

.....

# Clasificación automática de patrones de vibraciones mecánicas en maquinaria rotativa afectada por desbalanceo

## Automatic Classification of mechanical vibration patterns in rotating machinery affected by unbalance

Camilo Leonardo Sandoval\*, Andres Alejandro Barros\*\* y Sergio Herreño\*\*\*

### Abstract

In this paper, we present an algorithm for automatic classification of vibration patterns on rotating machinery affected by unbalance from spectral analysis. We developed this algorithm using case-based reasoning and various descriptors. The raised descriptors were: The root mean square value (RMS), the energy of Fourier spectra, the Higher Order frequency moments and the maximum value of the Fourier spectra. The job was to induce imbalance to a universal motor, taking the vibration signal in time domain by 3300 XL 8mm Proximity sensors and through a data acquisition card NI USB 6008, bringing data to the computer where we implemented a virtual instrument for capturing data and its subsequent transformation to obtain frequency spectrum. Consequently, we developed the algorithm in Matlab to automatically identify the imbalance present in the machine, using the technique of case-based reasoning, based on the calculation of the descriptors and the application of these within the algorithm implemented using the Euclidean distance as part of the decision mechanism among patterns without unbalancing vibration. The results show the RMS as the best performing descriptor for classification showed.

**keywords:** Vibrational analysis, pattern recognition, failure descriptors on rotating machine , Fourier spectrum.

### Resumen

En este trabajo, se desarrolla un algoritmo de clasificación automática de los patrones de vibración en maquinaria rotativa afectada por desbalanceo a partir del análisis espectral. En este sentido, se propuso un algoritmo experto usando

---

Fecha Recibido: 2013-08-18

Fecha Aprobado: 2013-10-08

\* Msc. Ingeniería Electrónica Docente Facultad de Ing. Electromecánica Universidad Antonio Nariño-Bucaramanga, camisandoval@uan.edu.co

\*\* Egresado UAN Bucaramanga Ing. Electromecánica, anbarros11@hotmail.com

\*\*\* Egresado UAN Bucaramanga Ing. Electromecánica, sergioh.a@hotmail.com



razonamiento basado en casos y el planteamiento de diversos descriptores de la falla desde el punto de vista de la información obtenida de la transformada rápida de Fourier (fft), aplicada a los registros temporales. Los descriptores planteados fueron: El valor medio cuadrático (RMS), la energía, el valor máximo y los momentos de frecuencia de alto orden (HOFM). El trabajo entonces consistió en inducir un desbalanceo a un motor universal, tomar la señal de vibración en el dominio del tiempo mediante sensores proximitor 3300 XL 8mm y mediante una tarjeta de adquisición de datos USB 6008 de National Instruments, llevar los datos al computador en donde se implementó un Instrumento virtual para la captura la información y su posterior transformación para la obtención del espectro de frecuencias. Posteriormente, se desarrolló un algoritmo en Matlab para identificar de manera automática el desbalanceo presente en la maquina, mediante la técnica de razonamiento basado en casos, a partir del cálculo de los descriptores y la aplicación de estos dentro del algoritmo implementado usando la distancia euclidiana como parte del mecanismo de decisión entre patrones de vibración con y sin desbalanceo. Los resultados obtenidos revelan al RMS como el descriptor que mejor desempeño mostró para la clasificación.

**Palabras clave:** Análisis vibracional, Reconocimiento de patrones, descriptores de falla en maquina rotativa, espectro de Fourier.

## Introducción

El análisis de vibraciones mecánicas como mecanismo de diagnóstico en el contexto del mantenimiento predictivo en maquinaria rotativa, ha tenido un gran auge en las últimas décadas y en las diferentes industrias[1]. Como es sabido, esta técnica de análisis vibracional permite diagnosticar distintos modos de falla entre los cuales se encuentra el desbalanceo [2]. Es importante aclarar que el desbalanceo se caracteriza por presentar un aumento en la componente fundamental del espectro, mostrando de esta manera una característica (aumento en la componente fundamental) que permite la discriminación de los patrones asociados al desbalanceo, con respecto a otras anomalías en el funcionamiento de una maquina rotativa [3],[4], como pueden ser el desalineamiento, soltura de partes y claramente el funcionamiento normal de la maquina.

