

# Vibration assessment of transmission bearings of a mini Baja SAE prototype

Enrique Flores <sup>\*,a</sup> , Andrés Albornoz<sup>b</sup> , Erwin López<sup>b</sup> , Jorge Romero<sup>c</sup> 

<sup>a</sup>Centro de Investigaciones en Mecánica (CIMEC), Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

<sup>b</sup>Laboratorio de Predicciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

<sup>c</sup>Centro de Investigación en Materiales (CIM), Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

**Abstract.-** In the present work, a non-invasive assessment of vibrations to the bearings of the transmission system of the mini Baja SAE UC 2004 prototype is carried out, in which possible defects are analyzed. The study carried out included the following stages: location and specification of each bearing used in the transmission system; measurement and data collection; obtention the failure frequencies for each bearing of the transmission system and study of the data obtained. The main results obtained are that all the bearings of the transmission system presented the possibility of failure for the two speeds of rotation of the transmission shaft defined for this study, the most recurrent possibility failure were defects in the outer race, and the least recurring were defects in the bearing cage; increased detected failure possibilities for one of the tested spin speeds. Additionally, it was possible to establish, from the illustrated vibration diagnosis chart created by the Charlotte analytical group, the possible cause of failure for most of the bearings studied. From what was obtained, it is concluded that the possible detection of failures in the bearings studied is sensitive to the speed of the transmission system for which the measurements are made, and that although an illustrated vibration diagnosis chart created by the analytical group of Charlotte allows the determination of possible causes of bearing failure, alternative methods to this are required for such detection.

**Keywords:** vibrations; bearings; non invasive assesment.

## Evaluación mediante vibraciones de los rodamientos de la transmisión de un prototipo mini Baja SAE

**Resumen.-** En el presente trabajo se realiza una evaluación no invasiva de vibraciones a los rodamientos del sistema de transmisión del prototipo mini Baja SAE UC 2004 en el que se analizan los posibles defectos existentes. El estudio realizado comprendió las siguientes etapas: ubicación y especificación de cada rodamiento utilizado en el sistema de transmisión; medición y obtención de datos; obtención de las frecuencias de falla para cada rodamiento del sistema de transmisión y estudio de los datos obtenidos. Como principales resultados obtenidos se tienen que todos los rodamientos del sistema de transmisión presentaron posibilidad de falla para las dos velocidades de giro del eje de transmisión definidas para este estudio, la posibilidad de falla más recurrente fueron los defectos en la pista externa, y la menos recurrente fueron los defectos en la jaula de los rodamientos; posibilidades de falla detectadas más acentuadas para una de las velocidades de giro ensayadas. Adicionalmente se pudo establecer, a partir de la carta ilustrada de diagnóstico de vibración creada por el grupo analítico de Charlotte, la posible causa de falla para la mayoría de los rodamientos estudiados. De lo obtenido se concluye que la posible detección de fallas en los rodamientos estudiados es sensible a la velocidad de giro del sistema de transmisión para la cual se hacen las mediciones, y que si bien la carta ilustrada de diagnóstico de vibración creada por el grupo analítico de Charlotte permite la determinación de posibles causas de falla en rodamientos, se requieren métodos alternativos a este para dicha detección.

**Palabras clave:** vibraciones; rodamientos; evaluación no invasiva.

Recibido: 21 de febrero, 2020.

Aceptado: 03 de abril, 2020.

### 1. Introducción

El mantenimiento predictivo aplica técnicas no destructivas en las máquinas para predecir cuándo requieren operaciones de reparación o cambio de piezas [1]. En general, las industrias dentro de sus

\* Autor para correspondencia:  
Correo-e: evflores@uc.edu.ve (E. Flores)

programas de mantenimiento predictivo utilizan el monitoreo y análisis de las vibraciones con el fin de establecer cuál es el estado de salud mecánica de las máquinas y en particular de sus elementos más críticos y de esta manera poder prevenir fallas catastróficas [2].

El análisis de vibraciones permite diagnosticar futuras fallas antes de que se originen, consiguiendo anticiparse a la falla al momento en que el equipo o elemento deja de trabajar en condiciones normales de operación, permitiendo establecer un criterio técnico y argumentando para determinar si dicho elemento puede reemplazarse o no; así el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza, extendiendo además la productividad del sistema operativo [3].

En un plano generalizado, las vibraciones se encuentran de manera principal en todas las máquinas, esto depende de ciertas máquinas en unas más o menos de acuerdo a factores conocidos; estos son directamente proporcionales al ruido que denotan el normal funcionamiento de una parte del sistema de transmisión [4].

Desde el punto de vista global y analizando el contexto mundial los sistemas automotrices son de gran importancia para el desarrollo de las industrias de todo el mundo, por ende, es necesario realizar un análisis exhaustivo en el funcionamiento del motor. Un problema que se ha notado en el transcurso de los años es el deterioro de las partes internas y externas del motor por casos particulares y desgaste de los mismos, un factor que se ha notado indispensable de analizar son las alteraciones ocasionadas por las vibraciones que generan [5].

En este mismo orden de ideas, dentro del mantenimiento predictivo se presta especial interés a las fallas en rodamientos, debido a su alto costo y al interés de aprovechar la mayor parte de su vida útil. La falla de un rodamiento es una de las principales causas de daños en la maquinaria rotativa. Estas fallas pueden ser catastróficas y pueden ocasionar tiempos de inactividad costosos [6].

Por ser un apoyo y soportar varios tipos de cargas transmitidas por un sistema, los rodamientos con regularidad presentan diversos tipos de fallas

internas, se encuentren en un eje o no. Por ende, es importante que estos sean evaluados antes de su montaje en un sistema y durante su funcionamiento en él. Los rodamientos presentes en el sistema de transmisión de los diversos prototipos Baja SAE UC, han presentado fallas a lo largo de su participación en competencias y eventos internacionales, repercutiendo directamente en los resultados de las ya mencionadas competencias por parte del equipo de estudiantes de la Universidad de Carabobo.

