

ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE VIBRACIÓN Y EMISIÓN ACÚSTICA PARA EL DIAGNÓSTICO DE SEVERIDAD DE FALLOS EN MAQUINARIA ROTATIVA

ACQUISITION OF VIBRATION AND ACOUSTIC EMISSION SIGNALS FOR THE FAULT SEVERITY DIAGNOSIS IN ROTATING MACHINERY

Ing. Edison Pacheco Córdova*, PhD. René-Vinicio Sánchez Loja*, PhD Diego
Cabrera*, PhD. Mariela Cerrada*.

* GIDTEC, Universidad Politécnica Salesiana,

Calle Vieja 12-30 y Elia Liut, Cuenca, Azuay, Ecuador.

E-mail: epachecoc@est.ups.edu.ec, {rsanchez|dcabrera|mcerrada}@ups.edu.ec

Resumen: Se adquirió señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de la severidad de fallos en maquinaria rotativa. Las señales de vibración y emisión acústica fueron adquiridas de una caja de engranajes de una etapa donde se simularon fallos de grieta y gripado en los engranes con un total de nueve niveles de severidad para cada fallo. Como resultados se analizó las señales en el dominio de la frecuencia donde se compara el comportamiento de la severidad del fallo de las señales de emisión acústica y vibraciones.

Palabras clave: Monitoreo de la condición, emisión acústica, señal de vibración, severidad de fallos.

Abstract: Vibration and acoustic emission signals were acquired to the diagnosis of the severity of faults in rotating machinery. The vibration and acoustic emission signals were acquired from a single stage gearbox where crack and scuffing failures were simulated in the gears with a total of nine severity levels for each failure. As a result, the signals in the frequency domain were analyzed to compare the behavior of the severity of the failure of the acoustic emission and vibration signals.

Keywords: Condition monitoring, acoustic emission, vibration signals, fault severity.

1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento basado en la condición (MBC) usa la información que se obtiene a través del monitoreo de la condición (MC). Estableciéndolo correctamente se puede reducir significativamente el costo, tareas innecesarias y riesgos asociados al mantenimiento preventivo y contribuir a la productividad (Galar *et al.*, 2015).

El MC se puede definir como un medio para determinar la condición de la máquina y prevenir

una falla de la misma sugiriendo acciones de mantenimiento cuando sea necesario (R. V. Sánchez, 2018). Mediante un MC que tiene como parámetros a las señales de vibraciones, emisiones acústicas (EA) y corriente, se puede lograr un diagnóstico temprano para disminuir paradas de emergencia, garantizar la continuidad de las operaciones y evitar fallos catastróficos en el sistema de engranajes (R.-V. Sánchez, Lucero, Vásquez, Cerrada, & Cabrera, 2018; Guiracocha, 2015).

El estudio de la severidad de fallos es una parte importante en un programa de mantenimiento basado en la condición (Jiang *et al.*, 2012).

En maquinaria rotativa como los engranes y rodamientos la estimación de la severidad de fallos es esencial para que las acciones preventivas se puedan tomar mucho y se pueda evitar que ocurra una falla en la maquinaria (A. Sharma, Amarnath, & Kankar, 2016), si bien estos elementos no son costosos, pero son vitales para el correcto funcionamiento, por lo que un fallo en uno de estos elementos podría generar cuantiosas pérdidas.

La medición de las emisiones acústicas se ha convertido en una técnica viable en el MC en maquinaria rotativa (Toutountzakis & Mba, 2003). Esta técnica es un método nuevo y exitoso en el monitoreo de la condición de maquinaria rotativa y diagnóstico de fallos (Ali, Rahman, & Hamzah, 2014). La detección temprana de grietas es posible mediante la adquisición y el análisis de EA, recientemente han captado la aceptación, debido a que el sensor EA puede ser más sensible a detectar la presencia de fallos iniciales que los sensores de vibración (Yoon & He, 2015; Scheer *et al.*, 2007).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es adquirir señales de vibración y señales de emisión acústicas en una caja de engranajes de una etapa con fallos de picadura y agrietamiento con nueve niveles de severidad, esto con el fin de estudiar el comportamiento de las señales a diferentes niveles de severidad y carga.

