

## Capítulo 9 Diseño y construcción de un interferómetro Doppler unidireccional para medición de fallas en rodamientos

### Chapter 9 Design and construction of a unidirectional Doppler interferometer for measuring bearing failures

LUNA-REYES, Martha†\*, FLORES-GIL, Aarón, BENAVIDES, Olena y MAY-ALARCON Manuel

*Universidad Autónoma del Carmen, Facultad de Ingeniería y Tecnología*

ID 1<sup>er</sup> Autor: *Martha María, Luna-Reyes* / **ORC ID:** 0000-0002-5106-2020, **CVU CONACYT ID:** 1088488

ID 1<sup>er</sup> Coautor: *Aarón, Flores-Gil* / **ORC ID:** 0000-0002-2302-2056, **CVU CONACYT ID:** 121166

ID 2<sup>do</sup> Coautor: *Olena, Benavides* / **ORC ID:** 0000-0002-8124-0326, **CVU CONACYT ID:** 339830

ID 3<sup>er</sup> Coautor: *Manuel, May-Alarcón* / **ORC ID:** 0000-0003-1586-4496, **CVU CONACYT ID:** 121176

**DOI:** 10.35429/H.2022.9.116.127

M. Luna, A. Flores, O. Benavides y M. May

\*101051@mail.unacar.mx

S. Figueroa & J. Sierra (VV. AA.). Ingeniería y Materiales Aplicados al Medio Ambiente. Handbooks-TI - ©ECORFAN-Mexico, 2022.

## Resumen

Se presenta una propuesta experimental para el desarrollo de un velocímetro láser Doppler que, por medio de interferometría de haces láser, permite detectar frecuencias de vibración para establecer el estado de vida útil de rodamientos. El diseño experimental consiste en un arreglo de siete fibras ópticas multimodo, seis de estas circundantes a una fibra central. Las seis fibras circundantes transportan luz de una misma fuente láser, pasan por una lente biconvexa, y en el punto focal de la lente, se genera la interferencia de los seis haces de luz que se manifiesta como patrón de franjas oscuras y brillantes.

La zona de interferencia se define como “volumen de medida” que, en el experimento, registrará las variaciones de frecuencia inducidas por las vibraciones mecánicas debido a los posibles desgastes de los rodamientos. Se presentan los espectros de frecuencia procesados por la técnica de FFT en tres zonas diferentes de los rodamientos, y se comparan las frecuencias experimentales con frecuencias definidas en la literatura de acuerdo con el cálculo de las frecuencias de falla del rodamiento, para establecer el nivel de desgaste presente en el mismo.

## Vibraciones mecánicas, Fibras ópticas, Interferometría, Láser Doppler

### Abstract

This work presents an experimental proposal for the development of a Laser Doppler Velocimeter which work by means of laser interferometry, this system allows the detection of vibration frequencies to determine the life span of bearings. The experimental design consists of a seven multimodal optical fiber array, six of them surrounding a central wire. The six outside fibers transport light from a same laser source, through a biconvex lens, and on the focal point of the lens the interference is generated by the six laser beams that shows as a pattern of dark and bright fringes.

The interference zone is defined as “measure volume” which, in this experiment, will register the frequency variations induced by the mechanical vibrations caused by the possible wear of the bearings. Frequency spectrums are presented as processed with FFT in three different zones of the bearings, experimental frequencies are compared with defined frequencies found in literature according to the failure frequencies calculated for the bearing in question, thus we are going to set the amount of wear on the bearing.

## Mechanical Vibrations, Optical fibers, Interferometry, Láser Doppler

### 1 Introducción

Los rodamientos son elementos cruciales a nivel industrial cuya función principal es transmitir el movimiento rotacional de los ejes, soportando las cargas que actúan sobre ellos. Estos componentes están por tanto expuestos a sufrir averías, mismas que pueden originarse por diversos motivos. Cabe resaltar el hecho de que estas fallas resultan en una huella particular de daño que es denominada patrón. Cada patrón es único y depende de la máquina en que se encuentre el rodamiento, así como la falla presentada. (SKF, 2017)

Al tratarse de piezas que son sometidas a vibraciones, es posible identificar señales de emisión acústica que nos permiten detectar el estado en que se encuentran los rodamientos. Se propone un método no intrusivo para determinar el nivel de desgaste producido en diversos rodamientos, en diferentes etapas de vida útil, seleccionados como muestras mediante la implementación de un Sistema LDV (Laser Doppler Velocimeter) y un espectrógrafo de mediana resolución espectral como sistema recolector de datos para posteriormente analizarlos mediante un análisis de Fourier y obtener así el diagnóstico de deterioro Flores *et al.* (2015).

La detección oportuna de las fallas durante el mantenimiento preventivo de unidades permite evitar costos por paros no programados. (SKF 2017) El método propuesto para la detección de desgaste en rodamientos permite aprovechar la emisión acústica generada para tal fin y, al ser una técnica no invasiva, evita el desmantelamiento o paro del equipo reduciendo costos por tiempo improductivo y mantenimiento correctivo y facilitando la toma de muestras a la vez que agiliza el proceso.

## 2 Metodología

Se desarrolla el estudio experimental para el diagnóstico del desgaste presente en elementos rodantes, específicamente rodamientos rígidos de bolas. Para ello se ha dividido el proceso de trabajo en tres importantes secciones: La Determinación de Muestras, la Toma de Datos Experimental y la Interpretación de las Señales.

