

# DETECCIÓN DE FALLA DE RODAMIENTO EN UNA CADENA CINEMÁTICA VÍA EMISIÓN ACÚSTICA

***Luis Alejandro Romero Ramírez***

Universidad Autónoma de Querétaro

*lromero@hspdigital.org*

***Luis Morales Velázquez***

Universidad Autónoma de Querétaro

*lmorales@hspdigital.org*

***Roque A. Osornio Ríos***

Universidad Autónoma de Querétaro

*raosornio@hspdigital.org*

***René de Jesús Romero Troncoso***

Universidad de Guanajuato

*troncoso@hspdigital.org*

***Daniel Morínigo Sotelo***

Universidad de Valladolid

*dmorinigo@hspdigital.org*

## Resumen

Las cadenas cinemáticas son componentes esenciales en la mayoría industrias, compuestas principalmente por motores de inducción, cajas de engranes, etc., las fallas de éstas provocan grandes pérdidas monetarias. Para evitarlos se utilizan sistemas automatizados de monitorización. Existen diferentes técnicas de monitoreo con diferentes metodologías, la emisión acústica (EA) es uno de los métodos de monitoreo no invasivo para la detección de fallas en estos sistemas. En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de adquisición de señales de EA y una metodología basada en el análisis de estas señales para la detección de falla de rodamiento en un banco de pruebas de una cadena cinemática, la

identificación de los componentes relacionados con la falla para el análisis es respaldado por su modelo teórico. Los resultados obtenidos muestran la detección de falla en rodamiento en altas frecuencias y la metodología para el análisis de la EA.

**Palabras Claves:** Detección de fallas, emisión acústica, FFT, rodamientos.

## **Abstract**

*Kinematics Chains are essential components in most industries, composed mainly of induction motors, gearboxes, etc., failures within them cause great monetary losses. To avoid this, automated monitoring systems are used. There are different monitoring techniques with different methodologies, the acoustic emission (AE) is one of the methods of noninvasive monitoring for the detection of failures in these systems. This work presents the development of an AE signal acquisition system and a methodology based on the analysis of these signals for the detection of bearing failure in a test bench of a kinematic chain. The identification of the components related to the fault for the analysis is supported by its theoretical model. The obtained results show the detection of failure in rolling in high frequencies and the methodology for the analysis of the AE.*

**Keywords:** *Acoustic emission, bearings, faults detection, FFT.*

## **1. Introducción**

En la industria existen muchos procesos y sistemas constituidos por cadenas cinemáticas. Una cadena cinemática es la interconexión de varios eslabones, tales que permiten un movimiento en combinación entre los eslabones que lo componen. Por lo tanto, se puede inferir que todas las máquinas usadas en la industria son compuestas por cadenas cinemáticas, las cuales son vitales en las industrias. Un fallo inesperado puede resultar en un devastador accidente y pérdidas financieras para las industrias. La mayoría de los sistemas de monitoreo en la industria suelen ser invasivos, lo que indica una interacción directa con el sistema; los sistemas de monitoreo no invasivo tienen un gran auge con diferentes métodos como lo son la termografía, la acústica, la emisión acústica, que son

usados para detectar los primeros signos de falla en una cadena cinemática conectada a alguna máquina rotativa como lo son los motores de inducción.

