

SISTEMA DE BAJO COSTO PARA MONITOREO DE DISTURBIOS DE VIBRACIÓN EN MÁQUINAS ROTATORIAS

Jared R. Ocampo

Profesor, Departamento Postgrado

Universidad Tecnológica Centroamericana (UNITEC), San Pedro Sula, Honduras

(Recibido: Julio, 2013)

RESUMEN. Una de las mayores causas de paros en la producción de una empresa son los fallos en sus máquinas y equipos. Para poder prevenir estos eventos no deseados, las empresas realizan labores de mantenimiento preventivo y predictivo que permiten programar los paros de maquinaria y evitar así los costos asociados con paros de emergencia. Una de las variables usada para monitorear la condición de los elementos, es su nivel de vibración, ya que está directamente relacionada a la condición del equipo y puede dictaminar cuando será necesario realizar mantenimiento en el mismo. A través de este proyecto, se creó un sistema de bajo costo que permite monitorear vibraciones y diagnosticar disturbios que podrían causar problemas en máquinas rotatorias usando el software de programación LabVIEW y un micro-controlador de la familia PIC. Este documento presenta la teoría detrás del análisis de vibraciones y como se construyó y probó un prototipo basado en la teoría investigada. También muestra cómo se logró crear un sistema que funciona muy bien con señales simuladas y que es capaz de graficar la aceleración, velocidad y desplazamiento en señales reales capturadas en archivos de texto. También se discuten las áreas de mejora a futuro para lograr capturar la frecuencia de vibración a partir de la adquisición de señales de acelerómetro reales.

Palabras clave: vibraciones, monitoreo, labVIEW, disturbios, máquinas rotatorias.

ABSTRACT. One of the biggest causes of production stoppages in companies are machinery and equipment failure. To prevent these unwanted events, companies conduct preventive and predictive maintenance that allows to program machine downtime and to avoid the costs associated with emergency stops. One of the variables used to monitor equipment or machinery conditions is its vibration level as it is directly related to the equipment conditions and it can dictate when you must perform maintenance on it. Through this project and using a LabVIEW programming software and a microcontroller of the PIC family, we created a low-cost system that can monitor and diagnose vibration disturbances that could cause problems in rotating machinery. This paper presents the theory behind vibration analysis and how a prototype was built and tested based on the researched theory. It also shows how it was possible to create a system that works very well with simulated signals and is capable of plotting the acceleration, velocity and displacement in real signals captured in text files. The paper also discusses the future areas for improvement in order to capture the vibration frequency from the acquisition of real accelerometer signals.

Keywords: vibration, monitoring, labVIEW, riot, rotating machines.

INTRODUCCIÓN

Las empresas experimentan grandes pérdidas monetarias producto de paros inesperados en su producción. Uno de los problemas más grandes sucede cuando las máquinas fallan mientras están en operación debido a que estas usualmente tienen un costo mayor de reparación. Esto se debe a que cuando una máquina se daña mientras está en movimiento, otros componentes que inicialmente no estaban en mal estado se dañan producto de la inercia e interacción que sucede cuando se presenta el fallo. Para poder prevenir estos eventos no deseados, las empresas realizan labores de

mantenimiento preventivo que permiten programar los paros de maquinaria y evitar así los costos asociados con paros de emergencia. El mantenimiento preventivo puede ser del tipo programado o del tipo predictivo. En el programado las revisiones se realizan cada cierto tiempo establecido previamente. Dicho tiempo puede establecerse por recomendaciones del fabricante (cada cierta cantidad de horas de funcionamiento), o basado en datos estadísticos históricos (usando el tiempo promedio entre fallos), etc.

En el caso del mantenimiento preventivo basado en predicción, el propósito es monitorear las condiciones en las que se encuentra una maquinaria para buscar predecir cuándo será necesario parar con el propósito de realizar reparaciones y ajustes. Este tipo de actividades para asegurar la disponibilidad del equipo también se conoce como mantenimiento basado en condiciones (CBM) y tiene como filosofía que el cambio en la condición y/o desempeño del equipo es el factor preponderante para la toma de decisión sobre la reparación o el remplazo del equipo (Raheja, Llinas, Nagi, y Romanowski, 2006). El objetivo de CBM es minimizar el costo total de las inspecciones y las reparaciones al recolectar e interpretar datos relacionados a la condición de operación de componentes críticos de un equipo forma continua (en línea) o discontinua (cada cierto tiempo).

De acuerdo a Knapp, Javadpour y Wang (2000), CBM puede reducir el costo total de inspección y reparación al permitir identificar aquellos fallos que están próximos a ocurrir, lo que redundaría en una reparación basada en la degradación de los equipos y no en reparaciones costosas basadas en intervalos específicos de tiempo o en fallos de emergencia. Adicionalmente Moubrey (2001), señaló que el mantenimiento preventivo basado en tiempo a menudo falla en maximizar la vida de servicio de los componentes, ya que en muchas ocasiones se remplazan componentes que todavía tienen muchas horas de vida útil disponible. Esto implica que en varios casos los equipos son objeto de actividades técnicas preventivas excesivas, debido a que se programan actividades de mantenimiento en equipos que realmente todavía no requieren atención.

Una de las variables que puede ser usada para monitorear la condición de los elementos de una maquinaria es su nivel de vibración. A pesar de que es natural que las máquinas vibren, cuando estas vibraciones se vuelven excesivas y sobrepasan ciertos límites establecidos es por causa de la presencia de problemas mecánicos o eléctricos. Por tanto, monitorear las vibraciones de una máquina es una buena manera de revisar la condición de dicho equipo y saber cuándo debe dársele mantenimiento.

Con esta finalidad este proyecto creó un sistema de bajo costo que permite monitorear vibraciones y diagnosticar disturbios que podrían causar problemas en máquinas rotatorias usando técnicas de medición y estadística. Para hacer esto fue necesario investigar la teoría detrás de los sistemas de monitoreo de vibraciones mediante acelerómetro y control estadístico de procesos. También, fue necesaria la construcción y prueba de un prototipo basado en la teoría investigada.

El prototipo desarrollado constó de una aplicación desarrollada usando el software de programación LabVIEW, el cuál analizó datos recibidos desde un acelerómetro y un

archivo en Excel. Este análisis le permite al usuario saber el estado de una máquina referente a sus vibraciones y tomar así la decisión de apagar el motor antes que estos disturbios generen un problema mayor y más claro de resolver. Por lo tanto, este proyecto pretende iniciar el desarrollo de una solución de bajo costo al mantenimiento basado en condición mediante análisis de vibraciones para empresas en Honduras.