La forma convencional de análisis y diagnóstico de falla en los rodamientos se ha basado en el empleo de registros de señales de vibración, que juegan en la actualidad un papel importante en el mantenimiento predictivo para analizar su comportamiento [7]. Estas señales se analizan mediante diversas técnicas entre las cuales pueden indicarse el análisis espectral, el análisis de la forma de onda, el análisis de fase, el análisis de órbitas, el análisis de coherencia, entre otras [2]; reportándose investigaciones donde se proponen metodologías alternativas [8] y donde se muestran la construcción de bancos de ensayo para la simulación de condiciones reales de carga a las cuales estaría sometido un rodamiento en particular a fin de obtener patrones de vibración que identifiquen los fallos de dicho rodamiento [9].

A pesar de las rigurosas pruebas a las que son sometidos durante las competencias, los rodamientos de la transmisión del vehículo prototipo mini Baja SAE UC no han sido evaluados con estudios no invasivos como lo es un análisis de falla por vibraciones. El conocimiento del estado de todas sus piezas no solo engloba factores económicos, a diferencia de la mayoría de la maquinaria en una planta de producción en las que son aplicados comúnmente estos análisis, sino que también podría evitar que un mal funcionamiento represente un riesgo de accidente que comprometa la seguridad integral del piloto e incluso a los espectadores, es necesario mantener bajo control el estado del rodamiento y del mismo sistema de transmisión para evitar fallas durante la competencia. Por este motivo, se realizó un estudio no invasivo de vibraciones a los rodamientos del sistema de transmisión del prototipo mini Baja

SAE UC 2004 en el que se analizaron los posibles defectos existentes [10], lo que podría contribuir a plantear soluciones que ayuden a mitigar los riesgos presentes.

## 2. Fundamentación

Las frecuencias que generan los rodamientos cuando los elementos rodantes pasan sobre una anomalía de superficie en el mismo elemento rodante o en la pista de rodadura se denominan frecuencias de falla fundamentales. Estas frecuencias son una función de la geometría del rodamiento y de la velocidad relativa entre las dos pistas de rodadura [11]. Por ejemplo, BPFO o la frecuencia de deterioro de la pista exterior de un rodamiento es físicamente el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista exterior cada vez que el eje realiza un giro completo [11]. Su valor viene dado en ciclos por minuto (cpm) y se calcula a través de la ecuación (1):

$$BPFO = 0,5Nn \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right) \cos\theta \right] \quad (1)$$

Donde:

$N$ : es la velocidad de giro [rev/s]

$D$ : es el diámetro medio del rodamiento [in]

$d$ : es el diámetro de las bolas o rodillos [in]

$n$ : es el número de bolas o rodillos [adimensional]

$\theta$ : es el ángulo de contacto en el rodamiento [rad].

BPFI o la frecuencia de deterioro de la pista interior de un rodamiento, es físicamente el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista interior cada vez que el eje realiza un giro completo [11]. Viene dado en ciclos por minuto (cpm) y se calcula a través de la ecuación (2):

$$BPFI = 0,5Nn \left[ 1 + \left( \frac{d}{D} \right) \cos\theta \right] \quad (2)$$

BSF o la frecuencia de deterioro de los elementos rodantes, es desde el punto de vista físico el número de giros que realiza un elemento rodante cada vez que el eje realiza un giro completo [11]. Viene dado en ciclos por minuto (cpm) y se calcula a través de la ecuación (3):

$$BSF = 0,5N \left( \frac{D}{d} \right) \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 (\cos\theta)^2 \right] \quad (3)$$

FTF o la frecuencia fundamental de tren o de deterioro de la jaula de un rodamiento, se define físicamente como el número de giros que realiza la jaula del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo [11]. Viene dado en ciclos por minuto (cpm) y se calcula a través de la ecuación (4):

$$FTF = 0,5N \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right) \cos\theta \right] \quad (4)$$

La Velocidad Como Amplitud de Vibración es un parámetro que permite reconocer la mayoría de los patrones de fallas primarias y de otros componentes cuando están en un estado evidente, como por ejemplo desbalanceo, desalineación, holgura mecánica, fricciones abrasivas, resonancias, pulsaciones, entre otros [12]. Generalmente se mide en pulgadas sobre segundo (sistema inglés), o en algunos casos en milímetros sobre segundo (sistema internacional). La convención es usar el valor eficaz o valor RMS. Acorde con la Norma ISO 10816 [13], el valor RMS de la velocidad como amplitud de vibración denotado por  $v_{rms}$  se determina a través de la ecuación (5):

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{v_{max}^2 + v_{min}^2}{2}} \quad (5)$$

Donde:

$v_{max}$ : es la máxima amplitud de velocidad en el espectro de vibraciones respecto a la velocidad [in/s].

$v_{min}$ : es la mínima amplitud de velocidad en el espectro de vibraciones respecto a la velocidad [in/s].

Una representación gráfica de un espectro de vibraciones respecto a la velocidad se muestra en la Figura 1.

La severidad de vibración es un indicador de la gravedad que puede tener un defecto. La amplitud de la vibración expresa la gravedad del problema, pero es difícil establecer valores límites de la

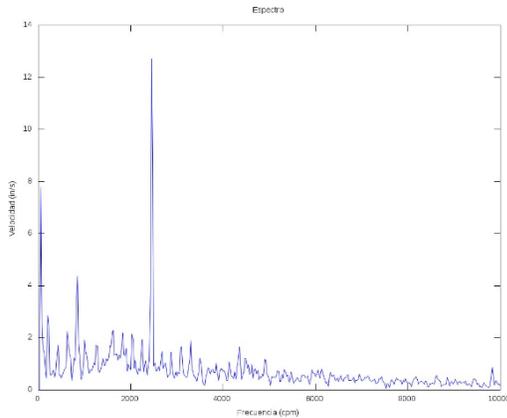


Figura 1: Espectro de vibración vista en amplitud velocidad. cpm: Ciclos Por Minuto

vibración que detecten un fallo. La finalidad del análisis de vibraciones es encontrar un aviso con suficiente tiempo para poder analizar causas y forma de resolver el problema ocasionando el paro mínimo posible en la máquina [14].