Estudios muestran que cerca del 41% de fallas de motores de inducción son causados por defectos de rodamientos [Henriquez et al, 2014]. Por lo cual, los rodamientos en los motores de inducción son elementos importantes en las cadenas cinemáticas, una falla en estos elementos puede causar interrupciones en procesos y operaciones en la industria [Vilela et al, 2004]. Diferentes métodos son usados para la detección y diagnósticos de defectos de rodamientos; estos pueden clasificar de una manera general como análisis de vibraciones, acústica, termografía, temperatura y corriente [Kral, 2010]. Entre los mencionados, el análisis de vibraciones es el más usado. Se han aplicado varias técnicas para la medición de vibraciones y respuestas acústicas para detección de fallas en rodamientos, tales como medición de vibración en dominio de tiempo y frecuencia, técnicas de presión de sonido, intensidad de sonido y método de emisión acústica [Henriquez et al, 2014]. Las últimas dos décadas han tenido un gran interés en la detección de fallos en rodamientos y diagnóstico usando diferentes métodos [Hao et al, 2008], [Caesarendra et al, 2016]. Algunos de estas investigaciones han sido recompiladas por los investigadores Tandon y Choudhuty [Tandon, 1999], quienes presentan a detalle diferentes trabajos de vibración y acústica para la detección de fallas en rodamientos. Algunos investigadores como Saucedo et al [Saucedo et al, 2016] han desarrollado, además de un análisis de vibraciones la utilización de la corriente para la detección de falla en rodamiento aplicado a un motor de inducción. En el mismo trabajo se realiza la detección de fallas en caja de engranes en una cadena cinemática.

La emisión acústica (EA) es ampliamente reconocida por ser un método no invasivo para el monitoreo de cadenas cinemáticas [Niknam et al, 2013]. Conforme a investigaciones [Yoshioka, 1982], [James, 1995], [Mba, 2003], el monitoreo con EA tiene ciertas ventajas por sobre el monitoreo de vibraciones, ya que el primero puede detectar de fallas superficiales, mientras que el último puede, en el mejor de los casos, detectar un fallo cuando emerge sobre la superficie del elemento de la cadena cinemática. La Transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*,

*FFT*) es la técnica más usada para el análisis de las señales en el dominio de la frecuencia. La *FFT* proporciona información útil de los componentes rotativos, que tienen componentes en frecuencia bien definidos [Saxena et al, 2006], la *FFT* es la herramienta principal utilizada en el presente trabajo para la identificación de armónicos en el ancho de banda de interés para la detección de la falla.

Los sistemas de monitoreo utilizados son limitados por la frecuencia de trabajo de los sensores, por lo cual estos sistemas fallan al detectar armónicos que se encuentren fuera su ancho de banda.

Los rodamientos son una fuente de ruido y vibración debido a la variación de compliancia la cual es el cambio de volumen en la estructura producido por el cambio de presión a través de la estructura o la presencia de un defecto [Tandon, 1992]. Los defectos en rodamientos pueden ser clasificados como distribuidos o locales. Los defectos distribuidos como una superficie rugosa, ondulaciones y la variación de la fuerza de contacto entre los elementos de rodamiento pueden aumentar la amplitud de la vibración y las señales de EA [Vahaviolos, 1999]. Un error de manufactura, una instalación inapropiada o desgaste causa estos defectos. Un elemento rotativo con carga genera vibraciones, aunque su geometría sea perfecta [Amini et al, 2016]. Por lo cual, la presencia de un defecto causa un significativo incremento del nivel de vibración, que puede ser detectado por emisión acústica. El estudio de vibración debido a esta categoría de defectos es, por lo tanto, importante para la inspección de calidad, así como el control de la condición del sistema [Tandon, 1999].

La emisión acústica es un fenómeno de generación de ondas elásticas transitorias debido a una liberación rápida de la energía de deformación causada por el movimiento relativo de partículas pequeñas bajo tensiones mecánicas [Gohar et al, 1998]. La frecuencia contenida en EA es típicamente en los rangos de 100kHz a 1MHz, por lo cual, EA no es influenciada o distorsionada por el desequilibrio y desalineación que se encuentran en rangos de baja frecuencia. Generación y propagación de grietas y defectos asociados con deformación plástica, son las principales fuentes de emisión acústica. La EA es una forma de detección pasiva, las ondas de alta frecuencia excitan al sensor que contiene un cristal

piezoeléctrico el cual produce un voltaje. Este método es principalmente usado para registrar la evolución durante la aplicación de un nivel de esfuerzo para la generación de deformaciones, incremento de defectos, fricción, etc. además es posible detectar alguna fase de transformación en el material por emisión acústica [Amini et al, 2016]. La EA tiene varias ventajas por encima del análisis de vibraciones, como la detección incipiente de la avería, es sensible a la localización de las fallas y pueden captar información en frecuencias más altas que las señales de vibración [Pao et al, 1979].