REVISIÓN DE LITERATURA

El desarrollo de una herramienta que pueda adquirir y analizar vibraciones y permita detectar problemas antes de que la máquina falle es parte del mantenimiento basado en condiciones.

MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIONES (CBM)

De acuerdo a Horner, El-Harem, y Munns (1997), es el cambio en condiciones y desempeño de una máquina y no un tiempo específico de operación transcurrido el que debería generar una orden de mantenimiento. Se podría decir que al realizar un CBM en realidad se está siguiendo una política de remplazamiento de partes dañadas justo a tiempo (JIT). Este tipo de política maximiza la vida de los componentes al evitar realizar cambio de partes cuando estas todavía están en buena condición.

Entre las variables que se usan para revisar la condición de un componente o equipo se encuentran la vibración, temperatura, voltaje, corriente, nivel de aceite, resistencia de aislamiento, etc. De entre todas estas variables, una que es común a casi todos los equipos industriales es la vibración, y por esta causa es una de las variables de monitoreo más utilizadas, junto con la temperatura, para determinar el estado o condición de un equipo. De hecho, de acuerdo a Farrar y Doebling en Carden y Fanning (2004), las aplicaciones más exitosas para la detección de daños en máquinas rotativas son las desarrolladas con la tecnología del análisis basados en vibraciones.

Entre las ventajas más importantes del mantenimiento basado en condición se encuentran una mejoría notable en la confiabilidad del sistema, los paros para reparaciones pueden ser programados para tiempos que sean convenientes, se evita daño extenso a la máquina producto de la eliminación de fallos forzados, una reducción en el costo de mantenimiento y una disminución en el número de operaciones de mantenimiento (lo que disminuye la influencia del error humano por causa de reparaciones innecesarias). La desventaja más grande que tiene CBM es el alto costo de instalación del equipo de monitoreo (en algunos casos de un costo más alto que el equipo a monitorear) y el incremento en el número de piezas que necesitan revisión y mantenimiento.

ANÁLISIS DE VIBRACIONES

La vibración es el movimiento repetitivo u oscilatorio de una pieza o componente que envuelve la conversión alternante entre energía cinética y potencial. Existen tres métodos típicos para medir o expresar la vibración de un objeto. La primera forma es a través de la medición de su desplazamiento o amplitud, es decir la distancia total que

viaja el componente. Este método de medición se usa cuando las frecuencias son bajas (debajo de 600 ciclos por minuto o cpm) y está normalmente relacionado al estrés que sufre el componente. La siguiente forma es mediante la medición de la velocidad, que es la tasa de cambio del desplazamiento. Este método de medición se usa cuando las frecuencias son de rango mediano (entre 600 y 60,000 cpm) y normalmente está relacionado a la fatiga. La última forma es mediante la medición de la aceleración, que es la tasa de cambio de la velocidad. Se usa cuando las frecuencias son altas (arriba de 60,000 cpm) y se relacionan a la fuerza que provoca la vibración.

Una máquina es un sistema dinámico que tiene entradas (las fuerzas internas y externas ejercidas en el equipo) y que tiene salidas (la respuesta generada y que se mide con transductores y sensores). El análisis de vibraciones es el proceso de desarrollar mediciones de las vibraciones de una máquina e interpretar los datos recolectados para tratar de predecir la salud de la máquina y programar el mantenimiento que es requerido. De acuerdo a Fluke Corporation (n.d.), entre los problemas más comunes que causan vibraciones no deseadas se encuentran el desbalance de elementos rotativos, la desalineación en acoplamientos, los engranajes y rodamientos desgastados o dañados, la holgura en rodamientos y montajes, y problemas eléctricos.

La Figura 1, muestra los pasos requeridos para realizar análisis de vibraciones. Primero, se monta un transductor en la maquinaria que se desea monitorear (usualmente un acelerómetro) y se miden los desplazamientos, las velocidades o las aceleraciones producidas por la vibración. Las señales medidas por el transductor son capturadas en el dominio del tiempo (amplitud vs. tiempo), como señales análogas las cuales son procesadas por un computador usando tarjetas de adquisición de datos. Estas señales son transformadas a señales digitales que pueden ser analizadas directamente o transformadas al dominio de la frecuencia (amplitud vs. frecuencia) usando la transformada rápida de Fourier (FFT). Usando estos análisis se puede observar la “vibración firma” del aparato bajo estudio, lo que le dirá al operador si dicho aparato está operando apropiadamente o si se observa una advertencia temprana de que la máquina está empezando a fallar.

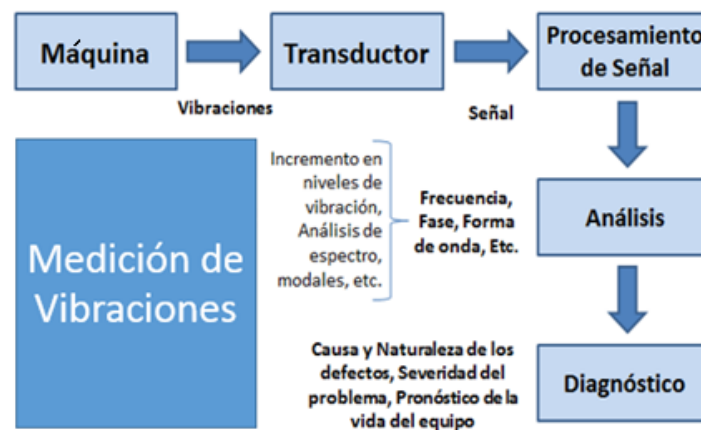


Figura 1. Pasos que se sigue en el monitoreo y análisis de vibraciones.

El nivel de vibración absoluta permisible es un indicador importante del estado actual de la máquina y está definido por el tipo de aparato en el que ésta se mide. Entre los estándares para medir la severidad de las vibraciones de una maquinaria los más importantes incluyen el ISO (Organización Internacional de Estándares) y el VDI (Estándares Nacionales Alemanes) y el BS (Estándares Nacionales Británicos). En la Tabla 1, se pueden observar los límites de severidad de vibración para estos grupos de maquinaria de acuerdo a la norma 2372. El área A se encuentra dentro de un nivel de vibración bueno, B está dentro de un nivel de vibración permisible, C en un rango de vibración insatisfactorio y D en un rango inaceptable o no permisible. Las máquinas se dividen en seis clases, dependiendo de su potencia y el tipo de montaje que estas tienen. En la tabla se muestran solo aquellas clases más utilizadas.