### 2.1 Determinación de las Muestras

Para llevar a cabo la recolección de datos se definen las muestras a utilizar durante la experimentación. Se propone el uso de rodamientos rígidos de bolas, debido a que son el tipo de rodamientos más habitual y son especialmente versátiles (SKF, 2015). Se seleccionan rodamientos del mismo modelo con diversos niveles de desgaste, tomando la recomendación del trabajo realizado por Flores *et al.* (2015) con un arreglo de Michelson por fibras ópticas de realizar un mayor número de pruebas y trabajar con elementos en diferentes etapas de su vida útil.

Los elementos utilizados para las pruebas experimentales son 2 rodamientos modelo 6201RS (con sello rozante, de elastómero) y 2 rodamientos modelo 6201Z (con sello metálico). En las figuras, se observan los diferentes estados en los que se encuentran cada una de las muestras utilizadas para esta fase experimental.

**Figura 1** Muestras seleccionadas de Rodamientos en Diferentes etapas de desgaste



*Fuente de Consulta: Elaboración Propia*

Los primeros ejemplares son un par de rodamientos con cero y poco nivel de deterioro por uso, pertenecientes a bombas periféricas de uso doméstico. Se han denominado “RODZ-N” y “RODZ-S” de acuerdo con el estado en el que se encuentran. Los siguientes ejemplares también corresponden a bombas periféricas de uso doméstico pero que cuentan con un mayor tiempo de vida y que, además, pudieron estar sometidas a la intemperie y su estado es visiblemente deplorable.

Se seleccionaron rodamientos rígidos de bolas de una hilera con diferentes niveles de deterioro; debido a su ordinariéz se optó por el modelo 6201 en sus versiones con sello metálico y de elastómero. De acuerdo con las especificaciones técnicas manejadas por el proveedor de rodamientos SKF, estos rodamientos cuentan, independientemente de su tipo de sello, con un diámetro exterior de 32 mm y un diámetro interno de 12 mm, en su interior contiene 7 balines cada uno en su respectiva canastilla. El ángulo de contacto se forma cuando se tienen cargas axiales o de empuje, si no existen tales cargas el valor de  $\beta_f$  es igual a cero (Villa Covarrubias, Piña Monarrez, and Rico Pérez 2021).

## 2.2 Toma de Datos Experimental

Para la sección experimental se hace uso de los equipos LDV y un espectrómetro de alta resolución como elementos recolectores de datos, tomando muestras a tiempo real durante intervalos determinados (1000 MHz), para posteriormente ser procesadas en un software donde se realizará la descarga de datos para la visualización de las señales (Gatica Hernández and Jiménez Rosende, 2002).

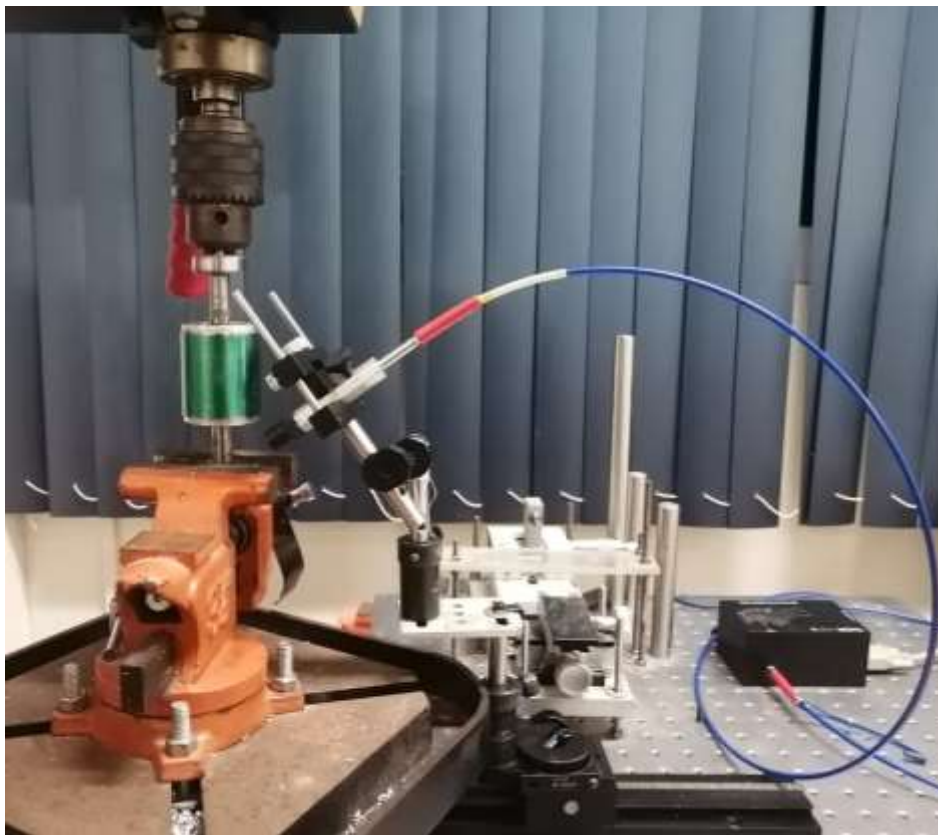
### 2.2.1 Componentes del sistema

Se describen brevemente los elementos constituyentes de cada parte del sistema experimental, tanto óptico (Sistema LDV) como mecánico; que es donde se han montado los rodamientos para ser sometidos al sondeo láser para su diagnóstico.