La Figura 2 extraída de la norma ISO 10816 [13], muestra los distintos niveles de severidad en base a los valores de la media cuadrática de la velocidad. Donde el color verde representa una máquina nueva o reacondicionada, el amarillo una máquina que puede operar indefinidamente, el naranja una máquina que no debería operar por tiempo prolongado y por último el color rojo son vibraciones que provocan daño a la máquina y equipos o elementos asociados.

								Valor RMS de Velocidades	
								11	0.43
								7.1	0.28
								4.5	0.18
								3.5	0.14
								2.8	0.11
								2.3	0.09
								1.4	0.06
								0.71	0.03
								mm/s	in/s
rigida	flexible	rigida	flexible	rigida	flexible	rigida	flexible	Fundación	
Bombas Mayores a 15 kW Radial, Axial, Flujo Mixto				Máquinas Medias 15kW<P<300 kW		Grandes Máquinas 300 kW <P<50MW			Tipo de Máquina
Clase IV		Clase III		Clase II		Clase I			Grupos

Figura 2: Severidad según el tipo de maquinaria [13]

*Peakvue* (valor pico) es una técnica de análisis

para señales generadas a altas frecuencias, diseñada con el objetivo de estudiar elementos cuyas fallas se presentan a altas frecuencias y baja amplitud, pero solo en una etapa incipiente del defecto, ya que cuando esta perdura en el tiempo es cuando incrementa las amplitudes y aparecen las frecuencias características de fallas de los rodamientos. Por ende, la energía vibratoria aumenta a niveles considerables y la falla ya es detectable con un aspecto de aceleración y en un ancho de banda adecuado. *Peakvue* centraliza su análisis a frecuencias altas donde se está generando la onda de esfuerzo, principalmente debido a contacto metal-metal, y toma como dato el valor pico o *peak* de los impactos generados en un pequeño periodo de tiempo para luego tomar en el espectro la frecuencia de repetición de dichos impactos [15]. La Figura 3 muestra los valores pico en distintos intervalos de tiempo en un espectro.

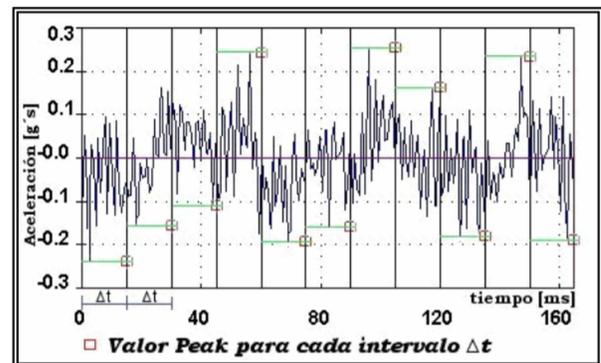


Figura 3: Valores pico en un espectro. Unidad g's: cociente entre la aceleración y la aceleración de gravedad [15]

En este contexto, la Carta Ilustrada de Diagnóstico de Vibración fue creada por el grupo analítico de Charlotte [13], formado en 1974, y se encarga de la sofisticación de estudios y pruebas en el área de análisis de vibración, control de ruido, y los programas de mantenimiento predictivo. Este grupo ha desarrollado una serie de análisis de vibraciones y seminarios de mantenimiento predictivo que se está enseñando en lugares de todo el mundo y permite tener una referencia de posibles causas de falla en los rodamientos de un sistema. Un extracto de esta carta se muestra en la Figura 4.

TABLA 1 - CARTA ILUSTRADA DE DIAGNOSTICO DE VIBRACIÓN

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	RELACIÓN DE FASE	OBSERVACIONES
C. Desalineación de Rodamiento Inclinado Sobre el Eje			Un rodamiento inclinado genera una vibración Axial considerable. Puede causar un movimiento torsional con un cambio de fase aproximado de 180° de arriba a abajo y de lado a lado cuando se mide en dirección Axial de la misma carcasa del rodamiento. Intentos de alinear el eje o balancear el rotor no alivian el problema. Es necesario remover el cojinete e instalarlo correctamente.

Figura 4: Carta Ilustrada de Diagnostico de Vibración [10]

### 3. Metodología

El estudio realizado a los rodamientos del sistema de transmisión del prototipo BAJA SAE 2004 comprendió las etapas que se indican a continuación.

Etapas 1. Ubicación y Especificación de cada rodamiento utilizado en el sistema de transmisión: Para esto, se empleó la información suministrada por Santana y Matos [16].

Etapas 2. Medición y obtención de datos: Se fijaron las condiciones bajo las cuales se realizarían las mediciones (velocidad de giro del eje de transmisión, disposición del sistema de transmisión); se configuraron los instrumentos de medición, se realizaron las mediciones de velocidad de giro del eje de transmisión acorde a lo establecido en la norma 10816-1995[13], y se efectuaron las mediciones de vibraciones mecánicas usando el escáner de vibraciones mecánicas Skf Microlog analyzer AX series - CMXA 80- bajo distintas condiciones de prueba.

Etapas 3. Obtención de las frecuencias de falla para cada rodamiento del sistema de transmisión: a través de las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) se determinan las respectivas frecuencias de falla para cada rodamiento del sistema de transmisión.

Etapas 4. Estudio de los datos obtenidos: Se graficaron los espectros a partir de las mediciones hechas, y se compararon las frecuencias pico de cada espectro con las frecuencias de falla obtenidas en la Etapa 1, utilizando la técnica *Pekavue* para determinar la localización de las fallas. Luego, se calcularon los valores RMS según el valor pico que refleje alguna falla en el rodamiento, para conocer qué tan severa es la vibración; para esto se comparó dicho valor RMS con los de la tabla de severidad de vibración mecánica establecida en la norma ISO 10816. Finalmente, en los casos donde la comparación arrojó la existencia de una

falla, al no contarse con evaluaciones previas que indicasen las posibles causas de falla de los rodamientos, siguiendo lo planteado por Ruiz *et al* [17], se empleó la Carta Ilustrada de Diagnóstico de Vibración para determinar la posible causa de falla en el respectivo rodamiento.

### 4. Discusión de resultados

La ubicación de cada rodamiento en el sistema de transmisión del prototipo Baja SAE 2004 se muestra en la Figura 5. Se tiene para este estudio un rodamiento en cada cubo de rueda y un rodamiento en cada salida de la caja de la transmisión.



