



**XXII CONGRESO**  
NACIONAL INGENIERÍA MECÁNICA

# **ANALES DE INGENIERÍA MECÁNICA**

Revista de la Asociación Española  
de Ingeniería Mecánica

Año 21, Septiembre 2018

19-21

**LIBRO DE ACTAS SEP 2018 madrid**

Congreso y publicación promovidos por la Asociación Española de Ingeniería Mecánica AEIM.

**Editor:**

José I. Pedrero

**Comité Editorial:**

Miryam B. Sánchez

Miguel Pleguezuelos

Lourdes del Castillo

Eduardo Gómez

*Área de Ingeniería Mecánica*

*Departamento de Mecánica*

*UNED*

**Edita:**

Universidad Nacional de Educación a Distancia

Septiembre de 2018

**Anales de Ingeniería Mecánica**

Año 21, Septiembre

**ISSN: 0212-5072**

## Monitorización de transmisiones de engranajes con sensores de emisión acústica

**E. Caso Fernández, M. Iglesias Santamaría, P. García, J. Sanchez, A. Fernández del Rincón**

*Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Cantabria, casoe@unican.es*

---

*El método predominante en mantenimiento en condición de máquinas rotatorias es la medida de vibraciones, si bien recientemente se han propuesto las ventajas que ofrece la tecnología de emisión acústica (EA) en la detección temprana de fallos y regímenes de baja velocidad. La captura de las señales de EA está condicionada por una fuerte atenuación con la distancia y la presencia de discontinuidades en el material entre la fuente y el sensor, por lo que la localización de los aparatos de medida tiene mayor importancia que en acelerometría tradicional. En este trabajo se miden las señales de EA en transmisiones de engranajes en diferentes condiciones para estudiar las características de la señal generada en la interacción de ejes, rodamientos y engranajes. Para ello se realizan una serie de ensayos con combinaciones de velocidad y carga variables, teniendo en cuenta el efecto de la temperatura del aceite de lubricación. Se toman medidas fijas, sobre los apoyos a la bancada, y embarcadas, con los sensores girando solidarios a los ejes. En paralelo a la emisión acústica se realiza un análisis de vibraciones sirviendo para contrastar y analizar las diferencias obtenidas entre ambas tecnologías en los distintos regímenes de operación. Se procesan los datos adquiridos para obtener parámetros estadísticos de las medidas con el fin de verificar los valores y tendencias debidos a los fenómenos transitorios relacionados con la variación de velocidad y carga.*

---

### 1. Introducción

La implementación de la emisión acústica (EA) en el campo del mantenimiento en condición de máquinas rotatorias tiene un largo camino por delante para conseguir el mismo estatus que el análogo análisis de vibraciones. Diversos estudios han sido llevados a cabo en la monitorización de rodamientos con EA mostrando prometedoras ventajas [1]. Esta tecnología está basada en las ondas elásticas de alta frecuencia que son registradas por un sensor piezoeléctrico generadas por instantáneas liberaciones de energía producidas por tensiones, defectos o interacciones entre componentes en movimiento relativo [2-3]. La aleatoriedad y la presencia de ruido en la señal de EA combinada con la complejidad que añaden las transmisiones por engranajes dificultan la identificación de fallos. Los múltiples componentes que las forman actúan como fuentes de emisión simultáneas situadas en diferentes lugares y con discontinuidades entre ellas y el sensor. Los mecanismos físicos relacionados con la generación de las ondas mecánicas no están completamente claros, siendo el fenómeno producido en el contacto de asperezas de superficies la principal hipótesis [4].