En el presente trabajo se ha dispuesto la realización de un algoritmo que se orienta a clasificar de manera automática los patrones de vibraciones mecánicas asociadas al desbalanceo, siendo capaz de decidir si la maquina en estudio

presenta o no esta anomalía. Para esto se tomo el modulo de análisis vibracional implementado por [1], el cual se describe en la siguiente sección. Así mismo, se uso reconocimiento de patrones el cual se basa según [5]-[7] en extraer ciertos descriptores (características de cada clase) y llevarlos a un mecanismo que decide la pertenencia de cada patrón a cada clase. En este sentido, el presente artículo reporta los descriptores utilizados para la clasificación, así como la implementación del clasificador usando razonamiento basado en casos e igualmente la evaluación del desempeño del clasificador para esta aplicación.

## Materiales

El presente trabajo se realizó a partir de inducir un desbalanceo al equipo de laboratorio implementado y validado por [1]. Dicho equipo consta de un motor universal, unos discos en donde se le colocan pequeñas masas para inducir el desbalanceo, un sensor proximitor 3300 XL 8mm, una tarjeta de adquisición de datos 6008 de National Instruments, un computador

portátil donde se encuentra el instrumento virtual (VI) que permite la adquisición de datos y el cálculo del espectro de frecuencias. Con este equipamiento se realizaron las mediciones de las señales en el dominio del tiempo que fueron posteriormente llevadas a la frecuencia para extraer los descriptores e implementar el clasificador. A continuación se señalan los distintos componentes del equipo de laboratorio utilizado en este trabajo.

### A. El motor

El motor empleado es un motor universal marca Dayton, AC/DC, modelo: 2M145 con alimentación 115 [Vrms] , un amperaje de 6,3 [A] y velocidad: hasta 10000 rpm. En la Fig. 1. puede verse el motor perteneciente al modulo en el que se realizaron las pruebas.

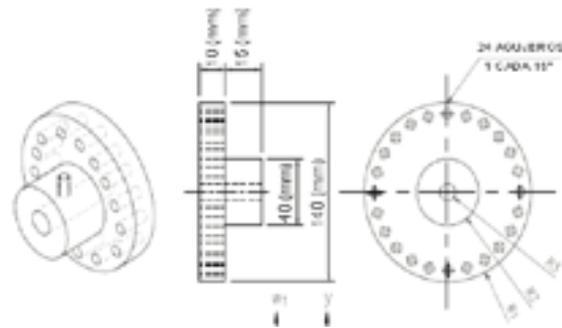
**Fig. 1.** Motor Universal perteneciente al banco. [1]



### Las ruedas

Las ruedas fueron diseñadas por [1] con el fin de aplicarle pequeñas masas que permitan inducir un desbalanceo en el eje del motor. Con el fin de tener una distancia uniforme se maquinaron 24 agujeros con una separación de 15° entre ellas. En la Fig.2. puede verse el plano de los discos y sus dimensiones.

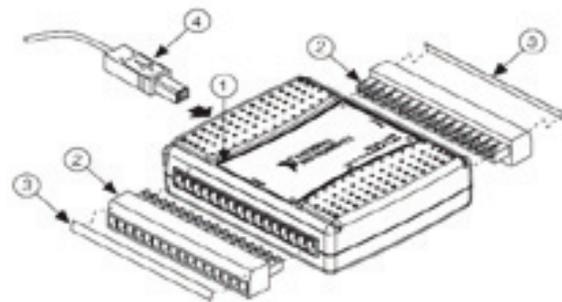
**Fig. 2.** Geometría de la rueda [1].



