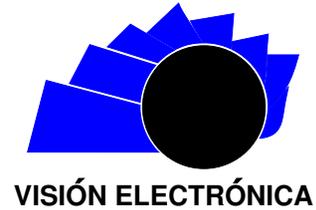




## Visión Electrónica

*Más que un estado sólido*

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/visele/index>



VISIÓN DE CASO

### Diagnóstico de rodamientos con vibraciones mecánicas e instrumentos virtuales

*Diagnosis of bearing with mechanical vibrations and virtual instruments*

Víctor Manuel Gómez Ramírez<sup>a</sup>, Juan Carlos Serna Bedoya<sup>b</sup>, Luisa Vélez López<sup>c</sup>,

#### INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

##### Historia del artículo:

Enviado: Diciembre de 2014

Recibido: Enero de 2015

Aceptado: Febrero de 2015

##### Palabras clave:

Análisis de vibraciones mecánicas

Densidad espectral de potencia

Instrumentación virtual

Rodamientos.



##### Keywords:

Mechanical vibration analysis

Power spectral density

Virtual instrument

Bearings

#### RESUMEN

El análisis de vibraciones mecánicas tiene gran importancia dentro del mantenimiento basado en condición; y en este sentido, se ha evidenciado que los rodamientos son los elementos que mayor incidencia tienen en las paradas de maquinaria rotativa. Por lo anterior, el presente trabajo describe la arquitectura hardware y el software de un analizador de vibraciones desarrollado en LabVIEW® orientado a estudiar rodamientos extrayendo sus parámetros o descriptores a través de la densidad espectral de potencia (DEP) y los valores RMS y DC de la señal en el tiempo. Como resultado, se ilustran las ventajas de trabajar con este tipo de soluciones: costo y la posibilidad de aumentar las prestaciones según las necesidades.

#### ABSTRACT

The mechanical vibration analysis has great importance in the condition based maintenance; in this sense, the bearings are elements that affect more stops rotating machinery. Therefore, this paper describes the hardware and software architecture of a vibration analyzer developed in LabVIEW® oriented to study bearings extracting its parameters or descriptors through the power spectral density (PSD) and the RMS and DC signal values in time. Shows the advantages of working with such solutions: cost and the possibility of increasing benefits as needed.

<sup>a</sup>Ingeniero electrónico, M.S.c. en Ingeniería, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia. e-mail: [vramirez@pascualbravo.edu.co](mailto:vramirez@pascualbravo.edu.co)

<sup>b</sup>Ingeniero electrónico, Equipel S.A.S, Medellín, Colombia, e-mail: [juan.serna@equipel.com](mailto:juan.serna@equipel.com)

<sup>c</sup>Ingeniera electrónica, Institución Universitaria Pascual Bravo, Medellín, Colombia. e-mail: [luisaisabelvelezlopez@gmail.com](mailto:luisaisabelvelezlopez@gmail.com)

## 1. Introducción

Las empresas deben mantener las máquinas rotativas en adecuadas condiciones de funcionamiento para responder a los compromisos de productividad. Industria y Academia han invertido bastantes recursos en la búsqueda de métodos que permitan la detección temprana de una falla [1]. Para lograrlo, utilizan herramientas como las emisiones acústicas, análisis de aceites, análisis de partículas, monitoreo de la corrosión, termografía y el análisis de vibraciones mecánicas, siendo este último uno de los métodos más generalizados [2].

Algunas causas de las vibraciones son las fisuras, los fallos en rodamientos, los fallos en engranajes y las soldaduras. Sin embargo, las fallas en los rodamientos son la causa más común de paradas de la maquinaria rotativa [3].

Un mantenimiento basado en condición se lleva a cabo en tres pasos claves [4]:

- Adquisición de datos.
- Procesamiento, análisis e interpretación de señales.
- Toma de la decisión de mantenimiento.

El diagnóstico de las fallas de la maquinaria es un procedimiento de correlación de la información obtenida en la medición con los fallos de la máquina. Este proceso es llamado reconocimiento de patrones [5].

Se han clasificado las técnicas de análisis de señales en tres categorías: análisis en el dominio de la frecuencia, análisis en el dominio del tiempo y análisis en tiempo-frecuencia.

