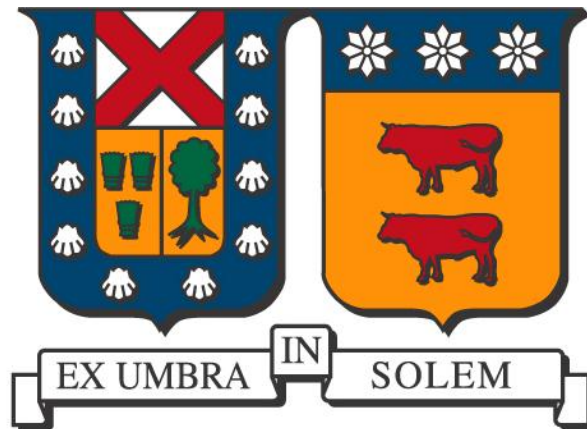


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE



**“ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE FALLAS EN
RODAMIENTOS POR MEDIO DE MEDICIÓN DE
ESPECTROS VIBRACIONALES”**

DIEGO IGNACIO DE ARCAS ORELLANA

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROFESOR GUÍA: DR. ING. DANILO ESTAY BARRIENTOS
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. JORGE ARDILA REY

AGOSTO - 2020

RESUMEN.

Los rodamientos corresponden a uno de los componentes fundamentales empleados en una gran variedad de máquinas y equipos rotativos como turbinas, motores, bombas, compresores entre otros, los cuales son comúnmente utilizados en distintos procesos industriales. El mantenimiento y monitoreo de este componente es una actividad indispensable en cualquier proceso industrial por lo que la investigación de nuevas técnicas y métodos utilizados para la detección de fallas en los rodamientos se encuentran en constante desarrollo. Este trabajo plantea evaluar la implementación de un nuevo método de clustering (Mapas PRH-PRL) en el análisis y caracterización de las fallas presentes en los rodamientos a través del tratamiento de espectros vibracionales. Para lograr esto se realiza un estudio en laboratorio de las fallas más comunes en rodamientos mediante la medición de vibraciones y aplicando los métodos convencionales de diagnóstico de fallas, para luego implementar el método de mapas PRH-PRL y evaluar el comportamiento de este en cuanto a la capacidad de detección de los distintos tipos de estados y fallas. De esta manera este trabajo pretende contrastar un análisis y diagnóstico de fallas convencional frente a la aplicación del método PRH-PRL en la detección de fallas. Como un primer acercamiento en la aplicación de este método al diagnóstico de fallas, los resultados obtenidos fueron favorables y efectivos en cuanto a la capacidad de detección de fallas que posee el método PRH-PRL, lo que da paso a nuevas líneas investigativas relacionadas con la aplicación de este método en el análisis de fallas en rodamientos.

ABSTRACT.

Bearings are considered as one of the fundamental components used in a vast variety of rotating machinery and equipment like turbines, engines, pumps and compressors among others, which are commonly utilized in different industrial processes. Bearing maintenance and monitoring are essential activities in any industrial process, reason why research and studies in new techniques and methods are in constant development. This work proposes to evaluate the implementation of a new clustering method (PRH-PRL Maps) applied to bearing fault analysis and characterization through vibration spectrum processing. To achieve this, a fault study is executed in a laboratory testing shaft through vibration data acquisition and using common vibration analysis methods, leading to the posterior implementation of the PRH-PRL maps method in order to evaluate the map's behavior related to its bearing fault detection and diagnosis capabilities. This work attempts to compare a common fault analysis amongst the application of the new PRH-PRL method in bearing fault detection. As a first approach of this method in a fault diagnosis analysis, the obtained results were considered as favorable and effective related to the method's fault detection capabilities, which leads to potential new investigatory paths involving the PRH-PRL maps in bearing fault analysis.

GLOSARIO.

FFT: Fast Fourier Transform.

PRH: Power Ratio for High frequencies.

PRL: Power Ratio for Low frequencies.

BPI: Ball Pass Frequency for the Inner race.

BPFO: Ball Pass Frequency for the Outer race.

BSF: Ball Spin Frequency.

FTF: Full Train Frequency.

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
ABSTRACT.....	ii
GLOSARIO.....	iii
1. Objetivos	1
2. Introducción	2
3. Marco Teórico.....	3
3.1. Análisis de Vibraciones.....	3
3.2. Dominio del tiempo.....	3
3.3. Espectro de frecuencias.....	4
3.4. Análisis de espectro.....	6
3.5. Fallas en Rodamientos	6
3.6. Frecuencias asociadas a las fallas.....	7
3.7. Diagnóstico de vibraciones.	9
3.8. Espectro de Envolvente o demodulación para el estudio de fallas en rodamientos.	12
3.9. Métodos de agrupación de datos. ‘Clustering’	16
3.10. Mapa PRH-PRL	18
3.11. Utilización de “Clustering” en el monitoreo y diagnóstico de fallas en rodamientos. ..	20
4. Metodología	24
4.1. Selección de Componentes.....	24
4.1.1. Rodamiento	24
4.1.2. Descansos.....	26
4.1.3. Banco de pruebas	28
4.1.4. Motor.....	28
4.1.5. Instrumentos de medición	30
4.2. Fallas	32
4.2.1. Métodos de mecanizado	32
4.2.2. Tipos de fallas.	33
4.3. Condiciones de funcionamiento.....	39
4.3.1. Revoluciones de giro.....	39
4.3.2. Descanso bajo análisis.....	40
4.3.3. Procedimiento de Montaje.....	41

4.3.4.	Frecuencias de fallas asociadas.....	44
4.4.	Estandarización de mediciones.....	45
4.4.1.	Número de Mediciones.....	45
4.4.2.	Parámetros de medición.....	45
4.5.	Traducción de espectros a mapas PRH-PRL.....	47
4.5.1.	Traspaso de datos.....	48
4.5.2.	Archivo de código numérico.....	51
4.5.3.	Rangos utilizados.....	52
4.5.3.1.	Traspuestos.....	53
4.5.3.2.	Complementarios.....	54
4.5.3.3.	Separados.....	55
4.5.4.	Diagrama de flujo de mediciones.....	56
5.	Análisis.....	58
5.1.	Resultados experimentales.....	58
5.1.1.	Primeras mediciones.....	59
5.1.2.	Segundas mediciones.....	65
5.2.	Análisis de espectros.....	80
5.2.1.	Frecuencias presentes.....	80
5.2.2.	Asociaciones de fallas presentes con frecuencias características.....	89
5.2.3.	Comparación entre mediciones I y II.....	94
5.2.4.	Niveles globales (RMS).....	96
5.3.	Análisis de mapas obtenidos.....	98
5.3.1.	Mapas obtenidos.....	99
5.3.2.	Asociación de fallas a sectores del mapa.....	102
5.3.3.	Comparación con rodamientos en buen estado.....	105
5.3.4.	Diferenciación de fallas por medio de método “K-means”.....	110
5.3.5.	Reproducibilidad de mapas en mediciones I y II.....	115
	CONCLUSIONES.....	120
	BIBLIOGRAFÍA.....	128
	ANEXOS.....	129
	Anexo 1: Código numérico para generación de mapa PRH-PRL.....	129
	Anexo 2: Valores de coeficientes porcentuales Figura 5.13.....	131
	Anexo 3: Ficha Técnica Motor Siemens.....	133

Anexo 4: Ficha Técnica Acelerómetro SKF.	134
Anexo 5: Ficha Técnica Equipo adquisidor SKF.	136
Anexo 6: Ficha Técnica Tacómetro Laser.	137

1. Objetivos

Dentro de la industria un porcentaje considerable de las máquinas presentes en los procesos son máquinas rotativas las cuales presentan rodamientos como un componente fundamental. Es por esta razón que el monitoreo y detección de fallas por medio de las señales de vibraciones en este tipo de componente es de gran importancia a la hora de aplicar mantenimiento a estos equipos.

Actualmente los métodos de monitoreo y detección de fallas en rodamientos están en constante evolución, principalmente en la forma en la que se interpretan las señales de vibraciones. Un nuevo método para la interpretación de espectros de frecuencia son la representación de Mapas PRH-PRL (*'Power Ratio for High Frecuencias' - 'Power Ratio for Low Frecuecies'*) los cuales se basan en representar el contenido de energía espectral relativa presente en los espectros de frecuencia por medio de intervalos de alta y baja frecuencia de señales.

Objetivo General

El objetivo general de este trabajo de título consiste en evaluar la aplicación del Mapa PRH-PRL en la medición y detección de las fallas más comunes en rodamientos utilizados en sistemas mecánicos giratorios.

Objetivos Específicos

- Estudiar tipo de fallas presentes en rodamientos y como se diagnostican mediante la utilización de métodos tradicionales de interpretación.
- Medir vibraciones en rodamientos con fallas estándar presentes en sus componentes principales.
- Aplicar el método de Mapas PRH-PRL a los espectros de vibraciones de los rodamientos en estudio.
- Relacionar análisis del método de los Mapas PRH-PRL con las fallas presentes en los rodamientos bajo estudio.

2. Introducción

Todos los sectores industriales cuentan con una infinidad de procesos los cuales, de una manera u otra dependen o se realizan por medio de diferentes equipos y máquinas de todo tipo. Las máquinas rotativas son unas de las máquinas más comunes que se pueden encontrar dentro de la industria.

Dentro de este tipo de máquinas el componente fundamental que permite su funcionamiento son los rodamientos, los cuales son capaces de generar el movimiento rotativo característico de estos equipos además de ser indispensables para un funcionamiento seguro y confiable. Debido al rol fundamental que cumplen estos componentes es que el mantenimiento y monitoreo del estado de estos es de vital importancia para la efectividad de los procesos.

