

# BANCOS DE ENSAYO PARA DOCENCIA EN VIBRACIONES MECÁNICAS.

**Ramón Peral Orts, Nuria Campillo Davó, Emilio Velasco Sánchez.**

Universidad Miguel Hernández de Elche. Av. Universidad S/N. CP: 03202, Elche, Alicante.  
[ramon.peral@umh.es](mailto:ramon.peral@umh.es)

## Resumen

En la actualidad, un importante porcentaje de la maquinaria encontrada en las industrias, se caracteriza por disponer de sistemas rotativos encargados de transmitir movimiento con diferentes fines. Este tipo de máquina, presenta fallos o muestras de deterioro muy característicos que suelen afectar a elementos tales como rodamientos, cojinetes de fricción o engranajes. El análisis de vibraciones resulta una técnica fiable para la detección de estos fallos, encontrando diferentes autores que localizan y justifican la existencia de espectros de frecuencia característicos para cada tipología de fallo. La aplicación práctica de estos conceptos, no resulta tarea sencilla, dada la dificultad de disponer de maquinaria comercial con fallos reales en los laboratorios docentes. Por este motivo, desde la Universidad Miguel Hernández se han diseñado y ejecutado diferentes montajes prácticos pensados para que el alumno sea capaz de detectar y justificar la presencia o no de estos espectros característicos, en función del fallo causado al montaje. Este artículo recoge las características básicas de estos bancos de ensayo, los pasos seguidos para su correcto manejo y los resultados obtenidos a través de los mismos.

**Palabras-clave:** Vibraciones mecánicas, rodamientos, prácticas, docencia, engranajes.

## Abstract

Nowadays, a great number of industries use rotative machines to transmit movement. That kind of machinery shows characteristic failures that affect gear, bearing and friction bearing. Vibration analysis is a reliable technique to detect these failures, finding different authors that prove relation between system failure and specific frequencies. Practical application of these concepts is not as easy as seems, because of the difficulty to find commercial machinery with real failures in teaching labs. As a consequence, at University of Miguel Hernandez there have been designed and made same practical sessions to study and analyze real vibration systems.

**Keywords:** Mechanical vibration, gear, bearing, teaching, lab session.

## 1 Introducción

El análisis de vibraciones es considerado una de las técnicas más efectiva a la hora de plantear un sistema de mantenimiento predictivo en máquinas rotativas. La experiencia y los años de trabajo junto a este tipo de maquinaria, confiere al técnico de mantenimiento cualidades suficientes para detectar el incipiente deterioro del sistema o de alguno de sus componentes, tales como los rodamientos, sistemas de engranes o sistemas de poleas. El principal problema que se encuentra una empresa a la hora de

implantar un sistema de mantenimiento predictivo es la falta de profesionales suficientemente formados en esta materia. Si bien es cierto que diferentes entidades y centros docentes imparten cursos especializados en esta materia, tienden a resultar excesivamente teóricos y los alumnos no llegan a experimentar personalmente el comportamiento vibracional de un sistema mecánico cuando está llegando a una fase de deterioro incipiente.

Desde la Universidad Miguel Hernández de Elche se ha confeccionado un conjunto de sesiones prácticas, a través de las cuales los alumnos, previamente formados en vibraciones mecánicas y análisis de espectro, son capaces de percibir el comportamiento de un sistema con alguno de sus componentes básicos dañados, así como familiarizarse con la instrumentación necesaria para la adquisición y posterior análisis de las señales vibracionales generadas.

## 2 Objetivos

El objeto principal del presente artículo es describir las sesiones prácticas empleadas para el estudio del análisis de vibraciones mecánicas, así como la composición y características de los montajes de ensayos empleados en las mismas. Para ello será necesario desarrollar los siguientes puntos:

- Análisis de las necesidades formativas de un profesional orientado al mantenimiento predictivo en ambientes industriales
- Descripción de los montajes y bancos de ensayo empleados en las sesiones prácticas.
- Caracterización de la instrumentación necesaria para el desarrollo de las mismas
- Análisis de los resultados obtenidos y conclusiones alcanzadas.

