

## Descomposición en modos empíricos y su aplicación en la detección de fallas en rodamientos

### Empirical mode decomposition and its application in bearing fault detection

HUESCA-LAZCANO, Erick Eduardo†\* & FLORES-RAMIREZ, Oscar

*Universidad Politécnica de Amozoc, Av. Ampliación Luis Oropeza No. 5202, Col. Las Vegas, Amozoc, Puebla. C.P. 72980*

ID 1<sup>er</sup> Autor: Erick Eduardo, Huesca-Lazcano / **ORC ID:** 0000-0002-0505-8442, **Researcher ID Thomson:** F-1162-2018, **Open ID:** 357590366000, **CVU CONACYT:** 223342

ID 1<sup>er</sup> Coautor: Oscar, Flores-Ramírez / **ORC ID:** 0000-0001-9884-9499, **Researcher ID Thomson:** E-8242-2018, **arXiv Autor ID:** 429567-444L3Z-UIWFRE, **CVU CONACYT ID:** 92914

Recibido 20 de Abril, 2018; Aceptado 28 Junio, 2018

#### Resumen

El mantenimiento correctivo tiene la ventaja de utilizar completamente la vida útil de los componentes, pero es afectado con tiempos de paro prolongados, dado que no hay manera de agendar dicho mantenimiento. Trae consigo el riesgo de daño secundario y en el peor de los casos fallas catastróficas. Actualmente, los sistemas de monitoreo de condición disponibles comercialmente para turbinas eólicas están basados principalmente en el análisis de vibración de distintos componentes rotatorios, entre los cuales se encuentran los rodamientos. Las fallas en rodamientos no causan paros inmediatos, estas se desarrollan con el tiempo hasta producir una falla crítica por lo tanto es importante monitorear las frecuencias características de fallas en los rodamientos, dichas frecuencias pueden estar ocultas en el espectro de frecuencias tradicional. Se propone la descomposición en modos empíricos como un método de preprocesamiento de las señales de vibración para que en conjunto con técnicas tradicionales de análisis en el dominio de frecuencia sea posible detectar las fallas comunes de los rodamientos. Los resultados se validan con datos experimentales.

**Rodamientos, EMD, Detección de fallas**

#### Abstract

Corrective maintenance has the advantage of fully utilizing the life of the components, but is typically affected by prolonged shutdown times, since there is no way to schedule such maintenance. It also brings with it the risk of secondary damage and in the worst-case catastrophic failures. Currently, commercially available condition monitoring systems for wind turbines are based primarily on the vibration analysis of various rotating components, among which are the bearings. Bearing failures do not cause immediate stoppages, they develop over time to produce a critical fault therefore it is important to monitor the characteristic frequencies of bearing faults, these frequencies may be hidden in the traditional frequency spectrum. There are methods such as envelope analysis that can detect these frequencies, but have the drawback of requiring very high sampling frequencies. That is why the decomposition in empirical ways is proposed as a method of preprocessing the vibration signals so that together with traditional analysis techniques in the frequency domain it is possible to detect the common faults of the bearings. The results are validated with experimental data.

**Bearings, EMD, Fault detection**

**Citación:** HUESCA-LAZCANO, Erick Eduardo & FLORES-RAMIREZ, Oscar. Descomposición en modos empíricos y su aplicación en la detección de fallas en rodamientos. Revista de Ingeniería Industrial. 2018. 2-4: 21-28.

† Investigador contribuyendo como primer autor.

\*Correspondencia al Autor Correo Electrónico: (erick.huesca@upamozoc.edu.mx)

## 1. Introducción

Actualmente existe un interés especial en el desarrollo de plantas de generación de energías renovables, entre estas se incluyen los parques fotovoltaicos y los parques eólicos. Estos últimos están compuestos por turbinas eólicas, las cuales, poseen un comportamiento dinámico muy complejo. Es importante que dichas turbinas estén siempre en las mejores condiciones para aprovechar al máximo su capacidad nominal de generación. Es por eso que llevar a cabo un programa de mantenimiento es de vital importancia para asegurar el máximo rendimiento.

Los métodos tradicionales de mantenimiento aplicados a rodamientos de las turbinas eólicas se basan en su reemplazo programado a intervalos de operación fijos. Este tiempo de reemplazo se establece con información estadística de las fallas. Este método muy popular actualmente no es eficiente ya que si se reemplaza de manera prematura constituye en un desperdicio en la vida útil de operación del rodamiento.

Una metodología más eficiente en el mantenimiento de maquinaria, es el mantenimiento basado en el monitoreo de condición, en este se determina la condición actual de la maquinaria basado en la información proporcionada por distintos sensores los cuales pueden ser de temperatura, sonido, vibración, voltaje, corriente, etc.