Los distintos métodos de monitoreo de rodamientos ayudan a diagnosticar, identificar y prevenir fallas que podrían incurrir en tiempos de detención prolongados en equipos críticos, así como en la seguridad de los propios trabajadores y operarios. Uno de los métodos de monitoreo de rodamientos más utilizado es el análisis de vibraciones generadas en los equipos. Las vibraciones corresponden a pequeños movimientos que se generan producto de las fuerzas internas entre los distintos componentes de las máquinas rotativas o equipos en general. El análisis de dichas vibraciones es capaz de entregar información útil sobre el estado de los rodamientos para luego efectuar las acciones preventivas adecuadas en caso de encontrarse algún desperfecto en ellos.

El siguiente trabajo está centrado en estudiar la aplicación de Mapas PRH-PRL en el diagnóstico, análisis y detección de fallas en rodamientos mediante la caracterización de espectros de vibraciones para así complementar los métodos ya existentes de detección de fallas usando vibraciones. Con esto se busca proporcionar a operarios y mantenedores una manera rápida y precisa de detectar las múltiples fallas asociadas a los componentes de los rodamientos.

3. Marco Teórico

3.1. Análisis de Vibraciones

Las vibraciones presentes en las máquinas rotativas son producto de las fuerzas internas generadas por la interacción de los distintos componentes de estas. Estas vibraciones se ven reflejadas en movimientos presentes en la máquina al estar en funcionamiento.

Como es sabido en el estudio de las vibraciones, estas son asociadas a movimientos ondulatorios en el dominio del tiempo, con ciertas características que los definen como lo son la amplitud de onda, frecuencia, periodo y fase [1]. Al aplicar el estudio de las ondas vibratorias al estudio de máquinas rotativas es posible caracterizar las vibraciones propias de la máquina por medio de combinaciones de funciones sinusoidales en el dominio del tiempo, las cuales representarán la posición física de un punto específico de la máquina a lo largo del eje del tiempo.

3.2. Dominio del tiempo.

La manera más simple de representar los movimientos ondulatorios es a través de movimientos armónicos, sin embargo, la caracterización y expresión gráfica de los movimientos vibratorias reales que se ven en los equipos rara vez son movimientos armónicos simples sino que se pueden representar por medio de funciones periódicas.

Gracias al desarrollo de las series de Fourier toda función periódica puede ser representada como una suma infinita de términos de senos y cosenos dentro de una serie de Fourier en el dominio del tiempo.

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots \quad (1)$$

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2)$$

De esto se extrae que toda función periódica se puede representar como una suma de funciones armónicas. Si bien esta suma es infinita, es posible obtener una buena aproximación utilizando un número acotado de funciones armónicas. Mientras más términos se utilicen en la suma de Fourier, más precisa será la aproximación de la función periódica deseada.

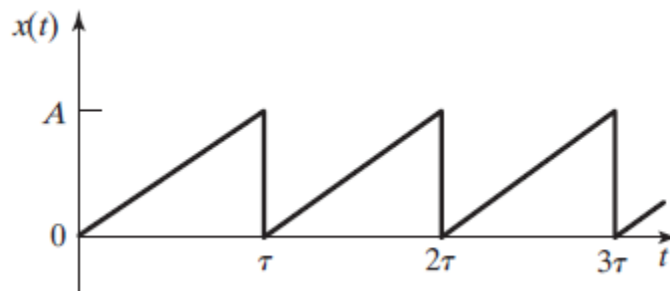


Figura 3.1: Representación de una señal periódica en el tiempo.

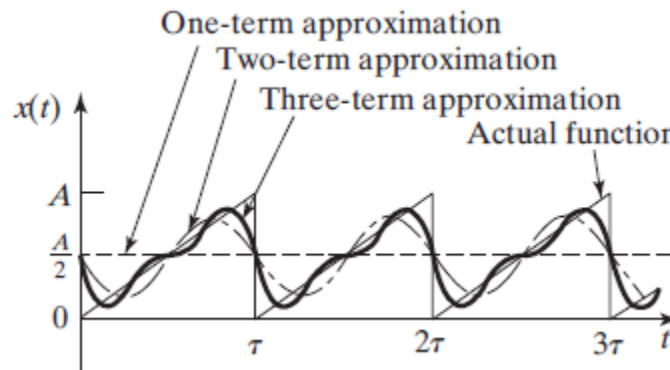


Figura 3.2: Aproximación de series de Fourier (Singiresu, 1995, p. 65).

Este concepto es la base para la representación de los movimientos vibratoriales que se estudiarán a continuación.

3.3. Espectro de frecuencias

Así como es posible representar el movimiento a través del tiempo, la expansión de las series de Fourier también permite representar las funciones periódicas en el dominio de las frecuencias

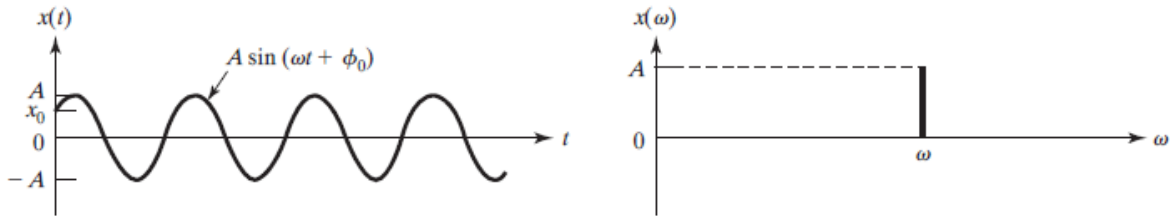


Figura 3.3: Transformación a espectro de frecuencias de una señal sinusoidal.

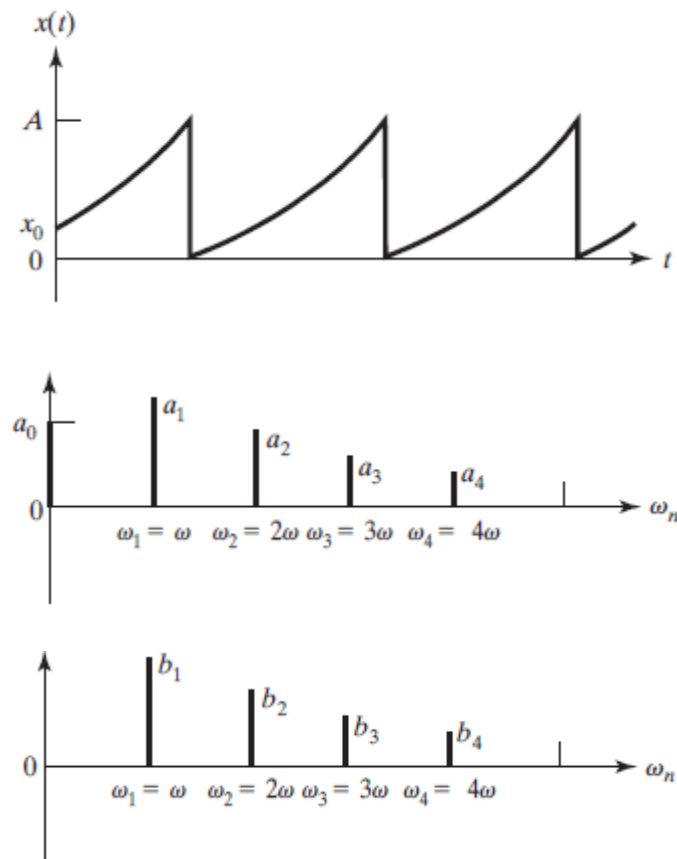


Figura 3.4: Representación de armónicos de los términos de Fourier

En el análisis de vibraciones el espectro entrega más información que el dominio del tiempo ya que como muestra la **Figura 3.4** es posible observar cómo aparecen los distintos términos de las series de Fourier por la cual se aproxima la señal en el dominio del tiempo. Esto es de gran utilidad a la hora de analizar las vibraciones ya que entrega información útil acerca del estado del equipo o aparato que se está analizando.

3.4. Análisis de espectro

El análisis de las señales de vibración propias de una máquina entrega distintas características del movimiento presente, así como información relevante sobre el estado de funcionamiento de estas. Generalmente la respuesta de movimiento en el dominio del tiempo no entrega el mismo nivel de información que en el dominio de frecuencias. El espectro de vibraciones muestra las frecuencias en las que más se concentra la energía del sistema, por lo que es posible relacionar las distintas frecuencias que lo componen a partes y componentes específicos de la máquina.

Los equipos utilizados para estudiar espectros analizan señales en el dominio de la frecuencia separando la energía de la señal en distintas bandas de frecuencia a través de una serie de filtros. El análisis en tiempo real de las señales es comúnmente utilizado para monitorear el estado de las máquinas ya que entrega el espectro de vibración en el mismo instante en la que la vibración del equipo se está llevando a cabo. El procedimiento de análisis en tiempo real es realizado por el método de la transformada de Fourier en la mayoría de los analizadores de señal digitales.

3.5. Fallas en Rodamientos

Los rodamientos son el componente esencial para el funcionamiento óptimo de toda máquina o equipo rotativo, genera una reducción de la fricción entre el eje y el resto de los componentes que se encuentran acoplados a él por lo que permite que el eje gire libremente sobre él facilitando la transmisión de movimiento.

Estos elementos poseen un nivel normal de vibración en su estado óptimo de funcionamiento por lo que un aumento en este nivel de vibración es un indicio de la presencia de un daño o desperfecto en alguno de los componentes de los rodamientos.

Las partes que componen los rodamientos que están sujetas a fallas debido a condiciones de uso y a las cargas a las que estos se encuentran sometidos son

principalmente el anillo exterior, el anillo interior, las bolitas o elementos rodantes y la jaula de contención de elementos rodantes.