### c. Sensor y trata de adquisición de datos

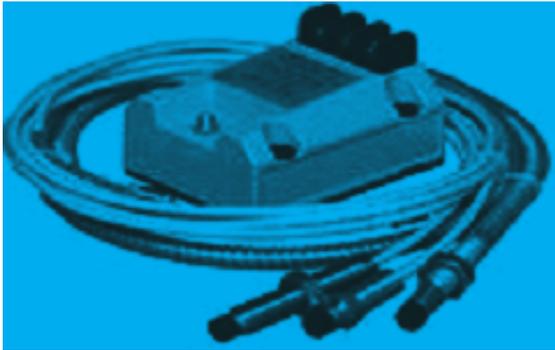
Para la adquisición de datos se seleccionó la tarjeta NI6008 de NationalInstrument, la cual proporciona 8 entradas analógicas (IA), dos salidas analógicas (OA); 12 canales de entrada / Salida digitales (IOD) y un contador de 32 bits con una interfaz de alta velocidad USB . En la Fig.3. se muestran cada una de sus partes: 1. Entradas analógicas (IA) 2. Borneras de conexión 3. Marquillas para borneras 4. Cable de conexión USB.

**Fig. 3.** Tarjeta de Adquisición de datos NI USB 6008. [1]



Adicionalmente, los sensores usados corresponden a sensores proximitor 3300 XL 8 mm de la marca Bently Nevada. Este proporciona una tensión de salida que es directamente proporcional a la distancia de la punta de sonda y la superficie observada. Esta sonda puede medir la posición estática del eje y los valores dinámicos. En la Fig.4. se ve un esquema de los sensores usados.

**Fig. 4.** Sensores utilizados. [1]



**Fig. 5.** Interfaz grafica del modulo [1].

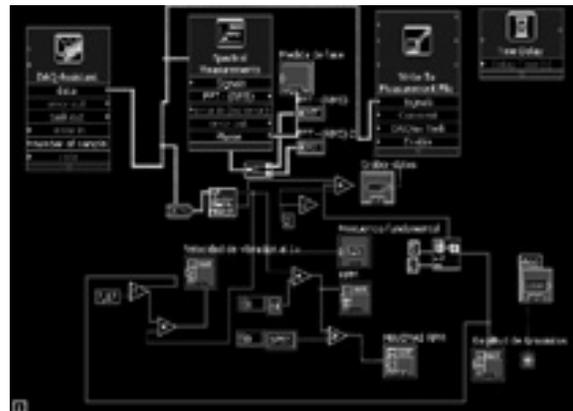


#### d. El instrumento Virtual para la Adquisición

El modulo de vibraciones tiene una interfaz grafica que permite la visualización de los espectros de frecuencia. Esta interfaz se muestra en la Fig.5.

Es importante destacar que para el desarrollo de la interfaz en [1] se implementó un diagrama de bloques que permitiera la adquisición y procesamiento de la señal. Para la adquisición se configuró un DAQ asistent, para una entrada de voltaje proveniente de los sensores. Así mismo se implementó la fft (transformada rápida de Fourier) para el análisis y cálculo de la frecuencia fundamental y la amplitud de los armónicos. En la Fig. 6 puede verse el diagrama de bloques implementado por [1].

**Fig. 6.** Diagrama de bloques para la adquisición y procesamiento de las vibraciones [1].



### 3. Métodos

La metodología se basó en inducir un desbalanceo en el eje, seguidamente la medición de las vibraciones a través de la interfaz, el cálculo de algunos descriptores de la falla y la implementación de un algoritmo para clasificación de patrones de vibración mecánica en maquinaria rotativa afectada por desbalanceo. En este sentido, para discriminar entre las dos clases (maquina con desbalanceo y maquina sin desbalanceo), se implementó un clasificador usando razonamiento basado en casos, utilizando los descriptores propuestos para alimentar dicho clasificador. A continuación se definen

cada una de las fases metodológicas llevadas a cabo en el presente trabajo, en relación a la toma de datos, cálculo de los descriptores y algoritmo de clasificación.