Tabla 1. Criterio de severidad de vibración para 10 Hz hasta 1000 Hz (ISO 2372).

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

Fuente: GRT Ingeniería (2012).

Hay varios tipos de algoritmos para extraer la característica de la señal de interés de la señal en bruto. Estos algoritmos pueden usarse de acuerdo al nivel de identificación de daño que se busca (Rytter, en Carden y Fanning, 2004). Los niveles varían desde la simple determinación de existencia de daño hasta la determinación de la posición geométrica del daño y la predicción de la vida útil restante de la estructura. Los dos métodos para análisis de vibraciones más comúnmente usados son: la medición de amplitud y la de frecuencia. Para medir el nivel de amplitud se integra dos veces la señal obtenida del acelerómetro (en el dominio del tiempo) para obtener el desplazamiento observado. En el caso del análisis de frecuencia, se utiliza el FFT (transformada rápida de Fourier) para convertir una señal del dominio del tiempo al

dominio de la frecuencia y obtener así un espectro de potencia que muestra la energía contenida en frecuencias específicas de la señal total (National Instruments, 2012).

MEDICIÓN DE VIBRACIONES USANDO LABVIEW

LabVIEW es un software de programación gráfico creado por National Instruments que cuenta con funciones integradas para realizar adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de mediciones y presentación de datos. La principal característica de este software es su facilidad de uso, ya que cuenta con una extensa librería de poderosas herramientas para crear aplicaciones relativamente complejas sin escribir líneas de texto de código (National Instruments, 2011). Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales (VIs), los cuales a su vez pueden usarse como bloques de construcción para programas más complejos. Cada VI consta de dos partes: el panel frontal, que es el interfaz que se usa para interactuar con el usuario cuando el programa se está ejecutando y el diagrama de bloques, que es el programa en sí y en donde se colocan los íconos que se interconectan entre sí y realizan las funciones establecidas (Travis y King, 2009).

El software de programación LabVIEW contiene un paquete de herramientas para desarrollar mediciones y análisis típicos requeridos por aplicaciones de audio, acústica o vibraciones llamado el Sound and Vibration Toolkit. Esta paleta de herramientas consiste de una librería de Vis que implementan funciones claves tales como: Escalamiento de señales a unidades de ingeniería (UE), Calibración de canales de medición, Aplicación de filtros de ponderación, Integración de señales en el dominio del tiempo, Desarrollo de mediciones de nivel, Desarrollo de mediciones de un solo tono, Desarrollo de pruebas de límite y máscara, Desarrollo de análisis de octavas fraccionales, Desarrollo de análisis de transcientes y Desarrollo de análisis de distorsión. Dentro de las paletas se encuentran VIs para realizar conversiones entre aceleración, velocidad y desplazamiento mediante integración y derivación. Esta integración puede hacerse en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia y se puede medir de forma instantánea y de forma continua usando los VIs apropiados. Igualmente se pueden medir niveles de vibración y hacer diferentes tipos de análisis (FFT, fraccional-octavas, transcientes, waterfall, swept-sine).

METODOLOGÍA

Para la construcción del sistema de monitoreo estadístico y diagnóstico de disturbios de vibración en máquinas rotatorias se requiere de la fusión de tres partes fundamentales:

- 1) **Hardware mecánico:** se requiere de un banco de pruebas que pueda ser usado para generar señales de vibraciones y revisar que toda la teoría investigada se cumple. El banco debe de ser constituido por un motor eléctrico que genere rotación y sus vibraciones correspondientes. En su defecto se requiere de señales producidas por un banco como este y guardadas en un archivo informático.

- 2) **Hardware electrónico:** debido a que el sistema debe ser capaz de tomar datos de forma sincrónica, es necesaria que tenga la habilidad de capturar información procedente de acelerómetros. Por esta razón se requiere de un aparato que pueda capturar la señal de los sensores, digitalizarla y enviarla a una computadora para su respectivo análisis. Esta parte constituye el módulo medición y control.
- 3) **Programa de software:** la señal adquirida debe ser analizada para poder tomar decisiones sobre el funcionamiento del sistema bajo estudio. Este sistema informático debe procesar la señal, extraer información de ella, realizar análisis de vibraciones y estadístico y desplegar gráficas y datos del análisis realizado. Este software debe poder adquirir las señales de parte de los acelerómetros a través del hardware electrónico y también adquirir datos desde un archivo (.xls, .txt, etc.)

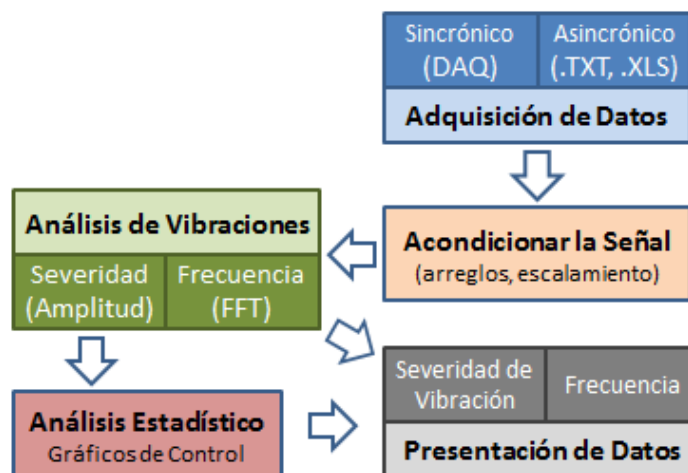


Figura 2. Módulos del software de monitoreo de vibraciones.