Estudios previos han propuesto las ventajas de la EA respecto a la acelerometría tradicional a bajas velocidades debido a la baja cantidad de energía liberada por los defectos [5]. El contenido en frecuencias de las ondas acústicas depende más de las características del material que de la velocidad de rotación [6]. Las señales de EA se adquieren a tasas de muestreo muy elevadas (por encima de 1 MHz), significando esto que una enorme cantidad de datos deben de ser registrados para una sola revolución del sistema. Además, trabajado a velocidades bajas se complica el análisis en frecuencias por la resolución espectral requerida para la detección y diagnóstico cuando las frecuencias naturales están próximas unas a las otras [7]. La implementación de métodos computacionales o incrementar el tiempo de adquisición son una solución cuando las limitaciones impuestas por la gran cantidad de datos y la operación estable de los sistemas monitorizados no están presentes [8]. Esta desventaja de la aplicación de EA a baja velocidad ha llevado a investigadores a desarrollar métodos para optimizar la diagnosis con EA en la monitorización de rodamientos [9] o la reducción de la cantidad de datos

[10]. Estas señales procesadas son útiles cuando en las señales originales se puede observar de manera clara estallidos o picos que superan los niveles de umbral de ruido a intervalos periódicos.

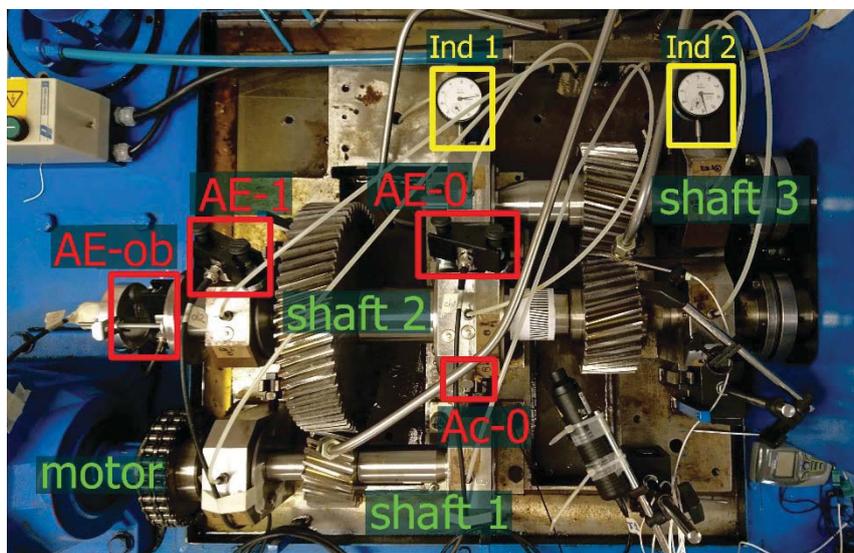
Un factor principal en la monitorización con EA es el lugar de colocación del sensor: la señal se ve atenuada por las discontinuidades entre distintos componentes y las propiedades de transmisión de los materiales que son atravesados. La información recogida por el sensor varía en gran medida si este ha sido situado en contacto con la propia superficie de un engranaje o en el soporte de un rodamiento [11].

Con el objetivo de simplificar el manejo de computacional de los datos, se emplean indicadores estadísticos para la detección de fallos observando variaciones en sus niveles. Los indicadores más empleados son la raíz cuadrática media (RMS), kurtosis, conteo de eventos o factor de cresta entre otros. Se han realizado diversas investigaciones con el propósito de la validación de la utilización de la EA en el mantenimiento en condición teniendo en cuenta el efecto de algunos de los parámetros que influyen en las características de las señales como velocidad, carga y temperatura [12-13].

El objetivo principal de este presente trabajo es el estudio del efecto producido por un error en el alineamiento de uno de los ejes de una transmisión por engranajes en las señales de EA, comprando dichos resultados con mediciones de aceleración, girando a bajas velocidades y sometido a carga variable. El engrane desalineado que aparece entre los dientes de los engranajes involucrados, a baja velocidad y carga variable, puede resultar una situación ventajosa para su detección por EA respecto a la acelerometría.

## 2. Procedimiento experimental

Para realizar los ensayos se emplea una transmisión que simula un reductor de un tren de laminación con dos etapas de reducción como se muestra en la Figura 1. El banco se alimenta con un motor eléctrico con reductor incorporado de 1.1 kW capaz de operar a bajas velocidades, por debajo de un máximo de 60 rpm. La carga se introduce por medio de un sistema de frenos neumáticos en dos de los ejes (eje 2 y 3) pudiendo ser cada uno operado independientemente. Los rodamientos y engranajes están lubricados gracias a un circuito de lubricación con una bomba que aporta un flujo de aceite constante. El banco ha sido diseñado para probar defectos y errores de desalineamiento, por lo que los ejes pueden moverse de manera controlado respecto de sus posiciones originales mostrando el desplazamiento mediante unos relojes comparadores.

