

PROYECTO DE UN NUEVO SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y ANÁLISIS DE SEÑALES DE VIBRACIONES

Fernando Palmieri¹, Darío Violante¹, Andreas Klemnow² y Wadi Chiapparoli¹

¹ Grupo de Vibraciones Mecánicas – UTN Facultad Regional San Nicolás
Colon 332, San Nicolás, Buenos Aries, Argentina- fpalmieri@frsn.utn.edu.ar

² Grupo de Vibraciones Mecánicas – UTN Facultad Regional Delta
San Martín 1175, Campana, Buenos Aires, Argentina- andreas.klemnow@gmail.com

RESUMEN

El mantenimiento basado en la condición mediante el análisis de vibraciones, se ha generalizado en el ámbito industrial, gracias a la gran capacidad de procesamiento digital de los analizadores, que han evolucionado considerablemente desde los primeros años de su aplicación industrial. Actualmente, las técnicas convencionales de procesamiento para el análisis de señales de vibración (gráficas amplitud - tiempo, promediado temporal, transformada rápida de Fourier, envolvente en frecuencias, etc.), están incorporadas en analizadores comerciales de amplia difusión, que generalmente se emplean para elaborar rutinas de medición para mantenimiento basado en la condición.

No obstante, existen otras técnicas de tratamiento de señales de vibraciones en desarrollo (como el análisis de transformadas Wavelet o de transformada de Hilbert-Huang, Spectrum and Cepstrum, etc.) que normalmente no están disponibles en los equipos comerciales. Además, estos equipos generalmente son de un número reducido de canales y con poca capacidad de adaptarse a distintas configuraciones de sensores.

Es por ello que en este trabajo se presenta el proyecto para desarrollar un nuevo sistema de adquisición de datos multicanal para el análisis de dinámica de rotores que permita incorporar las herramientas más actuales de análisis de señales y detección de fallas, para los futuros estudios del grupo de vibraciones de la Facultad Regional San Nicolás. Se fundamenta la selección del hardware para su concreción y se presentan los primeros avances en el desarrollo del sistema.

Durante la primera etapa del proyecto se analizó el uso de placas comerciales dedicadas versus placas de desarrollo con procesadores programables con capacidad de procesamiento de señal. A sí mismo, se inició el desarrollo de la interfaz de análisis de vibración en un entorno de programación destinado a objetos. Se espera en el corto plazo contar con una versión funcional del sistema para validación experimental.

Palabras clave: Medición de vibraciones; Análisis de Señales; Sistema de adquisición

1. INTRODUCCIÓN

En el proceso de convertir la energía en trabajo útil o viceversa, todas las máquinas vibran y rara vez se rompen sin dar alguna advertencia previa. Los signos de falla generalmente están presentes mucho antes de que la máquina se averíe por completo. Cuando las fallas comienzan a desarrollarse, también se modifican algunos de los aspectos dinámicos en la máquina, lo que afecta el nivel o la forma de las vibraciones de la misma. Tales cambios pueden servir para la identificación de fallas en desarrollo.

El mantenimiento basado en la condición mediante el análisis de vibraciones, se ha generalizado desde ya hace unos años en el ámbito fabril. Esto se ha debido principalmente a la gran capacidad de procesamiento digital de los analizadores comerciales disponibles en el mercado. Hoy en día, mediante el uso de mediciones in situ de las características del movimiento vibratorio de un sistema mecánico y su posterior análisis, se pueden detectar cambios que permiten identificar desperfectos o degradación.

Actualmente las técnicas convencionales de procesamiento para el análisis de señales de vibración como son las gráficas amplitud - tiempo, las técnicas de promediado temporal, la gráfica de espectro en frecuencias lograda por la transformada rápida de Fourier FFT y las técnicas de demodulación o envolvente en frecuencias están disponibles en la mayoría de los equipos de uno canal de medición. Además, existen otros que tienen 2, 3 o 4 canales de medición y permiten el trazado de orbitas, la determinación de fases, etc.