1.1 Monitoreo de vibraciones

El monitoreo de vibraciones ha demostrado ser una técnica eficiente en la detección de fallos en maquinaria rotativa y en los sistemas mecánicos empleados en diferentes sectores de la industria (V. Sharma & Parey, 2017). En el MC el análisis de vibraciones es la técnica más utilizada de la industria, debido a que puede identificar con gran precisión el 90% de todos los fallos de maquinaria por el cambio en las señales de vibración que se producen y el nivel de señal puede dar una predicción con gran exactitud de un fallo futuro (Devendiran & Manivannan, 2016).

1.2 Monitoreo de emisiones acústicas

Se puede definir a las EA como ondas elásticas transitorias generadas por la liberación rápida de energía causada por la deformación o un fallo en la superficie de un material (Pao *et al.*, 1979). Dentro del MC en maquinaria rotativa, las EA se definen

como ondas transitorias generadas por la interacción de dos elementos en movimiento relativo, estas pueden ser causadas por impacto, fatiga cíclica, fricción, turbulencia, pérdida de material, cavitación, fugas, entre otras (Mba & Rao, 2006).

Las señales EA pueden clasificarse en señal de ráfagas (*burst*) y señal continua. Las señales tipo ráfagas se dan cuando las fuentes monitoreadas no son repetibles y ocurren discretamente, además tienen puntos definidos claramente de principio y fin del ruido que provoca el defecto, son características de aparición y crecimiento de grietas en un material, cavitación y corrosión (Ferrando Chacon, 2015; Sidorova, 2010). Estas señales tienden a no ser más largas que unas pocas centésimas de segundo (Naumann, 2016).

Las señales de EA continuas tienen amplitudes y frecuencias variables, pero nunca se terminan, son típicamente emisiones de baja energía que ocurren cuando los mecanismos de fricción se presentan dentro de una estructura y no muestran ninguna característica visualmente obvia en el dominio del tiempo (Ferrando Chacon, 2015; Sidorova, 2010; Naumann, 2016). En la *Fig. 1* se puede observar la diferencia entre las señales tipo ráfaga y continua.

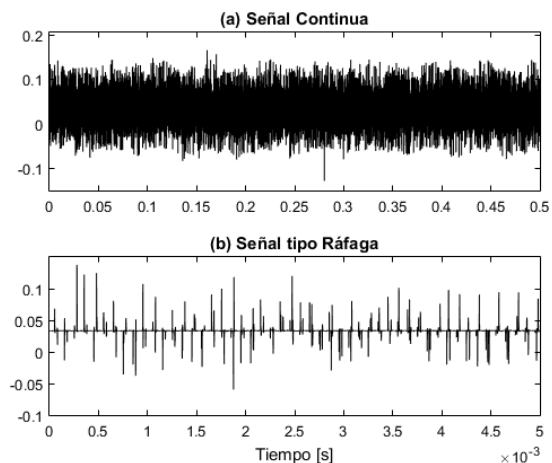


Fig. 1. (a) Señal continua (continuous signal), (b) señal tipo ráfaga (burst signal)

Una señal característica de EA tipo ráfaga se presenta en la *Fig. 2*, los datos que se obtienen de la forma de onda, se usan para sacar información sobre la fuente, tal como su actividad e intensidad (Sidorova, 2010; Degala, 2008).

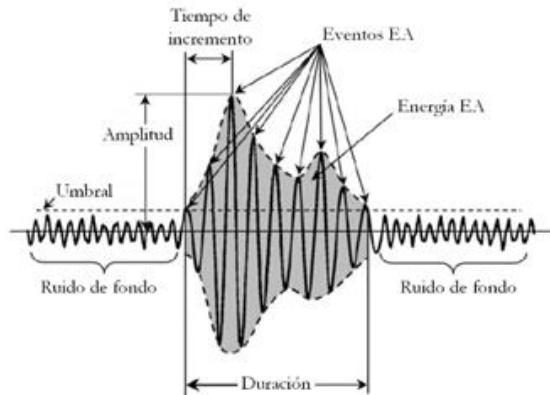


Fig. 2. Parámetros de la señal EA (Non-Destructive, 2016)

Amplitud (A): se la define como la tensión de pico de una onda, la cual es medida en decibelios (dB).

Tiempo de llegada: tiempo absoluto en el cual aparece la primera señal de descubrimiento de un fallo.