#### Sistema Óptico LDV (Laser Doppler Velocimeter)

Los componentes principales del sistema experimental son un láser de 785 nm de longitud de onda, perteneciente al infrarrojo cercano, con regulador de potencia, una lente de enfoque y fibra óptica bifurcada y un espectrógrafo de mediana resolución como elementos recolectores de datos, tomando muestras a tiempo real durante intervalos determinados, para posteriormente ser procesadas en un software donde se realizará la descarga de datos para la visualización de las señales. (Gatica Hernández and Jiménez Rosende, 2002)

**Figura 2** Sistema LDV ya montado



*Fuente de Consulta: Elaboración Propia*

El funcionamiento del sistema presentado comienza por una fuente de luz primaria (láser de 785 nm) cuyo haz será trasladado por medio de la fibra óptica bifurcada hasta la lente de enfoque, donde el arreglo modal de la fibra óptica de 7 puntas (6 alrededor de 1 central) hará la función de un divisor de haz convencional, lo que sería el equivalente a tener 6 fuentes de luz atravesando la lente para concentrarse en la distancia focal marcada por la misma (25 mm), formando en ese punto el volumen de medida, zona donde se genera la interferencia de los 6 haces de luz, el diseño en principio es similar al del telescopio espacial James Webb, solo que en este caso son espejos en lugar de fibras ópticas como en nuestro diseño Solís García, J. (2022). Diseños similares al que se presenta en este trabajo, se definen en Durán Escudero, M. (2022), para el caso de reflectores pseudo aleatorios, o bien para dimensiones grandes los diseños interferométricos SAR diferencial Szeibert, *et al.* (2022). De igual forma, los sistemas LDV se emplean para la medición de la velocidad en túneles de viento Balduzzi, N., and Balduzzi, N. (2022).

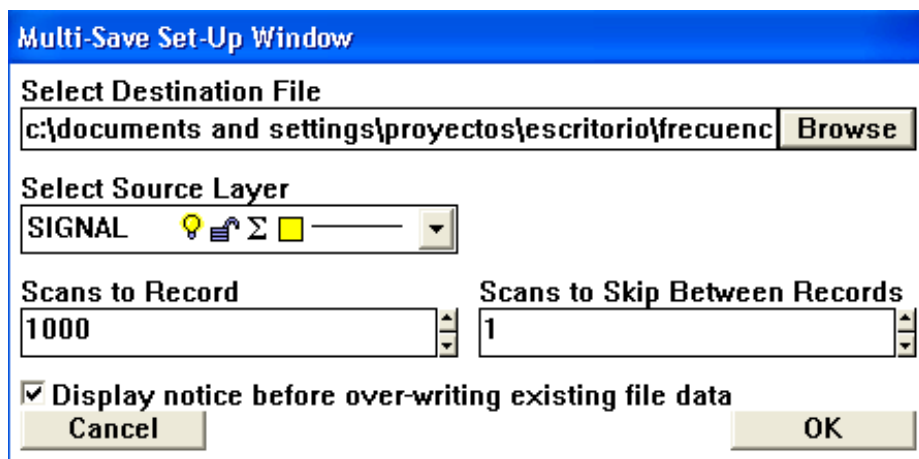
Para realizar los experimentos se acerca este volumen de medida al objeto de estudio, cuyas variaciones en el tiempo serán registradas por reflexión, por parte de la fibra central, la cual a su vez está conectada al módulo de detección. Una vez obtenidas las señales, se extraen del espectrómetro en formato “SPE” y son procesadas en el ordenador por medio de un código Matlab de FFT, convirtiéndose de variaciones temporales a espectros de frecuencia.

**Sistema mecánico**

Para realizar el análisis de las diferentes muestras se monta el rodamiento sobre el eje vertical del rotor fijado al taladro de banco que funge como banco de pruebas con una velocidad de rotación establecida en 3080 RPM en el husillo. La cara que expone el interior del rodamiento se posiciona hacia arriba para facilitar la manipulación de la sonda LDV.

Se toman un total de 10 pruebas por cada rodamiento con un tiempo de integración de 1,0 ms, con un número de escáneres igual a 1000; esto significa que, por cada prueba, se obtienen 1000 datos en 1 milisegundo.

**Figura 3** Software de toma de datos



*Fuente de Consulta: Extracto del Programa Spectra*

De acuerdo con el criterio de Nyquist, para 1,0 ms se obtendrían espectros de frecuencia partiendo de cero hasta  $5 \times 10^5$  Hz.

**Tabla 1** Criterio de Nyquis

Criterio de Nyquis					
Equipo	0.001	0.01	0.1	1	10
Ventana Tiempo	$10^{-3}$	$10^{-2}$	$10^{-1}$	1	10
Ventana Frecuencia	$0-5 \times 10^5$	$0-5 \times 10^4$	$0-5 \times 10^3$	$0-5 \times 10^2$	$0-5 \times 10^1$
Software	0.000 001	0.000 01	0.000 1	0.001	0.01

*Fuente de Consulta: Elaboración Propia*

### 3 Interpretación de datos

Una vez procesadas las señales de interferometría láser, adquiridas mediante el sistema LDV y el adquisidor de datos, se transforman las señales obtenidas en el dominio del tiempo a señales del dominio de la frecuencia o espectros de frecuencia utilizando las transformadas de Fourier. Se utiliza un código de Matlab bajo el algoritmo de FFT (Fast Fourier Transforms) para determinar el espectro de frecuencias asociados a las variaciones temporales (Flores *et al.* 2020) resultantes de los experimentos y así lograr su interpretación y diagnosticar el daño presente en los rodamientos a analizar.