## 3 Descripción de los montajes

A continuación se presentan los montajes diseñados para el análisis de vibraciones. Cada uno de ellos está pensado para detectar espectros característicos de uno o varios componentes dañados. Para permitir que el futuro profesional pueda ver la diferencia de las señales antes y después del daño, es necesario que el montaje permita el cambio de este componente de manera rápida y sencilla, así como la verificación del diagnóstico realizado.

### 3.1 Banco de ensayo de engranajes.

La *figura 1* muestra el banco de ensayos empleado para la obtención del espectro característico de un sistema mecánico con engranes dañados. Como se puede apreciar, cuenta con diferentes componentes encargados de transmitir el movimiento desde el motor **1** a la bomba de vacío **3**. Con el fin de conseguir que el sistema funcione a diferentes frecuencias, se ha dispuesto de un variador de frecuencia **2**, directamente conectado al motor. Como se aprecia, el sistema de ruedas dentadas **E** se encuentra en la fase intermedia de la transmisión (punto en el que se ubicará el sensor de medición **A**).

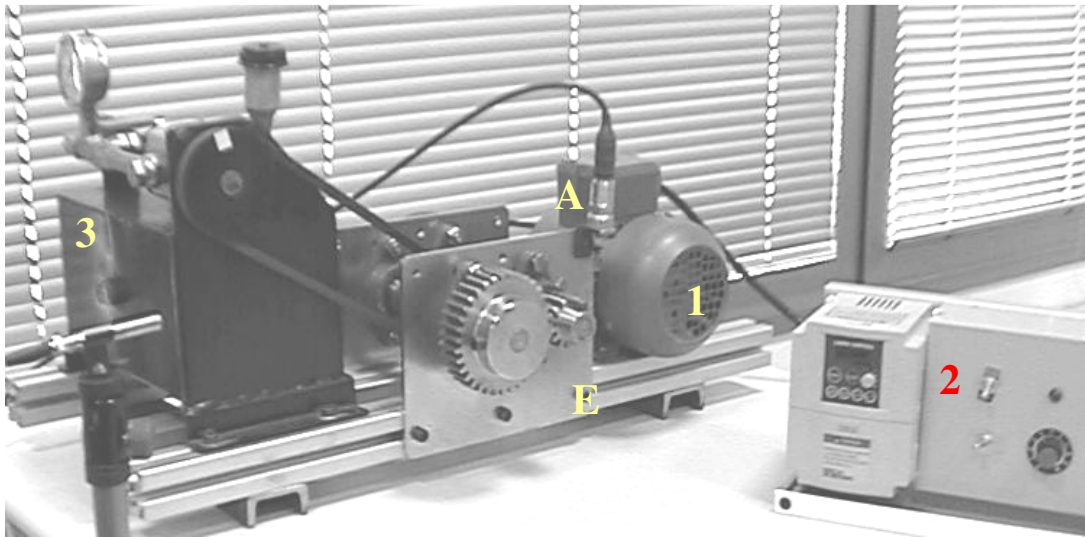


Figura 1. Montaje para la detección de fallos en sistemas de ruedas dentadas, engranajes.  
*Montaje A.*

### 3.2 Banco de ensayo de rodamientos.

Para la identificación de rodamientos dañados, se propusieron dos montajes con características diferentes. La propuesta inicial cuenta con un motor en posición vertical **B**, conectado a un variador de frecuencia **A** que permite alterar el régimen de funcionamiento del mismo. El motor arrastra un rodamiento fijado por una pieza especialmente diseñada para este fin, **C**. Para que el sistema no funcione sin carga, se emplea una masa de 5 kg, **D**, apoyada sobre la barra de sujeción.

La presencia de una carga descentrada genera un desequilibrio muy importante en el sistema, lo que dificulta la identificación del fallo en rodamiento en el espectro de frecuencia. Por este motivo se ideó un segundo sistema con el motor situado en posición horizontal y cargado con cilindros neumáticos tanto en dirección radial como axial. Este segundo montaje está en fase de ejecución por lo que aún no se dispone de resultados experimentales.