Tiempo de incremento: es el tiempo que tarda la onda en alcanzar su máximo valor tomando como inicio el primer cruce con el umbral.

Duración: es el tiempo existente entre el primer y último cruce de la onda con el umbral.

Energía: área bajo la curva generada por la envolvente de la señal de tiempo.

Eventos: número de pulsos emitidos por el circuito de medición cuando la señal es mayor que el umbral.

Las señales tipo ráfagas y continuas, están asociadas con la maquinaria rotativa, por ejemplo, una señal continua puede resultar de un flujo de fluido turbulento, mientras que la señal tipo ráfagas está asociada con la acción rodante transitoria. El ruido también es de tipo continuo (Mba & Rao, 2006). El impacto que es importante cuando se monitorea el fallo de un rodamiento, se considera una fuente de señal tipo ráfagas (Naumann, 2016). Las señales tipo ráfaga son emitidas por estructuras estáticas, los eventos pueden ser vistos claramente y pueden ser analizados por separado. En el caso de maquinaria rotativa, es posible que eventos individuales tengan una amplitud muy similar y se generen con la suficiente frecuencia como para que la señal parezca continua; sin embargo, la señal más común en maquinaria rotativa es cuando la señal continua aparece como fondo y los eventos más energéticos aparecen como picos (Hamel, 2013).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se construye un montaje experimental en una caja de engranajes para adquirir señales de vibración y EA para el diagnóstico de severidad de fallos en engranes. Se propone la construcción de dos fallos artificiales en los engranes: grietas y gripado con nueve niveles de severidad. La técnica que se utiliza para la comparación de las señales es mediante el análisis de la amplitud de la frecuencia de engranaje.

2.1 Banco de vibraciones

El banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, Ecuador, consta de todos los implementos necesarios para realizar diferentes configuraciones de maquinaria rotativa como: desbalanceo, desalineación y combinaciones de fallos en engranes y rodamientos. El banco se conforma por cinco unidades principales: unidad de mando, unidad motriz, unidad de carga, unidad de sistemas rotativos y unidad de adquisición de datos, tal como se ilustra en la Fig. 3.

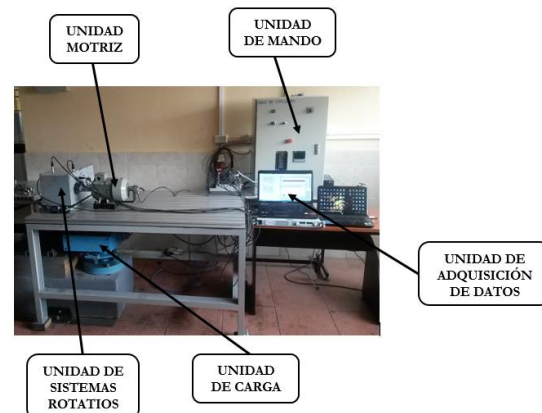


Fig. 3. Banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana.

El movimiento se genera por un motor marca Siemens modelo 1LA7 096-6YA60 de 2 hp; el movimiento que se transmite hacia el eje de entrada de la caja de engranajes es mediante un acople flexible. En el eje de salida de la caja de engranajes se ubica una polea que transmite el movimiento al freno magnético Rosati de 883 kW mediante una banda flexible, lo cual permite simular la aplicación de cargas. La carga del freno es controlada por una fuente de voltaje de corriente continua TDK-Lambda, GEN 100-15-is510. La velocidad de giro del motor es controlada por medio de un variador de frecuencia Danfoss VLT 1.5 kW.

El sistema de adquisición de datos de las señales de vibración y EA se presenta en la Fig. 4. Las señales de vibración son censadas por cuatro acelerómetros (A1, A2, A3, A4), modelo IPC 63C01, cada señal de los acelerómetros es adquirida a 50 kS/s por una tarjeta NI 9234. Las señales EA son censadas por dos sensores de EA (EA1, EA2) modelo *Physical Acoustics* WD que van montadas en las paredes más cortas de la caja de engranajes, cada señal de EA ingresa a un preamplificador MISTRAS 0/2/4C, cada señal EA es adquirida a 1MS/s por la tarjeta NI 9223. Las dos tarjetas NI 9234 y NI 9223 se acoplan a un chasis NI cDAQ-9188 que envía datos vía Ethernet a un computador portátil ASU ROG GL752VW-DH74 en el cual se dispone de LabVIEW para la adquisición de las señales y Matlab para el procesamiento de las señales.