En este trabajo se presenta la detección de falla en rodamientos en una cadena cinemática propuesta, por medio de análisis de señales de emisión acústica, adquiridas por un sistema de adquisición de alta velocidad, desarrollado con tecnología FPGA (*Field Programmable Gate Array*, Arreglo de compuertas programables en campo) y convertidor analógico-digital de alta velocidad que permite adquirir frecuencias mayores de 100kHz, este sistema da como ventaja una frecuencia de muestreo óptima para la adquisición de señales de alta frecuencia tale como las de EA y obtener más información al monitorizar cadenas cinemáticas. Se propone EA como un método complementario para los sistemas de monitoreo. El trabajo se concentra en adquirir señales del sistema con falla y un sistema sano, realizar el análisis de las señales con FFT aislando la banda de interés con un filtro pasa bandas, y comparar armónicos de vibración, producidas por su frecuencia de rotación y geometría, obteniendo indicadores de fallo como: nivel de ruido, promedio, desviación estándar y comparación de amplitud de armónicos. Con esto se concluye la identificación y presencia de la falla en alta frecuencia en las señales de EA adquiridas del sistema, abriendo posibilidades de futuras investigaciones con el método de EA.

## **2. Métodos**

Esta sección muestra la metodología propuesta y la descripción de la configuración experimental para la detección de falla de rodamiento en una cadena cinemática propuesta. La primera parte de la metodología parte de las frecuencias características relativas al defecto de carga en rodamientos, las cuales

son teóricamente bien conocidas, estas frecuencias se calculan a partir de la frecuencia de rotación y la geometría del balero. Estas son características de los elementos de contacto interno y externo ( $f_{BPIF}$ ,  $f_{BPOF}$ ), la frecuencia de rotación de la caja ( $f_{FTF}$ ), y la frecuencia de giro de elementos rodantes ( $f_{BSF}$ ), se expresan mediante ecuaciones 1 a la 4.

$$f_{BPIF} = \frac{f_r}{2} N_b \left( 1 + \frac{D_B}{D_C} \cos \theta \right) \quad (1)$$

$$f_{BPOF} = \frac{f_r}{2} N_b \left( 1 - \frac{D_B}{D_C} \cos \theta \right) \quad (2)$$

$$f_{FTF} = \frac{f_r}{2} \left( 1 - \frac{D_B}{D_C} \cos \theta \right) \quad (3)$$

$$f_{BSF} = \frac{D_C}{2D_B} f_r \left( 1 - \left( \frac{D_B}{D_C} \right)^2 (\cos \theta)^2 \right) \quad (4)$$

Donde  $f_r$  es la frecuencia de rotación de la parte interior del balero,  $D_C$  es el diámetro exterior,  $D_B$  es el diámetro de los balines,  $N_b$  es el número de balines, y  $\theta$  es el ángulo de contacto entre la superficie de rodamiento. Estas frecuencias pueden ser usadas en la detección de fallas en rodamientos, ya que se pueden visualizar en el espectro de frecuencias. La frecuencia de interés en este trabajo, son los armónicos de la frecuencia característica de elementos de contacto externo, por el tipo de falla en el rodamiento del banco de pruebas que se explicará más adelante.