Existen otras técnicas de tratamiento de señales de vibraciones en desarrollo, como el análisis de transformadas Wavelet o de transformada de Hilbert-Huang, Spectrum and Cepstrum, la descomposición modal y las técnicas de detección automática, que normalmente no están disponibles en los equipos comerciales y pueden ser de gran utilidad para el estudio de problemas de dinámica de rotores en forma experimental o para analizar equipos industriales, donde las técnicas provistas en los sistemas comerciales no pueden dar una adecuada solución. Finalmente, como ya se ha mencionado los equipos comerciales que se emplean para elaborar rutinas de mantenimiento basado en la condición son de un número reducido de canales, uno o dos de medición más uno de fase, y con poca capacidad de adaptarse a distintas configuraciones o sensores. Es por ello que en aplicaciones de laboratorio o investigación es necesario desarrollar un sistema de adquisición de datos de "arquitectura abierta" que permita incorporar las herramientas más actuales de análisis de señales y detección de fallas para avanzar en el desarrollo de nuevas técnicas.

En este trabajo se describe el proyecto de un nuevo sistema de adquisición de datos multicanal para el análisis de vibraciones que debe ser adecuado a problemas de dinámica de rotores y permitir la incorporación de las herramientas más actuales de análisis de señales y detección de

fallas. El mismo será usado en los futuros estudios del grupo de vibraciones de la Facultad Regional San Nicolás.

2. ESTADO ACTUAL DEL ANALISIS DE VIBRACIONES

El análisis de vibraciones para el mantenimiento basado en la condición centra su desarrollo, a nivel industrial, en el uso de técnicas de tratamiento y representación de magnitudes medidas (vibraciones, por ejemplo) mediante algún dispositivo que transforma una característica de movimiento en una señal electrónica. Las dos formas principales de presentar esas señales en los equipos comerciales de análisis de vibraciones son: la representación de valor medido en el dominio del tiempo o en el dominio de las frecuencias. Esto permite obtener las gráficas llamadas de señal temporal y de espectro en frecuencias, respectivamente. Algunos equipos cuentan con alguna técnica extra de procesamiento como la envolvente en frecuencia.

Los primeros trabajos acerca del diagnóstico de vibraciones mediante análisis espectral se publicaron a principios de los 60 (Blackman y Tukey [1]) y no hubo demasiados avances en la primera parte de la década, principalmente debido al costo de los equipos de análisis. El desarrollo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) en 1965 (Cooley y Tukey [2]), permitió la construcción de analizadores espectrales comerciales en tiempo real, y, a medida que el uso de estos analizadores se hizo más generalizado, varios autores comenzaron a estudiar las características de las vibraciones de varias fallas típicas de máquina y cómo se podrían diagnosticar utilizando análisis espectral (Laszlo Boros y col. [3], Downham y Woods [4], Swansson [5], Braun [6] y Randall [7]). Sin embargo, incluso con el uso del análisis espectral, el diagnóstico de fallas utilizando la señal temporal, es aún un problema relativamente complejo y requiere habilidades especializadas.

Hasta fines de la década de 1980, el análisis de vibraciones de la máquina se basaba en la representación de la señal de vibración en el dominio de tiempo o frecuencia (espectro). No obstante, desde ese entonces hasta nuestros días han sido desarrolladas técnicas más avanzadas, algunas con el propósito de hacer más sencilla la interpretación de las señales medidas y la tarea del analista, a la hora de determinar a qué defecto o condición de la máquina corresponde la señal de vibración medida; otras con el propósito de mejorar la detección a partir de considerar nuevas formas de obtener la señal o procesarla.

Desde entonces se ha trabajado en el desarrollo de distintas técnicas, que se pueden agrupar siguiendo la clasificación propuesta por Asilturk y sus colaboradores [8] en:

- 1- Técnicas en el dominio del tiempo;
- 2- Técnicas en el dominio de la frecuencia o técnicas espectrales: como son la transformada rápida de Fourier, el método de la transformada de Hilbert y el análisis Power Cepstrum;

3- Técnicas que conjugan tiempo frecuencia, como la transformada de Fourier de corto período de tiempo, la distribución de Winger-Ville y la transformada Wavelet.