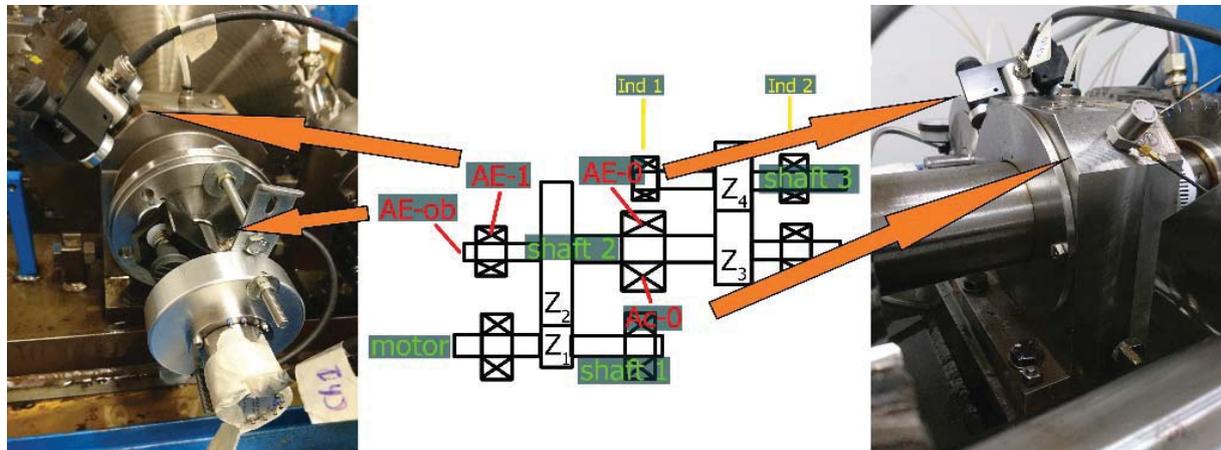


**Figura 1:** Transmisión empleada y situación de los equipos.

Por medio de una tarjeta de adquisición comercial de datos de 16-bit (AdLink USB-1210) se recogen las señales de tres canales de emisión acústica empleando tres sensores de EA preamplificados (VS150-RIC) situados en puntos de distintas características. Las señales de EA son adquiridas seleccionando la máxima tasa de muestreo de 2 MHz en cada uno de los canales. Esta captura se realiza por medio de un programa desarrollado en Labview que a su vez incluye la adquisición de la señal de aceleración y un canal tacométrico auxiliar empleando otra tarjeta (NI USB-9162 NI 923). La aceleración se mide con un acelerómetro uniaxial (Brüel & Kjær type 4398).

- **AE-0:** fijo sobre la carcasa de un rodamiento. Un sensor de EA se sitúa en la carcasa del apoyo del rodamiento principal del eje 2, siendo este el más cercano a los engranes afectados por el desalineamiento que se introduce.

- **Ac-0:** fijo sobre la carcasa de un rodamiento. Un acelerómetro es situado en una posición análoga al canal **AE-0** en la carcasa del mismo rodamiento.
- **AE-ob:** embarcado en el eje 2. En el extremo del eje 2 se coloca un sensor de EA que gira solidario en el eje. La señal se extrae por medio de un anillo deslizante.
- **AE-1:** fijo sobre la carcasa de un rodamiento. Este sensor de EA está situado sobre la carcasa del apoyo del rodamiento más cercano al del canal **AE-ob** al final del eje 2.



**Figura 2:** Sensor **AE-ob** con el anillo deslizante y **AE-1** en el apoyo de un rodamiento (en la parte izquierda), **Ac-0** y **AE-0** en el rodamiento principal a la derecha.

Además de estas medidas, la temperatura del aceite de lubricación y la temperatura ambiente se registran en todo momento empleando un termómetro *datalogger*.

