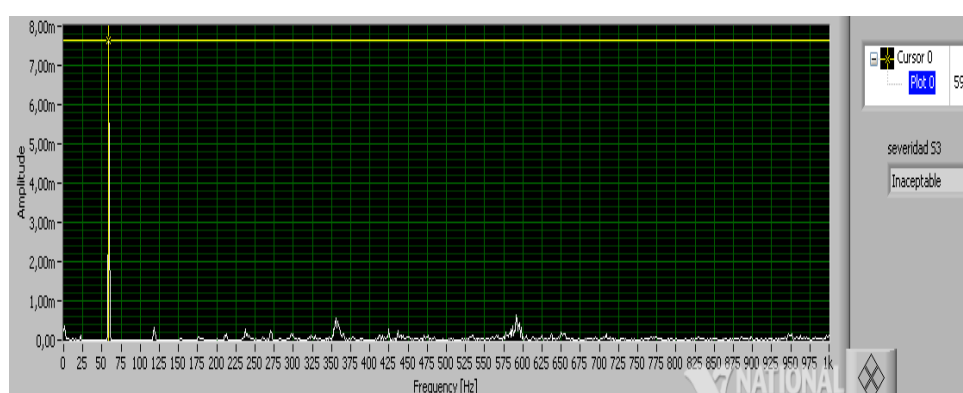


Figura 5.2 Espectro de motor con desbalance

EL desbalance en las maquinas es una de las causas más comunes de vibración donde los datos arrojados indican:

- La manifestación a 1x las rpm de la pieza desbalanceada
- La amplitud es proporcional a la cantidad de desbalance

La amplitud de la vibración es normalmente mayor en el sentido de medición radial, horizontal o vertical (en las maquinas con ejes horizontales).

Analizando el espectro observamos que la frecuencia que predomina es la del giro del motor que esta alrededor de los 58Hz.

Muchos defectos pueden estar asociados a esta frecuencia, siendo el más común el de desbalance mecánico, su amplitud de 7.66939mm es mayor que la encontrada en el espectro de motor en buen estado.

Dicho valor de vibración se le da al motor un estado de inaceptable.

A continuación se muestran las 10 amplitudes mayores con sus respectivas frecuencias originadas por desbalance

picos mayores 3	frec mayores 3
7,66939m	58,929
730,285u	591,405
596,773u	355,736
501,551u	358,26
466,645u	595,652
414,89u	594,499
366,357u	587
364,955u	0,85278
336,228u	117,866
301,451u	598

Figura 5.3 Amplitudes y Frecuencias del desbalance

### 5.3. Espectro de motor con holgura mecánica

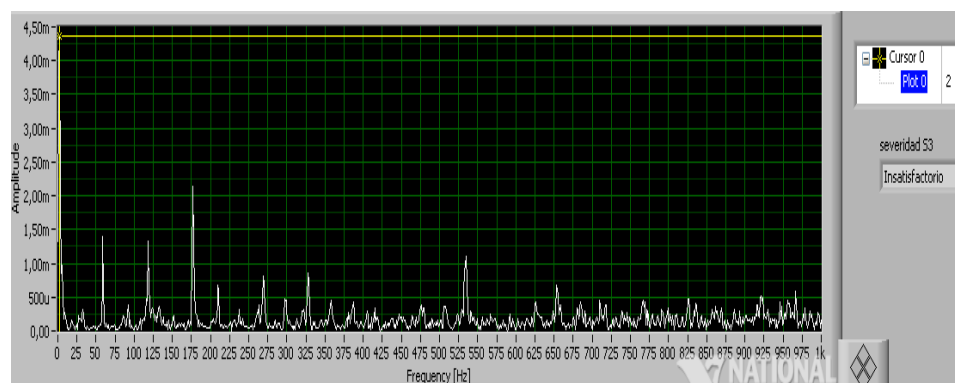


Figura 5.4 Espectro de motor con Holgura mecánica

En el siguiente espectro observamos que la frecuencia que predomina es la de 1.58Hz que la teoría atribuye esta falla a holguras ocasionadas por tornillos sueltos, cojinetes lisos (remolinos de aceite).

Con menor amplitud aparecen: 3X con 2.160mm, 1X (frecuencia de giro del motor) (58Hz) con 1.39mm y 2X con 1.33 mm, siendo estas las más representativas en el diagnóstico de esta falla.