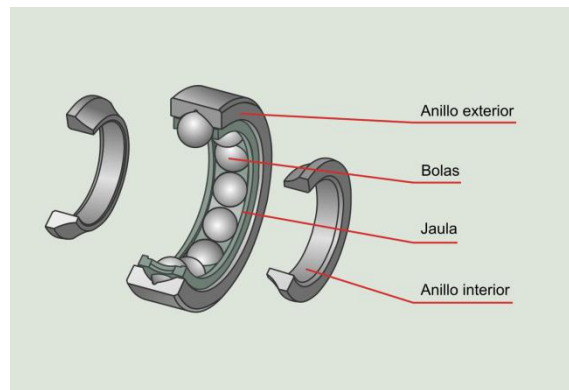


Figura 3.5: Diagrama de componentes de rodamiento.

La falla en el anillo exterior se caracteriza por la presencia de agrietamientos o desperfectos en la pista exterior que al girar entran en contacto con los elementos rodantes excitando la frecuencia asociada a esta pista.

Las fallas correspondientes al anillo interno se definen como un agrietamiento del material en la pista interna del rodamiento que generan vibraciones fuera del rango normal al entrar en contacto con los elementos rodantes.

Los elementos rodantes presentan fallas cuando estos se encuentran agrietados o bien han sufrido alguna deformación o desperfectos en su geometría lo que se traduce en vibraciones no deseadas a la hora de entrar en funcionamiento.

Finalmente, una falla en la jaula de los rodamientos se presenta como todo desperfecto que afecte la sujeción de los elementos rodantes generando movimientos no deseados para estos o propagando daños a otros componentes como la pista interna o externa.

3.6. Frecuencias asociadas a las fallas

Cada una de las fallas mencionadas anteriormente genera un efecto no deseado en el espectro de vibraciones de un rodamiento que se encuentra en funcionamiento. Estos efectos se aprecian en ciertas frecuencias del espectro que se ven excitadas, cada una de estas frecuencias se asocian directamente a cada una de las fallas. Estas frecuencias

características permiten determinar la presencia de fallas en el caso de que estas presenten un peak en el espectro.

La frecuencia de falla en la pista externa se denomina BPFO (*Ball Pass Frequency of the Outer race*), es la frecuencia a la que un elemento rodante pasa por algún desperfecto en la pista externa.

Para las fallas en la pista interna la frecuencia asociada se denomina BPFI (*Ball Pass Frequency of the Inner race*) y de forma similar que para la pista externa es la frecuencia con la que un elemento rodante entra en contacto con alguna falla presente en la pista interna.

La frecuencia asociada a los elementos rodantes se denomina BSF (*Ball Spin Frequency*) y es la frecuencia circular a la que gira cada elemento rodante sobre su propio eje. La falla en uno o más elementos rodantes impacta tanto la pista interna como la pista externa por cada revolución del elemento rodante por lo que la frecuencia que se observa excitada en el espectro corresponde a dos veces la frecuencia de giro de los elementos rodantes.

Finalmente, la FTF (*Fundamental Train Frequency*) es la frecuencia de giro de la jaula del rodamiento.

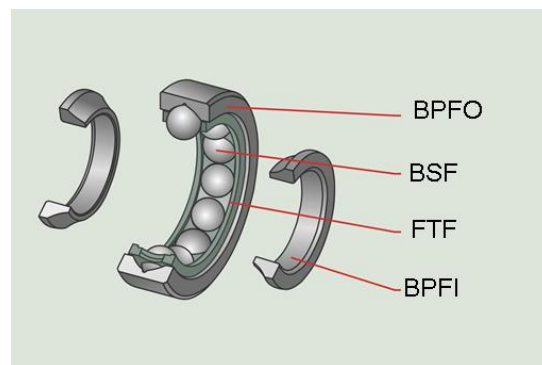


Figura 3.6: Representación de las frecuencias de falla asociadas.

Cada una de las frecuencias anteriores se puede calcular en base a las siguientes expresiones.

$$\text{BPFO} = \frac{N_b}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \theta \right) * \text{RPM} \quad (3)$$

$$\text{BPFI} = \frac{N_b}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \theta \right) * \text{RPM} \quad (4)$$

$$\text{BSF} = \frac{P_d}{2B_d} \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \right)^2 (\cos \theta)^2 \right) * \text{RPM} \quad (5)$$

$$\text{FTF} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \theta \right) * \text{RPM} \quad (6)$$

Donde

RPM : Revoluciones de giro del eje.

N_b : Número de elementos rodantes.

B_d : Diámetro de bola [mm].

P_d : Diámetro efectivo del rodamiento [mm].

θ : Ángulo de contacto de la bola [grados].

3.7. Diagnóstico de vibraciones.

Como se mencionó anteriormente, cuando comienzan a aparecer fallas o defectos en los componentes de un rodamiento se empiezan a ver señales de esto reflejadas en los espectros de vibraciones, de esta manera es posible realizar un diagnóstico de las fallas que se presentan, así como establecer que tan avanzado es el estado de falla en estos. A medida que las fallas se acrecientan los espectros muestran distintas etapas de evolución según el estado de daño que presenta el rodamiento.

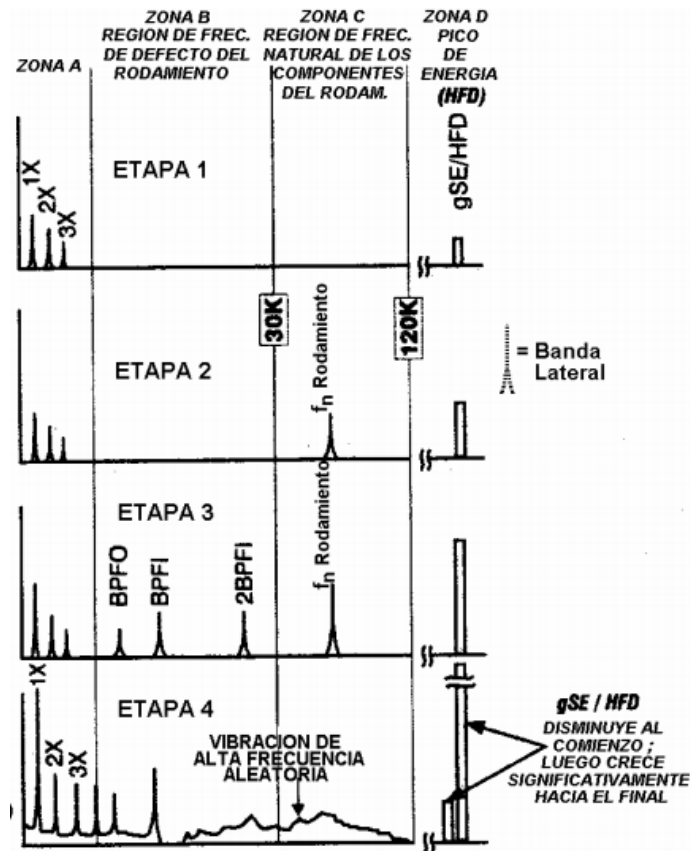


Figura 3.7: Ilustración de espectros según etapas de falla. [2]

La evolución de las fallas en los rodamientos se ve representada en la figura anterior en la que se aprecian 4 etapas de falla que muestran diferentes indicios en cada una de las zonas del espectro de vibraciones.

- **Etapa 1:** Los primeros indicios de deterioro en los rodamientos se ven en frecuencias ultrasónicas que van desde los 250.000 a 350.000 [hz], a medida que el desgaste aumenta las frecuencias disminuyen a 20.000 – 60.000 [hz]. Estas frecuencias se ven por medio de la evaluación de pico de energía gSE/HFD (zona D). Los espectros de alta frecuencias pueden determinar si el rodamiento falla o no en la etapa 1.
- **Etapa 2:** A medida que los defectos aumentan se comienzan a excitar las frecuencias naturales f_n de los rodamientos y soportes en el rango de 500 – 2.000[hz]. Estas frecuencias naturales también son atribuibles a resonancias de la

estructura de soporte. Se ven bandas laterales alrededor de peak de la frecuencia natural. Se ve que el peak de energía aumenta en la zona D.

- **Etapa 3:** En esta etapa se comienzan a apreciar las frecuencias de falla asociadas a los rodamientos y sus respectivos armónicos (BPFI, BPFO, BSF, FTF). Con el aumento del desgaste aparecen más armónicos, así como un aumento en las bandas laterales tanto en las frecuencias asociadas como en las frecuencias naturales f_n . Los peak de energía en la zona D siguen aumentando. En esta etapa el desgaste en el rodamiento ya es visible. Se recomienda cambiar el rodamiento si se encuentra en esta etapa.
- **Etapa 4:** En la etapa final la amplitud de la frecuencia 1X se ve acrecentada notablemente, así como el notable aumento de los armónicos de dicha frecuencia. De esta manera las frecuencias asociadas y las frecuencias naturales comienzan a desaparecer y en su lugar se da paso a la aparición de ‘ruido de piso’ aleatorio de banda ancha y alta frecuencia. Cuando se avecina la falla total se ve que la energía de peak crece a amplitudes excesivas.

Este tipo de diagnóstico proporciona información rápida y precisa sobre el estado de desgaste en el que se encuentran los rodamientos, lo que será de gran ayuda en el procedimiento experimental de identificación de fallas. [2]

consideran el eje, descansos, vibraciones externas del motor, correas y otros elementos que entran en resonancias excitando las frecuencias naturales. Es por esta razón que los picos de la BPFO son de menor magnitud.