La caja de engranajes se puede configurar para desarrollar pruebas en una o dos etapas, se pueden montar engranes de dientes rectos o helicoidales. Los engranes son construidos de acero E410, el número de dientes para el piñón y el engrane es de $Z1=32$ y $Z2=48$ respectivamente. El espesor de los dientes es de 20 mm, módulo de 2.25 y un ángulo de presión $\theta=20^\circ$. La lubricación utilizada para la caja de engranajes fue Gulf HARMONY A W ISO VG 68. La localización de los fallos fue en el engrane Z1, cada fallo tiene una condición normal P1 y nueve niveles de severidad P2 a P10. La duración de la adquisición de cada muestra fue de 10 segundos. La frecuencia de rotación del motor fue de 6Hz (F1), 12Hz (F2) y 16Hz (F3) y finalmente las cargas aplicadas fueron de 0V (L1), 10V (L2) y 20V (L3).

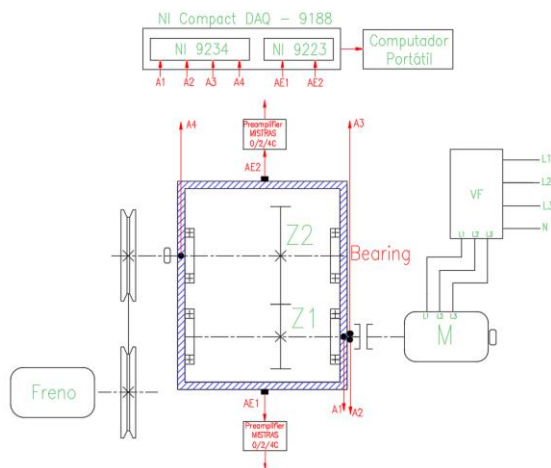


Fig. 4. Sistema de adquisición de señales.

2.2 Fallos simulados en engranes

Los engranes son uno de los principales elementos mecánicos que se encuentran en la gran mayoría de la maquinaria rotativa para transmitir movimiento, un fallo en uno de estos elementos puede generar daños catastróficos. El monitoreo de vibraciones es la técnica más utilizada para detectar fallos en engranes, pero actualmente el monitoreo de EA está empezando a ganar terreno en la detección de fallos, debido a su capacidad para detectar fallos incipientes. En este artículo se seleccionaron dos fallos: grietas en los dientes del piñón y el gripado en la cara del diente del piñón.

Fallo por grieta: un fallo por grieta (*crack*) es uno de los modos de fallos más frecuentes en los engranes. La identificación de diferentes niveles de grietas, especialmente para las iniciales, es un gran desafío en el diagnóstico de fallos de engranes (Lei & Zuo, 2009). Las grietas pueden ocurrir en cualquier parte del diente, debido a las altas tensiones mecánicas o de temperatura, defectos de los materiales por el uso de tecnología de fabricación de baja calidad (Starzhinskii *et al.*, 2008), cargas excesivas o fatiga (Liang *et al.*, 2015). Si las grietas no son detectadas en una etapa temprana, terminan con la fractura del diente, por esta razón también son denominadas fracturas progresivas (Chaari *et al.*, 2009).

El fallo de grieta se construirá en un solo diente con un ángulo de 45° y un espesor de 0.40 mm. En la Tabla 1 se especifica la profundidad y la longitud para cada nivel de severidad. La máxima profundidad de la grieta es la mitad del espesor del diente, debido a que el diente se romperá rápidamente cuando la profundidad sea más de la mitad del espesor del diente (Lei & Zuo, 2009; Wang *et al.*, 2015).

Tabla 1: Niveles de severidad para grietas.