#### Frecuencia teórica de fallo

El análisis de vibraciones es una de las técnicas más utilizadas para la detección de frecuencias que puedan indicar que algo anda mal con el rodamiento sin necesidad de llegar al punto en que el daño se manifieste de forma audible. Un rodamiento defectuoso producirá componentes de vibración que son múltiplos exactos de 1x, por tanto, es posible identificar la existencia de daños en los rodamientos si se detectan componentes asíncronos en los espectros analizados.

. **Tabla 2** Datos de rodamientos según su geometría

Datos del Rodamiento según su Geometría		
Diámetro Externo	D1	32 mm
Diámetro Interno	D2	12 mm
Diámetro de Paso	Pd	22 mm
Diámetro de Bola	BD	0.6 mm
Número de Bolas	NB	7
Ángulo de Contacto	$\beta$	0°

*Fuente de Consulta: Elaboración Propia*

Frecuencia de Fallo en Pista Externa

$$BFPO = RPM \frac{NB}{2} \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos\beta\right) \quad (1)$$

$$BFPO = (3080RPM) \frac{7}{2} \left(1 - \frac{6}{22} \cos(0)\right) \quad (2)$$

$$BFPO = 7,840CPM \quad (3)$$

Frecuencia de Fallo en Pista Interna

$$BFPI = RPM \frac{NB}{2} \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos\beta\right) \quad (5)$$

$$BFPI = (3080RPM) \frac{7}{2} \left(1 + \frac{6}{22} \cos(0)\right) \quad (6)$$

$$BFPI = 13,720CPM \quad (7)$$

Frecuencia de Fallo en Elementos Rodantes

$$BSF = RPM \frac{PD}{BD} \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos\beta\right)^2\right) \quad (8)$$

$$BSF = 3080 \frac{22}{6} \left(1 - \left(\frac{6}{22} \cos 0\right)^2\right) \quad (9)$$

$$BSF = 10,433.33CPM \quad (10)$$

Frecuencia de Fallo en Jaula

$$FTF = RPM \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{B_D}{P_D} \cos \beta \right) \tag{11}$$

$$FTF = RPM \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{6}{22} \cos \beta \right) \tag{12}$$

$$FTF = 1,120 CPM \tag{13}$$

Existen diferentes unidades para medir las frecuencias, siendo el más popular el ciclo por segundo o Hertz (Hz). Las unidades obtenidas con el cálculo teórico de las frecuencias de fallo se encuentran en ciclos por minuto, ya que están descritas en términos de las RPM (White 1990), razón por la cual, para convertir dichas frecuencias en Hz es necesario dividir las entre 60.

**Tabla 3** Frecuencias de fallo

Frecuencias de Fallo a 3080 RPM		
	CPM	Hz
<b>BPFO</b>	7840	130.667
<b>BPFI</b>	13720	228.667
<b>BSF</b>	10453.333	174.222
<b>FTF</b>	1120	18.667

Fuente de Consulta: Elaboración Propia

A modo de comprobación, se consultan los valores obtenidos teóricamente con los proporcionados por la herramienta del proveedor SKF para cálculo de Frecuencias de Rodamientos.

**Figura 4** Frecuencias de Fallo de Rodamientos por proveedor

Propiedades del rodamiento 6201									
Designación	Tipo de rodamiento	Dimensiones principales			Capacidad de carga básica			Clasificaciones de velocidad	
		Díametro interior	Díametro exterior	Ancho	Dinámica	Estática	Carga límite de fatiga	Límite	Catálogo
6201	Rodamiento rígido de bolas	d (mm)	D (mm)	B (mm)	C (kN)	C <sub>0</sub> (kN)	P <sub>0</sub> (kN)	n <sub>lim</sub> (1/min)	<a href="#">Open in catalogue</a>
6201	Rodamiento rígido de bolas	12	32	10	7,28	3,1	0,132	32000	<a href="#">Open in catalogue</a>

Frecuencias							
Designación	Frecuencia rotacional			Frecuencia de over-rolling			
	Aro interior	Aro exterior	Conjunto de esmerillas roscas y jaula	Elemento rodante sobre su eje	Punto en el aro interior	Punto en el aro exterior	Elemento rodante
	f <sub>i</sub> (1/min)	f <sub>e</sub> (1/min)	f <sub>j</sub> (1/min)	f <sub>r</sub> (1/min)	f <sub>oi</sub> (1/min)	f <sub>oe</sub> (1/min)	f <sub>or</sub> (1/min)
6201	51,333	0	18,667	87,311	228,667	130,667	174,222

Fuente de Consulta: Extraído de herramienta web SKF

La comparación de las frecuencias obtenidas teóricamente y las proporcionadas por la herramienta del proveedor pueden observarse en la siguiente tabla:

**Tabla 4** Frecuencia de fallo a 3080 rpm

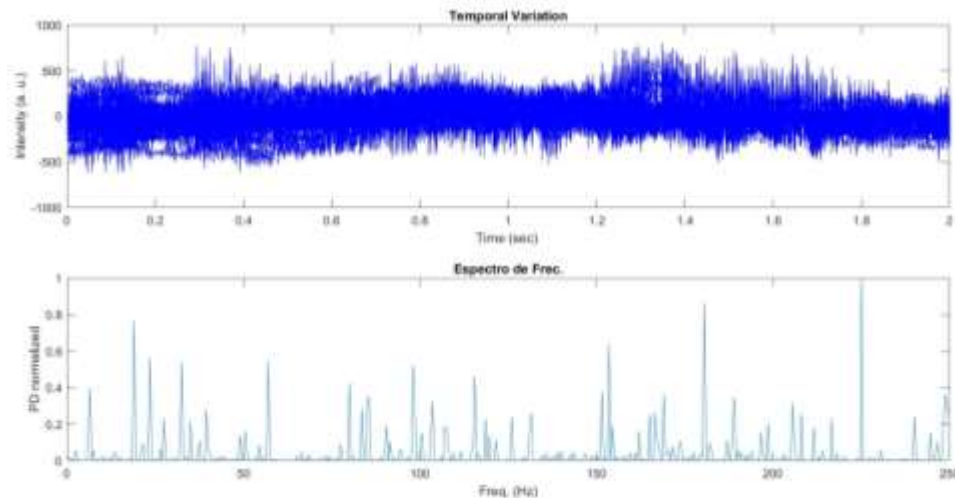
Frecuencias de Fallo a 3080 RPM en Hz		
	Teórica	SKF
<b>BPFO</b>	130.667	130.667
<b>BPFI</b>	228.667	228.667
<b>BSF</b>	174.222	174.222
<b>FTF</b>	18.667	18.667

Fuente de Consulta: Elaboración Propia

## Espectros de frecuencia

Al procesar los datos obtenidos con Matlab mediante el algoritmo FFT, se obtienen espectros de frecuencia como el mostrado en la siguiente figura.

. **Figura 5** Espectro temporal y de frecuencia



*Fuente de Consulta: Elaboración Propia*

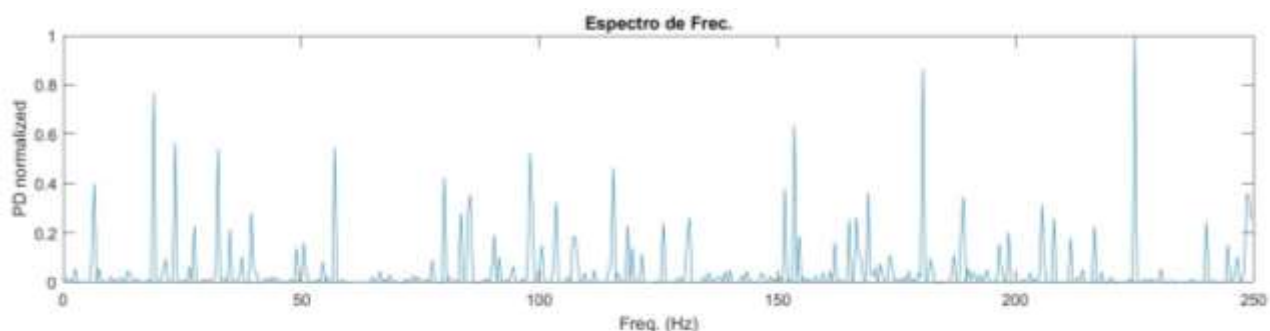
En la parte superior se observa el espectro en el espacio temporal, mientras en la inferior se ilustra el espectro de frecuencia. Este es resultado de la diferencia gráfica del valor promedio de los 1000 datos obtenidos por muestra con un tiempo de integración de 2 ms, que tras pasar por una señal filtrada de pedestal y obtener gráficamente la señal Doppler, aplica el FFT al número de muestras designado con el algoritmo de Matlab.

Para fines prácticos se ha delimitado el intervalo de frecuencia de 0 a 250 Hz, donde será posible comparar los espectros y ubicar las frecuencias de fallo y su diferencia en amplitud. De acuerdo con la guía para pruebas y análisis de vibración, los pasos iniciales en el análisis de vibración manual son:

- Identificación de los picos de vibración en el espectro y relacionándolos con frecuencias forzadas.
- Determinación de la gravedad de problemas de máquina basándose en las amplitudes y la relación entre los picos de vibración.
- Haciendo las recomendaciones apropiadas para las reparaciones, basadas en la gravedad de los problemas de máquinas.

## Identificación de los picos de vibración

. **Figura 6** Espectro de Frecuencia del Rodamiento RODZ-N

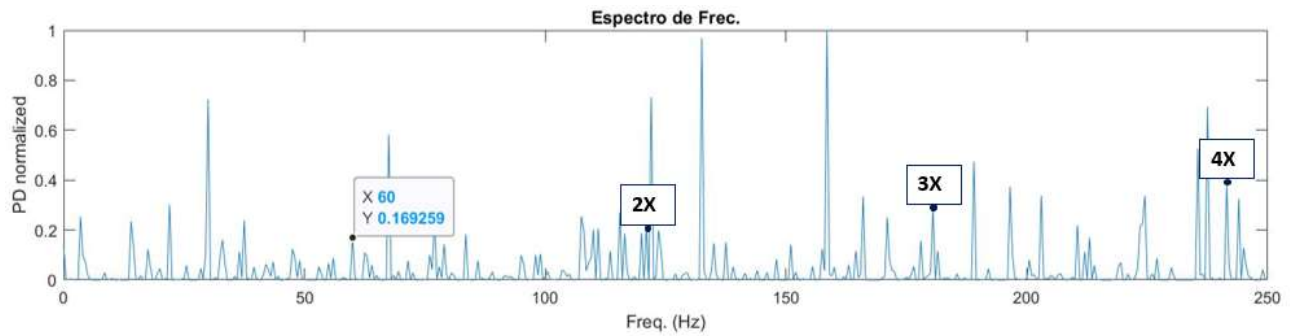


*Fuente de Consulta: Elaboración Propia*



Se ubican las frecuencias de fallo calculadas teóricamente en el primer espectro con la muestra en buen estado (RODZ-N). La frecuencia fundamental correspondiente en Hz a la frecuencia de giro debe rondar los 51 Hz, mientras las correspondientes a las frecuencias de fallo se ilustran en la tabla.