Figura 5: Ubicación de los rodamientos en el sistema de transmisión

Las especificaciones geométricas de cada rodamiento sometido a estudio se muestran en la Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 1: Especificaciones del rodamiento 6004-2RSH

Diámetro efectivo	31 mm
Diámetro de las bolas	6,35 mm
Número de bolas	9
Ángulo de contacto	0°
Tipo de rodamiento	Rodamiento rígido de bolas

Se establecen como velocidades de giro del eje de transmisión las correspondientes a la primera velocidad y la segunda velocidad del prototipo Baja SAE 2004. A través de medición se determina que

Tabla 2: Especificaciones del rodamiento 6007-2Z

Diámetro efectivo	48,5 mm
Diámetro de las bolas	7,938 mm
Número de bolas	11
Ángulo de contacto	0°
Tipo de rodamiento	Rodamiento rígido de bolas

Tabla 3: Especificaciones del rodamiento NNF-5006 ADB-2LSV

Diámetro interno	-42,215 mm
Diámetro de los rodillos	5,499 mm
Número de rodillos por fila	24
Ángulo de contacto	0°
Tipo de rodamiento	Rodamiento de rodillos cilíndricos de doble fila

estas velocidades de giro son 115 rev/min y 210 rev/min respectivamente.

Debido a que el estudio se centra en un sistema de transmisión de un prototipo mecánico todo terreno, fue necesario establecer criterios de seguridad para poder adquirir la información necesaria de forma segura. Considerando ésto, se procedió a suspender en el aire las ruedas traseras que generan la tracción mediante el uso de pedestales, y de esta forma permitirles girar libremente sin que el prototipo se trasladara de ubicación, dejando a disposición el sistema de transmisión para poder tomar la data.

Se aseguró que el instrumento necesario para la toma de data estuviera configurado a las necesidades de la investigación, de tal forma que manejara las variables requeridas, como velocidad, ciclos por minuto, cantidad de muestras por medición, entre otros. Se estableció trabajar con 10000 ciclos por minuto para cada muestra tomada en cada una de las direcciones (horizontal, vertical, axial) para las cuales se realizó cada medición, tomándose 400 puntos en el intervalo entre 0 y 10000 ciclos por minuto, que es la cantidad de puntos que ofrece el escáner. Se realizaron mediciones para cada una de las velocidades de giro establecidas previamente (115 rev/min y 210 rev/min).

Realizadas las mediciones con el escáner de vibraciones mecánicas Skf Microlog analyzer AX series -CMXA 80- bajo las distintas condiciones de prueba definidas, la data arrojada por dicho escáner se vació y organizó de manera tabulada, para la posterior representación gráfica del espectro de vibración vista en amplitud velocidad. La Figura 6 muestra el espectro correspondiente a la medición axial de vibraciones en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min. Este proceso se repitió para las dos velocidades de giro establecidas previamente y para cada uno de los rodamientos objeto de estudio.

Por otra parte, las frecuencias de falla para los rodamientos presentes en el sistema de transmisión se determinaron a través de las ecuaciones (1), (2), (3) y (4) . Los valores correspondientes a las frecuencias de falla se muestran en la Tabla 4 y la Tabla 5.

Tabla 4: Frecuencias de falla para los rodamientos presentes en el sistema de transmisión. Velocidad de giro: 115 rev/min

Código	BPFI (cpm)	BPFO (cpm)	BSF (cpm)	FTF (cpm)
6004-2RS	623,5	411,49	537,86	45,72
6007-2Z	736,02	528,97	683,81	48,08
NNF-5006	1559,76	1200,23	867,85	50,01

Tabla 5: Frecuencias de falla para los rodamientos presentes en el sistema de transmisión. Velocidad de giro: 210 rev/min

Código	BPFI (cpm)	BPFO (cpm)	BSF (cpm)	FTF (cpm)
6004-2RS	1138,64	751,35	981,76	83,48
6007-2Z	1344,03	965,96	1248,69	87,81
NNF-5006	2848,35	2191,64	1584,29	91,31

A continuación se realiza la representación de los armónicos de las frecuencias de falla (1X, 2X, etc.

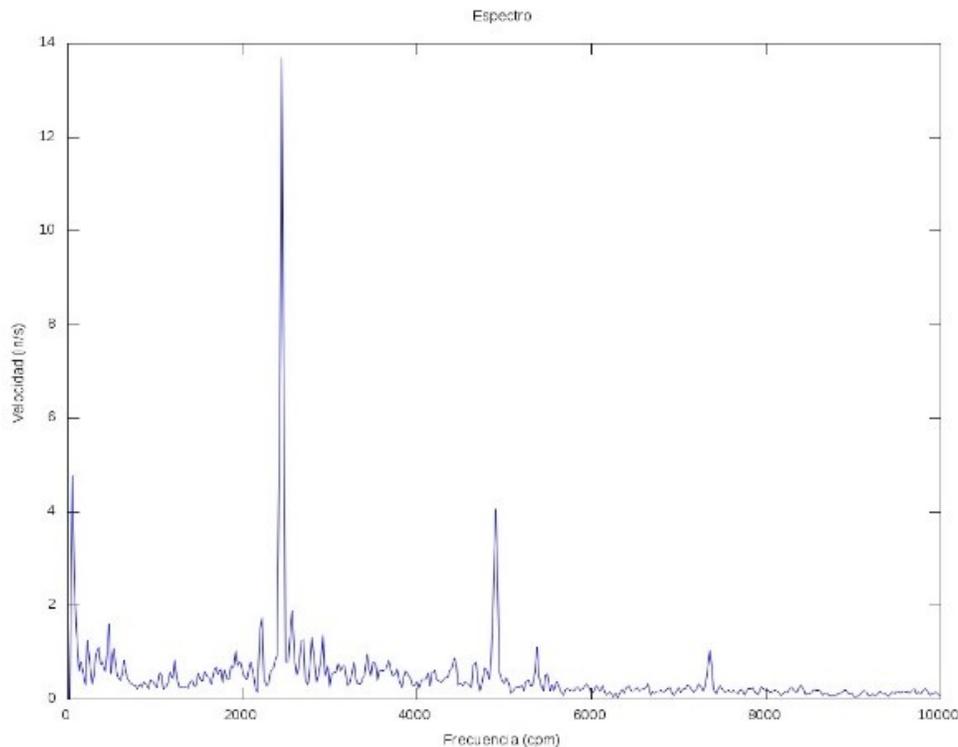


Figura 6: Espectro correspondiente a la medición axial de vibraciones en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min