En el caso del programa de software, este debe constar de los siguientes módulos (ilustrados en la Figura 2):

- 1) **Adquisición de datos:** Se encargará del ingreso de datos al sistema procedentes de un acelerómetro (sincrónicos) o de datos que han sido guardados en un archivo informático (asincrónicos).
- 2) **Acondicionamiento de la señal:** Se encargará de tomar la información en bruto adquirida de los sensores y colocarla en las unidades adecuadas y el formato correcto para su posterior análisis.
- 3) **Análisis de vibraciones:** Realizará análisis del nivel de vibración de la señal mediante la determinación de la severidad de la vibración (cálculo de la amplitud al integrar dos veces la aceleración y obtener la amplitud). También buscará la frecuencia a la que se está produciendo dicha vibración mediante el cálculo del espectro de potencia de la señal (FFT).
- 4) **Análisis estadístico:** Las señales de amplitud serán analizadas para identificar mediante gráficas de control si el sistema está fuera de control en cuanto a

vibraciones se refiere usando el criterio de severidad de vibraciones descrito en la Tabla 1.

- 5) **Presentación de datos:** Se presentarán tres gráficos: amplitud de la vibración (severidad), control X-bar del promedio del desplazamiento (severidad), y del espectro de potencia (frecuencia).

IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

En vista que el propósito principal de este proyecto fue la creación de un sistema para el monitoreo de vibraciones y diagnóstico de disturbios, fue necesaria la construcción y prueba de un prototipo basado en la teoría investigada. Esto requirió del uso y adecuación de hardware y de la programación de una aplicación de software.

HARDWARE MECÁNICO Y ELECTRÓNICO

Debido a la falta de materiales y equipos necesarios para construir el banco de pruebas necesario, se solicitó ayuda a la compañía Spectraquest, Inc. (Virginia, EE.UU.) para conseguir datos de prueba registrando el funcionamiento del banco de pruebas denominado Machinery Fault Simulator bajo varias condiciones. Estos datos sirvieron para tener información que pudiera simular el funcionamiento del sistema de forma asincrónica y ser usados para probar y calibrar el sistema informático desarrollado. El banco de pruebas consta de un motor eléctrico trifásico de 1 HP, un variador de velocidad, eje de $\frac{3}{4}$ " de diámetro, rodamientos en ambos extremos, acelerómetros montados en diferentes direcciones y diferentes aditamentos.

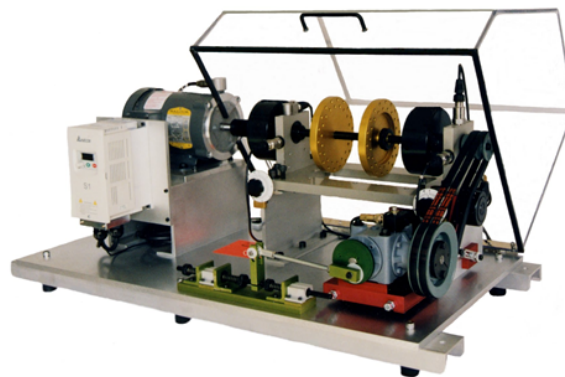


Figura 3. Banco de pruebas Machine Fault Simulator de Spectraquest, Inc.

Fuente: Spectraquest (2012).

Debido a que el sistema también debe de ser capaz de tomar datos de forma sincrónica, se requiere de la habilidad de capturar información procedente de acelerómetros. Por esta razón se adquirió un acelerómetro CMCP 1000 de la marca Reliability Direct. Por no contar con un banco de pruebas fue imposible probarlo totalmente, sin embargo este se conectó al hardware electrónico para asegurarse que el sistema recogía datos sincrónicamente y que el sistema informático era capaz de procesar la información apropiadamente. En el caso del hardware electrónico se usó

una tarjeta DAQ NI 9234 que es un módulo de adquisición de datos con acondicionamiento de señales para IEPE (Integrated Electronics Piezo Electric) capaz de leer señales de acelerómetros. Este módulo se conectó a un chasis cDAQ-9172 de National Instruments que permite la conexión del módulo a la computadora.

PROGRAMA DE SOFTWARE

El sistema de monitoreo estadístico y diagnóstico fue construido basado en el software de programación LabVIEW usando cuatro módulos:

- 1) Adquisición de datos
- 2) Acondicionamiento de señal
- 3) Análisis de vibraciones
- 4) Presentación de datos

ADQUISICIÓN DE DATOS

Para construir este módulo se usó una estructura de casos controlados desde un ring de texto en donde se seleccionaba si se deseaba hacer una adquisición de datos sincrónica (lectura de acelerómetros) o una adquisición asincrónica (leer un archivo en donde se hubieran registrado las mediciones de vibración). Para hacerlo, se usó el VIs DAQ Assistant y Load from ASCII respectivamente. La decisión del tipo de adquisición a realizar se hace desde la “Página Principal” en el Panel de Usuario del programa.

ACONDICIONAMIENTO DE SEÑAL

En este caso, por acondicionamiento de la señal se entiende la configuración de las señales medidas en un formato que permita su procesamiento. Para hacer eso, como se observa en la Figura 4, se escalaron las señales transformándolas de voltios (sensor) a la unidad de ingeniería preferida (mm, pulgadas, etc.) Para hacer esto se usó el VI Scale Voltage to EU. Adicionalmente, debido a que las señales vienen en arreglos de varias dimensiones (dependiendo del número de sensores usados) también fue necesario usar una función Index Array para extraer solo la señal del sensor que se quería medir (la columna correcta). Los valores de configuración del sistema (tipo de filtro de ponderación, sensibilidad del sensor, etc.) se hacen desde la “Página Principal” en el Panel de Usuario de la aplicación.