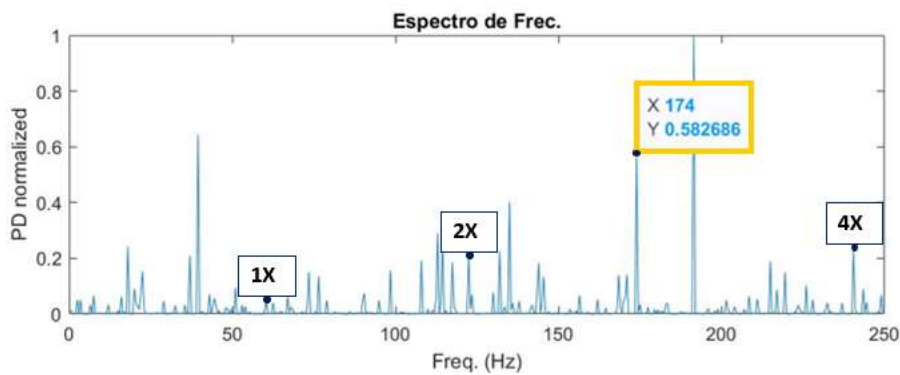
**Figura 7** Picos de Frecuencia RODZ-N



Fuente de Consulta: Elaboración Propia

Pese a que la frecuencia de giro calculada teóricamente es de 51.3 Hz, se muestra la presencia de una frecuencia de giro 1X de 60 Hz y sus armónicos 2X, 3X y 4X con amplitud ascendente. Se manifiestan ligeramente desplazadas frecuencias de tonos de rodamientos, con amplitudes muy bajas, lo cual puede indicar la ausencia de un fallo en el rodamiento de esta naturaleza. Para el rodamiento de estado semi nuevo, es posible notar que continúan presentes los picos a la frecuencia de giro y sus armónicos, con una amplitud en los picos 2X y 4X considerablemente mayor con respecto a 1X cuya amplitud decae por debajo de las 0.004 U.A. Sin embargo, se carece de un pico espectral 3X mientras existe una amplitud de casi 0.6 en la frecuencia BSF (Frecuencia de deterioro en elementos rodantes).

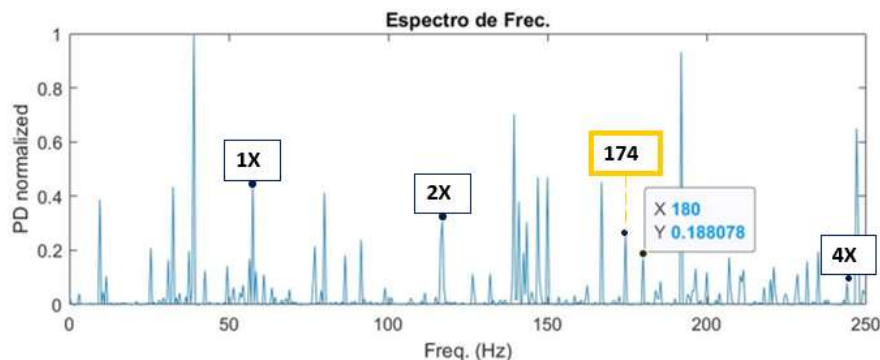
**Figura 8** Armónicos de espectro de frecuencia P3 de RODRS\_SN



Fuente de Consulta: Elaboración Propia

A compararlo con espectros tomados al mismo elemento (RODRS\_SN), se observa un incremento en la frecuencia 1X, lo cual podría indicar un problema de desbalanceo con respecto al eje; pese a que es notoria la disminución de amplitud en la frecuencia de BSF, continúa claramente presente dentro del espectro.

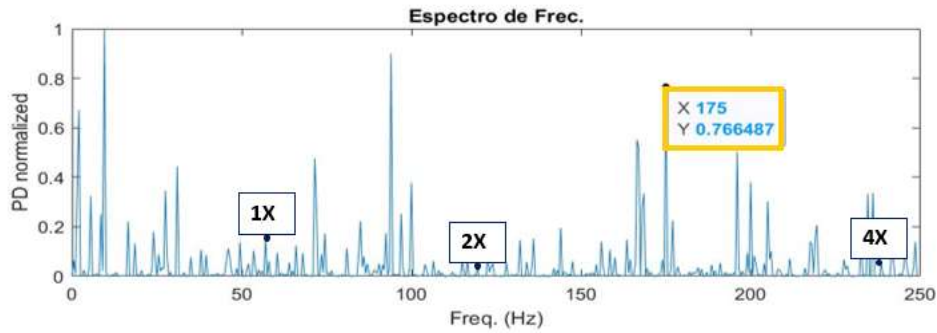
**Figura 9** Armónicos de espectro de frecuencia P9 de RODRS\_SN