Las características de la señal en el tiempo se extraen con herramientas de estadística descriptiva (media, valores pico, el factor de cresta, etc.) y estadística de orden superior como la raíz cuadrática media (RMS), y la kurtosis, etc. El valor RMS es tal vez la medida más común empleada en los estándares y se calcula por la ecuación 1:

$$f_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [f(t)]^2 dt} \quad (1)$$

Por otra parte, la transformada de Fourier es una herramienta matemática comúnmente empleada para el análisis en frecuencia de señales temporales. La transformada de Fourier está dada por:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \chi(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2)$$

Donde  $\chi(t)$  es la señal a transformar y  $X(f)$  es la transformada de Fourier.

Es indudablemente la técnica más efectiva para determinar defectos en maquinaria rotativa [2]. Esta técnica permite identificar fallas típicas tales como desbalanceo

de rotores, desalineamiento, soldaduras mecánicas y defectos en rodamientos. La idea del análisis frecuencial es encontrar la relación entre la frecuencia de las componentes en el espectro y la frecuencia de las fuerzas dinámicas que generan las vibraciones [6], [7].

Desde el punto de vista práctico, es válido hablar de la densidad espectral de potencia, que se obtiene de la transformada de Fourier, la cual informa sobre la distribución de potencia en las distintas frecuencias de análisis.

Para la recolección de datos y el análisis de vibraciones existe una gran cantidad de equipos comerciales, la mayoría de ellos incluye solamente técnicas básicas de análisis digital de señales, son de arquitectura cerrada y costos elevados.

De acuerdo con lo expuesto, el artículo se estructura de la siguiente forma: en la sección 2 se ilustran los materiales y métodos, enfatizando en la arquitectura del sistema de adquisición de datos, y en los parámetros a definir, así como en el software analizador virtual de vibraciones desarrollado en LabVIEW®. En la sección 4 se describen las pruebas realizadas con datos. En la 5 se muestran los resultados y su discusión; y en la 6 las conclusiones.

## 2. Materiales y métodos

En los laboratorios de las universidades se tiene la necesidad de tener un sistema económico, con arquitectura abierta y que permita implementar procedimientos complejos para entender a profundidad los fenómenos vibratorios, con el propósito de comprender a fondo las técnicas de diagnóstico y así evaluar y proponer técnicas de análisis.

Existe una amplia cantidad de técnicas para analizar señales vibratorias con propósitos de diagnóstico. En este trabajo se presenta el desarrollo de una plataforma que extrae parámetros o descriptores de rodamientos a través de la densidad espectral de potencia, valores RMS y DC de la señal en el tiempo.

### 2.1. Sistema de adquisición de datos

Un sistema genérico de adquisición de datos está compuesto por el siguiente hardware [8]:

- Computador.
- Tarjeta de adquisición de datos.
- Sistema de acondicionamiento.
- Transductor.
- Cable.

El proceso de captura de datos analógicos a través de computadores personales es realizado por las tarjetas de adquisición. La adquisición básicamente realiza la operación de conversión análogo/digital (A/D). Para la adquisición de señales dinámicas, como las de vibración, se recomienda utilizar tarjetas de adquisición de datos con alta resolución (mayor de 16 bits), bajo nivel de ruido y con una velocidad de muestreo por canal mayor de 100 kHz, [9].

Los transductores son los encargados de medir los fenómenos físicos y proveer una señal eléctrica que pueda ser tomada por una tarjeta de adquisición.

Los transductores utilizados para la medición de vibraciones son los acelerómetros piezoeléctricos, además de los velocímetros y los sensores de desplazamiento sin contacto; tanto los velocímetros como los sensores de desplazamiento son útiles cuando las frecuencias a analizar son relativamente bajas. La gran mayoría de estos sensores son activos, es decir que requieren suministro de voltaje, además, algunos requieren de un acondicionamiento especial, como disminución de impedancia, aislamiento y amplificación. El sensor que se utiliza en este instrumento es un acelerómetro piezoeléctrico IEPE SKF de sensibilidad  $100\text{ mV/g}$  (milivoltios por gravedad), figura 1. Los sensores IEPE contienen electrónica integrada, por lo tanto no necesitan amplificadores de carga y son menos inmunes al ruido, entre otras ventajas.