#### a. Toma de datos

Se define la toma de datos de manera exploratoria, teniendo en cuenta diferentes variantes como la posición de los sensores en el eje (lado acople o lado cojinete) además, teniendo en cuenta la carga, se realiza la toma de los mismos sin carga, con una sola carga en cada una de las posiciones de las ruedas que posee el eje (lado acople y lado cojinete), con una carga en cada una de las ruedas, y por último con dos cargas en cada una de las ruedas. Para cada una de

las variantes se tomaron registros a diferentes velocidades, a partir de las 600RMP y subiendo la velocidad 600RMP en cada prueba hasta llegar a los 3000RMP, ya que a mayor velocidad la vibración del sistema no permitió tomar los datos. Es decir, para cada variante descrita anteriormente se tomaron 5 registros, lo cual arroja un total de 50 registros.

### b. Calculo de los descriptores

Para el cálculo de los descriptores se realizó en primera instancia la fft a los datos obtenidos por el modulo. Adicionalmente, se calcularon los valores RMS del espectro así como la energía y valor pico del mismo. De igual forma se calcularon los momentos de frecuencia de alto orden (HOFM's) [8],[9]. En las ecuaciones 1- 4 se definen respectivamente dichos descriptores.

$$RMS = \frac{\text{Norm}(p(f))}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

Donde  $p(f)$  es el espectro de vibración y  $n$  son las distintas componentes frecuenciales del espectro. Así mismo,  $\text{Norm}(p(f))$  indica la norma del vector  $p(f)$ , lo cual corresponde a la distancia euclidiana del vector.

$$\text{Energía} = \int p(f)^2 df \quad (2)$$

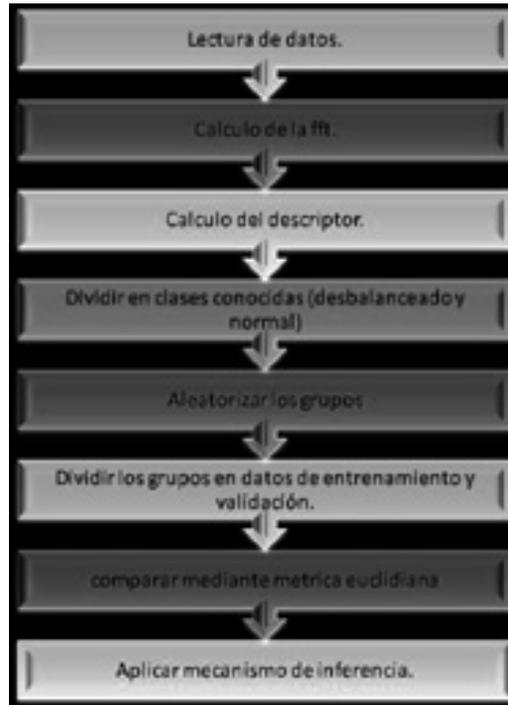
$$\text{pico} = \max p(f) \quad (3)$$

$$\text{HOFMS} = \sum f_i * p(f)_i \quad (4)$$

### c. Algoritmo de clasificación

El algoritmo de clasificación se realizó usando la técnica de razonamiento basado en casos propuesta por [10]-[12]. Dicho sistema se basa en el conocimiento a priori de una base de casos que caracterizan la clase requerida. En la Fig. 7. Puede verse un esquema del algoritmo implementado.

Fig. 7. Algoritmo implementado.



Es importante destacar que al observar la Fig.7., se ve que el paso final de la clasificación es la aplicación de un mecanismo de inferencia. Dicho mecanismo de inferencia se explica en la Fig.8. Cabe resaltar que dicho mecanismo de inferencia se propuso en [13], aunque para otra aplicación. No obstante, se implemento en el actual trabajo.

Fig. 8: Mecanismo de Inferencia utilizado. [13].