Severidad [%]	Profundidad [mm]	Longitud [mm]	Nivel de severidad
5.00	0.10	1.00	Leve
12.50	0.20	2.50	Leve
25.00	0.50	5.00	Leve
37.50	0.70	7.60	Leve
45.00	0.90	9.00	Leve
60.00	1.00	12.00	Moderado
75.00	1.50	15.00	Moderado
85.00	1.70	17.00	Severo
100.00	1.90	20.30	Severo

Fallo por gripado: el fallo por gripado o rayado conocido en inglés como "*scuffing*", se presenta como una eliminación o deformación plástica de la superficie de contacto de los dientes, causada principalmente por sobrecarga en el

funcionamiento durante ciclos prolongados y mala lubricación. Una vez iniciado el fallo este se propaga pasando de líneas de espesor despreciables a líneas marcadas incluso del mismo espesor del ancho del diente (Ebersbach *et al.*, 2006; Liou, 2010; Klein, 2009).

El fallo por gripado fue simulado en un solo diente del engrane, con una profundidad constante de 0.1 mm para todos los casos. La *Tabla 2* especifica el porcentaje del nivel de severidad para la generación del gripado.

Tabla 2: Niveles de severidad para el gripado.

Severidad [%]	Líneas	Longitud [mm]	Espesor [mm]	Nivel de severidad
1.67	2	1.50	0.50	Leve
3.33	2	1.50	1.00	Leve
5.00	2	1.50	1.50	Leve
6.67	2	1.50	2.00	Leve
8.89	2	2.00	2.00	Leve
16.67	2	2.50	3.00	Moderado
23.33	2	3.00	3.50	Moderado
40.00	2	4.50	4.00	Severo
60.00	3	4.50	4.00	Severo

2.3 Verificación de frecuencias características

Cuando una caja de engranajes se encuentra en buenas condiciones generan frecuencias características que están determinadas por la relación de transmisión entre el piñón-engrane y la frecuencia de giro del motor la cual se puede calcular mediante la ecuación (1); esta relación se la conoce como frecuencia de engranaje “*Gear Mesh Frequency, (GMF)*” la cual se presenta en la ecuación (2). Para el diagnóstico de la severidad de fallos en los engranes se efectuó mediante el comportamiento de la amplitud de la GMF en las señales de vibración y EA en el dominio de la frecuencia. Finalmente se realizará una comparación entre las señales de vibración y EA conforme avanza la severidad del fallo.

$$F_g = \frac{RPM_{motor}}{60} [Hz] \quad (1)$$

$$GMF = F_g * Z_1 \quad (2)$$

Dónde:

RPM_{motor} : Velocidad de giro del motor en rpm

Z_1 : Número de dientes del piñón

3. RESULTADOS

3.1 Severidad de fallos mediante vibración y EA

En las señales de emisión acústica que se presentan en la *Fig. 5* y *Fig. 6*, para fallos de grietas y gripado respectivamente, la identificación de la GMF se vuelve complejo, debido a que los armónicos se encuentran a lo largo de toda la señal, es decir se tiene mayor información la cual no puede ser interpretada con facilidad de forma visual; por lo que se requiere el uso de indicadores de condición y/o técnicas de inteligencia artificial para el diagnóstico adecuado con señales de emisión acústica.

Una vez identificada la GMF de forma visual se puede observar como esta va incrementando conforme la severidad del fallo avanza. Por lo cual mediante las señales de EA es posible identificar los diferentes niveles de severidad de un fallo, pero no se puede identificar qué tipo de fallo se está presentando.

En las señales de vibración que se presentan en la *Fig. 7* y *Fig. 8*, para fallos de grietas y gripado respectivamente, se puede identificar la GMF sin dificultad debido a que esta se encuentra en el mismo rango de frecuencia y está acompañada de bandas laterales a la frecuencia de giro del motor. La información que presentan las señales de vibración en el dominio de la frecuencia para los dos fallos seleccionados es poca en comparación a las señales de EA. Mediante las señales de vibración resulta complejo identificar la severidad de un fallo debido a que, la amplitud de la GMF varía de forma no uniforme para ambos fallos seleccionados.

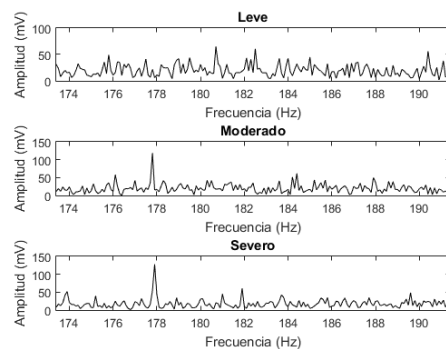


Fig. 5. Señales de EA para severidad de fallo por grieta.