Las señales de diferentes transductores proveen una serie temporal que contiene, en el caso de una malfunción, todos los síntomas relacionados a esta. En muchos casos no es fácil o incluso puede ser imposible distinguir la malfunción directamente en la serie temporal, debido a que la serie puede estar contaminada con ruido. Aun cuando existe la posibilidad de detectar la malfunción directamente en la serie temporal, si este fuera el caso, se necesitaría de personal técnico altamente calificado para analizar la información y poder diagnosticar la malfunción. Para superar lo anterior, es posible manejar estos datos en un segundo paso conocido como extracción de parámetros característicos, en este paso es posible utilizar varias transformaciones de la entrada para producir nuevas salidas conocidas como parámetros característicos.

Un parámetro característico es cualquier propiedad peculiar o cualidad, y podría ser simbólica o numérica. En este trabajo se propone la transformación de la señal utilizando la descomposición en modos empíricos para facilitar el diagnóstico y cuantificación del daño en los rodamientos.

La estructura del trabajo consiste en una breve introducción de los componentes de los rodamientos, así como las frecuencias características de los defectos, a continuación, se describe brevemente la descomposición en modos empíricos. Posteriormente se detalla la obtención de los datos experimentales utilizados en el presente estudio. Con estos datos se trabaja la metodología propuesta y finalmente se presentan los resultados.

## 2. Marco Teórico

### Frecuencias características de un rodamiento

Los rodamientos consisten de cuatro componentes: pista externa, pista interna, elementos rodantes y jaula. Los rodamientos defectuosos generan vibraciones iguales a la velocidad rotacional de cada componente. Las frecuencias de vibración se relacionan de manera importante a la rotación de los elementos rodantes, la jaula y al paso de los elementos rodantes sobre las pista exterior e interior. Las frecuencias asociadas con defectos sobre la pista interior y exterior están dadas por las siguientes expresiones.

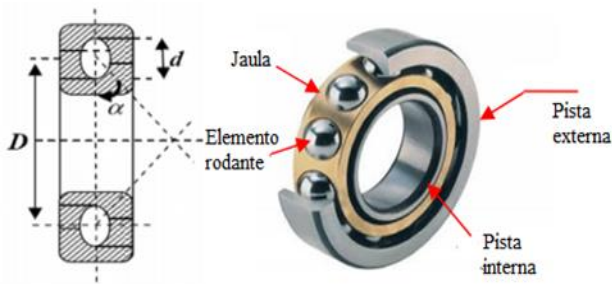
Defectos en la pista interna

$$f_{ir} = \frac{n}{2} f_r \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (1)$$

Defectos en la pista externa

$$f_{or} = \frac{n}{2} f_r \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (2)$$

Donde  $f_r$  es la frecuencia rotacional de la pista interna, es decir, la velocidad rotacional del eje,  $d$  es el diámetro del elemento rodante,  $D$  entre los centros de elementos rodantes opuestos,  $n$  es el número de elementos rodantes,  $\alpha$  es el ángulo de contacto.



**Figura 1** Componentes de un rodamiento

Fuente: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X1730159>

### Descomposición en modos empíricos

Las técnicas de procesamiento de señales tradicionales, incluyendo los análisis en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia son basadas en la suposición de que las señales a procesar son lineales y/o estacionarias. La descomposición en modos empíricos ha mostrado ser adaptable en aplicaciones en donde la señal no es estacionaria. La principal función de la descomposición en modos empíricos es descomponer la señal original de vibración en distintas señales llamadas funciones de modo intrínseco (IMF), una IMF, es una función que:

1. Tiene solo un extremo entre 2 cruces por cero consecutivos.
2. Su valor medio es cero.

El algoritmo ocupado para obtener las funciones de modo intrínseco de la señal  $x(t)$  se puede resumir de la siguiente forma:

1. Inicializar  $r_0 = x(t)$  e  $i = 1$
2. Extraer el  $i$ -ésimo IMF  $h_i$ 
  - a. Inicializar  $c_{i(k-1)} = r_{i-1}$ ,  $k = 1$
  - b. Extraer los máximos y mínimos locales de  $c_{i(k-1)}$
  - c. Interpolar los máximos locales y los mínimos por splines cúbicas para formar las envolventes superior e inferior de  $c_{i(k-1)}$
  - d. Calcular la media  $m_{i(k-1)}$  de las envolventes superior e inferior de  $c_{i(k-1)}$
  - e. Definir  $c_{ik} = c_{i(k-1)} - m_{i(k-1)}$
  - f. Si  $c_{ik}$  es un IMF entonces  $h_i = c_{ik}$ , en caso contrario ir al paso b) con  $k = k + 1$
3. Definir el residuo  $r_{i+1} = r_i - h_i$