### 2.1. Descripción del ensayo

Antes de llevar a cabo los ensayos, el banco está en funcionamiento el tiempo necesario para calentar las pastillas de freno, así como la estabilización de la temperatura del aceite de lubricación evitando influencias no deseadas en las señales generadas. La condición inicial de los ensayos es la correspondiente a una correcta posición de los ejes, en la que están firmemente fijados. La posición de los soportes es medida con los indicadores para posteriormente poder introducir el desalineamiento deseado.

Se seleccionan dos valores de baja velocidad para efectuar una serie de pruebas en combinación con varios niveles de carga (Tabla 1). Con cada combinación de carga-velocidad se repiten varias mediciones de 9 segundos modificando la carga con una tendencia lineal dentro de ese intervalo temporal. Toda la carga se introduce por medio del freno del eje 3 permitiendo que el eje 2, en el que se encuentran todos los sensores, no tenga perturbaciones directas de los frenos al variar la carga.

Después de recoger las medidas, las señales son procesadas con MATLAB calculando los indicadores estadísticos y realizando su análisis. RMS, kurtosis, factor de cresta y conteo de eventos, así como el percentil 0.99 son evaluados tanto en las señales de EA como de aceleración. Estos cálculos se realizan para la señal completa de 9 segundos y dividiendo la señal en pequeños fragmentos de tiempo para evaluar su evolución con la variación de la carga. Para cada condición de ensayo se selecciona un valor promedio de los indicadores obteniendo un valor representativo de cada uno.

**Tabla 1:** Condiciones de carga y velocidad.

Velocidad (ejes 2 y 3)	Potencia del motor
15 rpm	750 W
20 rpm	1000 W
	500 --- 1000 W
	1000 --- 500 W
	750 --- 1000 W
	1000 --- 750 W

Una vez conseguida la firma de operación en condiciones correctas, sin error en la posición de los ejes, se introduce un error de desalineamiento en el eje de salida (eje 3). El apoyo correspondiente al indicador 1 se mueve hasta que la aguja indica una desviación de 2 mm, como se muestra en la Figura 3, resultando un ángulo de 1.25° respecto a la posición inicial. Todos los ensayos y cálculos se repiten para esta configuración.

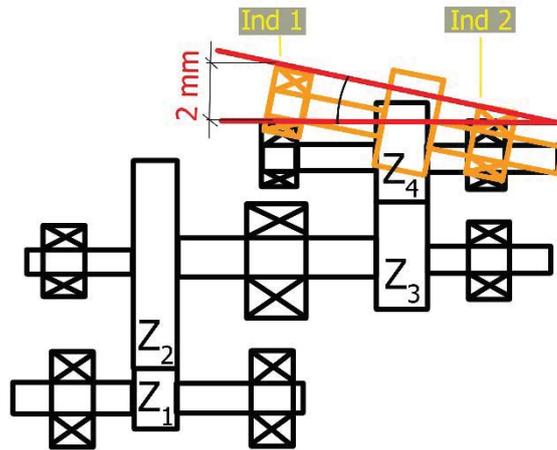


Figura 3: Esquema del desalineamiento.

### 3. Resultados

El principal efecto del desalineamiento en el eje de salida consiste en la modificación del engrane entre los engranajes Z<sub>3</sub> y Z<sub>4</sub> (Figura 3). El incorrecto contacto entre los dientes se refleja en el incremento de la amplitud de los picos en el sensor embarcado AE-ob (Figura 4). Al realizar un análisis espectral de la envolvente de la señal de EA, la frecuencia del contacto entre los dientes aparece en este canal sin información de ella en el resto de los sensores de EA.