**Figura 1.** Sensor piezoeléctrico,  $100\text{ mV/g}$ .



**Fuente:** [10].

La tarjeta de adquisición utilizada para este proyecto está constituida por chasis USB NI- CompactDAQ 9172, ver figura 2, y un módulo NI de I/O C series 9234, figura 3, que ofrece cuatro canales independientes de entrada para acelerómetros con conectividad BNC, un rango de entrada de  $\pm 5\text{V}$ , posee acondicionamiento integrado para acelerómetros IEPE, detección de frecuencias de hasta 25.6 kHz, características de A/Ds delta-sigma simultáneos, resolución de 24 bits, acoplamiento en AC/DC, y filtros incluidos analógicos y digitales que permiten adquirir señales de vibración con una gran precisión y exactitud.

**Figura 2.** Chasis cDAQ 9172.

NI cDAQ-9172



**Fuente:** [8].

**Figura 3.** Módulo I/O C series 9234.



**Fuente:** [8].

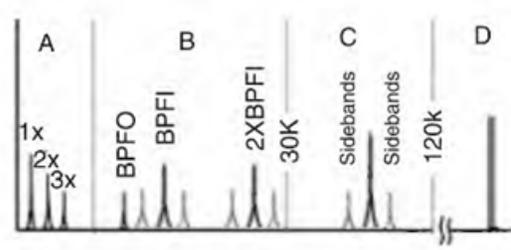
El analizador desarrollado permite extraer de las señales la información relevante, utilizando técnicas de procesamiento digital de señales. Se utilizó como plataforma de desarrollo el Software LabVIEW® 2009 (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench).

## 2.2. Definición de parámetros

En la literatura se divide el espectro de frecuencias de falla de un rodamiento en cuatro zonas, figura 4, por lo que se ha desarrollado el sistema considerando estos conceptos.

Se emplea la FFT para definir los parámetros sobre los intervalos del espectro donde, se espera, manifieste la falla del rodamiento: 3 parámetros definidos con un ancho de banda de 5 Hz, asociados a la frecuencia de giro del sistema y sus dos primeros armónicos. 6 parámetros definidos con un ancho de banda de 6 Hz, asociados a las frecuencias de falla en pista y en elementos rodantes y sus dos primeros armónicos. En total se analizan 9 parámetros basados en la Densidad Espectral de Potencia (DEP). A continuación se realiza una presentación detallada.

**Figura 4.** Zonas de Falla de un rodamiento.



**Fuente:** elaboración propia.

La ecuación que define los parámetros relacionados con falla en los elementos rodantes es:

$$P_{NXFrp} = \int_{NF_{rp}-3}^{NF_{rp}+3} DEP(f) df \quad (3)$$

Donde  $P_{NXFrp}$  es la potencia de la señal alrededor de las frecuencias consideradas,  $NX$  denota la frecuencia de giro y los 2 armónicos ( $1X$ ,  $2X$  o  $3X$ ),  $NF_{rp}$  es la frecuencia central de falla de los elementos rodantes y de sus armónicos ( $1F_{rp}$ ,  $2F_{rp}$ ,  $3F_{rp}$ ) y  $DEP(f)$  es la densidad espectral de potencia.

La ecuación que define los parámetros relacionados con falla en pista exterior es:

$$P_{NXFep} = \int_{NF_{ep}-3}^{NF_{ep}+3} DEP(f) df \quad (4)$$

Donde  $P_{NXFep}$  es la potencia de la señal alrededor de las frecuencias consideradas,  $NX$  denota la frecuencia de giro y los 2 armónicos ( $1X$ ,  $2X$  o  $3X$ ),  $NF_{ep}$  es la frecuencia central de falla de la pista exterior y sus armónicos ( $1F_{ep}$ ,  $2F_{ep}$ ,  $3F_{ep}$ ) y  $DEP(f)$  es la densidad espectral de potencia.

La ecuación que define los parámetros relacionados con la velocidad de giro es:

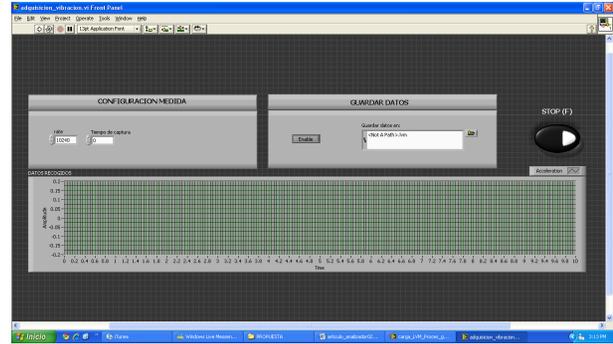
$$P_{NX} = \int_{NX-2.5}^{NX+2.5} DEP(f) df \quad (5)$$

Donde  $P_{NX}$  es la potencia de la señal alrededor de las frecuencias consideradas,  $NX$  denota la frecuencia de giro del eje y sus dos primeros armónicos:  $1X$ ,  $2X$ ,  $3X$ .