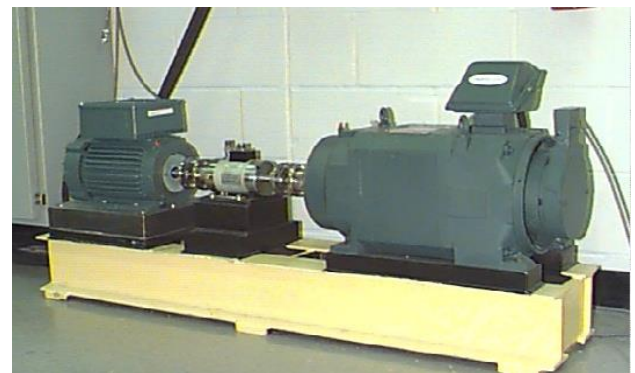
4. Si  $r_{i+1}$  todavía tiene al menos 2 extremos entonces ir al paso 2 con  $i = i + 1$ , en caso contrario el proceso de la descomposición es finalizado y  $r_{i+1}$  es el residuo de la señal.

La implementación de la descomposición es un proceso basado en los datos, por lo tanto, no se requiere de ningún conocimiento previo de la señal o de la máquina.

El algoritmo nos proporciona  $m$  IMFs, los cuales incluyen diferentes bandas de frecuencia de mayor a menor, es decir, en los primeros IMFs encontraremos anchos de banda de frecuencia alta, así sucesivamente hasta llegar al último IMF, el cual se conoce como residuo, y marca la tendencia de la señal.

### 3. Plataforma experimental

Los datos de vibración analizados en este trabajo fueron obtenidos del centro de datos de rodamientos de Case Western Reserve University.



**Figura 2** Plataforma experimental

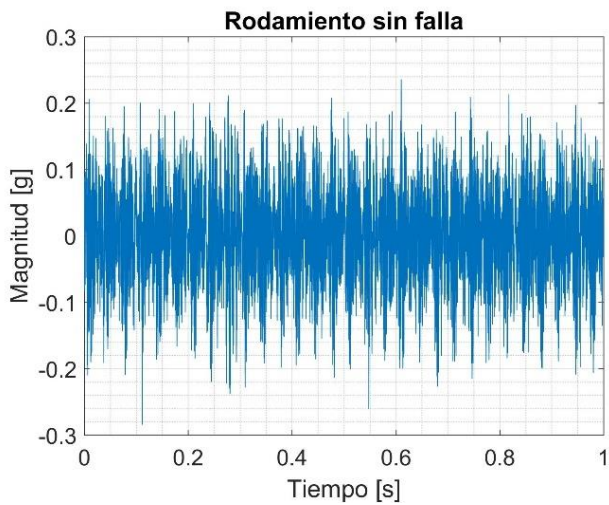
Fuente: <http://cseggroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/apparatus-procedure>

Como se muestra en la figura 2, la plataforma experimental consiste de un motor de 2 HP (izquierda), un transductor/encoder (centro), un dinamómetro (derecha) y un control electrónico, el cual no se muestra en la figura. El transductor/encoder es usado para obtener la velocidad y la carga del motor la cual es controlada por el dinamómetro. Los rodamientos de prueba soportan el eje del motor en el lado impulsor. Las fallas fueron introducidas en los rodamientos utilizando el mecanizado por electroerosión con diámetros de falla de 0.1778 mm, 0.3556 mm y 0.5334 mm.

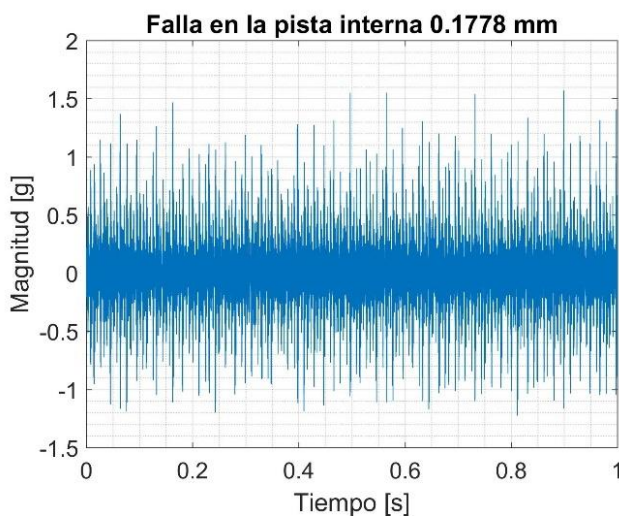
Los datos de vibración son obtenidos utilizando una frecuencia de muestreo de 12 kHz y en particular los datos ocupados en este trabajo corresponden al análisis del motor sin carga. Para este caso la velocidad de giro del motor es de 1797 rpm, es decir  $f_r = 29.95 \text{ Hz}$ .