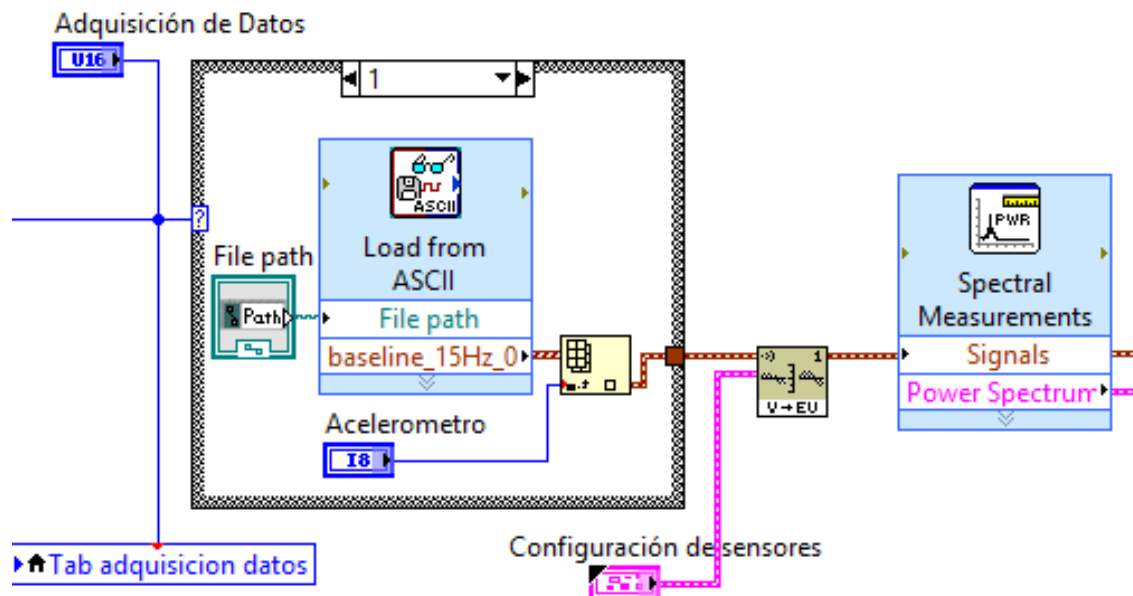


Figura 4. Acondicionamiento, filtrado y ordenamiento de señales.

ANÁLISIS DE VIBRACIÓN

Para realizar el análisis de las vibraciones fue necesario recordar que la aceleración es la doble derivada del desplazamiento. Por lo tanto, como se observa en la Figura 5, se usó el VI SVL Integration usando “single integration” para obtener la velocidad y “double integration” para obtener el desplazamiento. Luego se usó el VI Vibration Level para obtener el valor RMS de la velocidad y se tomó el valor máximo de entre los sensores. Este valor fue comparado contra los rangos establecidos en el criterio de severidad para vibraciones descrito en la Tabla 1 usando la función In Range. Para hacerlo se usaron dos estructuras de caso, una para establecer los rangos separados por tipo de máquina, y otro para establecer la zona de severidad en que la máquina se encuentra. La selección del tipo de máquina que se está usando, los niveles de severidad y del nivel de vibración presente pueden observarse en la página “Análisis de Severidad” en el Panel de Usuario.

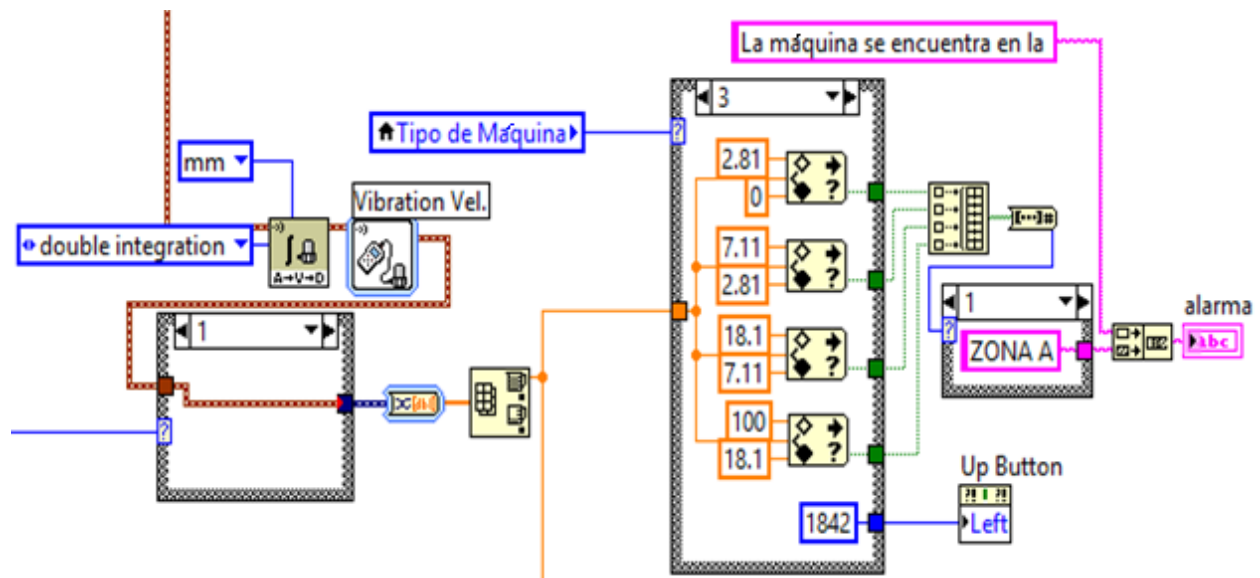


Figura 5. Cálculo de nivel de severidad de la señal.

Adicionalmente, usando nuevamente los VIs SVL Integration y Vibration Level se calcularon valores importantes tales como los valores RMS para la aceleración, velocidad y desplazamiento para ambos sensores (asumiendo el uso de acelerómetros en la posición X y Y de la máquina rotatoria). También se calculó la frecuencia dominante usando el VI Extract Single Tone Information. Esta información puede observarse junto con sus correspondientes gráficos en la página “Análisis de Vibraciones” en el Panel de Usuario del programa.

PRESENTACIÓN DE DATOS

La presentación de datos importantes para el usuario del programa se hizo en la forma de gráficos e indicadores numéricos que muestran la aceleración, velocidad y desplazamiento (dependiendo del tipo de integración que se haga). También se hizo un gráfico del espectro de potencia en el dominio de la frecuencia.

Se programó un panel de usuario que fuera agradable a la vista y fácil de usar. El interfaz está compuesto de cuatro pantallas:

- 1) **Página principal** – La Figura 6 muestra la pantalla inicial en donde se decidirá de dónde se tomarán los datos para analizar. Los datos pueden tomarse de un acelerómetro en línea (medición sincrónica) o de un archivo que se haya guardado con mediciones hechas (medición asincrónica). Dependiendo del tipo de adquisición de datos seleccionado el recuadro en la parte derecha de la pantalla cambia para adecuarse. Por ejemplo, en el caso de adquirir la señal de un sensor aparece información de configuración de dicho sensor (sensibilidad, filtro a usar, etc.) y en el caso de un archivo entonces aparece un diálogo para cargar el documento con extensión *.xls o *.txt y la ubicación de los sensores (en que columna se encuentran). Igualmente hay un espacio para configurar las unidades de desplazamiento que se desea usar (milímetros o pulgadas).