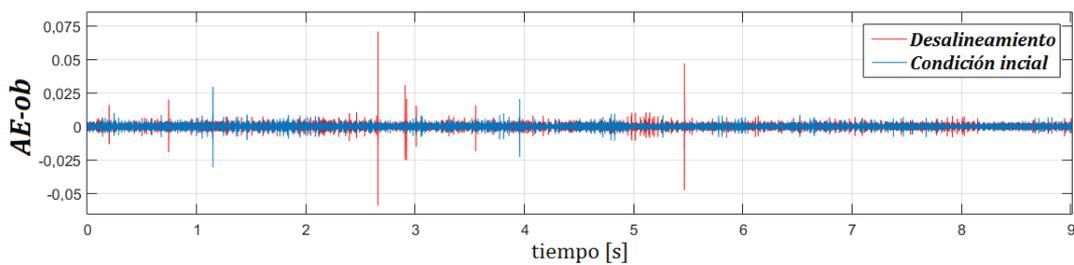


Figura 4: Variación de la señal de EA en el canal embarcado AE-ob con el desalineamiento – cambiando la carga de 1000 W a 500 W a 20 rpm.

La variación de carga se traduce en un aumento en amplitud en el mismo modo que lo hace la carga. La señal de EA procedente de AE-O situado en el mismo apoyo que el acelerómetro (Ac-O) presenta un comportamiento similar para ambas, aunque menos acusado en AE-O (Figura 5). El camino que recorre la señal desde la fuente de emisión que supone el contacto entre dientes y el sensor embarcado AE-ob es mayor que la distancia a los sensores situados en los apoyos fijos sobre los soportes de los rodamientos. Sin embargo la ausencia de discontinuidades y elementos en movimiento en ese espacio hace que la señal sea más clara.

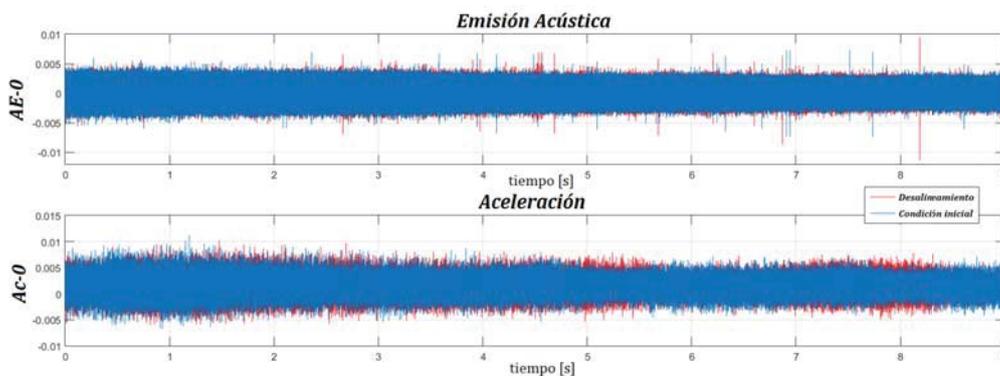
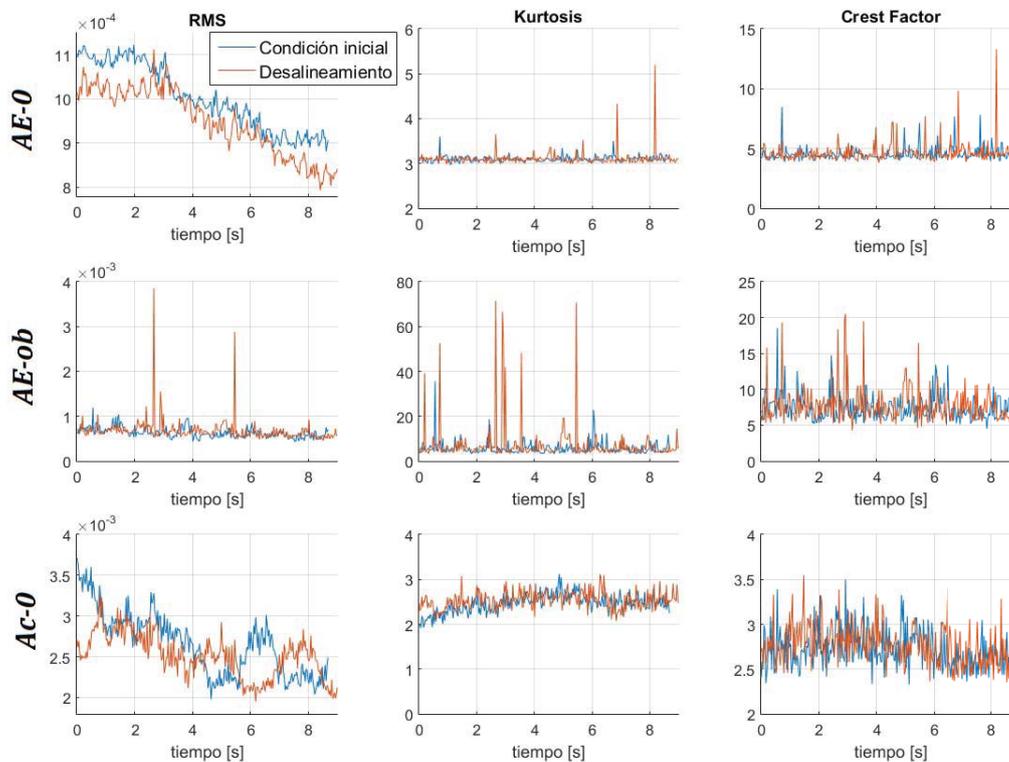