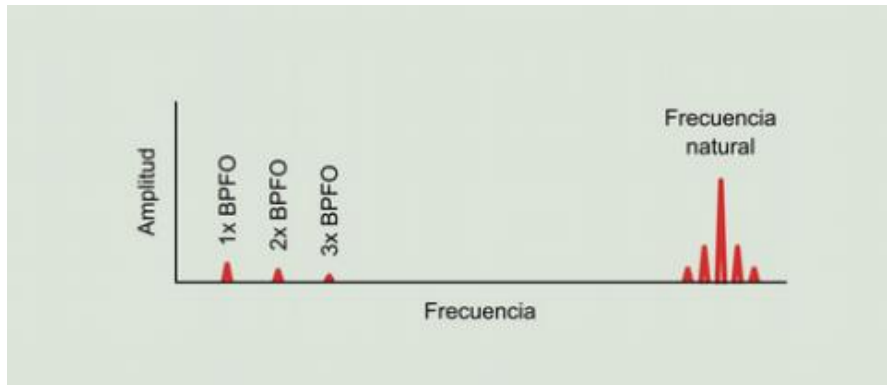


Figura 3.9: FFT de la forma de onda de la Figura 8 3.8.

Con esto presente se puede utilizar la herramienta de la demodulación de la señal de onda como se muestra con la línea negra punteada en la **Figura 3.8**, en donde la señal de onda se comporta como la señal portadora y la BPFO como señal modulada. De esta manera, por medio de la demodulación es posible obtener una señal que contenga información únicamente asociada a la falla presente en el rodamiento conocida como envolvente de la señal original, la que se aprecia en la **Figura 3.10**.

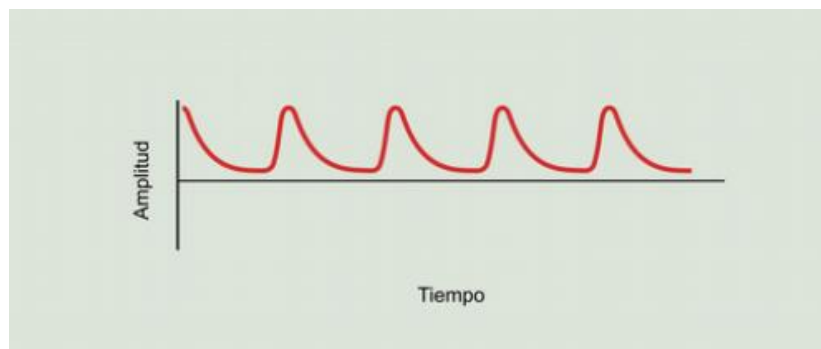


Figura 3.10: Forma de onda modulada a partir de la señal original.

De esta manera al aplicar la transformada de Fourier a la señal de envolvente se puede obtener el espectro de la envolvente de la **Figura 3.11** en la cual se aprecian claramente los picos armónicos correspondientes a las frecuencias BPFO del rodamiento en cuestión. Este tipo de espectro ayuda a filtrar los efectos de la resonancia del conjunto mostrando únicamente la información relacionada con la falla presente en el rodamiento en sí dejando de lado otros factores que aparecen en el espectro de la señal original de la **Figura 3.9**.

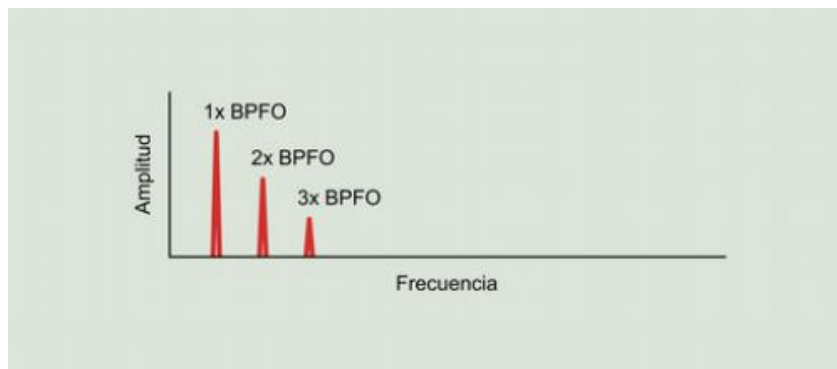


Figura 3.11: Espectro de la señal envolvente

Al utilizar esta herramienta en el diagnóstico de fallas en rodamientos es de gran utilidad ya que entrega algunas ventajas a diferencia de analizar los espectros de la señal original.

Al realizar medidas en conjuntos como bombas o sopladores es común que existan vibraciones aleatorias como se mencionó anteriormente, las cuales incrementan el ruido en los espectros y por lo tanto pueden llegar a ocultar los armónicos asociados a las fallas del rodamiento en los espectros estándar provocando que la falla pase inadvertida a simple vista. El uso de la demodulación ayuda a solucionar este inconveniente.

El uso de espectros de envolvente es de utilidad para diagnosticar problemas en rodamientos en máquinas que funcionan a bajas velocidades de giro, ya que el espectro de vibración en velocidad genera un filtro pasa alto lo que hace que ciertas frecuencias bajas asociadas a fallas sean imperceptibles, al usar la demodulación esta información sigue siendo válida ya que la frecuencia resonante del rodamiento sigue siendo de alta frecuencia.

La demodulación permite una detección temprana de fallas en rodamientos ya que las frecuencias asociadas a las fallas son el primer indicador de presencia de un desperfecto en algún componente del rodamiento. El espectro de la envolvente permite detectar estas frecuencias antes de que estas sean lo suficientemente fuertes como para que sean visibles en los espectros estándares de velocidad o aceleración.

Finalmente, esta técnica ofrece una mayor capacidad de diagnóstico en cuanto a las fallas en rodamientos, si aparece un pico armónico en el espectro de envolvente lo más probable es que se deba a un deterioro en el rodamiento por lo que es de esperar que también aparezca en los espectros comunes de vibraciones. Por otro lado, si aparecen frecuencias resaltadas en los espectros comunes que no se asocian a las frecuencias de giro de la máquina y a la vez estas mismas frecuencias se ven presentes en los espectros de envolvente es posible asegurar que se está ante la presencia de una falla en el rodamiento. Por último, si se observan ciertas frecuencias asociadas a fallas en el espectro estándar en dos puntos distintos, se puede revisar el espectro de envolvente y analizar si estos puntos también se ven presentes, si solo uno de ellos aparece en el espectro de demodulación se puede asociar esta frecuencia a una falla en el rodamiento mientras que la frecuencia que no se ve presente debe estar asociada a otro factor.

Si bien esta herramienta es de gran utilidad a la hora de complementar los análisis de vibraciones asociados a rodamientos, es necesario tener ciertas consideraciones. Si bien la detección de fallas resulta fácil con la demodulación, la magnitud de la amplitud de las frecuencias de falla no se puede correlacionar con el grado de deterioro que presenta el rodamiento, esto se debe a que a medida que aumenta el deterioro en el rodamiento la señal demodulada se vuelve cada vez más aleatoria, por lo que en ciertos casos la magnitud de la amplitud disminuye a medida que el deterioro avanza, por esta razón es que esta herramienta se debe utilizar en forma complementaria en los análisis de rodamientos en terreno.

3.9. Métodos de agrupación de datos. ‘Clustering’

El concepto de ‘Clustering’ es una técnica utilizada en distintas áreas del tratamiento de información, la cual consiste en la agrupación de datos según un cierto tipo de regla o algoritmo a partir del cual estos son agrupados de acuerdo a la similitud o diferencias presentes en ellos. Dentro de cada grupo se encuentran datos que son similares entre sí mientras que cada grupo se separa del resto según las diferencias en los datos. El objetivo de esta técnica es encontrar la partición de datos, es decir, que datos son similares y diferentes entre sí. El ‘Clustering’ no se refiere a una clasificación netamente tal, sino que más bien corresponde a un aprendizaje no-supervisado en donde se conocen los datos pero no los grupos en los que estos se encuentran organizados, esto se refiere a que a partir de un cierto tipo de regla o condición de agrupamiento predispuesta con anterioridad, también llamado algoritmo, el “Clustering” separa los datos conocidos generando de esta manera los diferentes grupos de organización.

Generalmente el análisis de “Clusters” se puede expresar como una representación gráfica en la cual los datos se pueden mostrar en un plano dos parámetros de clasificación para el caso de “Clustering” en dos dimensiones y de tres parámetros para casos en los cuales la representación gráfica es tridimensional.

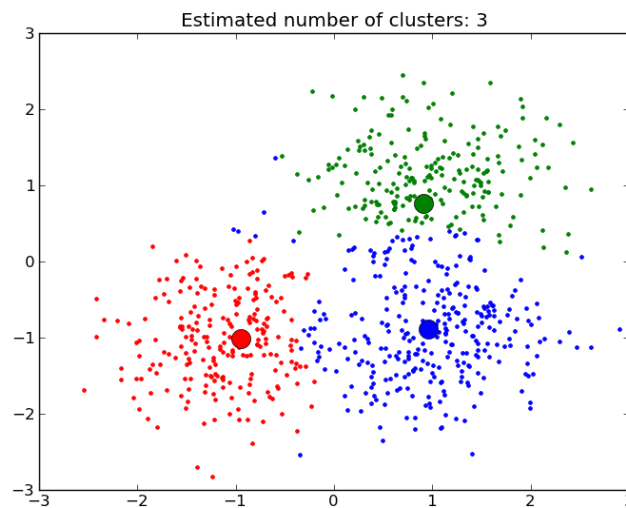


Figura 3.12: Ejemplo de “Clustering” en 2 dimensiones.

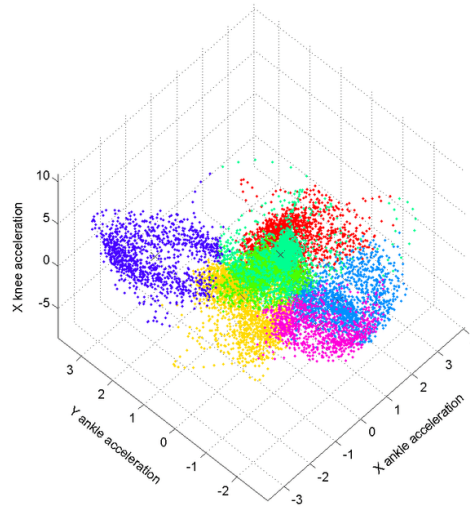


Figura 3.13: Ejemplo de “Clustering” en 3 dimensiones.