Al motor se le da un estado de insatisfactorio.

A continuación se muestran las 10 amplitudes mayores con sus respectivas frecuencias por holgura mecánica

picos mayores 3	frec mayores 3
4,89657m	1,58052
2,16056m	177,14
1,39861m	58,9881
1,33084m	118
1,2277m	534,597
1,12431m	5,53471
949,824u	328,397
900,093u	269,377
758,995u	653,446
755,966u	210,423

Figura 5.5 Amplitudes y Frecuencias de Holgura Mecánica

#### 5.4. Espectro de motor con desalineación

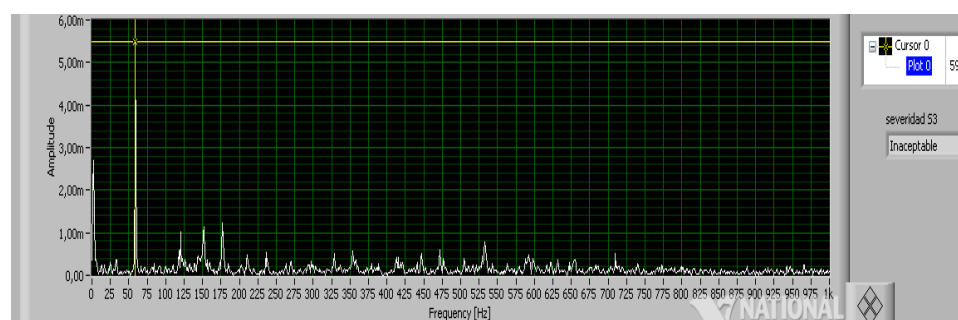


Figura 5.6 Espectro de motor con desalineación

En el siguiente espectro observamos que la frecuencia que predomina es la velocidad de giro del motor de 58Hz con 4mm de amplitud.

Con menor amplitud aparecen: 0.1X rpm con 2.8mm que muestra un remolino de lubricante en los rodamientos y 2X rpm, 2.5X rpm y 3X rpm dándonos a notar a que se debe a una desalineación paralela por su aparición en el eje radial

Debemos tener en cuenta de que podría confundirse entre desbalance y desalineación pero en el primero solo aparece 1X rpm y no sus múltiplos cercanos.

A continuación se muestran las 10 amplitudes mayores con sus respectivas frecuencias por desalineación

picos mayores 3	frec mayores 3
5,42664m	59,0182
2,86894m	1,37418
1,40493m	151,47
1,28982m	177,155
1,25219m	120,128
1,06213m	533,36
891,036u	354,438
758,271u	472,103
663,749u	210,545
592,188u	118,366

Figura 5.7 Amplitudes y Frecuencias de desalineación

## 5.5. Espectro de motor con falla de rodamientos

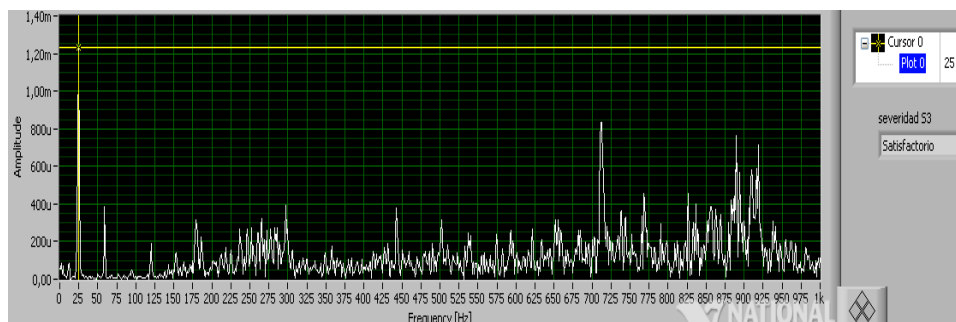


Figura 5.8 Espectro de motor con falla de rodamientos

Se reemplazó la segunda chumacera por otra con un rodamiento sin el sello y se realizó una pequeña fisura en el aro interior.

Se observan picos pequeños (0.5X rpm) con poca incidencia en el estado del motor.

Se constató que este tipo de falla genera ruido y derrame de lubricante por la falta de sellos en los rodamientos, que son el camino hacia una falla en el futuro por el alto contenido de armónicos.