4- Técnicas de promediado sincrónico.

Algunos trabajos recientes muestran resultados prometedores en el uso de técnicas basadas en la transformada de Hilbert - Huang [9-10] y de la transformada Wavelet [11- 14] para el monitoreo de rodamientos y engranajes y máquinas rotantes.

Ya en los últimos años, diversos autores [15-17] coinciden en agrupar a las técnicas en 3 categorías:

1- Técnicas del dominio del tiempo, como valor RMS, valor de pico, factor de cresta y método de Kurtosis.

2- Técnicas del dominio de las frecuencias como la transformada rápida de Fourier, la envolvente en frecuencias, el Cepstrum y el Spectrum.

3 – Técnicas del dominio tiempo – frecuencia, como la transformada Wavelet WT, la transformada discreta wavelet WVD, la densidad de potencia espectral o PSD, la transformada de Hilbert – Huang o la transformada de Fourier de corto tiempo STFT.

Algunos estudios recientes han concentrado los esfuerzos en técnicas de análisis que permitan visualizar de manera temprana los fenómenos transitorios, correspondientes a las primeras instancias de fallas en rodamientos, aplicando técnicas de la transformada de Fourier de corto tiempo [18] y han demostrado su utilidad. A sí mismo, otros estudios recientes [19] analizan variantes de la transformada de Fourier para obtener un espectrograma en colores que muestra resultados superadores. No obstante, muchas de estas técnicas aún no están disponibles en los instrumentos de uso industrial y tampoco están muy desarrolladas en el ámbito académico en el país.

Además de la evolución de las técnicas de análisis de vibraciones, también se han ido desarrollando herramientas de diagnóstico de fallas basado en el modelo. El diagnóstico de fallas basado en el modelo consiste en estimar o predecir variables del proceso a partir la correlación del comportamiento de las mediciones con datos obtenidos de un modelo confiable del proceso, ya sea matemático o basado en señales [20]. Ya en 1994, Isermann [21] analizaba la importancia de los modelos realistas para esta técnica y sus principios de aplicación, que más tarde [22] ampliaría y ejemplificaría para problemas de transmisiones de vehículos, de dirección de vehículos y de motores de combustión.

Paralelamente, aparecen trabajos en el campo de máquinas rotantes como el de Loparo y colaboradores [23] donde se describen métodos para análisis de fallas de rotores basados en modelos para cojinetes y rodamientos, generando un filtro de detección de fallas. Marckert y col.

[24] emplean un ajuste por mínimos cuadrados para identificar la falla a partir de la correlación entre señal medida y señal obtenida del modelo para el caso de desbalance de rotores simples y logran identificar la posición de la falla y sus características. También Sekhar [25] emplea un ajuste de mínimos cuadrados para identificar fallas de fisuras en rotores. Más recientemente y para un rotor muy sencillo Jalan y Mohanty [26] usan la misma técnica para identificar desbalance, desalineación y fisuras en ejes con buenos resultados.

También se emplean redes neuronales como herramienta de identificación en lugar de un ajuste y en el trabajo de Zarei y sus colaboradores [27] se presenta un método basado en una red neural artificial para identificar fallas en rodamientos de motores eléctricos. En este sentido Aherwar [28] en su revisión menciona que entre las técnicas que se usan para identificar fallas en engranajes se encuentran además de las redes neuronales, los sistemas expertos, las técnicas basadas en modelos y las que usan la lógica Fuzzy. Actualmente, existen muchos estudios que trabajan técnicas de detección de fallas a partir de señales obtenidas de modelos y de condiciones normales, con redes neuronales [29-30]

Por último, Mohamad Hazwan Mohd Ghazali y Wan Rahiman [17] analizan las técnicas de monitoreo y diagnóstico presentadas en más de 100 artículos y realizan una interesante revisión de cómo estas técnicas se complementan con otras de detección automática basadas en inteligencia artificial, lógica difusa y algoritmos genéticos. Dichos autores concluyen, además, que las técnicas del dominio del tiempo y frecuencias son las más adecuadas para análisis de problemas estacionarios y las de dominio tiempo frecuencia para problemas transitorios, además que el uso de sistemas basados en computadoras revisten en el futuro mejores perspectivas de desarrollo que los analizadores independientes.