El análisis de “Clusters” se puede extender hasta métodos que incluyan más de tres dimensiones, sin embargo, para esos casos la agrupación visual de datos no es posible por lo que se emplean algunos procedimientos automáticos de clasificación los cuales se basan en algoritmos y programas computacionales para obtener los distintos grupos de datos existentes.

Actualmente existe una gran variedad de algoritmos y métodos de análisis de “Clusters”, debido principalmente a que los procedimientos de clasificación automática son técnicas relativamente nuevas en el campo de la investigación de “Clusters” la cual es utilizada en una amplia gama de áreas científicas (estadística, biología, marketing, etc.) por lo que es considerada como una disciplina independiente que está en constante desarrollo. Por otro lado, la alta diversidad de métodos de análisis de agrupamiento de datos se le atribuye a que no existe una definición general de qué es un “Cluster” por lo que la forma de este se extiende a distintos tipos como esféricos, lineales, espirales, etc. De esta misma manera, el tipo de datos utilizado para el agrupamiento también pueden ser de distintas variedades, como variables continuas, discretas, etc.

3.10. Mapa PRH-PRL

Los mapas PRH-PRL (*Power Ratio Map*) representan una nueva técnica de “Clustering” para separar e identificar ruidos y las diferentes fuentes de descargas parciales asociadas a sistemas eléctricos.

Esta técnica de agrupación de potencia espectral está basada en la representación por medio de un mapa bidimensional el cuál muestra el contenido de potencia espectral en dos intervalos de frecuencia, PRL (*Power Ratio for Low frequencies*) y PRH (*Power Ratio for High frequencies*), los cuales son obtenidos a partir del espectro de frecuencias proveniente de la transformada rápida de Fourier (FFT) de cada pulso medido. Este espectro es dividido en dos intervalos de frecuencias los cuales se presentan en un plano, la potencia espectral acumulada en cada intervalo de frecuencia es normalizada para el total de la potencia espectral. De esta manera los valores finales quedan definidos como un indicador porcentual, uno para el intervalo de alta frecuencia y otro para el intervalo de baja frecuencia. [4]

$$PRL = \frac{\sum_{f_{1L}}^{f_{2L}} |s(f)|^2}{\sum_0^{f_T} |s(f)|^2} \cdot 100 \quad (7)$$

$$PRH = \frac{\sum_{f_{1H}}^{f_{2H}} |s(f)|^2}{\sum_0^{f_T} |s(f)|^2} \cdot 100 \quad (8)$$

- $s(f)$: magnitud de la FFT de la señal de pulso inicial, magnitud del espectro de frecuencias.
- $[f_{1L}, f_{2L}]$: Intervalo de baja frecuencia.
- $[f_{1H}, f_{2H}]$: Intervalo de alta frecuencia.
- f_T : frecuencia máxima del espectro analizado.

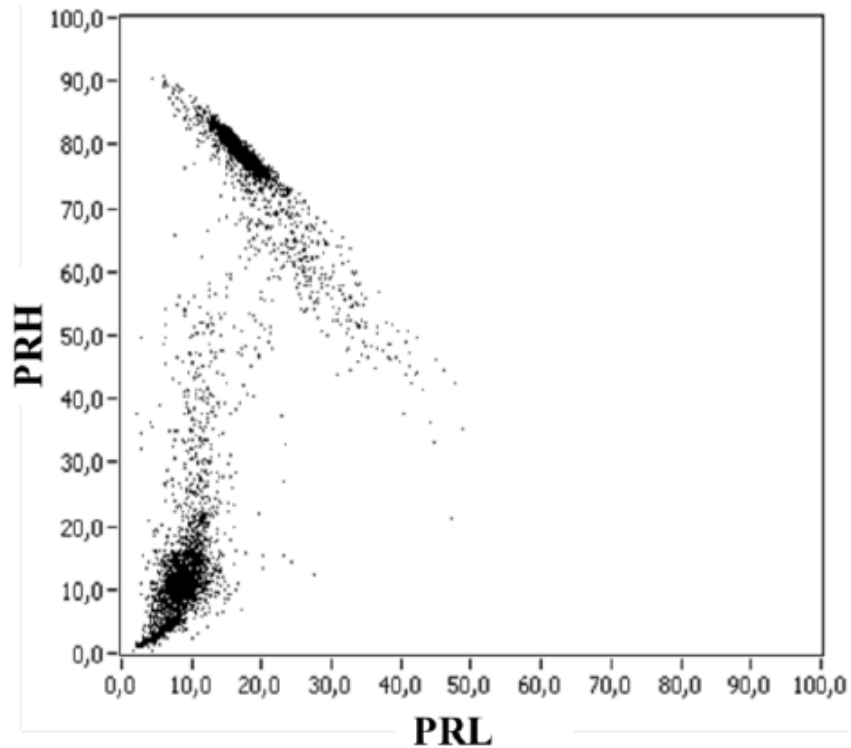


Figura 3.14: Representación gráfica de un mapa PRH-PRL.

Como se menciona en [5] existen dos consideraciones a tener en cuenta a la hora de aplicar este tipo de técnica. En primer lugar se debe tener que $0 \leq f_{1L} < f_{2L}$, $f_{1H} < f_{2H} \leq f_T$ y $f_{1L} < f_{2H}$, luego, en segundo lugar los intervalos se pueden modificar dependiendo de la distribución de potencia espectral que se obtenga, es decir, puede ser complementarios en el caso que f_{1H} sea mayor o igual que f_{2L} o se pueden trasponer si f_{1H} es estrictamente menor que f_{2L} .

Los valores de los puntos en el mapa PRH-PRL se distribuyen en diferentes regiones de este. Por lo que al aplicar esta técnica al análisis de fallas en rodamientos se buscará asociar cada región del mapa a un determinado defecto o falla con el fin de poder identificar la razón de la falla presente. Cabe mencionar que las distribuciones de las agrupaciones de puntos en el mapa no son definitivas ya que las distintas configuraciones experimentales, así como el rango de los intervalos utilizados pueden llevar a cambios en las ubicaciones de los puntos.

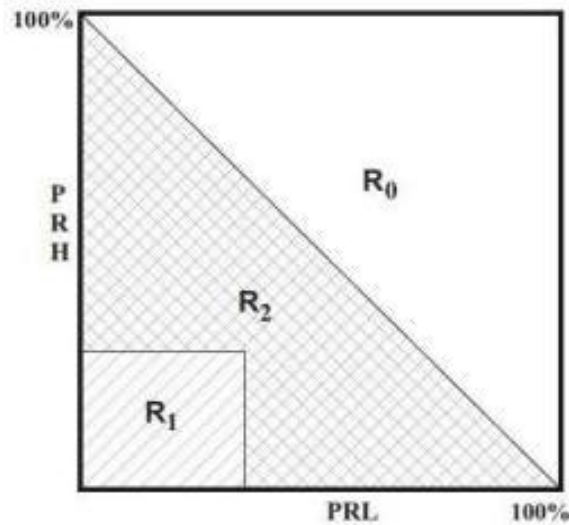


Figura 3.15: Representación de regiones del mapa PRH-PRL según [5]

3.11. Utilización de “Clustering” en el monitoreo y diagnóstico de fallas en rodamientos.

Actualmente la utilización de “Clusters” se ha extendido a diversas áreas para ser empleados como herramienta de clasificación de datos tal como se mencionó anteriormente. Una de estas áreas está relacionada con mantenimiento de componentes y elementos pertenecientes a sistemas mecánicos móviles, de manera más específica en el monitoreo y la detección de fallas en rodamientos. Si bien es un área en la que el uso de estos mapas es relativamente nuevo, existen algunos trabajos que han incursionado en la aplicación del análisis de “Clusters” para estudiar el comportamiento de rodamientos bajo condiciones normales de funcionamiento.

A continuación, se presentarán diferentes trabajos ya existentes que buscan emplear diferentes algoritmos y métodos de separación de datos para realizar un análisis de “Clustering”.

- ***“Observer-biased bearing condition monitoring: From fault detection to multi-fault classification”, 2015, [6].***

Este trabajo se centra en la utilización de métodos de “fuzzy clustering” para el monitoreo de rodamientos basado en condición, además de detección de fallas y clasificación del comportamiento de los rodamientos.

El algoritmo principal utilizado en este trabajo es FCMFP (“Fuzzy C-means with variable focal point”) el cual corresponde a una variación del método K-means o FCM (“Fuzzy C-Means”). Esta variación permite modificar la granularidad de los clusters con el fin de diferenciar de mejor manera ciertos clusters que con el algoritmo FCM común pueden pasar desapercibidos. Se da principal énfasis al análisis en base a la perspectiva que se tiene de los datos en relación al punto focal de observación en los mapas.

- ***“A comparison of fuzzy clustering algorithms for bearing fault diagnosis”, 2018, [7].***

En esta investigación se realizó una comparación directa entre diferentes algoritmos y métodos de separación de datos en base a clusters. A partir de las mediciones de vibraciones se compararon los clusters obtenidos a partir de los diferentes algoritmos utilizados para luego realizar un análisis de los resultados y evaluar cada método.

La comparación se realizó entre los algoritmos más comunes utilizados para el agrupamiento de datos y nuevos métodos que incluyen ciertas modificaciones en los algoritmos ya conocidos. Los métodos utilizados corresponden a:

- *“Fuzzy C-Means Method”* (FCM).
- *“Fuzzy C-Means with variable Focal Point”* (FCMFP)
- *“Gustafson-Kessel Algorithm”*, variación del FCM empleando una norma de distancia adaptativa para encontrar clusters elipsoidales.
- *“Fuzzy neighborhood density-based spatial clustering of applications with noise”* (FN-DBSCAN), algoritmo independiente basado en la densidad de datos.