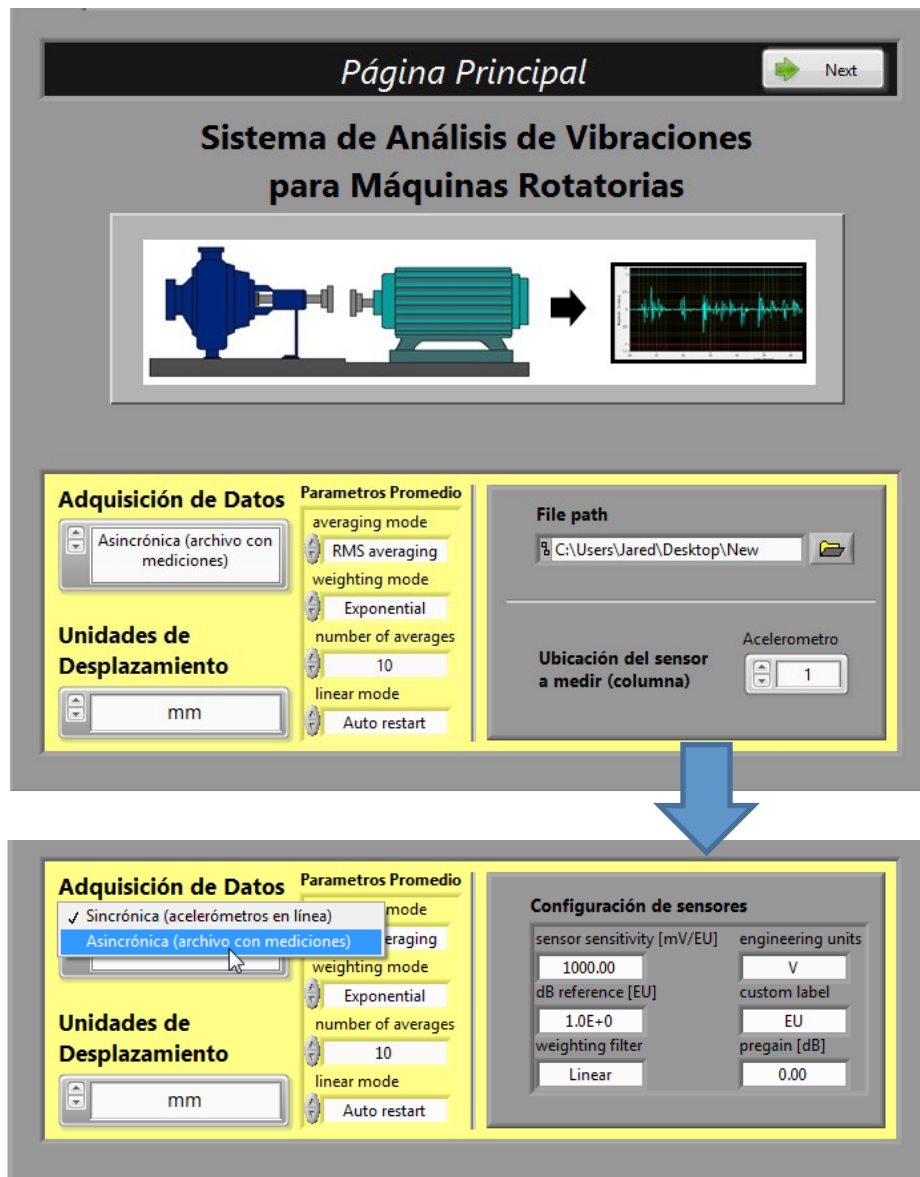


Figura 6. Página principal del programa.

2) **Análisis de severidad** – En la Figura 7 puede observarse la segunda pantalla, la cual muestra mediante un dial de aguja y un indicador numérico el nivel actual de vibración medido a partir de la velocidad. También permite que el usuario especifique qué tipo de máquina está monitoreando (basado en la potencia y tipo de montaje de la máquina establecida en la Tabla 1). Esta selección hace que se identifique claramente en donde está ubicado (usando una flecha) y cuál nivel de severidad de vibración está presente. Adicionalmente una leyenda de texto indica en qué zona de severidad se encuentra la máquina. Esta configuración permitirá a la herramienta informática identificar en qué nivel (A, B, C o D) se encuentra la vibración que el sistema está experimentando.

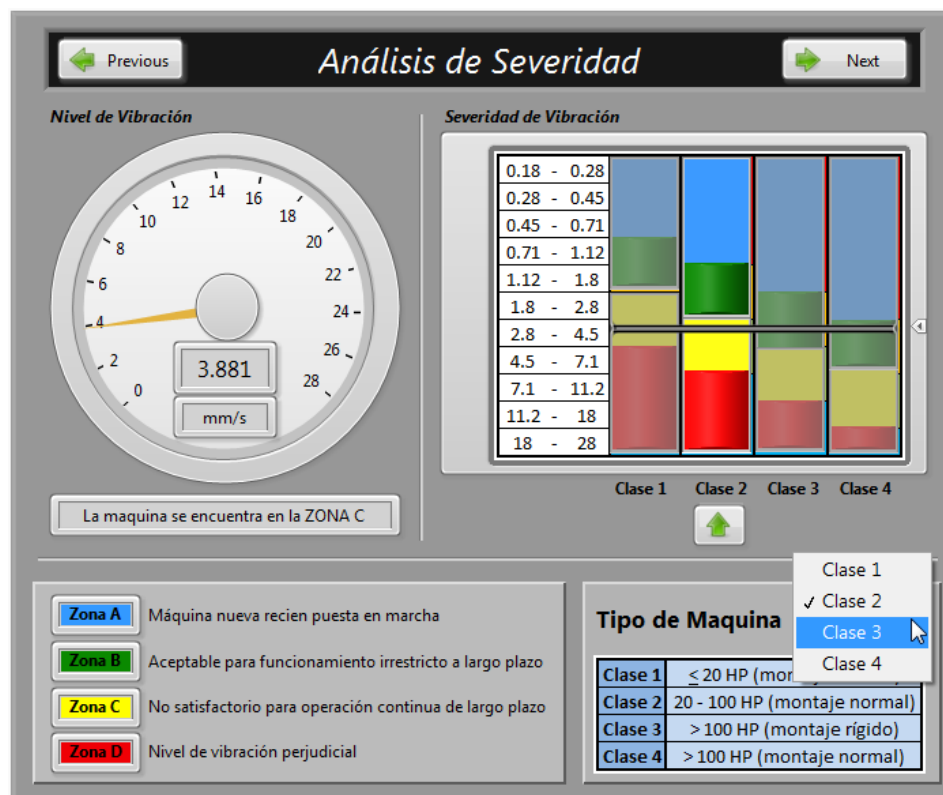


Figura 7. Página análisis de severidad.