Los rodamientos utilizados en la plataforma experimental son de la marca SKF, modelo 6205-2RS JEM, con ayuda de la expresión (1) se calcula la frecuencia de los defectos de pista interna, la cual es  $f_{ir} = 162.18 \text{ Hz}$ .

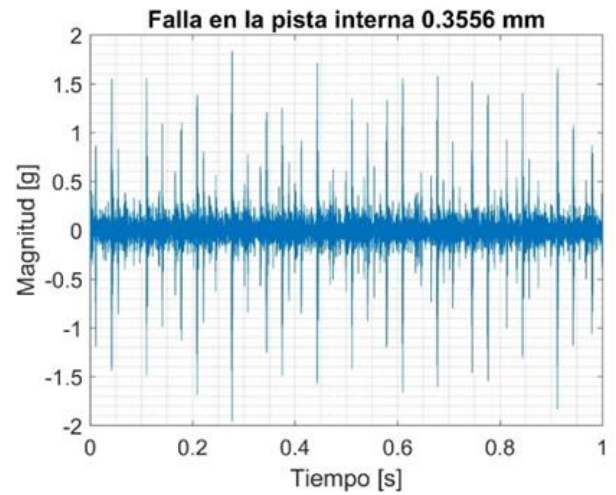
En los gráficos 1 a 4 se muestran las señales de vibración en el dominio del tiempo, y en los gráficos 5 a 8 se muestran sus espectros respectivos.



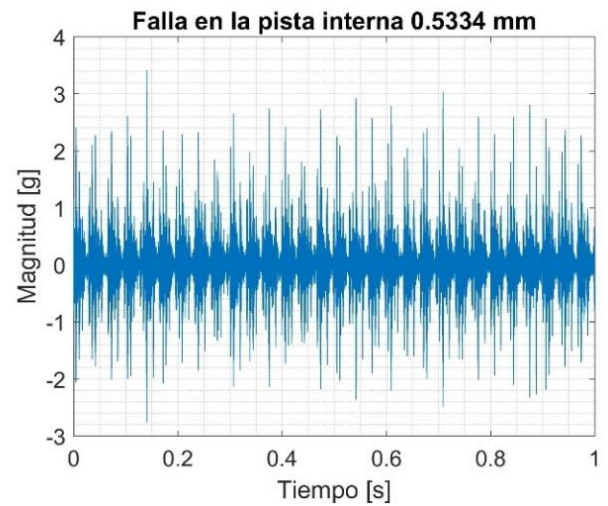
**Gráfico 1** Serie de tiempo del rodamiento sin falla  
Fuente: Elaboración Propia



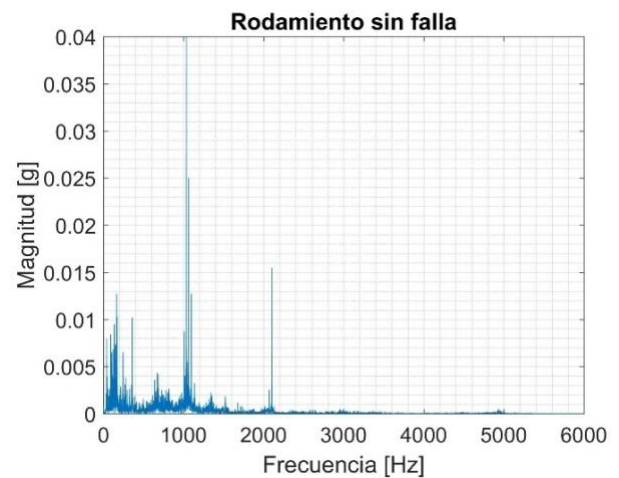
**Gráfico 2** Serie de tiempo del rodamiento con falla en la pista interna de 0.1778 mm  
Fuente: Elaboración Propia