- Clasificación automática de patrones de vibraciones mecánicas en maquinaria rotativa afectada por desbalanceo •

Finalmente, se evaluó el desempeño del clasificador utilizando validación cruzada. Los resultados se presentan y discuten en la siguiente sección.

#### 4. Resultados y análisis de resultados

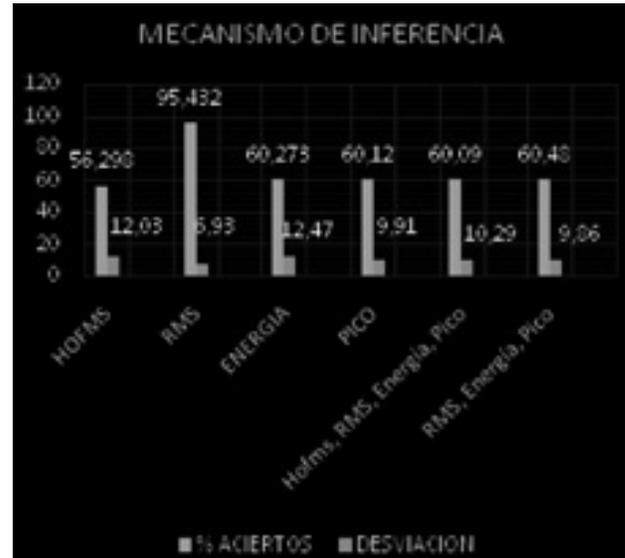
Una vez recogidos los datos se realizaron las pruebas del algoritmo aplicando distintos descriptores. Como uno de los retos fue definir cuál de los descriptores propuestos era el que permitía un mejor porcentaje de acierto, entendiendo este como la cantidad de veces que el clasificador decide apropiadamente entre 100 intentos; se realizaron distintas pruebas con distintos vectores de características como son: Tomando como vector característico un híbrido entre los valores RMS, energía y valor pico; tomando un vector característico donde se incluyeron los cuatro descriptores el valor RMS, HOFMS, Energía y valor Pico. Es importante destacar que para los vectores de características híbridas se realiza una normalización con el fin de garantizar una correcta comparación entre dichos vectores. Así mismo se tomó cada descriptor por separado para realizar el análisis. El procedimiento fue realizado para 100 pruebas aleatorizando los grupos en cada iteración. En la tabla 1 se muestra los resultados obtenidos por este procedimiento.

**Tabla 1.** Resultados finales de validación para las distintas características

Vector de características	Porcentaje de aciertos	Desviación estandar
RMS, Energía y pico	60.48	9.86
RMS, Energía, PICO y HOFMS	60.09	10.29
PICO	60.12	9.91
ENERGÍA	60.28	12.47
RMS	95.43	6.93
HOFMS	56.3	12.03

Aquí se puede notar que la mejor opción para clasificación fue solo usando el descriptor RMS. En la Fig.9. se muestran de manera grafica estos resultados.

**Fig. 9.** Resultados del test realizado al algoritmo.



Es importante destacar de la tabla 1 y Fig. 9, que el valor más bajo obtenido en el porcentaje de aciertos fue utilizando los HOFMS. Lo anterior se puede explicar teniendo en cuenta que según [1]-[3] el desbalanceo se caracteriza por un aumento en la amplitud de la componente fundamental del espectro (ver Fig. 5), y ya que que a medida que aumenta la frecuencia la amplitud del espectro disminuye esto hace el HOFM calculado se mantenga similar al de una maquina en funcionamiento normal, en donde el espectro es uniforme [1]-[3]. Por otro lado se puede ver que el valor RMS tiene el mejor comportamiento respecto a la clasificación, teniendo en cuenta que la discriminación se hizo solo para dos clases (desbalanceo y normal) el descriptor es relativamente sencillo. En este sentido, puede que en un clasificador multiclase (más de dos anomalías) este resultado pueda variar.