En la figura 1 se muestra la metodología llevada a cabo para este estudio. Para la detección de falla de rodamiento, se define el sistema en dos condiciones, condición sana y condición con falla de rodamiento. El elemento dañado fue remplazado en la cadena cinemática para poder realizar los diferentes experimentos. Para la adquisición de datos, se utilizó un sensor de emisión acústica, el cual está en contacto con la cadena cinemática, como se puede visualizar en la figura 2, los datos fueron adquiridos durante el funcionamiento del sistema con alimentación de línea para cada condición del banco de pruebas. Las

características del sistema de adquisición son específicas para adquirir señales dentro del ancho de banda de trabajo del sensor de EA, para este trabajo se propuso una frecuencia de muestreo de 550 kHz. El análisis espectral consiste en la aplicación de un diezmado de segundo orden y un filtro pasa-banda IIR (*Infinite Impulse Response*, respuesta infinita al impulso) en el ancho de banda de interés seleccionado entre 100 a 137 kHz, esto es debido a que el diezmado baja la frecuencia de muestreo a 275 kHz, el filtro es utilizado para observar las frecuencias de interés en el análisis realizado. Los armónicos por identificar y comparar son calculados usando ecuación 2, prediciendo el fallo por las características geométricas y la velocidad con la que trabaja el sistema, la cual es medida durante el experimento con un encoder.

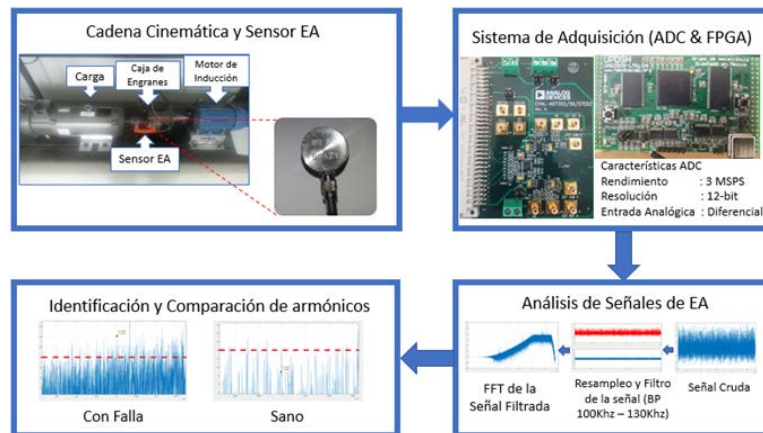


Figura 1 Metodología Propuesta.

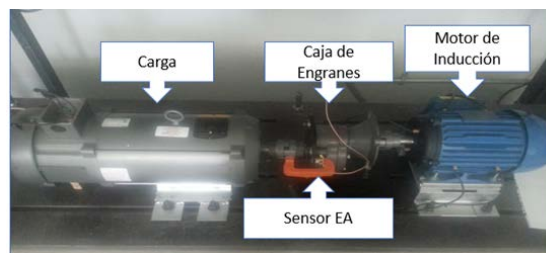


Figura 2 Banco de pruebas usado en el experimento.

Es importante mencionar que son aproximaciones y pueden variar debido a las condiciones de funcionamiento del banco de pruebas. Los datos adquiridos son almacenados en una computadora personal para posteriormente ser analizados

con la herramienta computacional MATLAB, aplicando a cada experimento el diezmado, el filtro pasa-banda y FFT, además de calcular su promedio y desviación estándar. El experimento se realizó diez veces para cada estado del sistema, en cada uso se adquirió 500k muestras, lo cual proporciona aproximadamente 1 segundo.

El banco de pruebas utilizado para las pruebas en la cadena cinemática se muestra en la figura 2. El banco de pruebas consiste en un motor de inducción trifásico (WEG0026ET3ET3E145T-W22). La cadena cinemática usa como carga mecánica un generador de DC (BALDOR CDP3604) alrededor del 20% de su carga nominal. El sensor de emisión acústica (WG50) del fabricante *Soundwel Technology*, con un ancho de banda de 100 kHz-1 MHz. Tiene una etapa de pre-amplificación y amplificador de la señal, proporcionado por el mismo fabricante con una ganancia de 40 dB, un ancho de banda de 10 kHz~2 MHz y un voltaje de salida de 10 V (Vpp). Para la etapa de adquisición se utilizó un convertidor analógico-digital (ADC, *Analog-Digital Converter*) de 12 bits ,2 canales, entrada diferencial, salida de 3 MSPS(AD7352) de *Analog Devices*. Para este experimento se utilizó la tarjeta EVAL-AD7352 que contiene el ADC y sus etapas de acondicionamiento de señal. Para el control de todo el sistema de adquisición, se utilizó una tarjeta propietaria basada en FPGA (PLCUAQ816) [Morales, 2010], esta tarjeta controla el ADC y guarda los datos en una memoria RAM dinámica, para posteriormente enviar los datos vía USB a la PC. El número de datos a adquirir es controlado desde el PC por un programa desarrollado en C++ y el cual comunica con la FPGA.