Aunque se le da al motor un estado de Satisfactorio, por sentido común se nota que el rodamiento con ligero chillido y con poca lubricación, no durará mucho y disparara las vibraciones en cualquier momento.

A continuación se muestran las 10 amplitudes mayores con sus respectivas frecuencias por falla en rodamientos.

picos mayores 3	frec mayores 3
1,24436m	24,881
980,866u	712,499
775,464u	890,161
711,963u	918,96
658,29u	910,437
630,112u	916,668
589,454u	888,169
574,395u	894,132
521,012u	768,458
471,813u	826,772

Figura 5.9 Amplitudes y Frecuencias de fallas de rodamientos



# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

1. La medición de las vibraciones mecánicas es una herramienta que sirve para conocer el estado real de operación en máquinas rotativas. Sin embargo, el análisis de vibraciones es más poderoso usándolo para el diagnóstico de fallas, principalmente, en sus etapas iniciales o incluso antes que las mismas ocurran.
2. Existen diferentes tipos de gráficos utilizados en el diagnóstico de vibraciones, sin embargo, la más valiosa es el espectro de frecuencias, el cual se obtiene por medio de la Transformada Rápida de Fourier.
3. Una vez finalizado el proyecto concluimos que es necesario tener un equipo analizador de vibraciones para la instalación y mantenimiento de la maquinaria eléctrica industrial en cualquier empresa.

4. La Vibración es parte inherente de las maquinas rotatoria, pero lo que caracteriza un nivel de vibración es la amplitud y la frecuencia a la que se origina dicha falla, debido a que los efectos son identificados fácilmente en un espectro de frecuencias.
5. Durante los trabajos de construcción y armado de la planta se pudo comprobar que se trabajaba con desbalance, desalineación y excesiva sujeción de pernos. Estas fallas fueron corregidas una vez se desarrolló el programa, comprobando así la efectividad y necesidad del análisis de vibraciones como herramienta de diagnóstico en la instalación de un equipo
6. Este diseño tiene la ventaja de poseer una arquitectura abierta, brindada por la instrumentación virtual, que permite la fácil comprensión de los detalles que componen la programación, dándole así la posibilidad de variar su diseño, introduciéndole o sustrayendo herramientas.
7. A través de los resultados obtenidos, se puede justificar la importancia de mantener un monitoreo constante de las vibraciones, que a pesar del alto costo de la instrumentación necesaria para realizar estos análisis o la contratación del servicio, se justifica al conocer el estado real de operación de los equipos para garantizar su operación estable y segura para beneficio de las instalaciones industriales y el personal operativo.

## RECOMENDACIONES

1. Se debe tener cuidado al usar los criterios de severidad de vibraciones, ya que, cada uno tiene condiciones específicas de aplicación y se debe estar seguro que corresponde al tipo de medición utilizada, las características de la vibración que se miden y al tipo de máquina que se monitorea.
2. Hay que notar que al inicio de las pruebas se identificó una alta vibración en la estructura y se iba optar por fijarla al piso del laboratorio pero con la ayuda del software de vibraciones y la correcta colocación de las partes de la planta se redujo las vibraciones en un 60%. Debido a que las vibraciones disminuyeron a valores aceptables, ya no fue necesario trabajar sobre soportes de caucho ni empernarla al piso pues se asume que el desbalance identificado era una consecuencia de los problemas encontrados y no la causa de la vibración. En cambio, si las vibraciones no hubieran disminuido después del mantenimiento se hubiera requerido de la fijación del soporte, pues se había descartado cualquier otra posibilidad.
3. Se puede mejorar el diseño usado, agregando sensores para monitoreo de temperatura, monitoreo de corriente, voltaje de alimentación y un variador de frecuencia
4. Se recomienda una conexión a tierra ideal, para evitar ruidos provenientes de los armónicos de la red eléctrica.

5. Revisar los conceptos sobre sensores piezoeléctricos y las características de los equipos de adquisición de datos es de gran importancia a la hora de comenzar a programar el instrumento virtual.
6. El método de montaje del acelerómetro, varía el valor de frecuencia de resonancia, siendo más útil montarlo sobre una base adhesiva ya que sobre una base imantada existe mucho roce entre las piezas.
7. Contar con una base imantada de dos patas, simplificaría el uso de más acelerómetros ya que dicha base acopla sin ningún problema el sensor en cualquier punto del motor
8. Colocar el banco de pruebas sobre una superficie con la menor cantidad de imperfecciones en el piso para evitar, problemas en su estabilidad e introducir movimientos externos al sistema analizado.