3) **Análisis de vibraciones** – En la Figura 8 se puede observar la penúltima pantalla del programa. Esta pantalla muestra dos gráficos:

- 3.1) **Aceleración** – En la parte superior se muestra la aceleración de la señal del sensor que está siendo medido.
- 3.2) **Velocidad/Desplazamiento** – En la parte inferior se muestra la velocidad o el desplazamiento capturada por el sensor. La decisión de desplegar uno u otro depende de la selección de integración sencilla (velocidad) o doble (desplazamiento) hecha en la parte inferior izquierda de la pantalla.

En la esquina inferior derecha de la pantalla también se presenta información de los valores RMS de la aceleración, velocidad y el valor de frecuencia calculado. Estos valores son dependientes del sensor que se desee medir (X o Y).

4) **Espectro de potencia** – En la Figura 9 se puede observar la última pantalla del programa. Esta pantalla muestra el gráfico del espectro de potencia (power spectrum). Esta gráfica se despliega en la última pantalla parte inferior derecha y muestra la conversión de la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia mediante el uso de FFT. Para realizarla fue necesario usar el VI expreso Spectral Measurement configurado para hacer una FFT.



Figura 8. Página análisis de vibraciones.

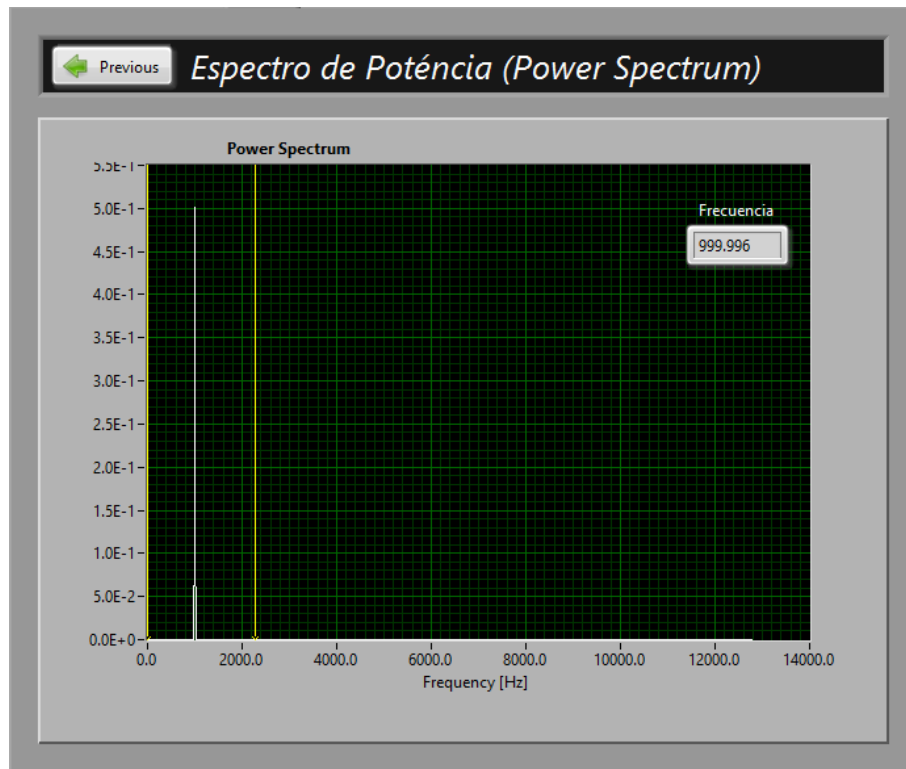


Figura 9. Página espectro de potencia y frecuencia.

El movimiento entre pantallas se programó usando los botones colocados en la parte superior del programa, un TAB control y un contador mediante la función de shift register. El programa quedó listo para agregar en el futuro otras funciones adicionales tales como el análisis estadístico (gráficos de control) de las señales adquiridas, análisis de fallos en rodamientos, bandas y ruedas dentadas, etc.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Inicialmente se usaron valores simulados mediante el uso del VI svx_Signal Generation para probar el funcionamiento del programa desarrollado simulando señales sinusoidales de 15, 30 y 60 Hz. Los resultados fueron los siguientes:

- 1) Los gráficos de aceleración, desplazamiento y velocidad se mostraron de forma apropiada y lógica.
- 2) Debido a que la señal simulada tenía un porcentaje de error muy pequeño (10 mV) el desplazamiento calculado fue muy pequeño (ver Tabla 2).
- 3) El VI de medición espectral: Power Spectrum determinó de forma correcta la frecuencia de la señal simulada sin ningún tipo de error.

En vista que se observó el comportamiento esperado en las variables de las pantallas, se decidió hacer pruebas con señales tomadas de acelerómetros reales. Para hacer esto se usaron los archivos enviados por la compañía Spectraquest. Las muestras correspondían a señales de una máquina en buen estado corriendo a 15, 45 y 60 Hz. Se procedió a ingresar los datos y a correr el programa con las señales de estos archivos. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- 1) Los gráficos de aceleración, desplazamiento y velocidad se mostraron de forma apropiada y lógica.
- 2) Debido a que la señal provenía de una máquina en buen estado y con frecuencias bajas, el desplazamiento registrado fue bajo (ver Tabla 2).
- 3) El VI de medición espectral: Power Spectrum no logró determinar de forma correcta la frecuencia de la señal simulada. De hecho en ninguno de los casos pudo determinarse la frecuencia, entregando valores tan inverosímiles como 0.13, 0.16 y 0.39 Hz respectivamente. Se asume que existió algún tipo de error a la hora de tomar la información, sin embargo, al ser esta información provista por un tercero (Spectraquest), no se tuvo acceso a hacer cambios o mejoras en la forma de adquisición de la señal.

Tabla 2. Desplazamiento en señal simulada y real para 15, 45 y 60 Hz.