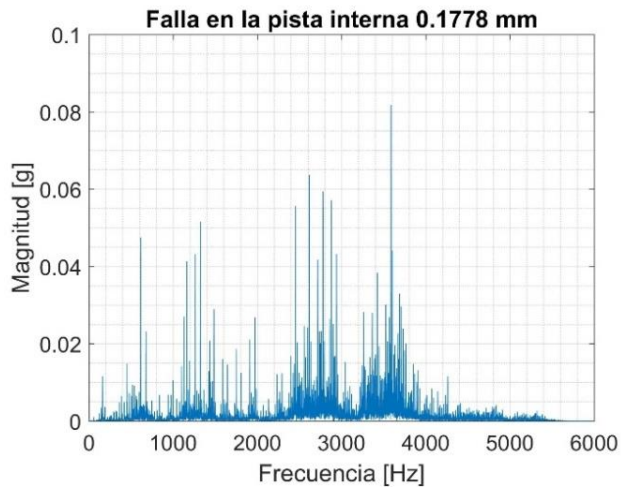
**Gráfico 3** Serie de tiempo del rodamiento con falla en la pista interna de 0.3556 mm  
Fuente: Elaboración Propia



**Gráfico 4** Serie de tiempo del rodamiento con falla en la pista interna de 0.5336 mm  
Fuente: Elaboración Propia

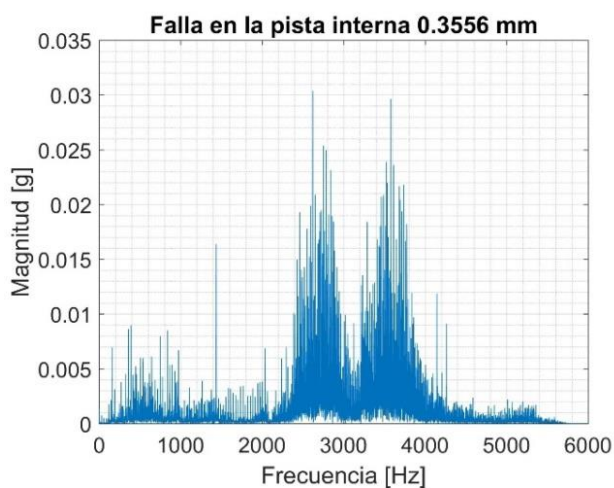


**Gráfico 5** Espectro del rodamiento sin falla  
Fuente: Elaboración Propia



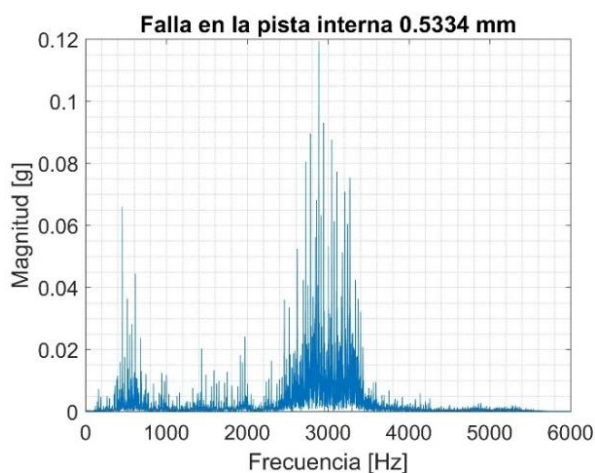
**Gráfico 6** Espectro del rodamiento con falla en la pista interna de 0.1778 mm

Fuente: Elaboración Propia



**Gráfico 7** Espectro del rodamiento con falla en la pista interna de 0.3556 mm

Fuente: Elaboración Propia



**Gráfico 8** Espectro del rodamiento con falla en la pista interna de 0.5334 mm

Fuente: Elaboración Propia

#### 4. Metodología

Como se puede observar en los gráficos anteriores, es posible identificar la falla a partir de las figuras, ya que es posible observar a simple vista como las amplitudes de la vibración y sus espectros correspondientes cambian, lo que no se puede decir, es el tipo de falla y la severidad de la falla. La metodología propuesta consiste en evaluar la condición de los rodamientos a partir del análisis del espectro de frecuencia cada uno de los IMF's, con el objetivo de localizar un cambio en las frecuencias características de los defectos.

En este estudio en particular nos concentramos en identificar los defectos de pista interna, es por eso que nuestra tarea se centra en buscar picos en el espectro de cada uno de los IMF's alrededor de la frecuencia de 162.18 Hz.