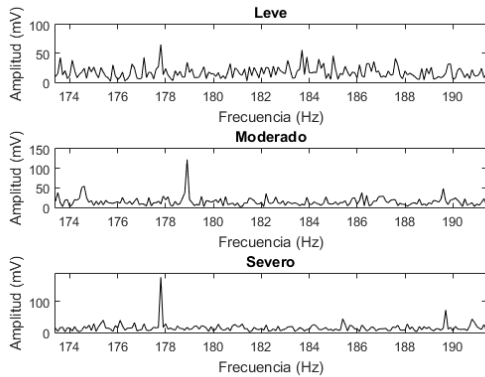


Fig. 6. Señales de EA para severidad de fallo por gripado.

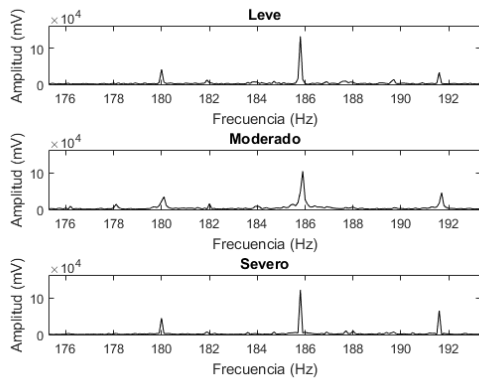


Fig. 7. Señales de vibración para severidad de fallo por grieta.

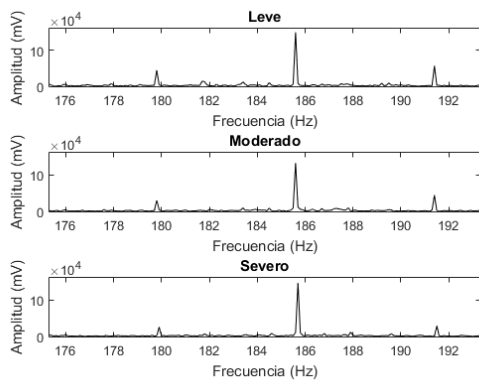


Fig. 8. Señales de vibración para severidad de fallo por gripado.

4. CONCLUSIONES

Mediante el estudio bibliográfico se detalló a profundidad el estudio de las emisiones acústicas aplicadas a la maquinaria rotativa, donde se resalta la importancia y la efectividad de esta técnica para

detectar los fallos incipientes dentro del monitoreo de la condición en comparación con las señales de vibración.

Con las señales de vibración se logró detectar fallos en engranes con facilidad mediante la frecuencia del engranaje, pero resulta complicado determinar el avance del nivel de severidad; mientras que con las señales de emisión acústica resulta complejo identificar el tipo de fallo en el engrane, pero con esta técnica se puede determinar como la severidad de los fallos va incrementando.

El monitoreo de las señales de emisión acústica es ideal para determinar la severidad de fallos por medio de técnicas de inteligencia artificial; debido a que la señal tiene mayor información que la de vibración en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

REFERENCIAS

- Ali, Y. H., Rahman, R. A., & Hamzah, R. I. R. (2014). Acoustic emission signal analysis and artificial intelligence techniques in machine condition monitoring and fault diagnosis: a review. *Jurnal Teknologi*, 69(2), 121–126.
- Chaari, F., Fakhfakh, T., & Haddar, M. (2009). Analytical modelling of spur gear tooth crack and influence on gearmesh stiffness. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 28(3), 461–468.
- C. J. Torres, J. F. Archila, M. L. Tronco, M. Becker, A. J. V. Porto, A. J. Tiberti. (2013). Estudio cinemático de una plataforma robótica para agricultura. REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGÍAS DE AVANZADA, ISSN: 1692-7257. 2(22).
- Degala, S. (2008). *Acoustic emission monitoring of reinforced concrete systems retrofitted with CFRP*. University of Pittsburgh.
- Devendiran, S., & Manivannan, K. (2016). Vibration Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies For Bearing and Gear Components-A Review. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(6), 3966–3975.
- Ebersbach, S., Peng, Z., & Kessissoglou, N. J. (2006). The investigation of the condition and faults of a spur gearbox using vibration and wear debris analysis techniques. *Wear*, 260(1), 16–24.