Para realizar los experimentos con rodamiento dañado, se realizó un daño artificial al rodamiento, perforando un agujero de un diámetro de 1.191 mm, en la pista exterior del rodamiento, usando una broca de tungsteno. Este fallo ha sido usado y reportado en diferentes estudios de fallas en rodamientos [Saucedo, 2016], [Vmien et al, 2014], el rodamiento usado es el modelo 6205-2ZNR y se muestra en la figura 3. Las características geométricas del rodamiento son las siguientes, contiene 9 balines de 7.9mm de diámetro y el diámetro externo es de 39 mm con un ángulo de contacto de 0°.





Figura 3 Rodamiento dañado.

### 3. Resultados

Los resultados son obtenidos aplicando la metodología propuesta. Se obtuvo la adquisición de la señal de emisión acústica en cada experimento, se realizó 10 adquisiciones de cada configuración del banco de pruebas, la señal obtenida se muestra en la figura 4.

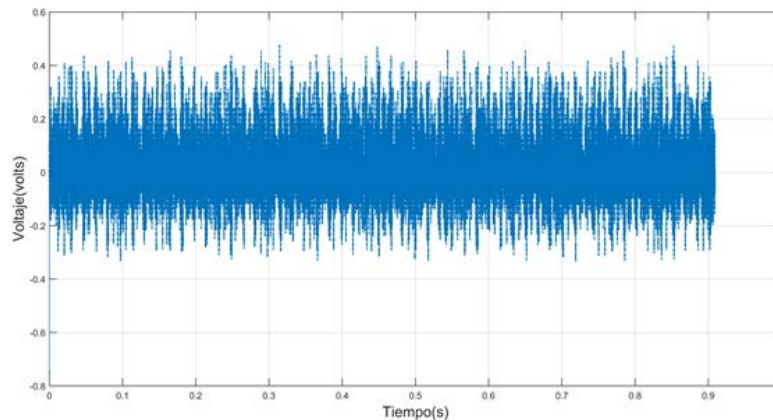


Figura 4 Señal cruda.

Las primeras observaciones notables entre las señales del sistema dañado y el sano, es la cantidad de ruido que presentan sin hacer ningún procesamiento. La señal es diezmada, filtrada y se aplica FFT para llegar al resultado mostrado en la figura 5, donde es analizado el ancho de banda de interés para la comparación de los armónicos. Al realizar un sistema con falla y el sistema sano, se notan amplitudes en el espectro de la señal que coinciden entre las dos, aunque el espectro de la señal con falla contiene un nivel más alto de ruido. Además, se compararon promedios y desviación estándar lo cual indica la presencia de más contenido armónico en la señal del sistema con falla. Estos indicadores son las principales referencias para realizar la comparación entre las señales de los dos estados del banco de pruebas analizado, teniendo así los indicadores de falla. Los

armónicos calculados con la ecuación 4 son también tomados como referencia para la comparación, tomando armónicos mayores de 100 kHz de la frecuencia de contacto externo del rodamiento. Los indicadores de falla se calculan de cada señal, los promedios de los indicadores se muestran en tabla 1.