- ***“A novel intelligent method for bearing fault diagnosis based on affinity propagation (AP) clustering and adaptive feature selection”, 2016, [8]***

Trabajo basado en un algoritmo centrado en la *“affinity propagation clustering”* y otras técnicas adaptativas de selección con el fin de proporcionar herramientas y equipar de mejor manera a personal no experto en tareas operativas de diagnóstico.

Se emplean técnicas como la *“Ensemble empirical mode decomposition”* (EEDM) y *“Wavelet packet transform”* (WPM) para extraer la información asociada a las características de falla que se encuentra implícita en las diferentes señales de vibraciones.

En resumen, este trabajo logra limpiar la información redundante que se encuentra presente en las vibraciones medidas y de esta manera incrementar la precisión en cuanto a la formación de los clusters de fallas.

- ***“Bearing Fault Recognition Based on Feature Extraction and Clustering Analysis”, 2016, [9]***

En este trabajo se explora la utilización de clusters tridimensionales para distinguir patrones de fallas en rodamientos. El estudio se centra en comparar diferentes combinaciones de parámetros en base a los cuales se encuentran elaborados los clusters, de esta manera se comparan los mapas tridimensionales y se evalúan los resultados en base al método de separación K-means o FCM.

A partir de esto se evalúa cual es la combinación de parámetros que resulta ser la más precisa a la hora de separar las distintas fallas bajo análisis.

- ***“A Novel Clustering Method for Rolling Bearing Faults Identification”, 2013, [10]***

Este estudio se centra en lograr encontrar el número correcto de clusters presentes en una distribución de datos graficada en un mapa. Este método está basado en la

utilización de parámetros como la densidad local ρ y la distancia euclidiana δ como los parámetros con los cuales se grafican las mediciones de vibraciones de cada rodamiento.

A diferencia del método K-means o FCM este trabajo propone la ventaja de que no se necesita saber de antemano el número de centroides que se desea encontrar a la hora de agrupar las mediciones en clusters, sino que logra identificar de manera automática cuantos clusters se encuentran presentes en los mapas obtenidos.

4. Metodología

4.1. Selección de Componentes

En las secciones siguientes se realizará una descripción técnica de los principales componentes involucrados en el proceso de obtención de mediciones a utilizar para el análisis del método de detección de fallas de los mapas PRH-PRL.

4.1.1. Rodamiento

Los rodamientos seleccionados para este tipo de trabajo experimental deben poseer ciertas características que faciliten el procedimiento y manipulación de estos a lo largo de las mediciones. Es por ello que el tipo de rodamiento escogido fue un rodamiento modelo 1207 auto alineante de bolas a rotula, el cual presenta el conjunto de elementos rodantes y jaula al descubierto, de esta manera la intervención en los componentes para obtener las fallas a estudiar, se puede realizar de manera más efectiva y rápida ya que permite un fácil desarme del rodamiento, además de ser compatible con las restricciones presentes en el banco de pruebas del laboratorio de tecnología mecánica.

Este tipo de rodamientos de bola auto alineante poseen doble hilera de elementos rodantes las cuales se asientan en un canal doble en el anillo interno y un canal de esfera en el anillo externo. Esta característica permite que el rodamiento posea una alineación automática a la hora de entrar en movimiento, de esta manera permite una desalineación angular del eje con respecto a la cubierta, por lo que son de gran utilidad en aplicaciones en donde pueda presentarse desalineación debido a errores de instalación o desviación del eje. Estos rodamientos están diseñados principalmente para soportar cargas radiales, las cargas axiales puras no son permitidas en este tipo de rodamientos.



Figura 4.1: Rodamiento 1207

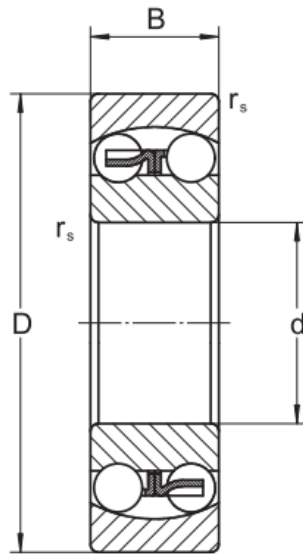


Figura 4.2: Representación gráfica de dimensiones de rodamiento 1207.

Tabla 4.1: Información nominal de fábrica de rodamiento 1207.

Dimensiones [mm]	
d	35
D	72
B	17
rs min	1.1
Rangos de carga [kN]	
Dinámica Cr	15.8
Estática Cor	5.1
Velocidades Límite [rpm]	
Grasa	8000
Aceite	9400
Peso [kg]	
Aprox.	0.317

La calidad de los rodamientos a utilizar depende netamente del origen, los materiales y el tipo de proceso de fabricación empleado para la manufactura de estos. Para la realización del estudio de fallas el rodamiento a intervenir será un rodamiento de marca KML de procedencia china, hecho de acero inoxidable, se utilizará este tipo de rodamiento debido a que es un rodamiento de fácil obtención y además resulta fácil intervenirlos para el mecanizado de fallas.

4.1.2. Descansos.

Los descansos seleccionados a utilizar en el montaje deben ser compatibles con los tipos de rodamientos 1207. El descanso seleccionado fue un descanso SNR modelo SNC-507-606 del tipo 'Pillow Block Housing'.

Este tipo de descansos consta de una sección inferior la que es fijada al lijar la superficie de trabajo y una sección superior que sella el conjunto. Este concepto simplifica

el montaje y el mantenimiento de las unidades interiores del descanso, ya sean los ejes, rodamientos y sellos. De esta manera los rodamientos son insertados en el eje para luego ser posicionados en la sección inferior del descanso.



Figura 4.3: Descanso SNC SNR-507-606.

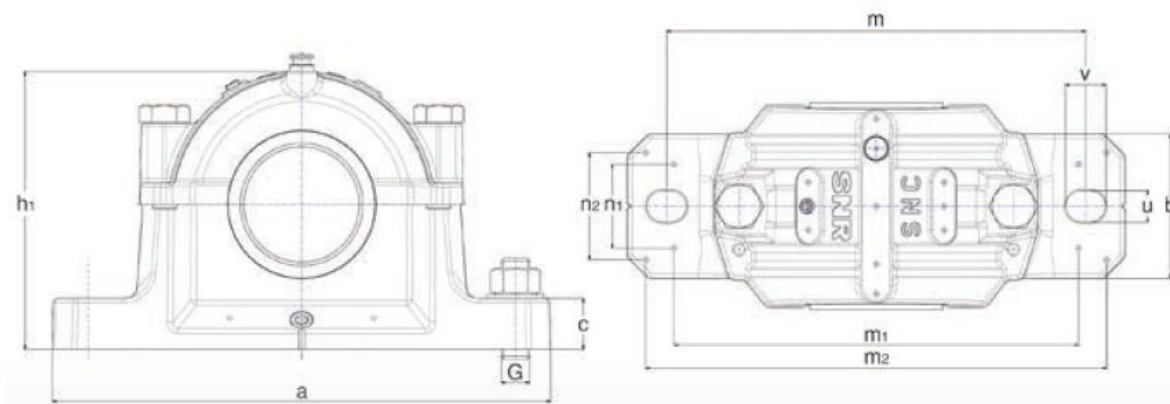


Figura 4.4: Plano de dimensiones.

TYP	D	a	b	c	g	h	l	m	G	u	v	h1	m1	n2	m2	n1	n3	Weight
Housing dimensions [mm]																		kg
SNC 506	62	185	52	22	32	50	77	150	M12	15	20	89	130	38	172	25	44	2,3

Figura 4.5: Tabla de dimensiones principales según [11].

4.1.3. Banco de pruebas

El banco de pruebas consiste en el conjunto de componentes encargados de simular las condiciones características de una maquina rotativa con el fin de realizar distintos tipos de pruebas y ensayos enfocados a la investigación y estudios académicos. El banco a utilizar en la toma de mediciones para este trabajo consiste en una estructura de soporte, un motor eléctrico que transmite el movimiento por medio de un juego de poleas de relación 1:1 y una correa de transmisión a un eje de 35[mm] de diámetro.



Figura 4.6: Conjunto correspondiente al banco de pruebas.

4.1.4. Motor

El encargado de entregar movimiento al banco de prueba es un motor eléctrico de 6 polos de la marca SIEMENS modelo 1LE0102-1AC42-2AA4, ficha técnica adjunta en el **Anexo 3**, el cual cuenta con una potencia de 1.5kW o 2HP. El motor se encuentra ubicado

en la plataforma baja del banco de pruebas y cuenta con un sistema de correa y poleas en la relación 1:1 para la transmisión de movimiento hacia el eje principal. El motor es energizado mediante una conexión de 220V a la red eléctrica del laboratorio de tecnología mecánica.



Figura 4.7: Motor eléctrico del banco de pruebas.

Por otro lado, el motor cuenta con un variador de frecuencia para regular la frecuencia de giro del motor y así obtener la velocidad de giro del eje deseada.



Figura 4.8: Variador de frecuencia.

4.1.5. Instrumentos de medición

Para la toma de datos se utilizarán equipos de uso común en la industria. Generalmente para la toma de datos en los análisis de vibraciones se utilizan sensores especializados en captar el movimiento vibratorio de los componentes, junto con equipos encargados de la adquisición de datos. El laboratorio cuenta con sensores y un equipo de procesamiento de datos marca SKF el cuál será utilizado para la toma de mediciones. Además, se cuenta con un tacómetro de la misma marca para la medición exacta de las revoluciones a las que gira el eje.



Figura 4.9: Acelerómetro analizador de vibraciones SKF modelo CMSS2200 con acople magnético.



Figura 4.10: Adquisidor de datos SKF Microlog Analyzer Serie GX.