Fuente de Consulta: Elaboración Propia

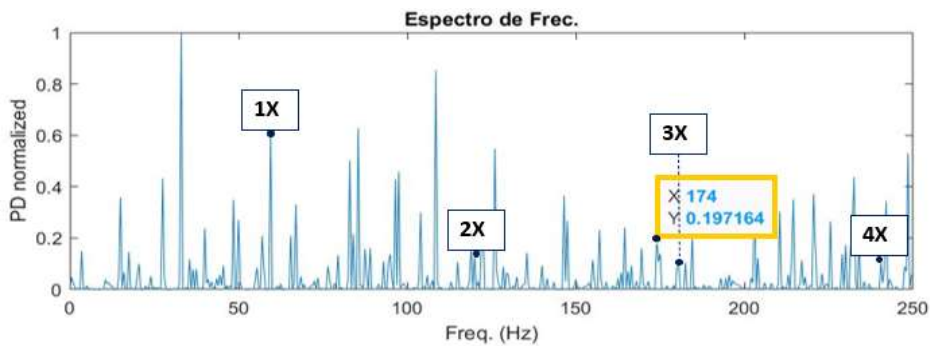
Para el caso del rodamiento RODZ\_D o muestra 3, se observa un comportamiento similar en donde se traza un pico espectral muy alto en BFS con frecuencia de giro y sus armónicos muy bajos en comparación para las primeras pruebas en el rodamiento, ya para las pruebas finales se incrementa la amplitud de 1X así como sus armónicos y la frecuencia de falla en elementos rodantes disminuye.

**Figura 10** Armónicos de espectro de frecuencia P3 de RODZ\_D



Fuente de Consulta: Elaboración Propia

**Figura 11.** Armónicos de espectro de frecuencia P10 de RODZ\_D

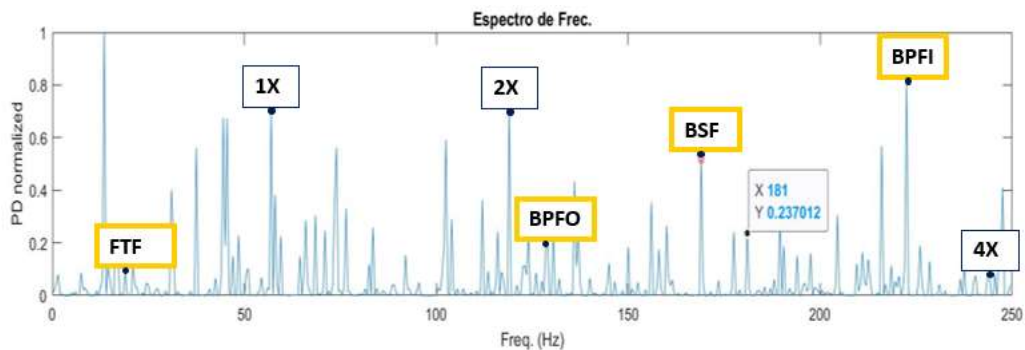


Fuente de Consulta: Elaboración Propia

Una diferencia remarcable entre los espectros de los rodamientos de las muestras 2 y 3, es el hecho de que para esta última los picos de frecuencia vienen acompañados de múltiples bandas laterales, algunas moduladas en armónicos de FTF (aproximadamente 18 Hz de espaciado entre bandas). Lo cual indicaría mayor daño en el rodamiento RODZ\_D con respecto al RODRS\_SN que no presenta bandas laterales tan marcadas.

En el caso de la 4ta muestra (RODZ\_MD) la presencia de fallas es más evidente. Existe daño en BFS y se encuentra acompañado por defectos en la pista interna (BPFI) como los picos de mayor amplitud, FTF y BFPO también se están presentes con amplitudes considerables. Hay presencia de bandas laterales y un ruido de fondo incipiente, así como un disparo en la amplitud de 1X y sus armónicos.

**Figura 12** Armónicos y Frecuencias de falla de espectro de frecuencia P3 de RODZ\_D



Fuente de Consulta: Elaboración Propia

## **Discusión de resultados**

Tras analizar el comportamiento de los picos de frecuencia de las 4 muestras estudiadas en sus diferentes espectros, con base a la literatura consultada y haciendo una comparación con la Carta Ilustrada de diagnóstico de vibración (Charlotte, n/d) se puede clasificar o diagnosticar el estado de estos rodamientos de acuerdo con la etapa de falla probable en la que se encuentran, así como la localización de la falla de acuerdo con los tonos de los rodamientos.

### **Rodamiento nuevo**

El rodamiento presenta una Etapa 1 incipiente.

Las frecuencias presentes son claramente la fundamental y sus armónicos (4 hasta el límite establecido para el análisis). Sin embargo, comienzan a manifestarse débilmente las frecuencias de falla características de la geometría del rodamiento 6201.

### **Rodamiento semi-nuevo**

Pese a tener una apariencia muy cuidada, este rodamiento presenta características típicas de un comienzo de la 3era etapa de falla, únicamente en BSF; esto debido a que, aunque los tonos de rodamiento son ubicables el incremento de interés se encuentra en la frecuencia que corresponde a los elementos rodantes. La ausencia del 3er armónico de la frecuencia fundamental podría deberse a una modulación con algún pico de frecuencia aleatorio (suma de frecuencias). También se detecta un ligero desbalanceo (incremento repentino de 1X), se presume como resultado de BSF.

### **Rodamiento desgastado**

Similar a RODRS-SN, el rodamiento RODZ-D, presenta un pico progresivo en 1X, que podría indicar desbalanceo, tonos de rodamiento marcados, aunque ligeros, con insistencia (amplitud mayor) en BSF.