siendo X la frecuencia de falla calculada para cada rodamiento y cada tipo de deterioro – BPF1, BPFO, BSF, FTF – indicada en la Tabla 4 o Tabla 5 según corresponda) para una comparación completa entre las curvas de los espectros y los valores de frecuencia de falla, indispensable para conocer los defectos en los rodamientos. Los valores de frecuencia armónica serán expresados según la amplitud total de la frecuencia evaluada. Para el estudio actual se evaluaron hasta 10000 ciclos por minuto para cada medición. Las Figuras 7, 8, 9 y 10 muestran la representación del Espectro en conjunto con los armónicos de las frecuencias de falla correspondiente a la a la medición axial de vibraciones en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min.

En relación a la frecuencia de falla en la pista interna del rodamiento en la Figura 7 se observan coincidencias entre las BPF1 a 1X (1560 ciclos por minuto), 2X (3120 ciclos por minuto) y 3X (4680 ciclos por minuto) y varias frecuencias de pico con amplitudes 0,5876 in/s, 0,7606 in/s

y 0,7858 in/s, respectivamente. La existencia de varias coincidencias de frecuencia de picos en el espectro con bajos armónicos de frecuencias de falla consecutivos, podría indicar la consecuencia de un rodamiento con defectos incipientes que no fueron atacados inmediatamente y que se agravaron con el tiempo. Entonces, se infiere que existe una falla en la pista interna del rodamiento, y esta a su vez podría estar causando vibraciones que pueden afectar el funcionamiento del prototipo, por lo que es necesario evaluar la severidad de dichas vibraciones.

Para esto se calcula el valor eficaz utilizando la ecuación (5), donde se tiene para este caso que  $v_{rms} = 0,4154$  in/s. Comparando este valor con los niveles de severidades de la norma ISO 10816 (Figura 2), se aprecia que el valor eficaz excede el rango aceptable de vibraciones, por lo que se infiere que el o los defectos presentes en la pista interna del rodamiento puede ser perjudicial para el sistema de transmisión del prototipo.

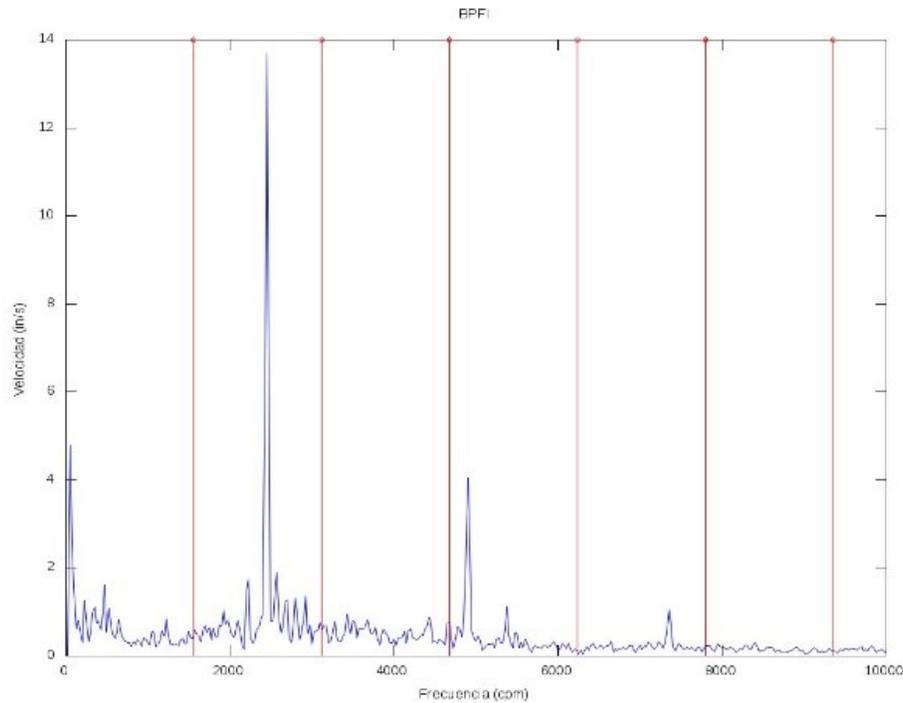


Figura 7: Armónicos de las frecuencias de falla de pista interna sobre el espectro de vibraciones axial en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min