A pesar del desarrollo que están teniendo a nivel mundial todas estas técnicas, todavía, la mayoría no están disponibles dentro de las herramientas comerciales que tienen los analistas de vibraciones en el ámbito industrial nacional.

3. SISTEMA DISPONIBLE

Actualmente el laboratorio de Vibraciones Mecánicas de la Facultad Regional San Nicolás cuenta con un sistema de adquisición desarrollado hace más de 15 años por la Facultad Regional Delta y la empresa KPS S.A. Este sistema está basado en una PC de escritorio (Figura 1) que tiene una placa adquisidora de datos National Instruments NI PCI 6013 de 16 bits de resolución, 16 canales analógicos con cuatro ganancias configurables y una frecuencia de muestreo de 200.000 muestras por segundo. Como adecuación se cuenta con un sistema de filtros analógicos de ocho canales con filtros configurables vía puerto serie y dos canales más para disparos digitales.

Este sistema presenta el inconveniente de que el principal componente, la placa adquisidora, ya no tiene soporte por parte de su fabricante, entonces se dificulta la actualización informática. Además no es portátil por estar vinculado a una PC de escritorio. Por último, el software que lo acompaña está desarrollado bajo Pascal con entorno gráfico Delphi y ya no existen tantas librerías y controladores específicos de estos sistemas para las nuevas placas adquisidoras o hardware por no ser los más utilizados para sistemas de adquisición de datos en la actualidad.



Figura 1: Foto del sistema disponible

4. ALTERNATIVAS EVALUADAS PARA EL NUEVO SISTEMA

4.1 Hardware

Para el nuevo sistema de adquisición se analizó el uso de tres alternativas

Dispositivo multifunción de adquisición de datos similar a la actual pero con conexión USB, se evaluaron alternativas. La primera de marca National Instruments donde se analizaron varios modelos entre ellos el modelo USB-6211, el USB-6212 y el USB-6215. De los tres se eligió el modelo USB-6212, de 400.000 muestras por segundo, 16 bit de resolución, 16 entradas y 2 salidas analógicas, 32 entradas y salidas digitales [31]. La elección fue motivada por la cantidad de salidas y entradas que es similar a la placa disponible.

También se analizó una segunda marca, ADLINK Technology que tiene tres modelos equivalentes llamados USB-1901, USB-1902 y USB-1903. Siendo el modelo USB-1902 de 250.000 muestras por segundo, 16 bit de resolución, 16 entradas y 2 salidas analógicas, 8 entradas y 4 salidas digitales [32], el que más se asemeja a las necesidades del proyecto.

Se consideró además usar una placa de desarrollo electrónica con capacidad de adquisición de datos, se evaluaron varios modelos como la placa Analog Devices EVAL-CED1Z acoplada con el módulo también de Analog Devices EVAL-ADAS3023EDZ que tiene 8 canales con una

resolución de 16bit, con una frecuencia máxima de 125.000 muestras por segundo en cada canal [33-34].

Finalmente se evaluaron placas Arduino entre ellas la placa Arduino Due con microcontrolador Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 que tiene 12 entradas analógicas de 12bit de resolución y una tasa de muestreo teórica de 1.000.000 de muestras por segundo que se reparte en las 12 entradas [35].