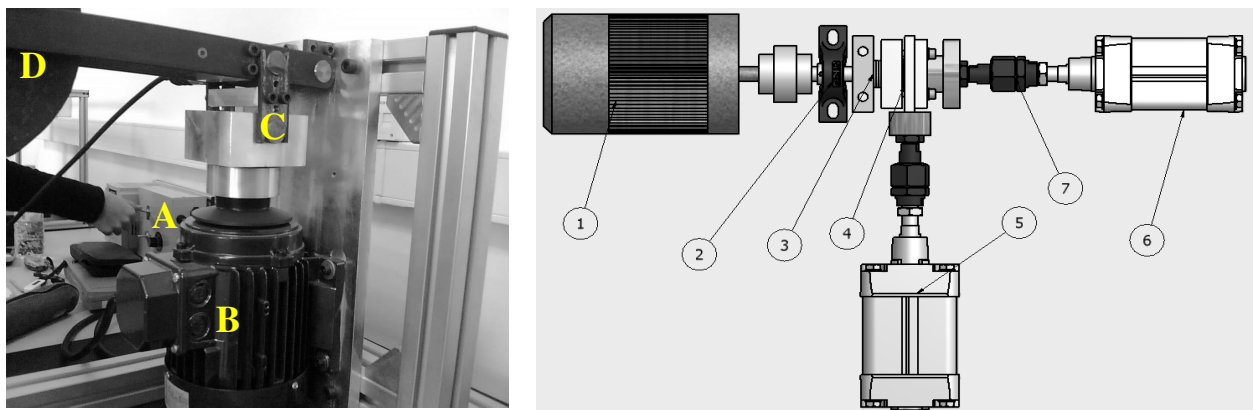


Figura 2. Montajes propuestos para la detección de fallos en los rodamientos. **B1** motor vertical y carga descentrada, **B2** motor horizontal y carga radial y axial a través de cilindros neumáticos.

Tabla 1 – Elementos del montaje *B2*

Elemento	Designación
1	Motor trifásico
2	Rodamiento rígido con soporte SY-35
3	Rodamiento combinado NKX-35
4	Rodamiento de rodillos cónicos 30204
5	Cilindro neumático Tipo1
6	Cilindro neumático Tipo2
7	Compensador de alineamiento

### 3.3 Sistema para la detección de sistemas desalineados.

La desalineación es un fallo muy común en máquinas rotativas que transmiten el movimiento a través de acopladores rígidos o semirígidos. Otros elementos afectados por la desalineación son los sistemas de poleas, rodamientos y cojinetes de fricción. La figura 3 muestra las desalineaciones que encontramos entre ejes acoplados (desalineación radial y angular). Se pretenden detectar dos tipos básicos de desalineación:

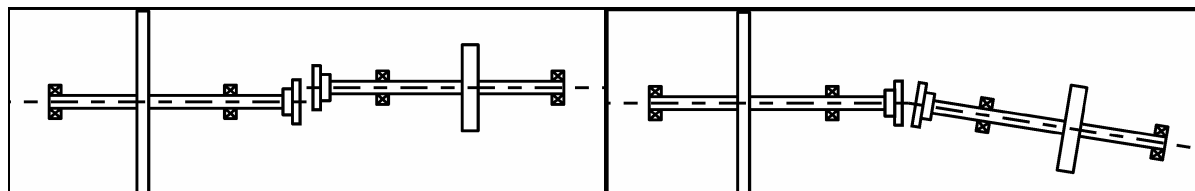


Figura 3. Desalineación radial y desalineación angular

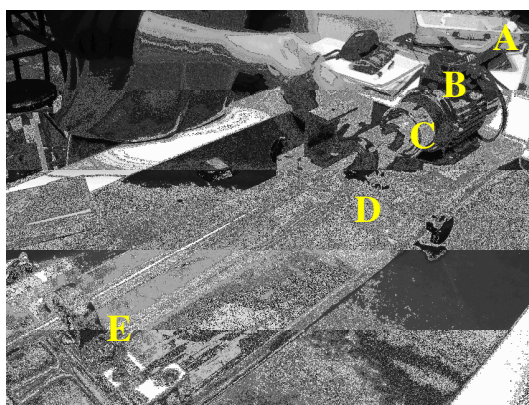


Figura 4. Montaje para la detección de desalineaciones en sistemas acoplados.