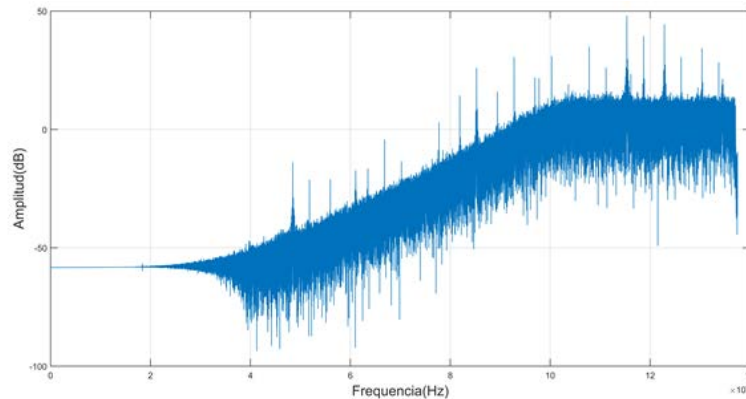


Figura 5 Señal filtrada y aplicando FFT.

Tabla 1 Promedios de Indicadores de falla.

Parámetros	Sistema con Falla	Sistema Sano
Promedio de Amplitud de FFT	9.59411dB	7.2671dB
Desviación Estándar	0.0887 volts	0.0615 volts
Amplitud de Armónicos	11.61dB	9.559dB

#### 4. Discusión

Para la detección de la falla, se analizan las comparaciones realizadas para los estados de falla y sano. En la figura 6 se muestra el espectro de la condición sana del sistema realizando un acercamiento de la señal anterior mostrada en la figura 5; en el espectro se destacan armónicos a comparar, además de mostrar una línea roja que indica el promedio de la señal del sistema falla y la línea verde el promedio de la señal del sistema sano. En la figura 7 se muestra el espectro en la condición del sistema con falla, teniendo al igual que la figura 6, señalando los armónicos en el espectro para su comparación, además de mostrar los promedios con las líneas roja y verde para su visualización. Las diferencias de los armónicos entre los estados del sistema varían entre 3 a 5 dB, analizando entre la banda donde se aplicó el filtro pasa-banda, lo cual indica la presencia de la falla en el rodamiento del sistema. La presencia de la falla se puede ver desde los diferentes

indicadores de fallas presentadas, las cuales son: nivel de ruido, nivel de contenido armónico, diferencia de promedio, varianza de las señales y diferencia de armónicos de la frecuencia de rodamiento exterior.

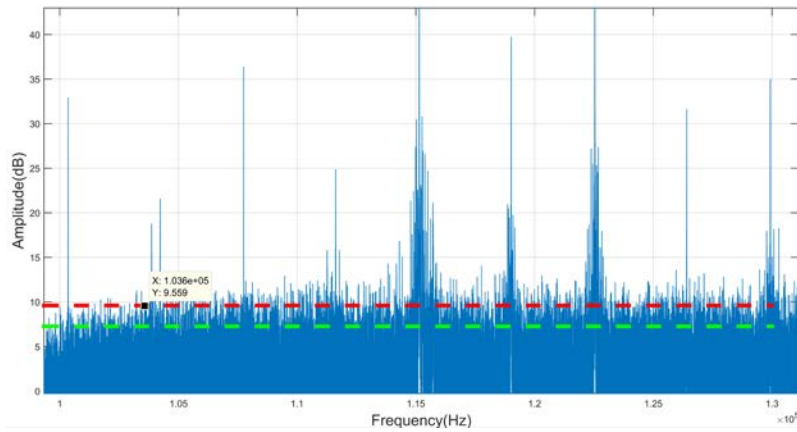


Figura 6 Acercamiento en la banda de interés de la FFT, Sistema sano.