# **ANEXOS**

**Tabla II. Identificación del estado de la máquina**

	<b>Nivel de vibración</b>			
<b>Estado máquina</b>	<b>Desplazamiento</b>	<b>Velocidad</b>	<b>Aceleración</b>	<b>Spike energy</b>
<b>Buenas condiciones</b>	Normal	Normal	Normal	Normal
<b>Rodamiento defectuoso Funcionamiento</b>	Normal	Normal	Normal	Alto
<b>Rodamiento defectuoso Funcionamiento</b>	Normal	Normal	Alto	Alto
<b>Problemas Analizar, parar</b>	Normal	Alto	Alto	Alto
<b>Problemas Analizar, parar</b>	Alto	Alto	Alto	Alto

**Tabla III. Resumen de fallas en bombas centrífugas**

Frecuencias en Hz o en órdenes	Causa
0 a 10 Hz	Recirculación en la bomba, holgura inadecuada entre los álabes y el cuerpo de la bomba, desplazamiento axial del rotor.
0.4x a 0.5x	Inestabilidad dinámica en los cojinetes. Remolino de aceite (Oil whirl) y latigazo de aceite (Oil whip).
1x	Muchos defectos pueden estar asociados a esta frecuencia, siendo el más común el desbalance mecánico o hidráulico.
2x	Muchos defectos pueden estar asociados a esta frecuencia, siendo el más común el desbalance mecánico o hidráulico.
2x, 3x, 4x,...	Holguras.
Zx (siendo Z el número de álabes del impulsor)	Frecuencia de paso de álabes, es inherente a la vibración en bombas. Su incremento y aparición de armónicos de la misma puede indicar rotura u obstrucción de un álabe o también su excentricidad.
5x a 20x	Frecuencias de rodamientos.
Frecuencias no relacionadas con el 1x	Posibles resonancias originadas por la vibración en máquinas vecinas.
100 Hz	Excentricidad rotoestática.

**Tabla IV. Características de varios acoplamientos**

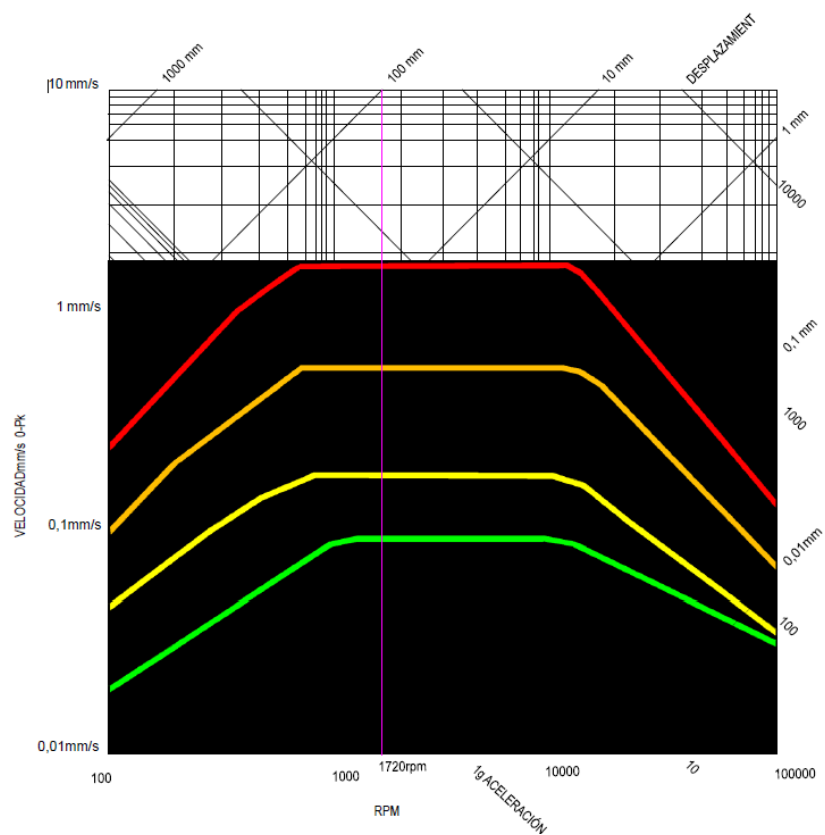
Nombre	Desalineación Tolerada				Observaciones
	Axial	Angular	Paralelo	Torsional	
Acoplamientos Rígidos	grande	ninguna	ninguna	ninguna	Se exige una alineación perfecta
Manguito de goma	moderada	ligera	ninguna	ninguna	
De disco Flexible	ligera	ligera (<3°)	ligera (<0.01d)	ligera o ninguna	Capacidad de absorber impacto. Sin juego
Helicoidal de fuelle	ligera	grande (<20°)	moderada (<0.20d)	ninguna	Gran capacidad de par torsor
De quijadas de goma	ligera	ligera (<2%)	ligera (<0.03d)	moderada	Gran absorción de impacto
Tipo Falk	ligera	ninguna	ninguna	moderada	Gran absorción de impacto
De cadena	ligera	ninguna	ninguna	ninguna	Gran absorción de impacto
De engrane	grande	ligera (<5°)	ligera (<0.05d)	ninguna	Gran capacidad de par torsor
De fuelle metálico	ligera	grande (<15°)	moderada (<0.20d)	ninguna	Falla por fatiga
Junta eslabonada lateral	ninguna	ligera (<5°)	grande (>2.00 d)	ninguna	No hay cargas laterales en los ejes
Junta universal	ninguna	grande (30°)	grande (en pares)	ninguna	La junta individual es de velocidad variable
Junta universal Rzeppa o junta Homocinética	ninguna	grande	ninguna	ninguna	Posee velocidad constante
Junta lateral Oldham	ninguna	ligera (<5°)	grande (>2.00 d)	ninguna	