#### *Montaje C.*

La figura 4 muestra el montaje empleado para la identificación de un sistema desalineado. Los principales componentes son el acoplador rígido *C* que transmite el movimiento desde el motor *B* y los apoyos montados en patines *D* y *E*, que permiten su desplazamiento con el fin de alcanzar diferentes grados de desalineación.

## 4 Instrumentación empleada

Los parámetros a controlar para la correcta identificación de las frecuencias características de fallo del sistema son la velocidad de funcionamiento del sistema, relación de transmisión entre los ejes comunicados, y señales de vibración en tiempo o sus respectivos espectros de frecuencia. Para ello será necesario que el alumno maneje la siguiente instrumentación:

- **Tacómetro.** Es el dispositivo empleado para medir la velocidad de giro del motor en revoluciones por minuto (rpm o cpm). Los tacómetros empleados pueden realizar esta labor acoplando su base a un punto en movimiento del motor (contacto) o montando una negativa reflectante en un punto en movimiento que corte el haz de luz que genera el propio instrumento (óptico).



Figura 5. Tacómetro midiendo en posición de contacto.

- **Lámpara estroboscópica.** Con el mismo propósito que el tacómetro se emplea la lámpara estroboscópica. Ésta produce un haz de luz a la frecuencia deseada, pudiendo sincronizar el montaje (su régimen de funcionamiento) con el de la lámpara. Este dispositivo se encuentra conectado con uno de los vibrómetros lo que permite obtener vibraciones únicamente a la frecuencia principal de funcionamiento del sistema (RPM).
- **Acelerómetros.** Como transductores de medida se emplean diferentes tipos de acelerómetros axiales y triaxiales. Estos sensores quedan acoplados a los montajes a través de base magnética o roscados empleando tornillos.

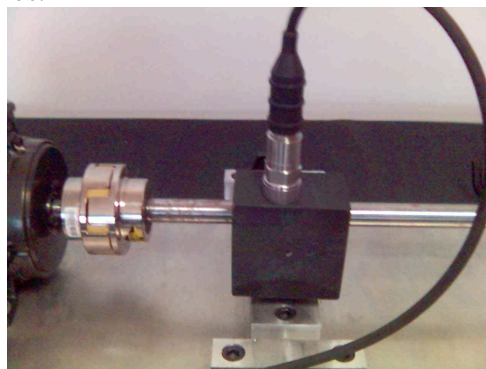


Figura 6. Acelerómetro con base magnética acoplado en uno de los apoyos del montaje 3.

- **Vibrómetro de único valor.** Este sistema proporciona valores totales de vibración en mm/s. Se encuentra conectado a un acelerómetro o sensor de velocidad y su manejo es mucho más sencillo que el del analizador de espectros.

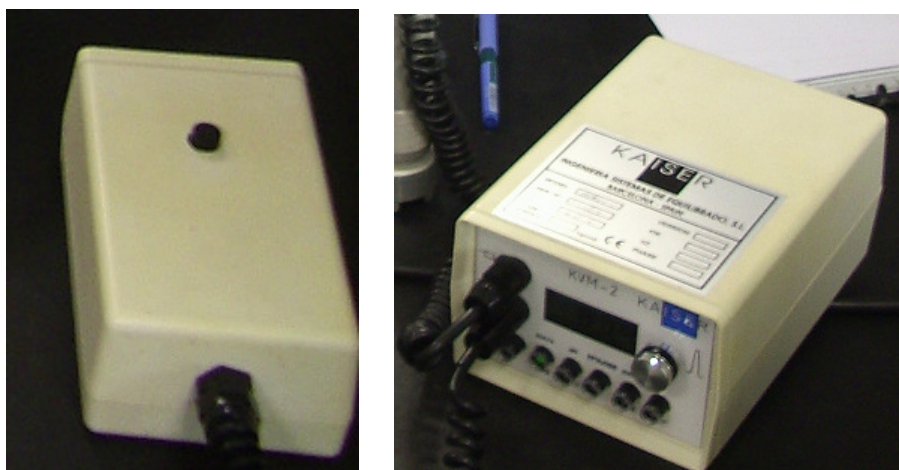


Figura 7. Lámpara estroboscópica y vibrómetro de único valor.