Figura 4.11: Tacómetro modelo CMAC 5030.

En los *Anexos 4, 5, y 6* se encuentran disponibles las fichas técnicas de los instrumentos de las *Figuras 4.9, 4.10 y 4.11* respectivamente, con todas las características y especificaciones técnicas relevantes. Se puede encontrar más información de los equipos en la página www.skf.com.

4.2. Fallas

En esta sección se realizará una descripción de cada una de las fallas aplicadas a los componentes principales del rodamiento bajo estudio, además de una explicación del método de mecanizado utilizado para la realización de estas.

4.2.1. Métodos de mecanizado

Con el fin de obtener las fallas deseadas en los distintos componentes del rodamiento en estudio, es necesario utilizar un método de mecanizado con el cual la falla fabricada logre generar el efecto vibracional deseado en el rodamiento y por lo tanto que estos efectos sean percibidos al entrar en funcionamiento.

Se realizó una evaluación de tanto los métodos de mecanizado como las herramientas con las cuales realizar las fallas tomando en cuenta las capacidades de estos, las facilidades y complicaciones de cada uno de los métodos para intervenir los rodamientos y la disponibilidad de estos en el laboratorio. Para asegurar un mecanizado efectivo en el material de los rodamientos se ha evaluado utilizar herramientas adiamantadas con el fin de garantizar una mayor dureza a la de los materiales de los rodamientos. Para ser más específico se ha optado por la utilización de fresas adiamantadas generalmente utilizadas en la industria odontológica, las cuales se encuentran recubiertas con un abrasivo adiamantado. En cuanto a equipo de mecanizado se optó por utilizar un equipo rotativo multipropósito de la marca Dremel, comúnmente utilizado en la industria para tareas relacionadas con pulir, grabar, cortar, esmerilar, afilar, etc.



Figura 4.12: Fresa adiamantada marca Jota modelo 909 FG 055.



Figura 4.13: Equipo rotativo multipropósito Dremel 3000.

4.2.2. Tipos de fallas.

El comportamiento defectuoso de los rodamientos está asociado a diferentes fallas en sus componentes como se mencionó anteriormente, es por esta razón que las fallas que deben estar presentes en la pista interna, pista externa, elemento rodante y jaula muestren el comportamiento asociado según la información conocida de estas en [2].

A continuación, se mostrarán en detalle los tipos de fallas mecanizadas en los distintos componentes, considerando la ubicación de cada una de ellas, así como la geometría de estas. Cabe destacar que las fallas mecanizadas se realizaron de manera que se logre asegurar un comportamiento defectuoso en los rodamientos bajo estudio, con el fin de poder analizar de manera específica el comportamiento del método de mapas PRH-PRL sobre este tipo de defectos.

4.2.2.1. Elemento Rodante

Para la creación de la falla en el elemento rodante se procedió a desmontar una de las bolas del rodamiento para someterla a un mecanizado que logre deformar su curvatura, de esta manera se espera que la bola en cuestión pierda su forma esférica generando aristas en su superficie. Con este tipo de intervención se espera que la bola dañada al entrar en funcionamiento dentro del rodamiento genere impactos con los demás componentes a medida que esta se encuentre en movimiento y de esta manera observar algún tipo de excitación en la frecuencia BSF.



Figura 4.14: Elemento rodante mecanizado.

4.2.2.2. Pista Interna

El mecanizado de la falla en la pista interna consistió en separar el anillo interior del rodamiento mediante la extracción de todos los elementos rodantes de la jaula lo que permitió manipular el anillo interno de manera independiente a los otros componentes.

Se procedió a mecanizar una ranura de forma transversal a las pistas de ambas filas de elementos rodantes con el fin de asegurar que cada bolita del rodamiento tenga un contacto asegurado con la falla realizada. La ranura posee un ancho de 3 [mm] y una profundidad de 1[mm] aproximadamente.



Figura 4.15: Falla mecanizada en el anillo interno del rodamiento.



Figura 4.16: Segunda vista de falla en la pista interna.

4.2.2.3. Pista Externa

A diferencia de la pista interna, para la pista externa se realizará el estudio de dos tipos de fallas asociadas a este componente. Generalmente las fallas en la pista externa que se ven de manera más común en la industria se generan en la dirección longitudinal de la pista, es decir, en el sentido de las hileras de elementos rodantes, la principal causa de este tipo de fallas es el exceso de cargas a las que puede ser sometido el eje combinado con algún tipo de desbalanceo y una gran cantidad de horas de operación.

Por lo tanto, la pista externa se verá intervenida con una falla en la dirección longitudinal como se explicó anteriormente y de manera transversal de la misma forma que lo realizado con la pista interna.

De manera análoga al procedimiento realizado en la pista interna, se procedió a separar el anillo externo del resto de los componentes del rodamiento y se realizó un mecanizado transversal que atraviesa ambas hileras de bolitas como se muestra en la siguiente figura. Las dimensiones de la ranura mecanizada son similares a las de la ranura presente en la pista interna. En las **Figuras 4.17 y 4.18** se puede apreciar la falla transversal realizada.



Figura 4.17: Ranura transversal mecanizada en la pista exterior del rodamiento.



Figura 4.18: Acercamiento de falla transversal en la pista exterior.

Para el mecanizado de la falla longitudinal se realizó un procedimiento similar al utilizado para la ranura transversal, en la **Figura 4.19** se puede observar la falla longitudinal resultante. Con este tipo de defectos se busca que los elementos rodantes generen vibraciones en el conjunto al pasar sobre las ranuras mecanizadas y así excitar la frecuencia BPFO o alguno de sus respectivos armónicos.



Figura 4.19: Acercamiento de falla longitudinal en la pista exterior.

4.2.2.4. Jaula

La jaula de sujeción en este modelo de rodamiento es un componente difícil de intervenir ya que, si bien es un elemento de fácil manipulación, no se encuentra en contacto constante con los componentes que podrían generar efectos vibracionales considerables, por lo que los daños que pueden ser generados en la jaula de este modelo de rodamientos no siempre generarán vibraciones notables.

La falla en la jaula se centró en deformar una de las pestañas de sujeción de uno de los elementos rodantes, con el fin de tratar de que esta entre en contacto con alguna de los anillos del rodamiento y así producir algún tipo de vibración. La falla en la jaula de sujeción se puede ver presente en la *Figura 4.20*.



Figura 4.20: Falla en la jaula de sujeción.

4.3. Condiciones de funcionamiento.

El proceso de mediciones se realizará bajo ciertas condiciones de funcionamiento a las cuales será sometido el banco de pruebas durante el periodo en el que se encuentre en funcionamiento. En esta sección se efectuará una breve descripción de algunos aspectos importantes relacionados con la toma de mediciones y el análisis de las fallas bajo estudio.

4.3.1. Revoluciones de giro.

Un factor que será determinante durante todo el proceso de análisis de este trabajo es la velocidad de giro a la que será sometido el eje para los efectos de la toma de mediciones. En base a este parámetro es que se realizará todo el análisis futuro ya que los datos de diagnóstico presentados en las *Secciones 3.5, 3.6 y 3.7* dependen de la velocidad de giro a la que se encuentra sometido el rodamiento en estudio.

El laboratorio cuenta con un tacómetro laser capaz de medir las revoluciones exactas a las que gira el eje. Al fijar el tacómetro, posicionarlo de manera adecuada y con la ayuda de una cinta reflectante se procede a realizar las mediciones del valor de velocidad de giro del eje que será considerado en los cálculos futuros necesarios para el análisis. El valor obtenido para la velocidad de giro del eje es de **1022 [rpm]**.



Figura 4.21: Tacómetro posicionado para la medición de revoluciones de giro del eje.

4.3.2. Descanso bajo análisis.

El banco de pruebas consta de dos descansos para soportar el eje, debido a que comúnmente todo tipo de vibraciones son transmitidas a lo largo de los conjuntos mecánicos, es que se ha optado por analizar solo uno de los descansos del banco. Esto con el fin de aislar de la mejor manera posible el comportamiento del rodamiento con la falla presente, de esta manera un descanso se dejará con un rodamiento en buen estado, de mejor calidad (rodamiento de procedencia Austriaca) y lubricado para tener un comportamiento adecuado y no transmitir vibraciones externas, mientras que el descanso restante será el que se encontrará bajo análisis y en el cual se instalarán cada uno de los rodamientos dañados para ser sometidos a las mediciones de vibraciones.

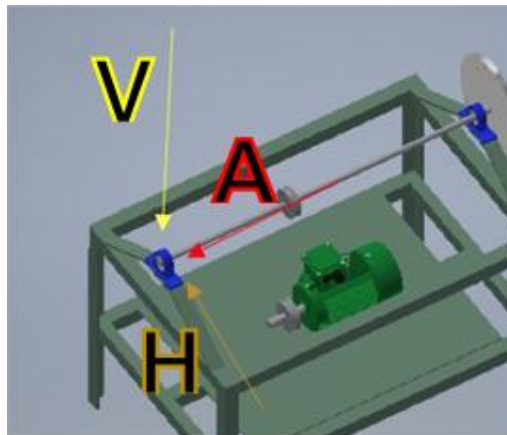


Figura 4.22: Esquema de direcciones de descanso izquierdo.



Figura 4.23: Descanso seleccionado para la toma de mediciones.

4.3.3. Procedimiento de Montaje.

El proceso de montaje y desmontaje de los rodamientos en el banco de pruebas es una etapa de gran importancia ya que es en esta instancia en la cual se realizan los principales ajustes a los componentes del banco para lograr obtener un funcionamiento óptimo en la toma de datos.

Esta sección está destinada a realizar una breve descripción del proceso de montaje de los rodamientos en estudio, dicho proceso se realiza cada vez que sea necesario cambiar los rodamientos defectuosos por lo que es necesario conocer adecuadamente cada componente del banco y las etapas que componen este proceso.