En cuanto a la estadística de orden superior se ha definido la raíz cuadrática media por ser el valor de más amplio uso en análisis de vibraciones.

El desarrollo del VI se descompone en 2 ventanas, una primera interfaz en la que se especifica la ruta donde se guardarán los datos y que permite hacer la captura de la señal, figura 5.

**Figura 5.** Interfaz de Captura.



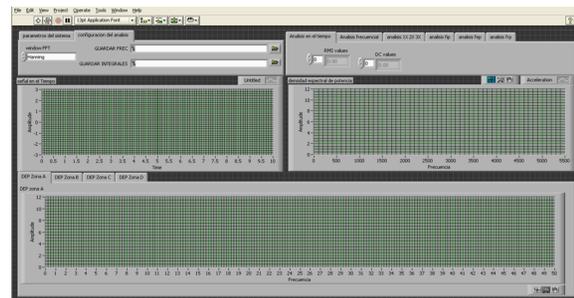
**Fuente:** elaboración propia.

El tiempo de captura esta predefinido a 10s y se tiene configurado por defecto la frecuencia de muestreo a 10.240 KHz, lo cual limita el instrumento a observar frecuencias de hasta 5.1199 KHz con una resolución del espectro de potencia de 0.1 Hz. Tanto los valores de frecuencia de muestreo como el del tiempo de captura pueden ser cambiados de acuerdo a las necesidades de análisis.

Las señales de tiempo se procesan en la interfaz de análisis para extraer los parámetros definidos, figura 6, para ello es necesario introducir los parámetros del sistema mecánico, como la velocidad de giro y las frecuencias de falla de rodamiento a inspeccionar. También es posible elegir el tipo de ventana para evaluar la densidad espectral de potencia (Hanning, Hamming, Blackman-Harris, etc.), así como la ubicación donde será guardado el archivo de análisis.

Luego del proceso de análisis, el programa grafica debajo del área de configuración la señal de tiempo y en la parte superior derecha la densidad espectral de potencia.

**Figura 6.** Interfaz de procesamiento.



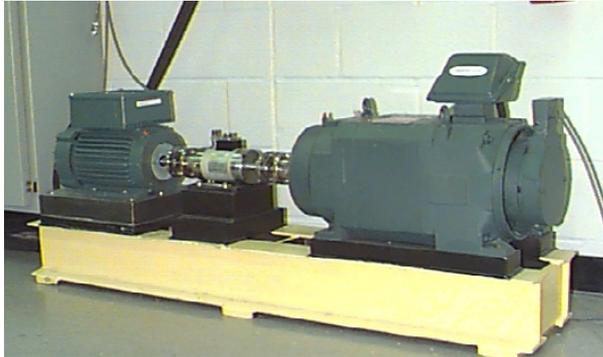
**Fuente:** elaboración propia.

### 3. Pruebas con datos

El montaje ha sido realizado por Case Western Reserve University [11], ver figura 7, quien ha cedido los datos de las mediciones, obtenidos de su propio diseño experimental, y serán utilizados para poner a prueba el procesamiento de la señal del VI.

Descripción del sistema:

**Figura 7.** Montaje para fallas en rodamientos.



Fuente: [11].

El montaje consiste de un motor de 2 HP (izquierda), un traductor de torque (centro), un dinamómetro (derecha) y electrónica de control.

Las características más relevantes del montaje se describen a continuación:

#### Características del rodamiento:

Rodamiento: 6205-2RS JEM SKF Frecuencia de falla del anillo interior (FIP) 160 Hz Frecuencia de falla del anillo exterior (FEP) 106 Hz Frecuencia de falla de los elementos rodantes (FRP) 130 Hz

#### Descripción de las fallas:

Las fallas fueron introducidas en la pista interior a través de descargas eléctricas que produjeron diámetros de falla en el rodamiento de 0.007, 0.014, y 0.021 pulgadas.

#### La carga:

La carga se mantuvo constante para todas las pruebas.