Figura 5: Señales de AE-O y aceleración Ac-O en posición correcta y con desalineamiento de los ejes – cambiando la carga de 1000 W a 500 W a 20 rpm.

La Figura 6 muestra la variación temporal de 3 de los indicadores estadísticos: RMS, kurtosis y factor de cresta, de los dos canales de EA *AE-0* y *AE-ob* y del canal de aceleración *Ac-0* durante la adquisición de una medición. El valor de RMS cambia en tendencia lineal con la carga para ambas señales de aceleración y EA, con o sin desalineamiento y para todos los canales, en posición fija o embarcada. La presencia del desalineamiento se observa en el sensor *AE-ob* del eje 2 donde aumentan los valores de pico en el RMS de la misma manera que la amplitud en la señal de emisión acústica tiene mayor amplitud al introducir el desalineamiento. La evolución del RMS a lo largo del tiempo ofrece una simplificación del comportamiento de la señal en bruto con una significativa disminución de los datos.



**Figura 6:** Evolución de los indicadores de la señal – cambiando la carga de 1000 W a 500 W a 20 rpm.

El desalineamiento provoca la aparición de picos en el valor de kurtosis durante el intervalo de medida de los canales de EA, tanto en los sensores fijos como en el embarcado, con una importancia mayor en el embarcado (*AE-ob*) para la velocidad más baja de rotación. Por otra parte no se aprecia una respuesta en el valor del kurtosis de la señal de aceleración cuando se compara con la debida al desalineamiento.

Se calcula un promedio de todas las mediciones repetidas a una misma configuración de carga y velocidad. Cada una de estas condiciones se ve representada por un valor para comparar el efecto del desalineamiento así como de la capacidad de cada indicador en la detección de éste. Los indicadores que muestran una mayor influencia del desalineamiento son los relativos al sensor embarcado, de manera más significativa que en la señal de EA en bruto y en la evolución temporal de los indicadores (Figuras 7 y 8).

La variación en el canal embarcado (*AE-ob*) y en el de aceleración es más pronunciada para velocidades elevadas (dentro del rango de muy bajas velocidades). Los indicadores de la señal de aceleración parecen no estar influenciados por la incorrecta alineación del eje a muy bajas velocidades. Sin embargo, la variación del valor de RMS de la señal *AE-0* procedente del sensor situado en el rodamiento principal ha sido un indicativo de la presencia de defecto independiente de la velocidad de giro (Figura 7). En el soporte del otro rodamiento en el que se ha medido el canal *AE-1*, se produce el mismo comportamiento para baja velocidad pero la tendencia se revierte cuando la velocidad es mayor mostrando una respuesta poco clara a la presencia del defecto. La reducción del nivel de RMS en *AE-0* y la modificación en la respuesta de *AE-1* según la velocidad parecen indicar que esos cambios son efecto de la nueva distribución de cargas debido al desalineamiento. Si fuese un efecto del incremento de la temperatura del aceite ambos deberían disminuir de igual manera.