En todos los casos la frecuencia de muestreo es adecuada para esta aplicación considerando que para analizar problemas de vibraciones se deben manejar frecuencias de 10kHz. Aun en los dispositivos que usan el multiplexado en todas las entradas analógicas. Las placas de desarrollo tienen más frecuencia de conversión ADC teórica pero no pueden aprovecharse todas las entradas disponibles. Los dispositivos Multifunción evaluados en primera instancia tienen mayor resolución y más canales útiles. Además, tienen escalas de ganancia ajustables por programación que son útiles para reducir la necesidad de adecuación de señal. Finalmente poseen soporte con librerías específicas y probadas para las funciones a usar en este proyecto, en contrapartida son más costosos.

4.2. Software

Para el desarrollo del programa de adquisición se analizó como alternativas los lenguajes: Pascal, Basic, C++ o Python. Además para cada lenguaje se analizó si se tenía acceso a un entorno de programación orientada a objetos.

El lenguaje Pascal ya había sido usado en el desarrollo del sistema original, es conocido pero presenta la desventaja que no tiene soporte en las plataformas de los dispositivos DAQ (Data Acquisition) dedicados de NI y se debe recurrir a librerías que tienen algunos años. Está disponible en entornos gratuitos como Free Pascal pero no cuentan con demasiadas herramientas.

Tanto los lenguajes lenguaje Visual Basic, C++ y Python están disponibles en el entorno de desarrollo Visual Studio gratuito de Microsoft y existen librerías actualizadas para el manejo de los dispositivos Multifunción de adquisición de datos. Python es uno de los lenguajes que se están usando actualmente con frecuencia en aplicaciones industriales de adquisición y manejo de datos, pero no ha sido empleado anteriormente a este trabajo. Por último, tanto Visual Basic como C++ han sido empleados en el pasado para trabajos previos y son las alternativas más viables por conocimientos, disponibilidad de recursos y aptitud.

A partir de ese análisis se elige como plataforma de desarrollo Visual estudio con lenguaje Visual Basic o C++ según las librerías disponibles para el dispositivo de adquisición de datos adquirido.

5. ESQUEMA DE SISTEMA SELECCIONADO

El sistema que se pretende desarrollar planea reemplazar el existente, pero además se espera generar un software que permita adecuarse a más de un dispositivo de toma de datos. La cantidad de canales espera poder incrementarse respecto del actual.

La experiencia adquirida con los dispositivos multifunción específicos como el que provee National instruments es muy valiosa, es por ello por lo que se selecciona como primera opción utilizar el dispositivo NI USB-6212 o en su defecto el dispositivo ADLINK USB-1902. Una ventaja adicional de estos equipos es que requieren menos adecuación de señal porque ya cuentan con filtros y ganancias ajustables. Además, si el proceso de compra se dilata por cuestiones administrativas se puede comenzar a trabajar con la placa actual disponible, que se ha logrado funcione con las mismas librerías de programación. El sistema actual de filtros es compatible con el mencionado dispositivo, por lo que, solo con una adecuación de conexiones se puede comenzar el desarrollo sin necesidad de construir un nuevo sistema de filtros. Este sistema de filtros deberá desarrollarse posteriormente para poder elevar el número de canales.

Finalmente se plantea usar la mayor cantidad de procesamiento por software y evitar en lo posible los filtros analógicos a excepción de los que se colocan para evitar el aliasing o solapamiento y las protecciones.

El proyecto completo implica integrar los elementos descriptos en el esquema (figura 2):