- **Analizador de frecuencias OROS.** Este elemento proporciona al alumno espectros de frecuencia para la identificación de fallos. Su configuración y manejo resultan algo más compleja, con lo que se deberá familiarizar previamente al alumno con el software para que la medición se realice correctamente.



Figura 8. Analizador de frecuencias OROS.

## 5 Desarrollo de las sesiones prácticas y resultados

La instrumentación y los montajes permiten la obtención de información suficiente para realizar un diagnóstico de mantenimiento apropiado. A continuación se detalla la metodología empleada en cada una de las sesiones, así como los resultados obtenidos en cada una de ellas.

### 5.1 Metodología de trabajo.

#### 5.1.1 Engranajes

Inicialmente, se deberá de estudiar detenidamente el montaje y se realizará un croquis básico de funcionamiento con los datos de cada uno de los elementos (Nº de dientes de las ruedas, diámetros, longitudes,...). Para los ensayos se emplearán dos pares de engranajes (rueda-piñón) diferentes, el primero de ellos se encuentra algo desgastado y con una pequeña holgura en la transmisión y el segundo además de la holgura entre rueda y piñón, cuenta con un deterioro significativo en uno de los dientes del piñón.

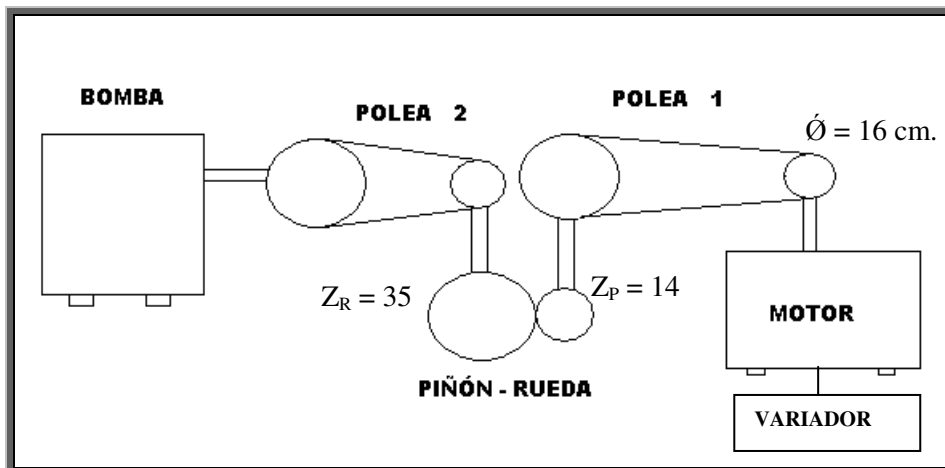


Figura 9. Croquis montaje A.

Posteriormente se determinan las características a tener en cuenta para obtener un espectro útil, tales como unidades de medida, frecuencia máxima o resolución deseada.

Tras comprobar que tanto el montaje como la instrumentación están preparadas para su funcionamiento, se pondrá en marcha el montaje y se medirá el régimen de giro de uno de los ejes empleando para ello el tacómetro o la lámpara estroboscópica (con los diámetros de las poleas y el número de dientes de las ruedas se podrá deducir el régimen de giro del resto de ejes). A su vez se colocará el acelerómetro en la base preparada para ello y se realizarán diferentes medidas para los dos pares de ruedas.



Figura 10. Detalle del piñón dañado

### 5.1.2 Rodamientos.

La metodología empleada para el resto de montajes es análoga a la descrita con anterioridad, ya que en el caso del montaje **BI**, se dispone de un par de rodamientos SKF desmontables, uno de ellos en perfecto estado y otro deteriorado en su pista externa.

### 5.1.3 Desalineación.

Por último el montaje **C**, precisará de una alineación previa a su funcionamiento (empleando relojes comparadores) y una vez ensayado en estas condiciones, se desalineará empleando los patines sobre los que descansan los apoyos.