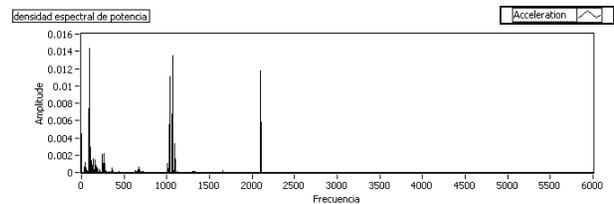
#### Toma de las medidas:

Se tiene una señal de gravedad (g) contra tiempo para las condiciones de funcionamiento sin falla, falla de 0.007, 0.014, 0.021 pulgadas, por lo tanto contamos con 4 señales a analizar.

Se obtuvieron las gráficas de la DEP -medida en ms<sup>2</sup>/Hz- contra frecuencia –medida en Hz-, para cada uno de los ensayos, que se presentan en las figuras 8 a 11, también se obtiene la información presentada en las tablas 1 a 4 que ilustran los parámetros basados en la densidad espectral de potencia ms<sup>2</sup>/Hz. El término IR007, significa falla en pista interna de 0.007 pulgadas.

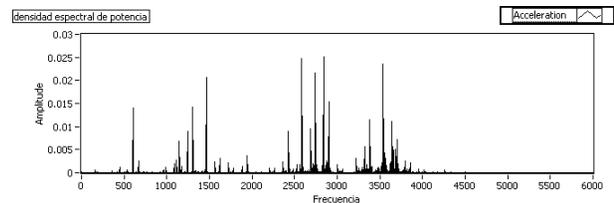
#### Gráficas:

**Figura 8.** Sistema a 1772 RPM sin falla.



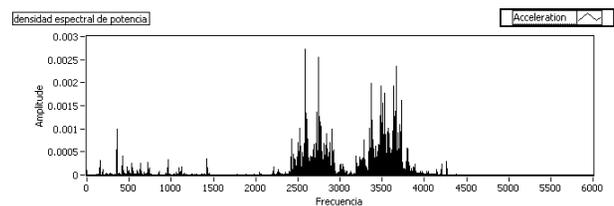
Fuente: elaboración propia.

**Figura 9.** Sistema a 1772 RPM falla en pista interior de 0.007”.

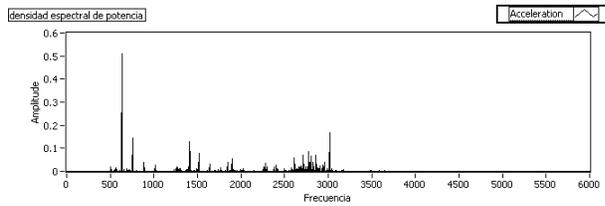


Fuente: elaboración propia.

**Figura 10.** Zona B, sistema a 1772 RPM falla en pista interior de 0.014”.



Fuente: elaboración propia.

**Figura 11.** Sistema a 1772 RPM falla en pista interior de 0.028".

**Fuente:** elaboración propia.

**Tabla 1.** Potencia a la frecuencia de giro y dos de sus armónicos para los 4 ensayos.

Ensayo	Potencia 1X	Potencia 2X	Potencia 3X
Normal	6.502216E-05	4.776764E-05	7.689555E-04
IR007	4.316380E-08	1.205493E-06	1.720492E-07
IR014	2.422525E-07	3.804510E-07	1.145404E-07
IR028	4.917403E-07	1.150086E-06	4.065819E-07

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 2.** Potencia a la frecuencia de falla FIP y dos de sus armónicos para los 4 ensayos.

Ensayo	Potencia FIP	Potencia 2FIP	Potencia 3FIP
Normal	3.604130E-04	3.976265E-05	1.523323E-05
IR007	1.222264E-04	1.980971E-05	9.561975E-05
IR014	7.799987E-05	1.102007E-05	1.095519E-04
IR028	1.455221E-04	4.178050E-05	3.676506E-03

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 3.** Potencia a la frecuencia de falla FEP y dos de sus armónicos para los 4 ensayos.

Ensayo	Potencia FEP	Potencia 2FEP	Potencia 3FEP
Normal	1.057662E-03	1.446100E-04	3.917456E-05
IR007	4.866333E-06	3.319011E-05	2.714463E-05
IR014	4.887010E-06	2.948783E-05	1.277489E-05
IR028	1.832972E-05	6.550926E-05	4.330747E-05

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 4.** Potencia a la frecuencia de falla FRP y dos de sus armónicos para los 4 ensayos.