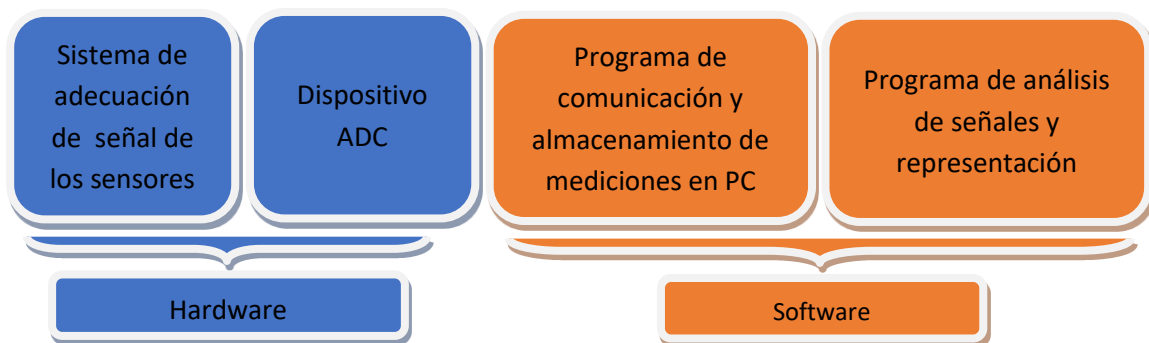


Figura 2: Esquema del sistema de adquisición

En cuanto al Hardware se plantea desarrollar la alternativa de una versión demostrativa usando una placa Arduino para fines didácticos, esta alternativa será tenida en cuenta en el desarrollo del software. En todos los casos la comunicación será USB para poder usar una laptop.

Las etapas definidas en el proyecto son las definidas a continuación:

- 1- Desarrollo del software de análisis y representación de señales y gestiones de compra del nuevo dispositivo ADC. En la primera etapa se aprovecharán las señales medidas y

almacenadas con el sistema actual para comenzar el desarrollo del nuevo software, principalmente en lo que respecta a la implementación de las nuevas técnicas de procesamiento de señales y representación. Paralelamente se comenzará las gestiones de la compra del nuevo dispositivo para adquisición de datos.

- 2- Desarrollo del algoritmo de comunicación con el dispositivo ADC y hardware de adecuación de señales. Una vez adquirido el nuevo dispositivo se comenzará a desarrollar el software de medición y el sistema de adecuación de señales. Se deberá poder conectar sensores de proximidad y acelerómetros. En caso de sufrir demoras en la construcción del nuevo hardware de adecuación se procederá a adecuar el disponible que se emplea con la tarjeta NI PCI 6013 para emplearlo con la nueva tarjeta.
- 3- Finalmente se harán pruebas de campo y se continuarán implementando nuevas técnicas de procesamiento de señales

Finalmente, se espera desarrollar un segundo Hardware alternativo de menor potencia, con tecnología Arduino, que pueda usarse con el mismo software. Este segundo sistema se construirá con fines didácticos para instrumentar un banco de pruebas portátil que se encuentra disponible en el laboratorio y se espera emplear para capacitaciones y demostraciones en instituciones educativas.

6. AVANCES

A fines del 2022 se comenzaron las gestiones de compra del nuevo dispositivo de conversión digital analógico NI USB-6212. Las gestiones, a la fecha, están avanzadas y se espera la aprobación del banco para realizar la transferencia al exterior y concretar la compra. No obstante, el contexto actual ha demorado esta tarea que se inició en noviembre del año pasado cuando fue iniciado el proceso. Se espera poder concretar la compra en los próximos meses.

En caso de no poder concretar la misma se analizará continuar el desarrollo con la placa Analog Devices EVAL-CED1Z acoplada con la tarjeta EVAL-ADAS3023EDZ, que son de menor costo, pero requerirá más trabajo en el desarrollo del sistema de adecuación de señales. Paralelamente, se ha comprado una de placa de desarrollo Arduino para comenzar a trabajar en la versión didáctica.

A comienzos de este año se comenzó el desarrollo del software, ya se han incluido las rutinas convencionales como el promediado temporal y la transformada rápida de Fourier. Para probar estos algoritmos se aplican a datos medidos con el sistema anterior. También se logró controlar la placa antigua con las librerías actualizadas del fabricante. Esto llevo un tiempo considerable, dado que no existe soporte para la placa disponible.

Aun no se pudo implementar ningún algoritmo de tratamiento de señal más moderno que no esté incluido en los analizadores comerciales desarrollo (como el análisis de transformadas Wavelet o de transformada de Hilbert-Huang, Spectrum and Cepstrum, etc.). El proyecto se comenzó a ejecutar a fines del año pasado y fue presentado ante la Secretaria de Ciencia y Tecnología de la UTN y aprobado con el código ASECSN0008611 a comienzos de este año.