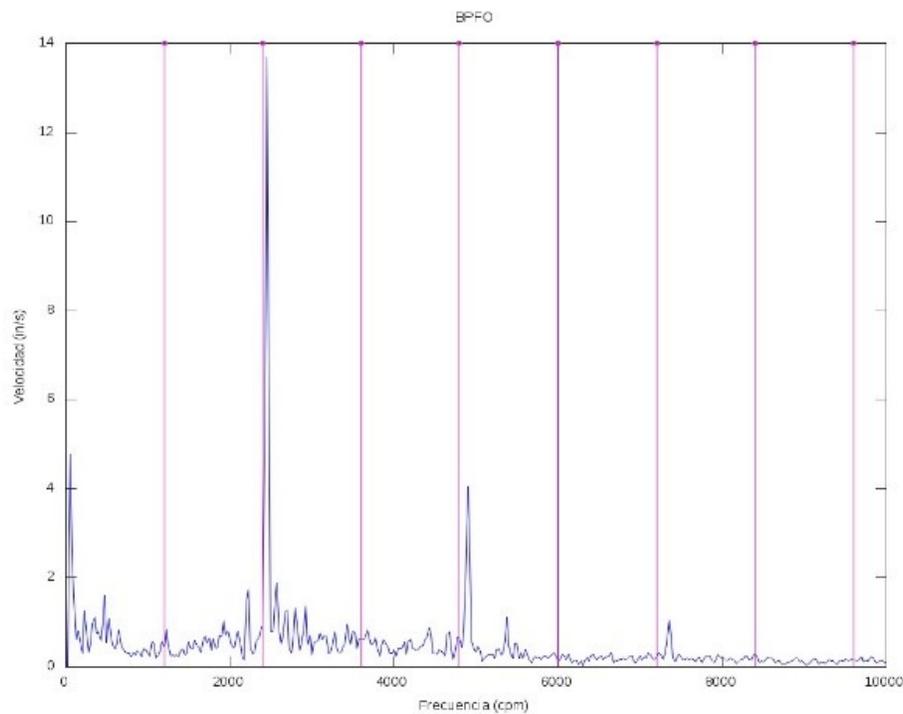


Figura 8: Armónicos de las frecuencias de falla de pista externa sobre el espectro de vibraciones axial en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min

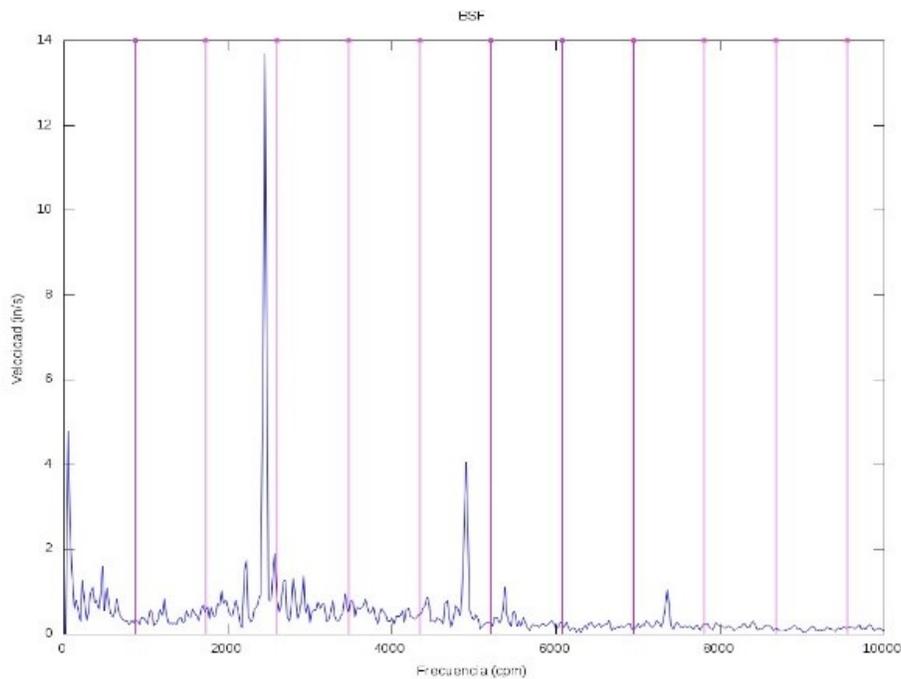


Figura 9: Armónicos de las frecuencias de falla de un rodillo sobre el espectro de vibraciones axial en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min

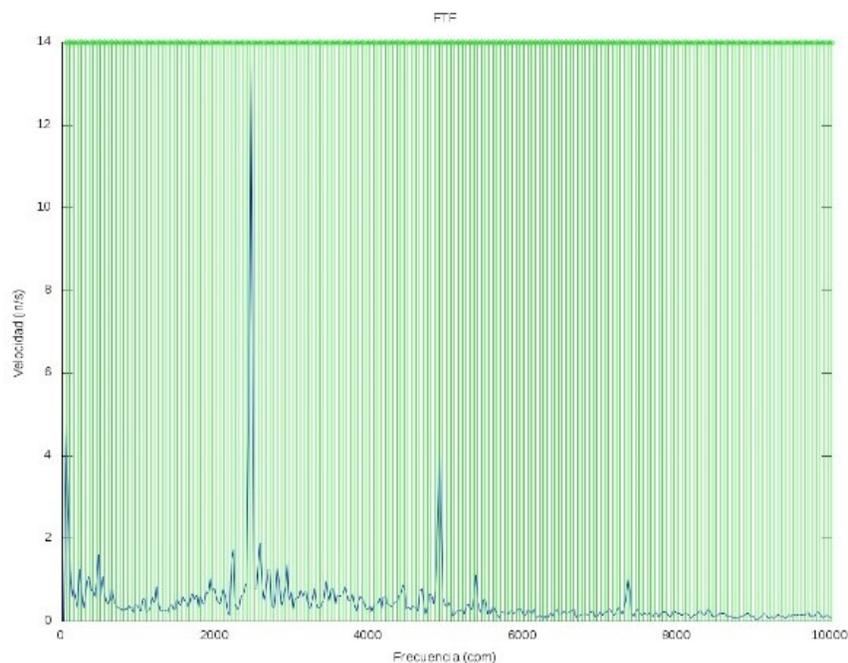


Figura 10: Armónicos de las frecuencias de falla de la jaula sobre el espectro de vibraciones axial en el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min.

Adicionalmente, acorde con lo indicado en la Carta Ilustrada de Diagnóstico de Vibración (un extracto de esta se muestra Figura 4), en virtud que las coincidencias entre las BPFi y las frecuencias de pico se da a 1X (1560 ciclos por minuto), 2X (3120 ciclos por minuto) y 3X (4680 ciclos por minuto), se infiere que la posible causa de falla sea que el rodamiento se encuentre inclinado sobre el eje de transmisión. Esta carta indica, a su vez, que se requiere remover el cojinete e instalarlo correctamente.

En la Figura 8 se observa como un BPFO en 1X coincide con una frecuencia pico de 0,8376 in/s, por lo que se puede deducir que existe algún defecto en la pista externa, cuya severidad de vibración según la norma ISO 10816, con un  $v_{rms} = 0,5922$  in/s, se podría considerar como muy grave.