## ALARMAS DE NIVEL Y TENDENCIA

Para dar un diagnóstico, es necesario observar los niveles de vibración que presenta cada uno de los puntos de la máquina. Muchas veces los espectros de vibración pueden presentar picos especiales, pero esto no significa que haya una característica de falla, ya que la máquina puede estar operando a condiciones normales dentro de los niveles establecidos por la norma. El problema se presenta cuando estos picos comienzan a aumentar su nivel.

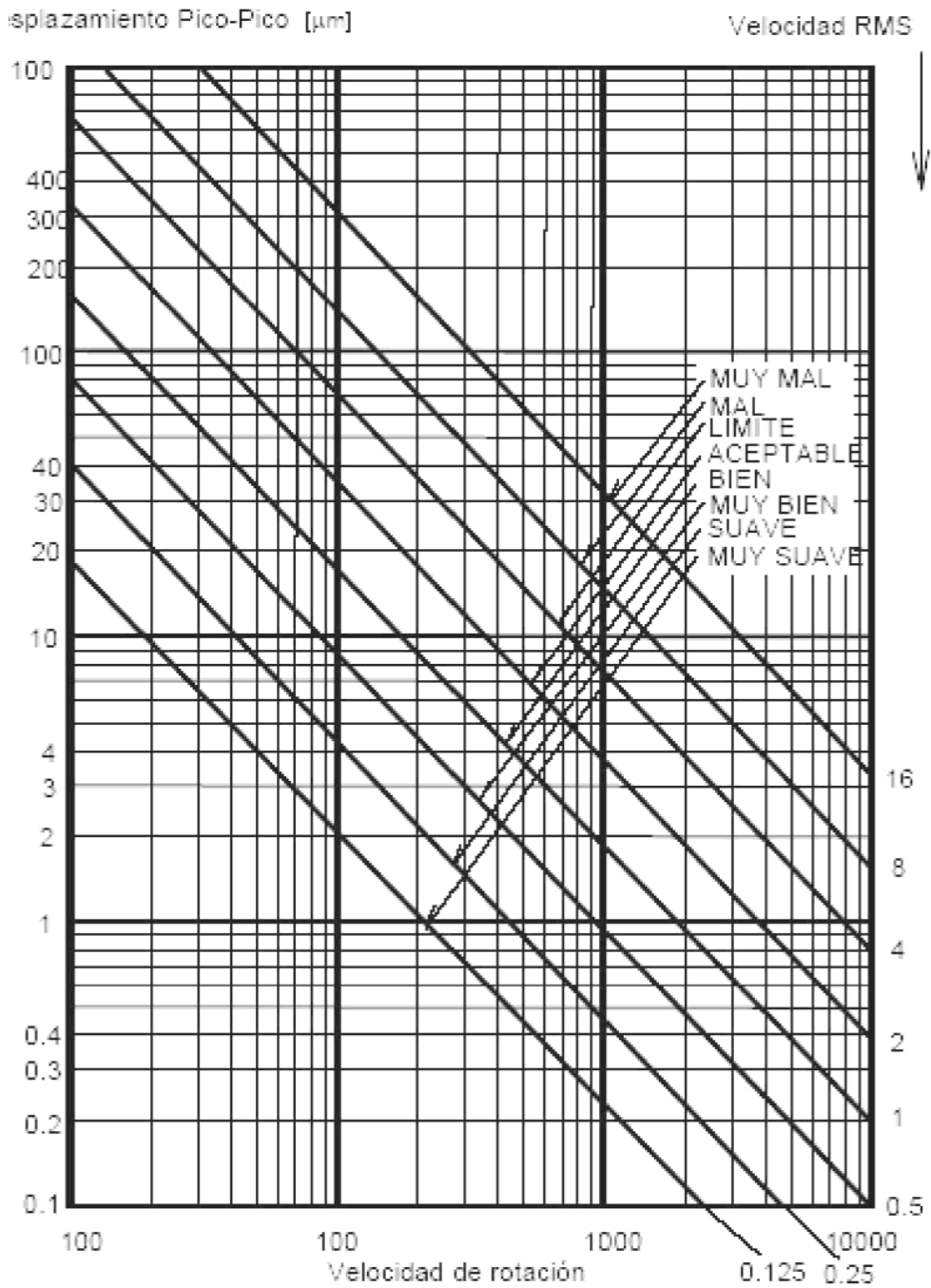
La siguiente gráfica logarítmica que encarna valores de aceleración, velocidad y desplazamiento frente a una frecuencia específica. Es el resultado de procesos de experimentación por parte de A-MAQ.