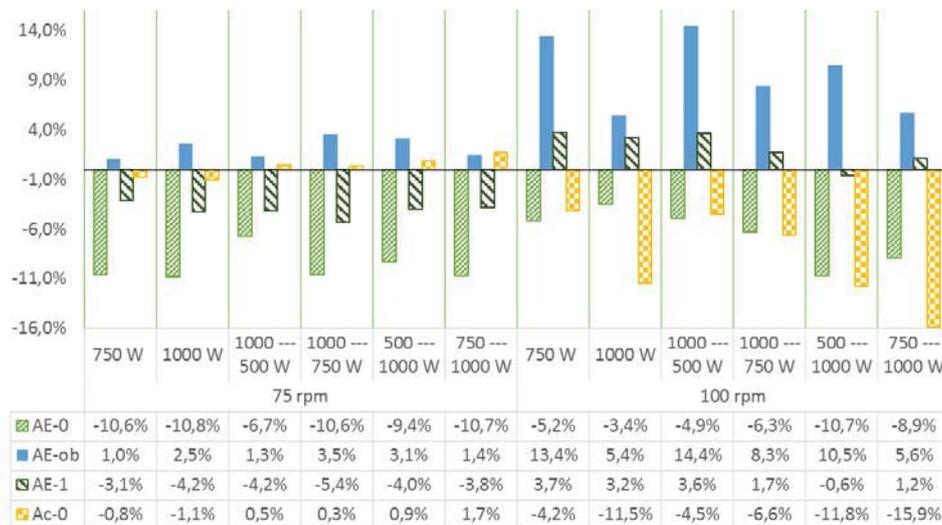


Figura 7: Variación del RMS (%) con desalineamiento.

El valor de kurtosis se dispara en el canal embarcado *AE-ob* y sin notarse un efecto en el resto de canales de EA o la aceleración (Figura 8). Se aprecia que a pesar de la aparición de picos en la evolución temporal del kurtosis de la señal de EA de canal *EA-0* (como se puede ver en el valor del kurtosis respecto del tiempo al introducir el desalineamiento en la Figura 5) cuando se calcula para las señales completas y se realiza el promedio esta información se pierde. El valor del kurtosis describe como es de abrupta o suave en su contenido de picos la amplitud de un conjunto de datos. Se ha visto que la señal de aceleración no presenta una morfología de “estallidos” como ocurre en las señales acústicas haciendo que este indicador no sea un parámetro relevante empleando esta otra tecnología.

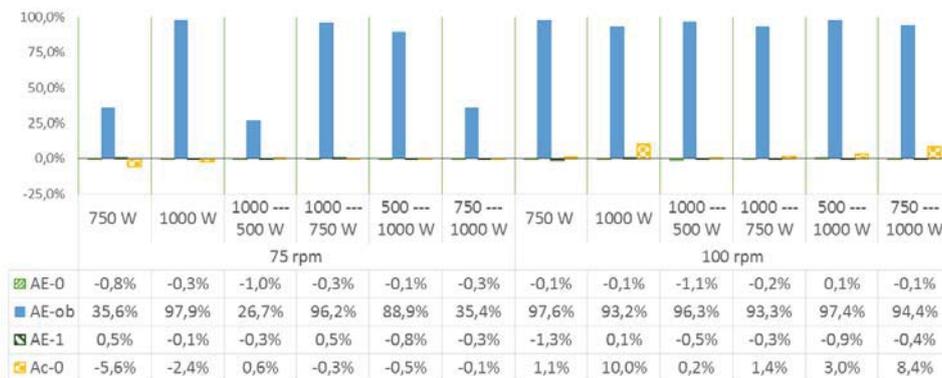


Figura 8: Variación del kurtosis (%) con desalineamiento.