Como se describió en el párrafo anterior, hemos propuesto una forma de identificar la falla, por lo que ahora se propone la siguiente metodología para cuantificar la severidad de la falla. La propuesta en este trabajo consiste en calcular la energía de cada uno de los IMF's utilizando la siguiente expresión:

$$E_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i^2} \quad (3)$$

Una vez que se ha obtenido la energía individual, se calcula la energía total de la señal, sumando cada una de las energías individuales, esto es:

$$E = \sum_{i=1}^m E_i \quad (4)$$

Con los datos anteriores obtenemos el porcentaje de energía de cada uno de los IMF's, con ayuda de la siguiente expresión:

$$P_i = \frac{E_i}{E} \quad (5)$$

Al comparar la distribución de energía en cada IMF, podemos cuantificar la severidad de la falla, esto principalmente debido a que debido a las características frecuenciales de la falla en análisis implica que el contenido frecuencial de la señal se hará más rico en las frecuencias altas, y al aumentar la severidad del defecto ocasionará una mayor amplitud de vibración en frecuencias altas, haciendo que las energías de los primeros IMF's aumenten.

5. Resultados

En primer lugar, mostramos cada una de las descomposiciones de las señales ocupadas en este trabajo, cabe mencionar que una vez que se introduce la falla en el sistema, la dinámica no lineal se hace presente aumentando la complejidad del sistema, reflejándose en el aumento del número de modos cuando la severidad de la falla aumenta.

Como se puede observar en el gráfico 1 que corresponde a la descomposición del rodamiento sin defecto el número de modos obtenidos son 12, mientras que, para el mayor defecto, esto es, 0.5334 mm el número de IMF's ha aumentado a 13.

De la misma forma en los gráficos se puede observar como el ancho de banda va disminuyendo en cada IMF, esto significa que las frecuencias mayores se concentrarán en los primeros IMF's y las frecuencias mas bajas estarán presentes en los últimos IMF's.

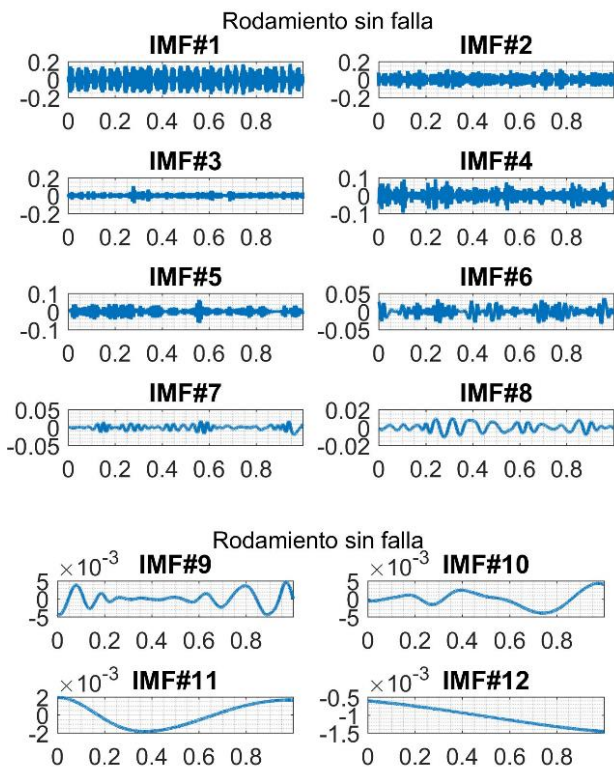


Gráfico 9 Descomposición de la señal de vibración del rodamiento sin falla  
Fuente: Elaboración Propia

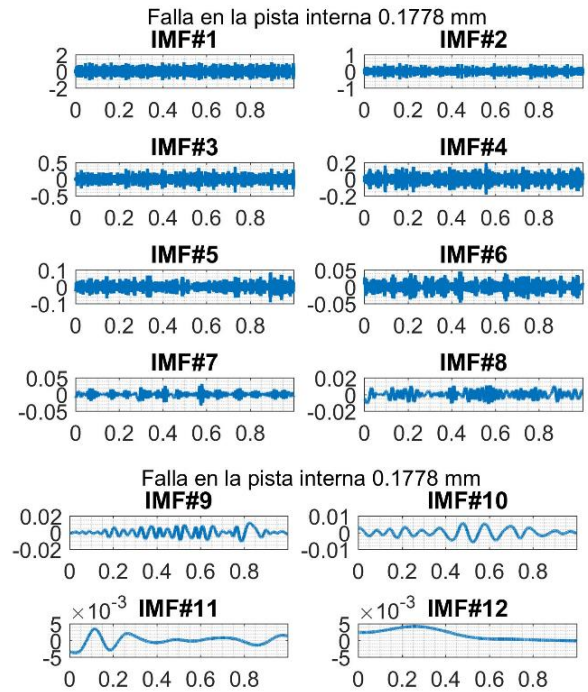


Gráfico 10 Descomposición de la señal de vibración del rodamiento con falla 0.1778 mm  
Fuente: Elaboración Propia