#### Conclusiones

El presente proyecto muestra la implementación de la técnica de clasificación automática de pa-

trones de vibraciones, tomando muchos recursos disponibles para tal fin, se usaron técnicas tales como el razonamiento basado en casos, utilizando métrica Euclidiana, además de estas técnicas el estudio se apoyó en una herramienta matemática como lo es la transformada rápida de Fourier, esencial para el tratamiento digital de señales, ya que los descriptores calculados se obtienen a partir del espectro de Fourier utilizando dicha transformada.

El análisis del algoritmo desarrollado muestra que para los cuatro descriptores tomados para el desarrollo de la clasificación el de mejor desempeño es el valor RMS ya que se evidencia que el porcentaje de clasificación es más alto que el de los otros tres descriptores, incluso cuando se toma en cuenta los 4 descriptores en el mismo algoritmo, los valores de desviación también analizados para cada uno de los descriptores muestran los valores más bajos para el valor RMS. Finalmente se mostró que es posible clasificar de manera automática, con una tasa de ciertos alta (95 de 100 aproximadamente - ver tabla 1), el desbalanceo respecto de un funcionamiento normal, con un algoritmo relativamente sencillo, utilizando razonamiento basado en casos. No obstante se recomienda a futuro incluir mas clases para realizar la clasificación automática entre un grupo compuesto por diversas anomalías (desalineamiento, soltura, etc).

## Referencias

- [1] CÁCERES, Joaquín y DIAZ, Julio; implementación de un banco de pruebas para análisis de vibraciones mecánicas en maquinaria rotativa afectada por desbalanceo, Universidad Antonio Nariño, facultad de ingeniería electromecánica, 2012
- [2] GUERRERO, Ricardo y SALAZAR, Andrés. Monitoreo de la condición Basado en análisis de vibraciones. Bogotá: Engineering Reliability and Management (ER & M), 2006. 13 p.
- [3] GRIM, Gary y MITCHELL, Bruce. Entendiendo las bases del balanceo y técnicas de medición, USA: Precision Measurement and Testing, 2010. 1-2 p
- [4] ESTUPIÑAN, Edgar; SAN MARTIN, Cesar y SOLA LIGUE, René. Diseño e Implementación de un Analizador Virtual de Vibraciones Mecánicas. En: Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Tarapacá, Vol. 14 N°1, pp. 7-15. Tarapacá, 2006.
- [5] KITTLER J., Reconocimiento de Patrones, Notas de seminario, Universidad de Surrey, Rev. 0.9, 2002.
- [6] ALDER, Michael, An Introduction to Pattern Recognition. eavenforBooks.com, 2001.
- [7] THEODORIDIS S., Koutroumbas K., Pattern Recognition, Elsevier, Academic Press. Second Edition. 2003.
- [8] MENDEL J.H, Tutorial on higher-order statistics (spectra) in signal processing and system theory: theoretical results and some applications. Proc. IEEE, 1991, 79 (3), pp. 278-305
- [9] PFLUG, L.A. Naval Res. Lab., Stennis Space Center, MS, USA, Higher-Order Statistics, Proceedings of the IEEE Signal Processing Workshop, 1997
- [10] LOZANO, Laura y FERNÁNDEZ, Javier, Razonamiento basado en casos: Una visión general. Universidad de Valladolid, 2010
- [11] GÓMEZ PÉREZ, José de Jesús; González Quintana, Diana Marcela; "Evaluación de daños en tuberías, mediante Razonamiento Basado en Casos y procesamiento de señales con transformada Wavelet y MPCA". Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2010.
- [12] CAMACHO NAVARRO, Jhonatan; "Sistema Experto Para La Monitorización De Salud Estructural Mediante El Reconocimiento De Patrones: Adaptación Y Validación Numérica". Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2010.
- [13] SANDOVAL RODRÍGUEZ, Camilo Leonardo. Caracterización de la dinámica de los movimientos básicos de la mano a partir de la actividad electromiográfica del antebrazo. Universidad Industrial de Santander 2013.