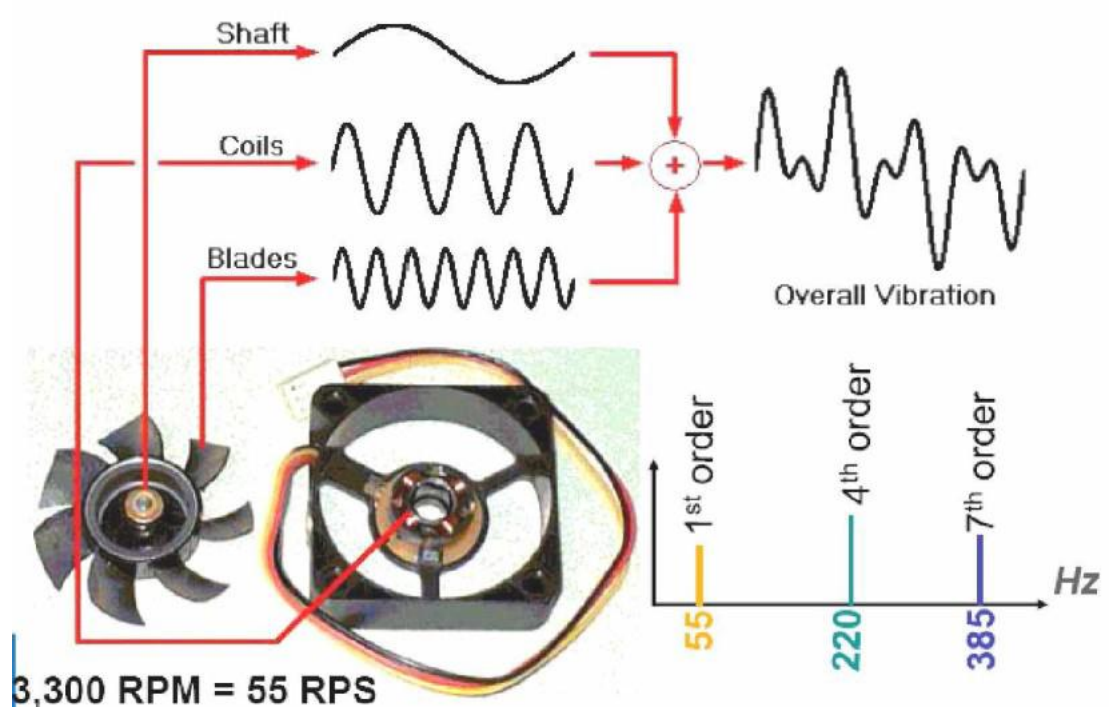
**Tabla V. Criterio de severidad de vibración de acuerdo a las normas VDI 2056, ISO 2372 y BS 4675**