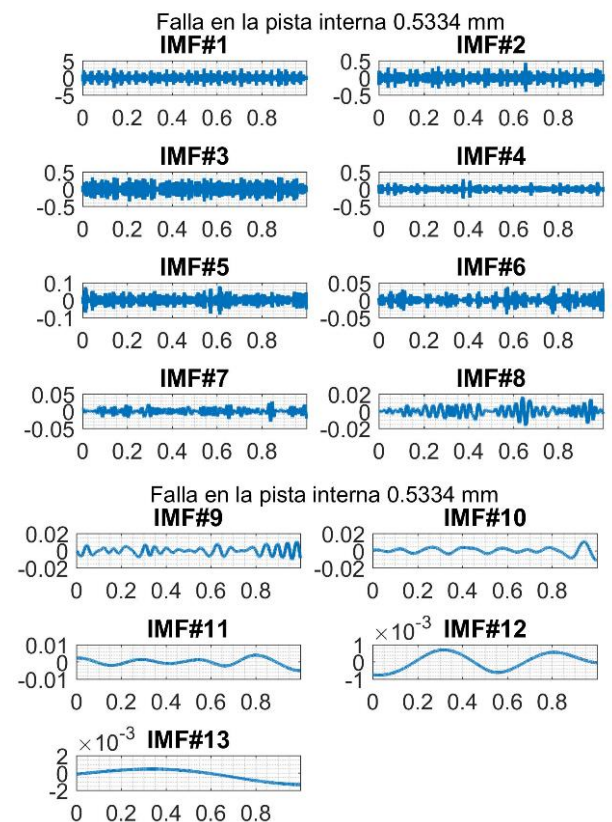
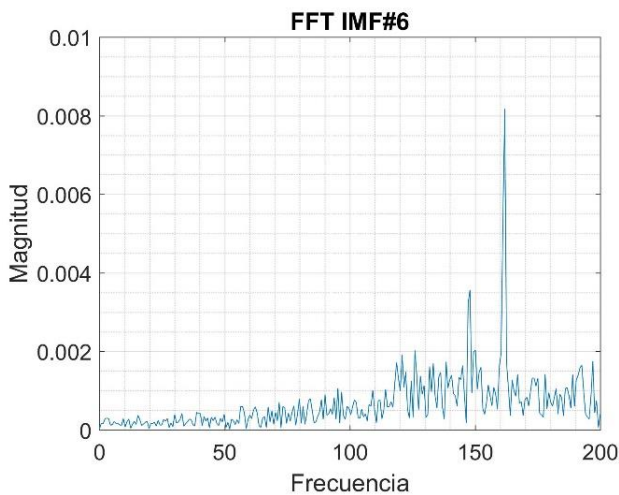


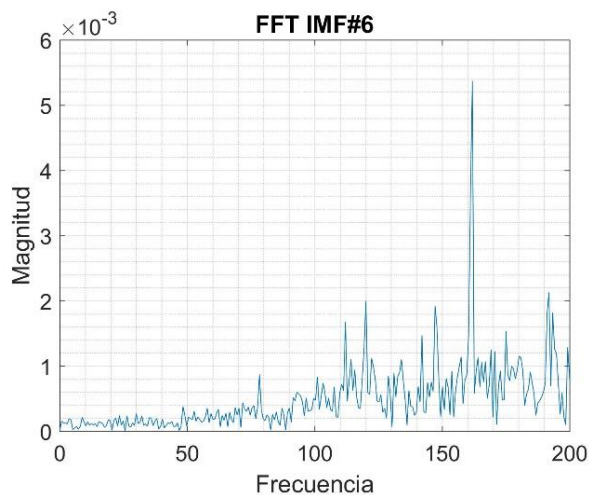
Gráfico 11 Descomposición de la señal de vibración del rodamiento con falla 0.5334 mm.  
Fuente: Elaboración Propia

Como se mencionó anteriormente nos concentraremos en los espectros de los modos que contengan la frecuencia del defecto.

En el gráfico 12 se observa claramente un pico en la frecuencia de 161.9 Hz en el IMF 6 del rodamiento con falla de 0.01778 mm, de la misma manera en el gráfico 13 se observa el un pico en el IMF 6 del rodamiento con falla de 0.3556 mm a 161.9 Hz, dicha frecuencia corresponde con la frecuencia característica de la falla en análisis.