7. CONCLUSIONES

La experiencia de los integrantes del proyecto con el sistema disponible permite concluir que el nuevo sistema es posible de construir.

El punto más crítico del proyecto desde el punto de vista económico es la adquisición del nuevo dispositivo de adquisición de datos (DAQ). Si bien las gestiones se han iniciado, el contexto no permite asegurar si se va a concretar. No obstante, se han planteado alternativas para desarrollar el sistema usando la placa de desarrollo.

REFERENCIAS

- [1] Blackman, R.B. and Tukey, J.W. *The Measurement of Power Spectra*. Dover Publications, New York, 1958.
- [2] Cooley, J.W. and Tukey, J.W., *An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series*. Mathematics of Computing, Vol. 19, pp. 297-301, 1965.
- [3] Boros L., Bate H. and Bete G. *Early Detection of Gear Faults Using Vibration Analysis in a Manufacturer's Test Dep.* Bruel & Kjser, Denmark, <https://www.bksv.com/media/doc/bo0295.pdf>
- [4] Downham E. and Woods, R., *The Rationale of Monitoring Vibration on Rotating Machinery in Continuously Operating Process Plant*. ASME Vibration Conference, Paper 71, Vib. 96, 8 al 10 de setiembre, 1971, Toronto, Canadá.
- [5] Swansson, N.S., *Application of Vibration Signal Analysis Techniques to Signal Monitoring*. Conference on Friction and Wear in Engineering, pp. 262-267, 1980, Australia.
- [6] Braun, S., *Mechanical Signature Analysis*. Academic Press Inc., London, 1986.
- [7] Randall, R.B., *Frequency Analysis*. Brüel and Kjær, Copenhagen, 3rd edition, 1987.
- [8] Asilturk, I. Aslanci, H. and Ozmen, U. *Machinery Monitoring using Vibration Signal Analysis*. International Journal of Mechanical and Production Engineering. Vol. 5 (2), pp. 21-25, 2017.
- [9] Febgeli Ma, Xiaoshuia Chen and Jilong Du. *Bearing fault Based on improved Hibert-Huang Transform*. 5th International Conference on Civil Engineering and Transportation, 4 y 5 de Mayo de 2015, Ottawa, Canada.

- [10] Soualhi, A. Medjaher, K. and Zerhouni N., *Bearing Health monitoring based on Hilbert-Huang Transform, Support Vector Machine and Regression*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Institute of Electrical and Electronics Engineers, pp. 1-11, 2014.
- [11] Li-Ye Zhao, Lei Wang and Ru-Qiang Yan, *Rolling Bearing Fault Diagnosis based on Wavelet Packet Decomposition and Multi-Scale Permutation Entropy*. Entropy, Vol. 17, pp. 6447-6461, 2015.
- [12] Riaz, S. Elahi, H., Javaid, K. and Shahzad T. *Vibration Feature Extracto in and Analysis for Fault Diagnosis of rotating Machinery- A Literature Survey*. Asian Pacific Journal of Multidisciplinary Research, Vol. 5 (1), pp. 103-110, 2017.
- [13] Zhengz, H. and Chen, L., *Gear fault diagnosis based on continuous wavelet transform*. Mechanical Systems and Signal Processing. Vol. 16 (2–3), pp. 447-457, 2002.
- [14] Lebold, M., McClintic, K., Campbell, R., Byington, C. and Maynard, K., *Review of Vibration Analysis Methods for Gearbox Diagnostics and Prognostics*. Proceeding of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, pp. 623-634, 1 al 4 de mayo, 2000, Virginia.
- [15] Vishwakarma M. and Singh S., *Review of Vibration Analysis Techniques for Rotating Machines*. International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 4 (3), 2015.
- [16] KiranKumar, M.V., Loksha, M., Kumar, S. and Kumar, A., *Review on Condition Monitoring of Bearings using vibration analysis techniques*. Materials Science and Engineering. Vol. 376 (2018) 012110, doi:10.1088/1757-899X/376/1/012110
- [17] Hazwan Mohd Ghazali M. and Rahiman W. *Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review*. Shock and Vibration, Vol. 2021, Article ID 9469318, 25 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>
- [18] Gang Yu, *A Concentrated Time–Frequency Analysis Tool for Bearing Fault Diagnosis*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 69 (2) pp. 371 – 381, 2020.
- [19] Khadersab, A. and Shivakumar, S. *Vibration Analysis Techniques for Rotating Machinery and its effect on Bearing Faults*. Procedia Manufacturing, Vol. 20, pp. 247-252, 2018.
- [20] Edwards, S., Lee, A.W., Friswell, M.I. *Fault Diagnosis of rotating machinery*. The Shock and vibration digest, Vol. 30 (1), pp. 4-13, 1998.
- [21] Isermann R. *On the applicability of model-based fault -detection for technical processes*. Control Engineering practice, Vol. 2 (3), pp. 439-450, 1994.
- [22] Isermann R. *Model- based Fault detection and diagnosis – Status and applications*. Automatic Control in Aerospace, Saint-Petersburg, Russia, 2004.