Ensayo	Potencia FRP	Potencia 2FRP	Potencia 3FRP
Normal	4.793047E-08	1.976205E-08	1.576667E-08
IR007	2.213126E-10	2.523694E-10	6.214103E-10
IR014	2.301518E-09	6.356633E-10	6.168439E-10
IR028	1.895579E-08	2.921704E-08	1.657927E-08

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4. Discusión de resultados

Como puede observarse en las figuras 8 a 11 los primeros indicios de los fallos en los rodamientos dan vibraciones a unas frecuencias altas, a medida que la falla aumenta se nota un incremento en potencia disipada en esta zona D. Ya en el ensayo 4 se puede observar una disminución en la potencia de la zona D y el incremento de la potencia en el segundo armónico de la frecuencia de falla de la pista interior al valor  $3.676506E-03$ , como puede verse en la tabla 2. En las tablas se observa con mayor claridad esta tendencia, en la tabla 2 puede verse que a medida que va aumentando el fallo la potencia del tercer armónico también lo hace, además en las otras tablas se observa que las magnitudes de la potencia para las otras frecuencias de falla permanecen mucho menores, del orden de  $10^{-5}$  e inferiores.

#### 5. Conclusiones

En esta investigación se ha desarrollado un analizador de vibraciones enfocado a estudiar rodamientos. Es una herramienta flexible ya que posee una arquitectura abierta, con posibilidades de modificación y mejoras futuras. Contiene módulos de adquisición y lectura de datos y se pueden implementar nuevas técnicas de análisis.

En este analizador se ha implementado la técnica de Densidad espectral de potencia para cuantificar la potencia disipada por las fallas en un rodamiento buscando el análisis y diagnóstico de fallas, mediante el análisis de vibraciones.

Gracias a que la recolección de los datos se realiza desde un computador a través de la aplicación desarrollada en LabView®, resulta una alta flexibilidad para transportarlos hacia otras aplicaciones.

## Referencias

- [1] Moreno Sánchez R., Pintado Sanjuán P., Alonso Sánchez F.J., Chicharro Higuera J.M., Morales, Robredo A.L., Nieto Quijorna A.J. "Evaluación y comparación de modelos de diagnóstico de fallos en engranajes utilizando las señales de vibraciones mecánicas", 8º congreso iberoamericano de ingeniería mecánica, Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007.
- [2] Cornelius Scheffer, Paresh Girdhard, "Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance", Oxford: Jordan Hill, 2004
- [3] C.Castejón, O., Lara, J.C. García-Prada, "Automated diagnosis of rolling bearings using MRA and neural-networks", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol 24 No 1 pp. 289-299, 27 June 2009.
- [4] J. Lee, R. Abujamra, A.K.S. Jardine, D. Lin, D. Banjevic, "An integrated platform for diagnostics, prognostics and maintenance optimization", in: The IMS '2004 International Conference on Advances in Maintenance and in Modeling, Simulation and Intelligent Monitoring of Degradations, Arles, France, 2004.
- [5] Andrew K.S. Jardine, Daming Lin, Dragan Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance, Mechanical Systems and Signal Processing" (2006) pp.1483–1510.
- [6] S. Goldman. "Vibration Spectrum Analysis". Industrial Press Inc. 2nd edition. New York, USA, pp. 83-85, 113-122. 1999
- [7] J. Mitchell. "Introduction to Machinery Analysis and Monitoring". Pennwell Books. 2nd edition. Oklahoma, USA, pp. 134-160. 1993.
- [8] National Instruments, Febrero 2008. [En línea]. Disponible en: [www.ni.com](http://www.ni.com).
- [9] T. Butcher. "10 Questions to ask when selecting your sound and vibration measurement system". Enero 2006. [En línea]. Disponible en: [http://www.ni.com/academic/instructor/meche\\_dynamics\\_vibration.htm](http://www.ni.com/academic/instructor/meche_dynamics_vibration.htm)
- [10] SKF Group "The Power of Knowledge Engineering" Julio 2014 [En línea]. Disponible en: [www.skf.com](http://www.skf.com)
- [11] Case Western Reserve University, Julio 2014 [En línea]. Disponible en: <http://www.eecs.cwru.edu/laboratory/bearing>.