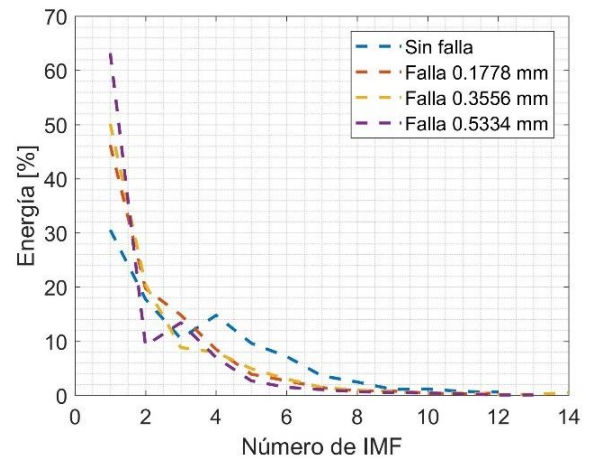


**Gráfico 12** Pico en el espectro 161.9 Hz del IMF #6 del rodamiento con falla 0.1778 mm  
Fuente: Elaboración Propia



**Gráfico 13** Pico en el espectro 161.9 Hz del IMF #6 del rodamiento con falla 0.3556 mm  
Fuente: Elaboración Propia

Una vez que se ha identificado la falla ahora corresponde cuantificarla, en el gráfico 14 se puede observar la distribución energética de la señal en cada IMF. La línea azul corresponde a la distribución energética del rodamiento sin falla, en este caso la mayor concentración de energía se da en el primer modo con un 30%, conforme el defecto aumenta la distribución energética en el primer modo va aumentando, y este aumento es consistente con la severidad del defecto.



**Gráfico 14** Porcentajes de energía para cada IMF  
Fuente: Elaboración Propia

## 6. Conclusiones

Se presenta una herramienta alternativa en el procesamiento de señales, destacando como principal ventaja su adaptabilidad. Al analizar de manera individual cada uno de los IMF, es más fácil analizar las frecuencias características de los defectos en los rodamientos. Además, se presenta un criterio energético simple para cuantificar la severidad de la falla. Aun cuando la descomposición en modos empíricos resulta una herramienta robusta y adaptable, es importante mencionar que tiene ciertos inconvenientes, entre ellos algo que se conoce como la mezcla de modos, lo que pudiera ocasionar que no siempre la frecuencia de importancia aparezca en un solo IMF, por el contrario, esa frecuencia aparecería en más de un modo, dificultando la identificación de fallas.

## 7. Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro se pretende diseñar un sistema automatizado inteligente que disminuya en la medida de lo posible la interacción de un experto.

## Referencias

- Lotfi, S., Jaouher, B. A., Farhat, F. (2014). Bi-spectrum based-EMD applied to the non-stationary vibration signals for bearing faults diagnosis. *ISA Transactions*, 53(5), 1650-1660.
- Boudiaf, A., Moussaoui, A., Dahane, A., Atoui, I. (2016). A comparative study of various methods of bearing fault diagnosis using the Case Western Reserve University data. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16(2), 271-284.

HUESCA-LAZCANO, Erick Eduardo & FLORES-RAMIREZ, Oscar. Descomposición en modos empíricos y su aplicación en la detección de fallas en rodamientos. *Revista de Ingeniería Industrial*. 2018.

Santhana Raj, A., Murali, N. (2013). Early classification of bearing faults using morphological operators and fuzzy inference. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 60(2), 567-574.

Aguirre-Echeverry, C. A., Mejia-Henao, J. D., Cardona-Morales, O., Castellanos-Dominguez, G. (2014). Identificación mejorada de componentes en baja frecuencia de turbinas eólicas empleando EEMD e integración en el tiempo. *Energetica*, 44, 85-91.

Amirat, Y., Benbouzid, M., Wang, T., Turri, S. (2014). Performance analysis of an EEMD-based Hilbert Huang transform as a bearing failure detector in wind turbines. *First International conference on green Energy*, 193-198.

Amirat, Y., Choqueuse, V., Benbouzid, M. E. H. (2010). Condition monitoring of wind turbines based on amplitude demodulation. *Proceedings of the 2010 IEEE ECCE*, 2417-2421.

Wu, Z. H., Huang, N. E. (2009). Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 1(1), 1-41.

Boudraa, A., Cexus, J. C. (2007). EMD-based signal filtering. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 56(6), 2196-2202.

Lu, B., Li, Y., Wu, X., Yang, Z. (2009). A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis. *Proceedings of the 2009 IEEE PEMWA*, 1-7.

Caselitz, P., Giebhardt, M. M. J. (1997). Application of condition monitoring systems in wind energy converters. *Proceedings of the 1997 EWEC*, 579-582.