### **Rodamiento muy desgastado**

El daño en este rodamiento es muy marcado, todos sus tonos se encuentran visiblemente presentes, con amplitudes considerables. Continúa la tendencia de existir fallo en los elementos rodantes, pero, a diferencia de los 2 rodamientos evaluados con este tipo de falla, este parece ya haber afectado a las pistas tanto interior como exterior, sobre todo a BPFI cuya amplitud supera los 0.8 u.A. El incremento en 1X y 2X indica claramente la presencia de desbalanceo y la presencia de bandas laterales armónicas FTT y la presencia de ruido de fondo incipiente, agudizan el estado de falla de este. Debido a que aún no se presenta el fenómeno de atenuación de los tonos de rodamiento con respecto al incremento de la frecuencia fundamental y sus armónicos, se determina que el rodamiento presenta un estado de falla 4 inicial.

## **Conclusiones**

Se ha desarrollado un sistema laser que permita la medición de vibraciones mecánicas mediante el efecto Doppler. Se ha determinado como objeto de análisis la vibración en los rodamientos. Se propuso una construcción flexible utilizando fibras ópticas, de esta forma se logran mediciones con relativa facilidad en puntos específicos de los rodamientos.

Se ha planteado un a base teórica que ha permitido el diseño y el desarrollo de un sistema laser prototipo. Asimismo, se ha realizado la experimentación suficiente para evaluar la posibilidad de la detección de vibraciones en las piezas determinadas para el estudio en ambientes controlados. La revisión del estado del arte realizada da cuenta de varias décadas de avances tecnológicos en esta tecnología. Dicha revisión ha permitido comprender y aplicar los fundamentos para el sistema descrito, así como explorar la aproximación a realizar mediciones en ambientes no controlados.

El prototipo es un sistema no inclusivo, y el punto de medición, denominado volumen de medida es en el punto focal (2.5 cm), de la lente convexa colocada a la salida de las fibras ópticas.

Al incidir el haz sobre el rodamiento, se dispersa en todas direcciones, la componente que se mide es la reflejada y que va en la dirección de la fibra óptica central, y se lleva al sistema de detección, que en este caso es un espectrógrafo. La velocidad de registro del espectrógrafo es de 1M segundos. Un total de 1000 espectros se registran para obtener mediciones de variaciones en el tiempo de 10-3 segundos, 10-2 segundos, etc. Se aplica la técnica de FFT para obtener espectros de frecuencia con las que se pueden hacer diagnósticos del desgaste de rodamientos, de acuerdo con las frecuencias reportadas en la literatura. En resumen, a partir de los resultados obtenidos por el sistema laser para la detección de vibraciones tenemos lo siguiente:

- Es posible detectar las vibraciones de los rodamientos en un ambiente controlado, lográndolo a partir de la comparación con las frecuencias naturales.
- El sistema permite una medición relativamente sencilla debido a la flexibilidad de la fibra óptica, permitiendo explorar su aplicación remota.
- Mediante la técnica FFT se puede realizar una aproximación del desgaste de los rodamientos

## Referencias

- Balduzzi, N., & Balduzzi, N. (2022). Diseño y construcción de un túnel de viento supersónico con sistema de visualización Schlieren (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).
- Gatica Hernandez, Nestor Fabian, and Pablo Hernán Jiménez Rosende. 2002. “Técnica de La Demodulación En El Diagnóstico de Fallas En Máquinas Rotatorias.” UACH.
- Flores. Aarón, De la cruz. Lelio, Benavides. Olena, May. Manuel, Análisis de fallas de rodamientos y holgura en motores de corriente alterna, por medio de un sistema de láser y fibras ópticas. SOMI, Vol. 30, No. 1, 2015.
- Flores-Gil, A, Bandala-Garcés. M, Benavides, O, García-Lara, C, Martínez-González, J. Implementación de un velocímetro láser Doppler unidimensional con fibras ópticas. SISTEMAS LÁSER APLICADOS A LA INGENIERÍA: Red Temática del Sureste de Sistemas Láser y Comunicaciones Aplicadas a la Ingeniería. Universidad Autónoma del Carmen. 2020, páginas: 45-53
- Durán Escudero, M. (2022). Diseño e implementación de láseres de fibra óptica basada en reflectores pseudoaleatorios cuasi distribuidos. <https://academica-e.unavarra.es/handle/2454/43458>
- SKF. 2017. *Daño de Rodamientos y Análisis de Fallas.* .” <https://www.skf.com/mx/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings> (December 6, 2022).
- SKF. 2015. “Rodamientos Rígidos de Bolas.” <https://www.skf.com/mx/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings> (December 6, 2022).
- Solís García, J. (2022). Grandes telescopios ópticos: del catalejo al Telescopio Espacial James Webb.
- Szeibert, W.T., Tomás, R., Liu, X., Lopez-Sanchez, J.M., Díaz, E., Zhao, C. (2022). Empleo de imágenes PAZ para la monitorización de un movimiento de ladera en Alcoy (Alicante) mediante interferometría SAR diferencial. X Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Granada, España, 13-16 septiembre 2022.
- Villa Covarrubias, B., M. Piña Monarrez, and L. Rico Pérez. 2021. *Metodología de Confiabilidad Weibull Para El Diseño de Rodamientos de Bola En Base a Esfuerzos de Hertz.* Ciudad Juárez, Chihuahua.
- White, Por Glen. 1990. *Introducción al Análisis de Vibraciones.* www.AzimaDLI.com. “Carta ilustrada de Diagnóstico de Vibración”, grupo analítico de Charlotte