- [23] Loparo, K., Adams, M.L., Wei Lin, Farouk Abdel-Magied, M., Afshari, N., *Fault Detection and Diagnosis of Rotating Machinery*. IEEE Transactions on industrial electronics, Vol. 47 (5), pp. 1005-1014, 2000.
- [24] Markert R., Platz, R. and Seidler, M. *Model Based Fault Identification in Rotor Systems by Least Squares Fitting*. International Journal of Rotating Machinery, Vol. 7 (5), pp. 311-321, 2001.
- [25] Sekhar A.S. *Identification of a Crack in a Rotor System Using a Model-based Wavelet Approach*. Structural Health Monitoring, Vol. 2 (4), pp. 293–308, 2003.
- [26] Jalan, A. K., Mohanty, A. R. *Model Based Fault Diagnosis in Rotating Machinery*. International Journal of Performability Engineering, Vol.7 (6), pp. 515-523, 2011.
- [27] Zarei, J., Amin Tajeddini, M. and Reza Karimi, H., *Vibration analysis for bearing fault detection and classification using an intelligent filter*. Mechatronics, Vol. 24 (2), pp. 151-157, 2014.
- [28] Aherwar A. *An investigation on gearbox fault detection using vibration analysis techniques: a review*. Australian Journal of Mechanical Engineering. Vol. 10 (2), pp.1-16. 2012.
- [29] Sheng Guo, Tao Yang, Wei Gao and Chen Zhang, *A Novel Fault Diagnosis Method for Rotating Machinery Based on a Convolutional Neural Network*. Sensors, Vol. 18 (5), pp 1429, 2018, <https://doi.org/10.3390/s18051429>
- [30] Yu Wei, Yuqing Li, Minqiang Xu and Wenhui Huang, *A Review of Early Fault Diagnosis Approaches and Their Applications in Rotating Machinery*. Entropy, Vol. 21(4), pp. 409, 2018, <https://doi.org/10.3390/e21040409>.
- [31] National Instruments *USB-6212 Specifications*. Consultado el 10-5-2023 <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usb-6212-specs/page/specs.html>
- [32] ADLINK Technology *USB-1901-1902-1903 datasheet*. Diciembre 2019, pp. 1-3 Consultado el día 10-5-2023 https://www.adlinktech.com/Products/Data_Acquisition/USBDAQ/USB-1901_1902_1903
- [33] Analog Devices. *EVAL-CED1Z, Preliminary Technical Data*. 2007, pp. 1-24. Consultado el día 10-5-2023. https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/evaluation-documentation/EVAL_CED1Z.pdf
- [34] Analog Devices. *ADAS3023. Data Sheet*. Enero 2017, pp. 1-30. Consultado el día 10-5-2023. <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADAS3023.pdf>
- [35] Arduino. *Technical specifications for the Arduino® Due*. Consultado el día 10-5-2023. <https://docs.arduino.cc/hardware/due>