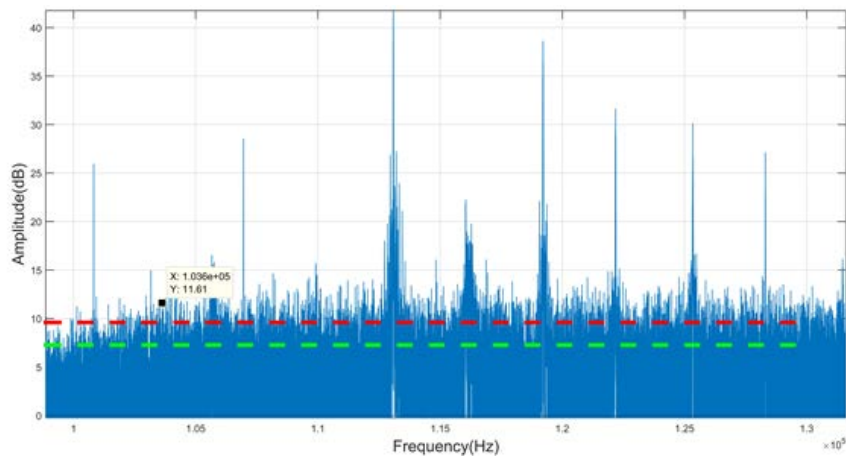


Figura 7 Acercamiento en la banda de interés de la FFT, Sistema dañado.

El sistema de adquisición utilizado para este experimento está en prototipo, lo cual limito al sistema de trabajar a una frecuencia de adquisición más alta, por las perturbaciones y ruido que interferían con las señales de control de alta frecuencia del FPGA para controlar el ADC y transferir los datos. El sistema realiza las primeras pruebas en detección de fallas de esta índole, para darle un enfoque como un sistema complementario, por su principal ventaja de la EA de trabajar en altas frecuencias.

## 5. Conclusiones

Este trabajo propone una metodología para el análisis de señales de EA para el diagnóstico de falla en rodamiento. Se utilizó un sistema que aún está en prototipo para la adquisición de señales de EA, con tecnología FPGA que tiene ventajas como ser reconfigurable y de arquitectura abierta, esto se aprovecha en el sistema siendo un reconfigurable la frecuencia de adquisición. La cadena cinemática propuesta está compuesta por un motor de inducción, caja de engranes y una carga mecánica, se utilizó con dos configuraciones, sano y con falla de rodamiento en el motor de inducción. Al procesar las señales y analizarlas, se realizaron comparaciones de diferentes indicadores propuestos para la identificación de falla de rodamiento. Cada comparación de los indicadores muestra una diferencia, siendo mayor el nivel de dB en las señales del sistema con fallo de rodamiento. El método de EA es propuesto como complementario, ya que su ancho de banda de trabajo puede visualizar espectros de altas frecuencias que otros métodos no pueden, por las limitaciones físicas de los sensores principalmente.

Para tener mejor resolución en el análisis de las señales de EA se trabaja en realizar un sistema de adquisición en una tarjeta que contenga todas las etapas, para evitar los problemas de ruido que interrumpían con las señales de control. Este trabajo es preámbulo para futuros trabajos y diferentes aplicaciones de la EA en las cadenas cinemáticas, así como extenderse a futuros desarrollos de sistemas para aplicaciones industriales para la detección de fallas como un sistema adicional de monitoreo no invasivo.

## Agradecimientos

Este trabajo de investigación fue respaldado por CONACyT.

## 6. Bibliografía y Referencias

- [1] Amini, A., Entezami, M., Huang, Z., Rowshandel, H., & Papaelias, M., Wayside detection of faults in railway axle bearings using time spectral kurtosis analysis on high-frequency acoustic emission signals. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(11), 1687814016676000, 2016.