- Ferrando Chacon, J. L. (2015). *Fault detection in rotating machinery using acoustic emission*. Brunel University London.
- Galar, D., Thaduri, A., Catelani, M., & Ciani, L. (2015). Context awareness for maintenance decision making: A diagnosis and prognosis approach. *Measurement*, 67, 137–150.
- Guiracocha, A. R. (2015). *Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones acústicas e imágenes termográficas infrarrojas para un sistema mecánico rotativo con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en engranajes* (B.S. thesis).
- Hamel, M. A. (2013). Condition Monitoring of Helical Gears Using Acoustic Emission (AE) Technology.
- Jardine, A. K., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*, 20(7), 1483–1510.
- Jiang, F., Li, W., Wang, Z., & Zhu, Z. (2012). Fault severity estimation of rotating machinery based on residual signals. *Advances in Mechanical Engineering*, 4, 518468.
- Klein, M. A. (2009). *An experimental investigation of materials and surface treatments on gear contact fatigue life*. The Ohio State University.
- Lei, Y., & Zuo, M. J. (2009). Gear crack level identification based on weighted K nearest neighbor classification algorithm. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(5), 1535–1547.
- Liang, X., Zuo, M. J., & Hoseini, M. R. (2015). Vibration signal modeling of a planetary gear set for tooth crack detection. *Engineering Failure Analysis*, 48, 185–200.
- Liou, J. J. (2010). *A theoretical and experimental investigation of roller and gear scuffing*. The Ohio State University.
- Mba, D., & Rao, R. B. (2006). Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating Machines; Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines and Rotating Structures.
- Naumann, J. (2016). *Acoustic Emission Monitoring of Wind Turbine Bearings*. University of Sheffield.
- Non-Destructive, T. J. S. for. (2016). *Practical Acoustic Emission Testing*. Springer.
- Pao, Y.-H., Gajewski, R. R., & Ceranoglu, A. N. (1979). Acoustic emission and transient waves in an elastic plate. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 65(1), 96–105.
- Sánchez, R. V. (2018). *Diagnóstico de fallos en cajas de engranajes con base en la fusión de datos de señales de vibración, corriente y emisión acústica*. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín.
- Sánchez, R.-V., Lucero, P., Vásquez, R. E., Cerrada, M., & Cabrera, D. (2018). A comparative feature analysis for gear pitting level classification by using acoustic emission, vibration and current signals. *IFAC-PapersOnLine*, 51(24), 346–352.
- Scheer, C., Reimche, W., & Bach, F.-W. (2007). Early fault detection at gear units by acoustic emission and wavelet analysis. *J. Acoust. Emiss*, 25, 331–340.
- Sharma, A., Amarnath, M., & Kankar, P. K. (2016). Feature extraction and fault severity classification in ball bearings. *Journal of Vibration and Control*, 22(1), 176–192.
- Sharma, V., & Parey, A. (2017). Frequency domain averaging based experimental evaluation of gear fault without tachometer for fluctuating speed conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 85, 278–295.
- Sidorova, A. (2010). *Aplicación del método de la emisión acústica en la monitorización de las estructuras de hormigón*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Starzhinskii, V. E., Soliterman, Y. L., Goman, A. M., & Osipenko, S. A. (2008). Forms of damage to gear wheels: Typology and recommendations on prevention. *Journal of friction and wear*, 29(5), 340–353.
- Torres, C., Archila, J., Tronco, M., Becker, M., Viera Porto, A., & Tiberti, A. (2013). Estudio cinemático de una plataforma robótica para agricultura. *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGÍAS DE AVANZADA*, 2(22).
- Toutountzakis, T., & Mba, D. (2003). Observations of acoustic emission activity during gear defect diagnosis. *NDT & E International*, 36(7), 471–477.
- Wang, D., Tsui, K.-L., Tse, P. W., & Zuo, M. J. (2015). Principal components of superhigh-dimensional statistical features

and support vector machine for improving identification accuracies of different gear crack levels under different working conditions. *Shock and Vibration*, 2015.

Yoon, J., & He, D. (2015). Planetary gearbox fault diagnostic method using acoustic emission sensors. *IET Science, Measurement & Technology*, 9(8), 936–944.