45.00	<b>No Permissible</b>	<b>No Permissible</b>	<b>No Permissible</b>	<b>No Permissible</b>
28.00				
18.00				
11.20				
7.10				
4.50	<b>Límite</b>	<b>Límite</b>	<b>Límite</b>	<b>Límite</b>
2.80				<b>Admisible</b>
1.80	<b>Admisible</b>	<b>Admisible</b>	<b>Admisible</b>	<b>Admisible</b>
1.12				
0.71				
0.45	<b>Normal</b>	<b>Normal</b>	<b>Normal</b>	<b>Normal</b>
0.28				
0.18				
<b>Vel. [mm/s]</b>	<b>Máquinas Pequeñas (&lt; 15 Kw)</b>	<b>Máquinas Medianas (15 - 75 Kw) (300 Kw, soporte especial)</b>	<b>Máquinas Grandes (base rígida) (&gt; 75 Kw)</b>	<b>Máquinas Grandes (alta velocidad) (&gt; 75 Kw)</b>

**Tabla VI: Severidad del desbalance según: mechanical vibration practical machinery vibration analysis and predictive maintenance”**



## EJEMPLO DE COMPONENTES DE ANALISIS DE ORDEN



Tres componentes armónicas producidas por diferentes elementos.

# BIBLIOGRAFÍA

[1] A-MAQ S.A., Tutorial de Vibraciones para Mantenimiento Mecánico, <http://www.a-maq.com/tutoriales/Tutorial%20Vibraciones%20para%20Mantenimiento%20Mecanico%20A-MAQ%202005.pdf>, fecha de consulta septiembre 2010

[2] SAAVEDRA, P., Diagnóstico del Desalineamiento de Ejes en Máquinas Acopladas a través del Análisis de Vibraciones, <http://es.scribd.com/doc/42719738/to-de-Ejes-en-Maquinas-Acopladas>, fecha de consulta octubre 2010

[3] SAAVEDRA, P., Análisis de Vibraciones de Máquinas, [http://www.dim.udec.cl/lvm/capacitacion/cursos/categoria\\_l.pdf](http://www.dim.udec.cl/lvm/capacitacion/cursos/categoria_l.pdf), fecha de consulta octubre 2010

[4] ESTUPIÑAN, E., Técnicas de Diagnóstico para el Análisis de Vibración de Rodamientos, [http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos%20PREDICTIVO\\_archivos/galileo.dim.edec.cl%20lvm/articulo\\_rodamientos\\_CHILE1.pdf](http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos%20PREDICTIVO_archivos/galileo.dim.edec.cl%20lvm/articulo_rodamientos_CHILE1.pdf), fecha de consulta octubre 2010

[5] ESTUPIÑAN, E., Diseño e Implementación de un Analizador Virtual de Vibraciones Mecánicas, <http://www.scielo.cl/pdf/rfacing/v14n1/ART02.pdf>, fecha de consulta octubre 2010

[6] THOMSON,W.T. Teoría de Vibraciones: Aplicaciones, Prentice – Hall Hisp, 1983

[7] PENKOVA,M., Análisis de Señales Vibratorias, <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/870/87011532002.pdf>, fecha de consulta noviembre 2010

[8] MONTENEGRO, L., Mantenimiento y Análisis Vibratorio (Segunda Edición), <http://www.ceciv.net/pdfs/muestra-manual-intro.pdf>, fecha de consulta febrero 2011

[9] MOSQUERA, G & PIEDRA, M & ARMAS, R., Las Vibraciones Mecánicas y su Aplicación al Mantenimiento Predictivo, <http://es.scribd.com/doc/17688640/LAS-VIBRACIONES-MECANICAS-y-EI-Mantenimiento-Predictivo>, fecha de consulta febrero 2011

[10] TORRES, F., Análisis de Vibraciones e Interpretación de Datos, <http://www.guemisa.com/articul/pdf/vibraciones.pdf>, fecha de consulta marzo 2011