- [2] Caesarendra, W., Kosasih, B., Tieu, A. K., Zhu, H., Moodie, C. A., & Zhu, Q., Acoustic emission-based condition monitoring methods: Review and application for low speed slew bearing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 72, pp. 134-159, 2016.
- [3] Delgado-Arredondo, P. A., Garcia-Perez, A., Morinigo-Sotelo, D., Osornio-Rios, R. A., Avina-Cervantes, J. G., Rostro-Gonzalez, H., & Romero-Troncoso, R. D. J., Comparative study of time-frequency decomposition techniques for fault detection in induction motors using vibration analysis during startup transient. *Shock and Vibration*, 2015.
- [4] Gohar, R., & Akturk, N., Vibrations Associated With Ball Bearings. In *Conference on Multi body Dynamics, Proc. I. Mech. Engrs*, pp. 43-63, 1998.
- [5] Hao, R. J., Lu, W. X., & Chu, F. L., Review of diagnosis of rolling element bearings defaults by means of acoustic emission technique. *Journal of Vibration and Shock*, 27(3), pp. 75-79, 2008.
- [6] Henriquez P., Alonso, J. B., Ferrer, M. A., & Travieso, C. M., Review of automatic fault diagnosis systems using audio and vibration signals. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 44(5), pp. 642-652, 2014.
- [7] James Li C, Li S, Acoustic emission analysis for bearing condition monitoring, *Wear* 185(1), pp. 67–74, 1995.
- [8] Kral, C., & Habetler, T. G., *Condition monitoring and fault detection of electric drives*. INTECH Open Access Publisher, 2010.
- [9] Mba D, Acoustic emissions and monitoring bearing health. *Tribol Trans* 46(3), pp. 447–451, 2003.
- [10] McFadden P, Smith J., Acoustic emission transducers for the vibration monitoring of bearings at low speeds. *Proc Inst Mech Eng Part C J Mech Eng Sci* 198, pp. 127–130, 1984.
- [11] Morales Velazquez, L., de Jesus Romero Troncoso, R., Osornio-Rios, R. A., Herrera-Ruiz, G., & Cabal-Yeppez, E., Open-architecture system based on a reconfigurable hardware–software multi-agent platform for CNC machines. *Journal of Systems Architecture*, 56(9), pp. 407-418, 2010.

- [12] Niknam, S. A., Songmene, V., & Au, Y. J., The use of acoustic emission information to distinguish between dry and lubricated rolling element bearings in low-speed rotating machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9-12), pp. 2679-2689, 2013.
- [13] Pao, Y. H., Gajewski, R. R., & Ceranoglu, A. N., Acoustic emission and transient waves in an elastic plate. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 65(1), pp. 96-105, 1979.
- [14] Pollock, A. A., Acoustic emission-2: acoustic emission amplitudes. *Non-destructive testing*, 6(5), pp. 264-269, 1973.
- [15] Saucedo-Dorantes, J. J., Delgado-Prieto, M., Ortega-Redondo, J. A., Osornio-Rios, R. A., & Romero-Troncoso, R. D. J., Multiple-fault detection methodology based on vibration and current analysis applied to bearings in induction motors and gearboxes on the kinematic chain. *Shock and Vibration*, 2016.
- [16] Saxena, A., & Saad, A., Genetic algorithms for artificial neural net-based condition monitoring system design for rotating mechanical systems. In *Applied Soft Computing Technologies: The Challenge of Complexity*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 135-149, 2006.
- [17] Tandon N, Nakra B., Comparison of vibration and acoustic measurement techniques for the condition monitoring of Rolling element bearings. *Tribol Int* 25(3), pp. 205–212, 1992.
- [18] Tandon, N., & Nakra, B. C., Vibration and acoustic monitoring techniques for the detection of defects in rolling element bearings—a review. *The shock and vibration digest*, 24(3), pp. 3-11, 1992.
- [19] Tandon, N., & Choudhury, A., A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology international*, 32(8), pp. 469-480, 1999.
- [20] V.Mien, K. Hee-Jun, and S. Kyoo-Sik, Rolling element bearing fault diagnosis based on non-local means de-noising and empirical mode decomposition, *IET Science, Measurement and Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 571–578, 2014.

- [21] Vahaviolos, S. J., Acoustic emission: standards and technology update, ASTM, 1999.
- [22] Van Hecke, B., Qu, Y., & He, D., Bearing fault diagnosis based on a new acoustic emission sensor technique. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, 229(2), pp. 105-118, 2015.
- [23] Yoshioka, T., & Fujiwara, T., A new acoustic emission source locating system for the study of rolling contact fatigue. Wear, 81(1), pp. 183-186, 1982.