Para este último ensayo puede ser empleado el vibrómetro de único valor y la lámpara estroboscópica para el 1xRPM, 2xRPM y 3xRPM.

## 5.2 Resultados

A continuación se muestran los espectros obtenidos para cada uno de los montajes. Con el fin de realizar un diagnóstico correcto, será necesario calcular previamente las frecuencias características de fallo de cada uno de los elementos, empleando para ello formulas teóricas [1][2], así como los datos característicos de cada uno de los montajes (datos tomados en el apartado anterior).

### 5.2.1 Montaje A, engranajes.

Con los datos obtenidos del montaje es posible calcular las frecuencias características de los engranajes, así como sus armónicos. Estos valores han de ser identificados en el espectro para poder emitir un diagnóstico.

$$GMF = Z_p * RPM_p = Z_c * RPM_c \quad (1)$$

$$FFE = GMF / N_E \quad (2)$$

$$FRD = GMF * N_E / Z_c * Z_p \quad (3)$$

Donde GMF es la frecuencia de engrane, FFE es la frecuencia de fase de ensamblaje, FRD es la frecuencia de repetición de diente,  $Z_p$  es el número de dientes del piñón,  $RPM_p$  el régimen de funcionamiento del eje del piñón,  $Z_r$  es el número de dientes de la rueda,  $RPM_r$  el régimen de funcionamiento del eje de la rueda y  $N_E$  son las fases de ensamblaje.

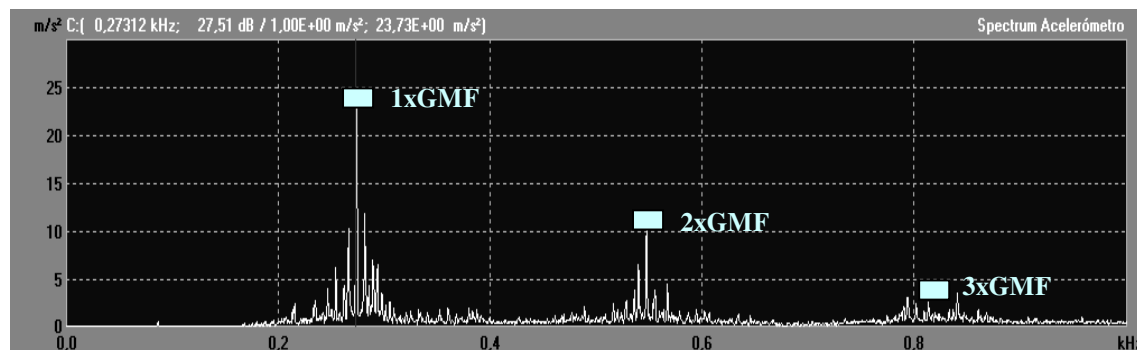


Figura 11. Espectro tomado con el primer par rueda-piñón.

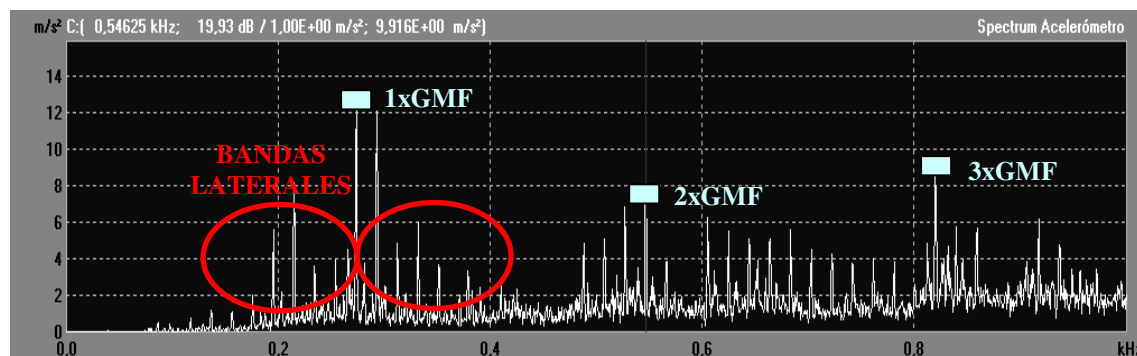


Figura 12. Espectro tomado con el segundo par rueda-piñón.