En relación a la posibilidad de falla en los rodillos, en la Figura 9 se observa la ocurrencia de un pico a la frecuencia de 1750 ciclos por minuto con amplitud de espectro de 0,6482 in/s en el armónico 2X, por lo que se deduce que existe una falla en al menos un elemento rodante. Aplicando la ecuación (5) se obtiene  $v_{rms} = 0,45838$  in/s, que, según la norma de severidad ISO-10816, indica que el problema es crítico.

Por último se compara, a través de la Figura 10, el espectro con la frecuencia de falla de la jaula desde el mismo pico a 1750 ciclos por minuto donde se apreció una falla por elemento rodante. También se observó un pico para el armónico 35X, no obstante también se visualiza la existencia de una banda en ese mismo punto por lo que se determina un posible desperfecto en la jaula del rodamiento.

El análisis realizado al caso particular del espectro de vibraciones axial en rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha a 115 rev/min, se realizó de la misma forma a este rodamiento en dirección horizontal y vertical, y en estas tres direcciones a 210 rev/min. De la misma manera, se realizó el mismo análisis al resto de los rodamientos del sistema de transmisión del prototipo Baja SAE (6007-2Z, 6004-2RS, NNF-5006 de la rueda izquierda), a las dos velocidades de giro previamente establecidas (115 rev/min y 210 rev/min). Los resultados obtenidos en cada análisis en relación a las fallas y severidades de las

fallas de los rodamientos estudiados se resumen en las tablas 6 y 7.

Tabla 6: Fallas y severidades de los rodamientos estudiados detectadas por vibraciones para una velocidad de giro de 115 rev/min

Rodamiento	Dirección	BPFI	BPFO	BSF	FTF
6007-2Z	Axial	✓	✓	✓	-
	Horizontal	✓	✓	-	-
	Vertical	✓	✓	-	-
6004-2RS	Axial	✓	✓	✓	-
	Horizontal	✓	✓	✓	-
	Vertical	✓	✓	✓	-
NNF-5006 (rueda der.)	Axial	✓	✓	✓	✓
	Horizontal	-	✓	✓	-
	Vertical	✓	✓	-	-
NNF-5006 (rueda izq.)	Axial	-	✓	✓	-
	Horizontal	✓	✓	✓	-
	Vertical	-	-	✓	✓
Severidad		Leve		Aceptable	
		No aceptable		Crítico	

Tabla 7: Fallas y severidades de los rodamientos estudiados detectadas por vibraciones para una velocidad de giro de 210 rev/min

Rodamiento	Dirección	BPFI	BPFO	BSF	FTF
6007-2Z	Axial	-	-	-	-
	Horizontal	-	-	-	-
	Vertical	-	-	✓	-
6004-2RS	Axial	-	-	-	-
	Horizontal	-	-	✓	-
	Vertical	-	-	✓	-
NNF-5006 (rueda der.)	Axial	-	-	-	-
	Horizontal	-	-	-	-
	Vertical	✓	-	✓	-
NNF-5006 (rueda izq.)	Axial	-	-	-	-
	Horizontal	✓	✓	✓	-
	Vertical	-	-	-	-
Severidad		Leve		Aceptable	
		No aceptable		Crítico	

En el mismo orden de ideas, acorde a lo establecido la Carta Ilustrada de Diagnóstico de Vibración creada por el grupo analítico de Charlotte, las posibles causas de los defectos presentados por los rodamientos se indican a continuación:

En el rodamiento 6007-2Z, a partir del espectro de medición vertical comparado con los armónicos de la frecuencia de deterioro de los elementos

rodantes (BSF) a 210 rev/min, se determina como posible causa de defecto la desalineación paralela del eje de transmisión con respecto al acople derecho a la caja.

En el rodamiento 6004-2RS, la forma de los espectros de las mediciones hechas para este rodamiento, no se puede determinar la posible causa de los defectos del rodamiento a partir de lo indicado en la Carta Ilustrada de Diagnóstico de Vibración.

En el rodamiento NNF-5006 de la rueda derecha, a partir del espectro de medición axial comparado con los armónicos de la frecuencia de deterioro de la pista exterior de un rodamiento (BPFO) a 115 rev/min, se determina como posible causa de defecto que el rodamiento se encuentra inclinado sobre el eje de transmisión.

En el rodamiento NNF-5006 de la rueda izquierda, a partir del espectro de medición horizontal comparado con los armónicos de la frecuencia de deterioro de la pista interior de un rodamiento (BPFI) y comparado con los armónicos de la frecuencia de deterioro de la pista exterior de un rodamiento (BPFO), ambos a 210 rev/min, se determina como posible causa de defecto la desalineación paralela del eje de transmisión con respecto a la rueda izquierda.

A partir de los resultados obtenidos se puede observar que:

- Todos los rodamientos presentaron al menos dos defectos de severidad crítica a 115 rev/min, mientras que a 210 rev/min hubo poca evidencia de fallas.
- La falla más recurrente fue la presencia de defectos en la pista externa, y la que menos se manifestó fue el defecto en la jaula de los rodamientos.
- A pesar de ser un mismo rodamiento el que se estudia y la medición de vibraciones en la misma dirección, en el caso donde se estudió la medición axial de vibraciones del rodamiento NNF-5006 de la rueda trasera derecha a 115 y 210 rev/min, se observó la diferencia de velocidades de rotación a las que trabaja el rodamiento influye en las vibraciones causadas por los defectos del rodamiento.
- El eje de transmisión posiblemente presenta desalineación paralela con respecto al acople derecho de la caja, según el espectro de vibraciones en la medición vertical del rodamiento 6007-2Z a 210 rev/min, a lo que se pueden atribuir los defectos en pista interna, externa y en una bola del rodamiento.
- El espectro de medición horizontal del rodamiento de la rueda izquierda a 210 rev/min dejó en evidencia que sus defectos en la pista interna, pista externa y al menos uno de sus rodillos, posiblemente sean consecuencia de una desalineación paralela con respecto a la chumacera de la rueda izquierda.
- Según el espectro de la medición axial a 115 rev/min en el rodamiento NNF-5006, es probable que los defectos detectados por el análisis de vibraciones sean consecuencia de un mal montaje o alguna deformación en el rodamiento por un impacto sufrido por el prototipo Baja SAE, pues el comportamiento del espectro sugiere que el rodamiento tiene una inclinación sobre el eje de transmisión.
- Por la forma en la que se presentaron los espectros de vibración, no se puede determinar la posible causa de los defectos del rodamiento 6004-2RS aplicando un análisis de vibraciones al mismo.
- Los dos rodamientos NNF-5006, cuyas especificaciones eran exactamente iguales y cumplían el mismo rol en el sistema de transmisión del prototipo, presentaron las mismas fallas, pese a que fueron detectadas en mediciones de direcciones distintas.
- A pesar de haber realizado el análisis de vibraciones a dos velocidades de rotación distintas, en el rodamiento NNF-5006 de la rueda izquierda los defectos de la pista interna, la pista externa y de uno de los rodillos hicieron presencia a ambas velocidades y en la misma dirección de la medición (horizontal), aun cuando se observen notables diferencias entre los espectros de vibración que estas puedan tener.