### 4. Conclusiones

En este estudio experimental se han empleado indicadores de la señal para realizar un análisis paramétrico de la señal de EA para comprobar el efecto de un error de desalineamiento en uno de los ejes sometido a carga variable. La posición de los sensores se ha visto como un factor extremadamente relevante. Colocando el sensor de EA en contacto directo sin discontinuidades con elementos en movimiento proporcionan una señal más clara en la que se aprecia la presencia del contacto entre dientes. Por otra parte, la información en frecuencias de esos eventos se pierde cuando se mide en carcasa a través del rodamiento, debido a que los elementos rodantes actúan como fuentes de ruido y las discontinuidades de material a los largo del trayecto de la señal.

La monitorización con EA parece ofrecer una ventaja en el diagnóstico a muy bajas velocidades donde los indicadores de la señal de aceleración no tienen una buena sensibilidad a este error de alineamiento introducido en el sistema de estudio. La variación de la carga modifica la amplitud, y por lo tanto el valor de RMS de la señal, en una tendencia lineal de igual modo con y sin desalineamiento.

El error de desalineamiento origina un incremento de los picos relacionado con el incorrecto engrane de los dientes en la señal de EA por los que el kurtosis resulta un indicador con buena respuesta.

## 5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por el proyecto DPI2017-85390-P del Ministerio de Ciencia y Tecnología de España, EUIN2017-88667 del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad de España y el proyecto PredictEA de SODERCAN “convocatoria de I+D en energías renovables marinas”.

## 6. Referencias

- [1] Ferrando, J.L., “Fault Detection in Rotating Machinery Using Acoustic Emission”, BRUNEL UNIVERSITY LONDON, (2015)
- [2] Coronado D., Fischer K, “Condition monitoring of wind turbines: State of the art, user experience and recommendations”, Fraunhofer IWES, Project report, (2015)
- [3] Molina, C., “Contributions to the analysis of vibration and acoustic emissions for the condition monitoring of epicyclic gearboxes”, Aachen: RWTH Aachen University, (2010)
- [4] Mohamed Ali Elforjani, “Condition Monitoring of Slow Speed Rotating Machinery Using Acoustic Emission Technology”, Cranfield University School Of Engineering, PhD Thesis. Academic Year: 2009 – 2010 Supervisor: Dr. David Mba, (2010)
- [5] Fernández A., Viadero F., Munoz B., Sancibrian R., García P., “High Resolution Methods for Misalignment Detection in Low Speed Gear Boxes”, IASME. Issue 1, Vol-ume 1, January 2004. ISSN 1790-031X (2004)
- [6] Viadero F., Fernández A., Muñoz B., Sancibrián R., García P, “Detección de averías en reductores de baja velocidad mediante métodos paramétricos”, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Métodos Computacionais em Engenharia, ISBN 972-49-2008-9, (2004)
- [7] Tan, C. K., & Mba, D., “Identification of the acoustic emission source during a com-parative study on diagnosis of a spur gearbox”, Tribology International, 38(5), 469-480. 10.1016/j.triboint.2004.10.007, (2005)
- [8] Toutountzakis, T., & Mba, D., “Observations of acoustic emission activity during gear defect diagnosis”, NDT and E International, 36(7), 471-477. 10.1016/S0963-8695(03)00063-X, (2003)
- [9] Vicuña, C. M., & Höweler, C., “A method for reduction of acoustic emission (AE) da-ta with application in machine failure detection and diagnosis”, Mechanical Systems and Signal Processing, 97, 44-58. 10.1016/j.ymsp.2017.04.040, (2017)
- [10] Sako, T., & Yoshie, O., “Diagnosis of extremely low-speed rolling-element bearing using AE envelope waveform”, IEEJ Transactions on Industry Applications, 132(4), 501-509+6. 10.1541/ieejias.132.501 (2012)
- [11] He, Y., Zhang, X., & Friswell, M. I. “Defect diagnosis for rolling element bearings using acoustic emission”. Journal of Vibration and Acoustics, Transactions of the ASME, 131(6), 0610121-06101210. 10.1115/1.4000480, (2009)
- [12] Tan, C. K., Irving, P., & Mba, D., “A comparative experimental study on the diagnos-tic and prognostic capabilities of acoustics emission, vibration and spectrometric oil analy-sis for spur gears”, Mechanical Systems and Signal Processing, 21(1), 208-233. 10.1016/j.ymsp.2005.09.015, (2007)