Como se puede apreciar, el primer espectro muestra los tres primeros armónicos de la frecuencia de engrane, imagen característica de un error de transmisión. A su vez, el segundo añade a estas frecuencias unas claras bandas laterales a la frecuencia de funcionamiento del piñón a ambos lados de la frecuencia de engrane y sus armónicos, lo que indica un claro fallo en el piñón.

### 5.2.2 Montaje B1, rodamientos.

Las frecuencias características de fallo en rodamientos indican el deterioro de uno de sus componentes, jaula, pista interior, pista exterior o elemento rodante. Para la correcta identificación deberá calcularse cada una de las frecuencias así como sus primeros armónicos.

$$FTF = \frac{RPM}{2} * \left(1 - \frac{B_D}{P_D} * \cos \alpha\right) \quad (4)$$

$$BPFI = \frac{N_B}{2} * RPM * \left(1 + \frac{B_D}{P_D} * \cos \alpha\right) \quad (5)$$

$$BPFO = \frac{N_B}{2} * RPM * \left(1 - \frac{B_D}{P_D} * \cos \alpha\right) \quad (6)$$

$$BSF = \frac{P_D}{2 * B_D} * RPM * \left(1 - \left(\frac{B_D}{P_D}\right)^2 * (\cos \alpha)^2\right) \quad (7)$$

Donde  $B_D$  es el diámetro de las bolas o rodillos,  $P_D$  es el diámetro primitivo,  $N_B$  es el número de elementos rodantes del rodamiento,  $\alpha$  el ángulo de contacto y RPM la velocidad de giro del eje.

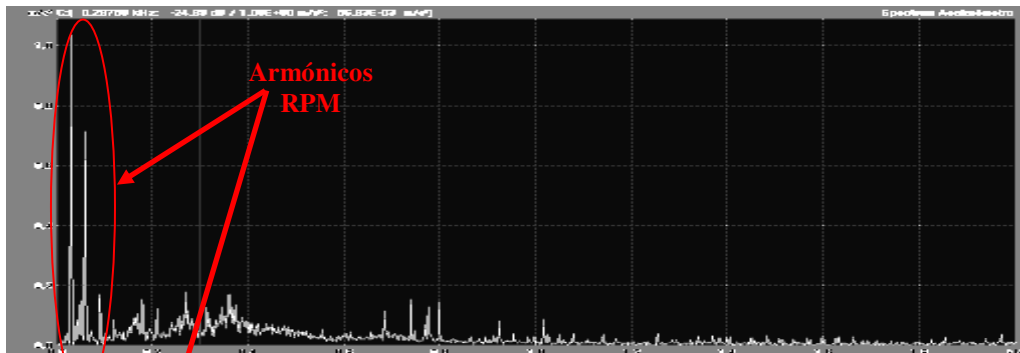


Figura 12. Espectro obtenido con el rodamiento en buen estado.

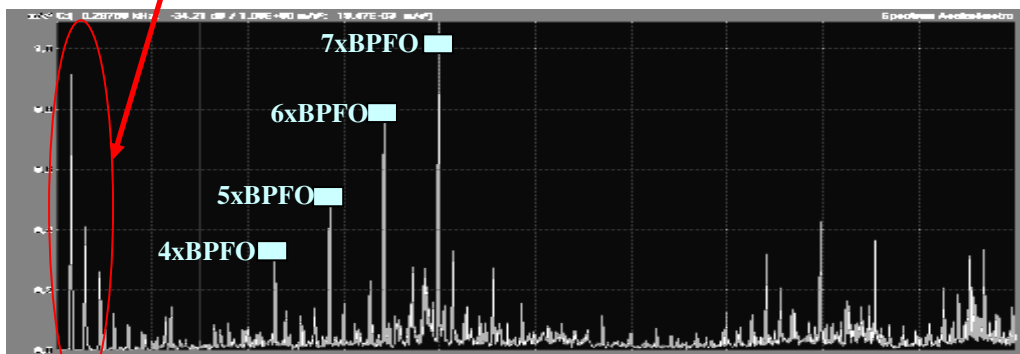


Figura 13. Espectro obtenido con el rodamiento dañado en pista externa.