## 5. Conclusiones

El estudio realizado deja en evidencia que la posibilidad de falla en rodamientos a través estudio no invasivo de vibraciones es sensible a la velocidad de giro del eje de transmisión donde se ubiquen tales rodamientos, en virtud que a ciertas velocidades de giro pudiesen observarse posibilidades de falla que no se observan a otras velocidades de giro.

La detección de posibilidad de falla en rodamientos a través estudio no invasivo de vibraciones depende de la dirección (axial, horizontal, vertical) en la cual se realice la medición, en virtud que de acuerdo a las mediciones realizadas en el presente estudio en una dirección de medición en particular se detecta una posibilidad de falla que no se detecta en otras direcciones de medición.

Pueden darse casos donde a través del uso de la Carta Ilustrada de Diagnóstico de Vibración en conjunto con un espectro de vibración dado no se logre determinar la posible causa de falla de un rodamiento, por lo que se requeriría usar algún método alternativo para la determinación de la posible causa de falla.

## 6. Referencias

- [1] W. Olarte, M. Botero, y B. A. Cañon, “Análisis de vibraciones: una herramienta clave en el mantenimiento predictivo,” *Scientia et Technica*, vol. 16, no. 45, pp. 219–222, 2010.
- [2] E. Estupiñán, C. San Martín, y R. Solaligue, “Diseño e implementación de un analizador virtual de vibraciones mecánicas,” *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Tarapacá*, vol. 14, no. 1, pp. 7–15, 2006.
- [3] W. Paguay y C. E. Satán, “Construcción de un simulador para el diagnóstico de modos de fallas en cojinetes planos mediante el análisis de vibraciones para la Facultad de Mecánica de La Epoch,” Trabajo de titulación previa a la obtención del título de Ingeniero de Mantenimiento, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería de Mantenimiento, Riobamba, Ecuador, 2017.
- [4] J. Peralta, “Desarrollo de un procedimiento para el diagnóstico de crucetas a través del análisis de vibraciones en trenes de potencia posterior y su contribución al mantenimiento predictivo,” Trabajo de

titulación presentado para optar al grado académico de Ingeniero Automotriz, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Riobamba, Ecuador, 2019.

- [5] M. Guevara y L. Landa, “Análisis de vibraciones en el motor de combustión interna J20-A a través de simulación de modos de fallas para contribuir el mantenimiento predictivo,” Trabajo de titulación previa a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Automotriz, Riobamba, Ecuador, 2019.
- [6] M. E. Moreno-Sánchez, J. A. Villarraga-Ossa, y R. Moreno-Sánchez, “Diagnóstico de fallas tempranas de rodamientos en mecanismos susceptibles al desbalanceo y a la desalineación,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 18, no. 2, pp. 187–197, 2019.
- [7] Z. Y. Medrano Hurtado y C. Pérez Tello, “Validación de señales vibro-acústicas para el diagnóstico de fallas en rodamientos en un generador síncrono,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 27, no. 2, pp. 51–81, 2017.
- [8] C. San Martín, E. Estupiñán, and D. San Martín, “A methodology for the detection and diagnostic of localized faults in gears and rolling bearings systems,” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 18, no. 1, pp. 44–52, 2010.
- [9] J. E. Estévez-Rodríguez y J. M. Bernal-de Lázaro, “Análisis de los rodamientos usados en electro-ventiladores del sistema de refrigeración de motores Hyundai,” *Ingeniería Mecánica*, vol. 22, no. 2, pp. 85–91, 2019.
- [10] A. Albornoz y E. López, “Estudio de vibraciones en los rodamientos del sistema de transmisión de un Prototipo Baja SAE.” Trabajo especial de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico, Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Bárbula, Venezuela, 2016.
- [11] B. Graney and K. Starry, “Rolling Element Bearing Analysis,” *Materials Evaluation*, vol. 70, no. 1, pp. 78–85, 2011.
- [12] M. Salazar, “Determinación de espectros de aceleración para el torno Prazi SD-400 variando las condiciones de operación,” Proyecto de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico, Universidad EAFIT, Departamento de Ingeniería Mecánica, Área de Mantenimiento, Medellín, Colombia, 2007.
- [13] ISO, *ISO-10816: Vibración Mecánica*, International Organization for Standardization, 1998.
- [14] R. Moscoso, “Programa de control del mantenimiento proactivo y correctivo en equipos mecánicos del transporte de hidrocarburos en el Ecuador,” Tesis para optar el grado académico de Doctor en Ingeniería Industrial, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Industrial, Unidad de Posgrado, Lima, Perú, 2017.

- [15] A. Álvarez, “Técnicas de diagnóstico de daños incipientes en rodamientos,” Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero en Ejecución en Mecánica, Universidad de Magallanes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica, Punta Arenas, Chile, 2005.
- [16] G. Santana y J. Matos, “Metodología para el Diseño de la Transmisión de un Vehículo Prototipo Baja SAE,” Trabajo especial de grado, Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Bárbula, Venezuela, 2011.
- [17] S. M. Ruiz, L. V. Henríquez, y C. V. Caballis, “Metodología para diagnosticar fallas localizadas en equipos de una línea de producción de carbón activado,” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 24, pp. 93–108, 2018.