Frecuencia	Desplazamiento Calculado	
	Señal Generada por VI Simulador	Archivo con Señal de Acelerómetros
15 Hz	1.7 E-5	2.2 E-3
45 Hz	5.7 E-6	6.8 E-3
60 Hz	4.3 E-6	6.7 E-3

Finalmente, se tomó el sensor acelerómetro CMCP 1000 y se conectó al módulo cDAQ 9172 descrito en la sección de hardware mecánico y electrónico para confirmar la capacidad del sistema para leer sensores. Por falta de un banco de pruebas no se pudo comprobar su funcionamiento usando una frecuencia de rotación específica, pero si se observó reacción en los gráficos y variables de medición ante movimientos de cambio de aceleración en el sensor.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se investigó cómo desarrollar un sistema de monitoreo y diagnóstico que revise el nivel de severidad de las vibraciones que experimenta una máquina rotatoria. Usando la información recogida se procedió a construir el sistema propuesto. El sistema fue probado usando señales simuladas y señales guardadas en un archivo producidas por un banco de pruebas en un centro de investigación en Virginia, EE.UU. Adicionalmente, el sistema se conectó a un sensor acelerómetro para probar su funcionamiento. Los logros obtenidos fueron los siguientes:

- 1) Se creó un sistema que actualmente es capaz de tomar información simulada y graficar la aceleración, velocidad y desplazamiento y obtener la información de frecuencia de la señal adecuadamente.
- 2) Este sistema también puede graficar apropiadamente la señal proveniente de información registrada de acelerómetros y guardada en un archivo de texto. Sin embargo, a pesar de que el sistema captura el desplazamiento, no se pudo validar que el desplazamiento obtenido es en efecto correcto. Adicionalmente, no pudo validarse la habilidad del sistema para graficar y capturar la frecuencia de la señal.
- 3) El sistema puede leer señales directamente de acelerómetros; sin embargo, no se logró probar extensamente debido a la falta de un banco de pruebas en donde realizar la experimentación.
- 4) Este sistema toma la información de vibración y la analiza contra rangos de severidad pre-establecidos y presenta un panel de usuario fácil de usar y atractivo.

Por lo tanto, el propósito original del proyecto se logró completamente sólo para señales simuladas y de forma parcial para señales reales obtenidas de un archivo de texto, debido a que a pesar de que se logró capturar los gráficos de aceleración,

velocidad y desplazamiento no se obtuvieron valores aceptables de frecuencia. Será necesario hacer más pruebas con sensores reales para hacer las correcciones necesarias en el programa. Este banco de pruebas servirá igualmente para hacer pruebas más conclusivas sobre el funcionamiento del sistema con acelerómetros reales. Para esto se sugiere construir un banco de pruebas consistente de un motor, un variador de frecuencia, chumaceras, eje, en donde puedan hacerse este tipo de pruebas y no depender de archivos enviados por terceros.

En conclusión, se logró parcialmente el objetivo de crear un sistema capaz de medir y analizar las vibraciones de máquinas rotatorias. En vista de que lo único que se requiere para su funcionamiento es una laptop existente corriendo la aplicación desarrollada, una tarjeta de adquisición de datos y un acelerómetro (un total de \$500), se podría decir que se logró el objetivo de crear un sistema de bajo costo pues un sistema típico de monitoreo de vibraciones cuesta entre \$3000 - \$5000.

El sistema puede mejorarse mucho con algunas recomendaciones:

- 1) Conseguir un banco de pruebas en donde realizar experimentos en los laboratorios de UNITEC. Este sistema debe estar constituido por un motor AC, un variador de velocidad, un eje sujeto entre chumaceras, etc. Este sistema será usado para generar experimentos que permitan corregir los errores que se han presentado en el proyecto en la actualidad.
- 2) Experimentar con acelerómetros de bajo costo conectado un microcontrolador PIC o Arduino. Este sistema podría sustituir al acelerómetro piezoeléctrico y la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments. La comunicación con la PC podría hacerse via serial (RS232) o vía inalámbrica. Esto reduciría aún más el costo final del sistema pasándolo de \$500 a \$100.
- 3) Investigar y experimentar como desarrollar otras herramientas para el análisis de vibraciones para tratar de diagnosticar fallos en elementos tales como balineras (rodamientos), bandas, ruedas dentadas, etc.

BIBLIOGRAFIA

- Carden, E.P. y Fanning, P. (2004). Vibration Based Condition Monitoring: A Review. *Structural Health Monitoring* 2004 3: 355. Recuperado el 5 de Agosto 2012, de <http://shm.sagepub.com/content/3/4/355>.
- Fluke Corporation. An Introduction to machinery vibration. Recuperado el 8 de Julio 2012, de <http://www.reliableplant.com/Read/24117/introduction-machinery-vibration>.
- Horner, R.M.W., El-Haram, M.A., y A.K. Munns (1997). Building maintenance strategy: a new management approach, *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 3 No. 4, pp. 273-280.
- Moubray, J (2001). *Reliability-Centered Maintenance*. NY: NY Industrial Press.
- Knapp, G.M. and Wang, H.P. (1992), "Machine fault classification: a neural network approach", *International Journal of Production Research*, Vol. 30 No. 4, pp. 811-23.

National Instruments (2011). Página web de National Instruments [Online]. Recuperado el 10 de Septiembre 2012, de <http://www.ni.com>.

National Instruments (2012). Vibration Analysis and Signal Processing in LabVIEW. Recuperado el 29 de Agosto de 2012, de <http://www.ni.com/white-paper/9230/en>

Raheja, D., Llinas, J., Nagi, R. y Romanowski, C. (2006). Data fusion/Data mining based on architecture for condition based maintenance. *International Journal of Production Research*.

Travis, J. y King, J. (2009). LabVIEW for Everyone, 3rd Edition, Prentice Hall.

GRT Ingenieria http://grtingenieria.com/?page_id=43

Spectraquest <http://spectraquest.com/>

“LA REVISTA INNOVARE NO SE HACE RESPONSABLE EN NINGÚN CASO DE LOS CONTENIDOS, DATOS, CONCLUSIONES U OPINIONES VERTIDAS EN LOS ARTÍCULOS PUBLICADOS, SIENDO ESTA RESPONSABILIDAD EXCLUSIVA DEL (DE LOS) AUTOR (AUTORES)”