El desequilibrio se aprecia en el primero de los espectros con la presencia de un pico importante a 1 y 2xRPM. El segundo de los espectros muestra un aumento importante de la energía vibracional, con la presencia de picos en la frecuencia de fallo de pista externa (BPFO) y sus armónicos, así como bandas laterales a RPM de distancia.

### 5.2.3 Montaje C, eje desalineado.

La única frecuencia a tener en cuenta en este montaje es el régimen de giro del motor, y sus primeros armónicos. Como se aprecia en el primero de los espectros, los patines instalados para la fácil desalineación del sistema, introducen una holgura clara en el mismo, esto junto con la dificultad de realizar una correcta alineación, hace que el espectro tenga más energía vibracional de la esperada.



Figura 14. Espectro del sistema alineado.

El siguiente espectro muestra claramente como los picos en RPM y sus armónicos han crecido significativamente, centrándonos en la relación entre el 2 y 3xRPM y el 1xRPM para determinar el grado de desalineación.

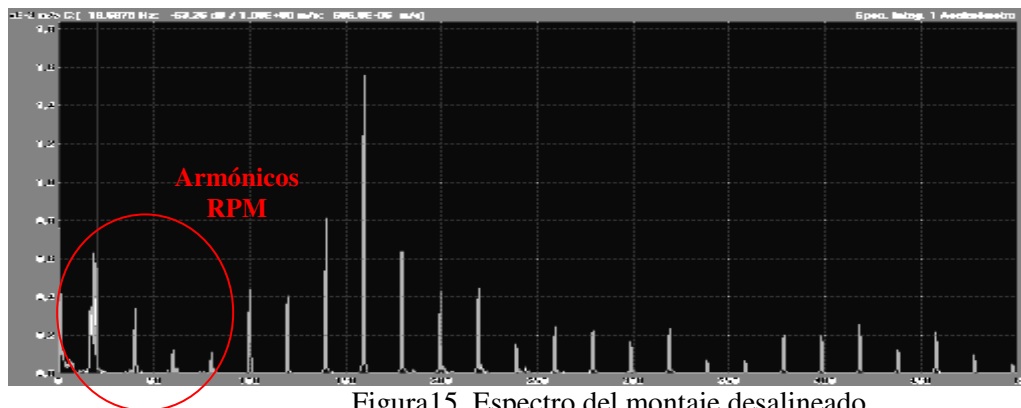


Figura 15. Espectro del montaje desalineado.

## 6 Conclusiones

Como resultado de la experiencia llevada a cabo en la Universidad Miguel Hernández con las sesiones prácticas para el análisis de vibraciones, se puede afirmar que:

- Es posible planificar y ejecutar montajes sencillos para la obtención de espectros de vibraciones reales en los que se puedan identificar fallos típicos de rodamientos, engranajes y sistemas desalineados.
- Estos montajes, permitirán al alumno entrar en contacto con sistemas mecánicos reales y percibir las vibraciones reales de los mismos.
- Los diagnósticos obtenidos coinciden con los fundamentos teóricos del análisis de vibraciones para mantenimiento predictivo en máquinas.
- Cabe destacar cómo la experiencia con estos montajes permite el perfeccionamiento de los mismos, así como la localización de fallos de funcionamiento no esperados a través del propio análisis de espectros.

### **Agradecimientos**

A todos aquellos alumnos de la Universidad Miguel Hernández que han ayudado al perfeccionamiento de estos montajes a través de sus aportaciones y comentarios en los últimos años.

### **Referencias**

- [1] Sánchez Marín, F. T. *et al.* **Mantenimiento Mecánico de Máquinas**. Ed. Universitat Jaume I. Castellón, 2006.
- [2] Urías, J, Del Castillo, J, Artés, M, Detección de fallos en rodamientos de bolas mediante análisis de vibraciones y reconocimiento de patrones. *Anales de Ingeniería Mecánica*, Gijón, 2008.