- En primer lugar, es necesario desplazar el motor eléctrico a través de los rieles guía para lograr destensar la correa de transmisión de movimiento.



Figura 4.24: Riel guía de motor eléctrico.

- Se debe liberar la correa de transmisión tanto de la polea del eje como de la polea del motor con el fin de dejar libre al eje.
- Se deben remover los pernos de sujeción de las tapas superiores de cada descanso.
- Las tapas de sujeción son retiradas para remover el eje del banco de pruebas y lograr una mejor manipulación a la hora de realizar el cambio de rodamientos.
- Se sueltan los seguros de los topes axiales de cada rodamiento.

- Se desmonta manualmente uno o ambos rodamientos del eje, dependiendo de cuales se deban cambiar.
- Los rodamientos nuevos son instalados manualmente en el eje y este es montado sobre los descansos fijando los anillos internos de sujeción y los tope axiales.

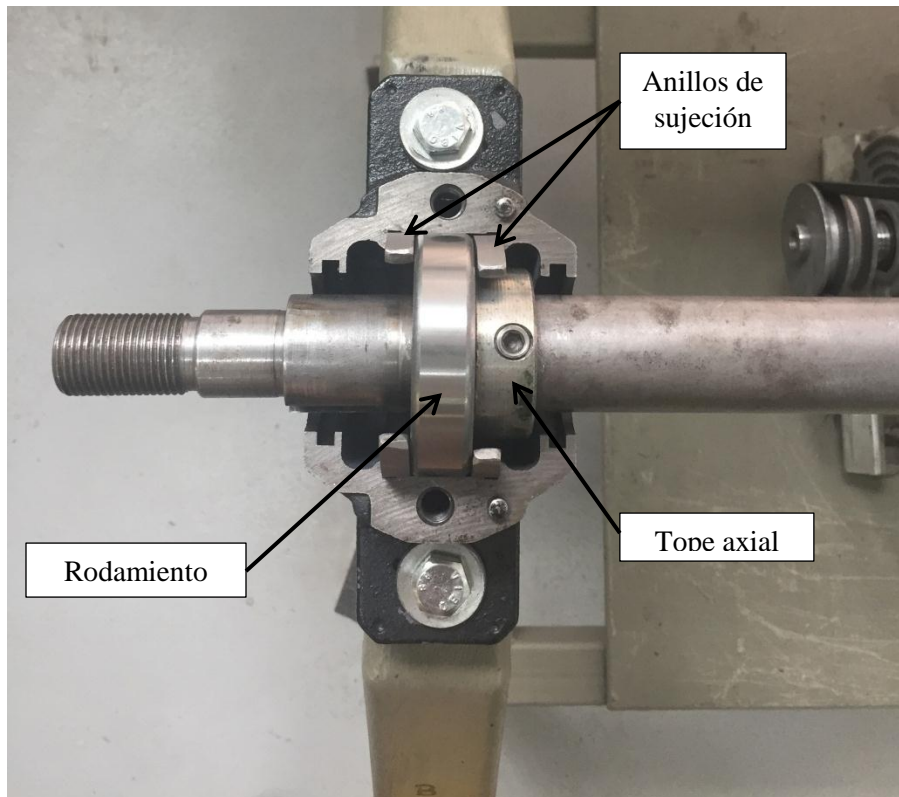


Figura 4.25: Componentes interiores del descanso.

- Se alinean y ajustan las poleas del eje y el motor según la nueva posición.

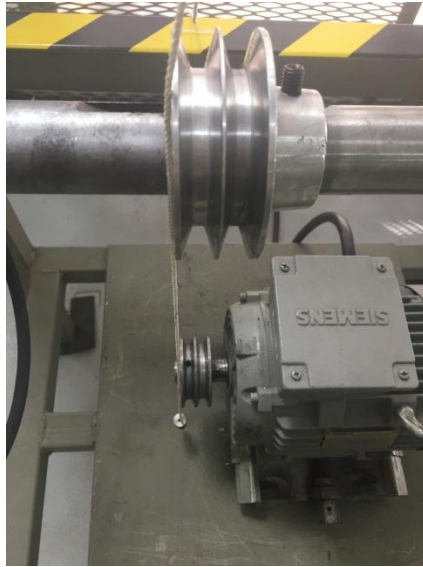


Figura 4.26: Alineamiento de poleas.

- Las tapas de sujeción superiores de los descansos son instaladas y aseguradas.
- Montar correa de transmisión sobre ambas poleas y proceder a desplazar el motor eléctrico para generar tensión en la correa.

Este es el proceso estándar para el cambio de rodamientos usado durante este trabajo, sin embargo, debido al uso constante del banco del laboratorio para efectos académicos, en ciertos casos los descansos son cambiados por descansos de otro modelo. En estos casos, a la hora de volver a montar los descansos SNC es necesario realizar un proceso de alineación de estos al ser instalados en el banco de pruebas, con el fin de disminuir cualquier efecto relacionado con la desalineación del eje.

4.3.4. Frecuencias de fallas asociadas.

Para evaluar el comportamiento de las fallas mecanizadas es necesario comparar los espectros de las fallas con las frecuencias de falla asociadas a cada uno de los componentes según las ecuaciones (3), (4), (5) y (6).

Con esto el objetivo es que al medir las vibraciones de los rodamientos con las fallas anteriormente descritas se pueda observar la presencia de las frecuencias de falla asociadas a cada una de ellas, con el fin de confirmar que los defectos en los rodamientos son válidos para realizar el posterior análisis y caracterización con los mapas PRH-PRL.

Se tiene que la frecuencia de giro del eje en el banco de pruebas es de 1022 [rpm] medidos según el tacómetro disponible en laboratorio. Los cálculos de las frecuencias BPFI, BPFO, BSF y FTF para un eje que gira a 1022 [rpm] se presentan en la tabla a continuación.

Tabla 4.2: Frecuencias de falla asociadas a los distintos componentes.

	[Rpm]	[Hz]
BPFI	9387	156,45
BPFO	6965	116,08
BSF	3374	56,23
FTF	435	7,25

4.4. Estandarización de mediciones.

Para obtener mediciones con la menor variabilidad y la mayor coherencia posible entre ellas es necesario que el proceso de toma de mediciones se encuentre estandarizado bajo ciertos parámetros, los cuales se aplicarán de la misma manera para todos los rodamientos y en todas las mediciones realizadas.

En esta sección se explicarán algunos de estos factores y de cómo se encuentran aplicados en el proceso de medición.

4.4.1. Número de Mediciones.

Con el fin de tener una noción concreta del comportamiento de cada falla bajo estudio, es necesario obtener un conjunto de mediciones espectrales consistentes para cada rodamiento. Para lograr tener un espacio muestral considerable y lograr percibir la variabilidad que pueda existir en las mediciones de los rodamientos, no basta solo una medición para cada falla, sino que lo ideal es realizar una cantidad considerable de mediciones para así poder analizar cuál es el nivel de estabilidad y la variabilidad que se ve en el comportamiento vibracional de cada falla.

En base a lo anterior es que se ha decidido por tomar **10 mediciones consecutivas** para cada rodamiento analizado, y de esta manera poder encontrar los patrones de comportamiento de cada falla para el futuro análisis vibracional.

4.4.2. Parámetros de medición.

El equipo de adquisición de datos SKF posee una amplia gama de configuraciones y modos con los cuales realizar la toma de datos en cuanto a vibraciones. En esta sección se presentarán los parámetros escogidos que serán utilizados para la toma de todas las mediciones a realizar en este trabajo. Estos parámetros fueron escogidos en base a distintas

mediciones de prueba y tomando en cuenta aquellos que se adecuan de mejor manera al tratamiento de los datos para el análisis futuro con el método PRH-PRL.

- **Tipo de espectro:** Espectro de envolvente.
- **Rango de análisis:** 0-2000 [hz].
- **Filtro:** 5000 [hz] – 40 [khz].
- **Tipo de medición:** RMS.
- **Resolución:** 6400 líneas.

4.5. Traducción de espectros a mapas PRH-PRL

Se tiene que todos los rodamientos en estudio serán sometidos a un análisis vibracional tradicional, empleando espectros de vibraciones y asociando las frecuencias presentes con las frecuencias características de cada rodamiento, por lo que en esta sección se explicará el proceso de traducción empleado para traspasar los datos entregados por los espectros vibracionales a los mapas de energía espectral PRH-PRL descritos en la **Sección 3.10** para luego ser analizados y evaluados en secciones posteriores.

La toma de datos se realizará de acuerdo a las condiciones de funcionamiento establecidas en la **Sección 4.3** y por medio de los instrumentos de medición descritos en la **Sección 4.1.5**. El equipo SKF adquiere los datos del banco de pruebas según ciertos parámetros establecidos en la **Sección 4.4.2** y los entrega en un formato específico para este equipo por lo que esta sección está destinada a describir el traspaso de información desde los espectros de vibraciones entregados por el equipo hasta los mapas PRH-PRL.

4.5.1. Traspaso de datos

El primer paso para la obtención de los datos a analizar es revisar el formato en el que el equipo SKF entrega los valores de la información medida. Una vez realizada la medición, el equipo SKF es capaz de mostrar directamente el espectro de vibración a través de la pantalla digital integrada en él, sin embargo a la hora de exportar esta información a un computador el equipo entrega un archivo el cuál se lee a través de un software que provee SKF para la lectura, análisis y trabajo de espectros, además este software permite la exportación de los datos en un archivo Excel, dicho archivo posee un formato interno específico en el cual se especifican todos los parámetros bajo los cuales se realizó la medición como lo es el tipo de análisis realizado, las unidades en las que se realiza la medición, número de líneas, datos obtenidos, rango, fecha y hora, etc. Luego el archivo entrega una la tabla de datos recopilada de la medición en las columnas que indican la frecuencia y la amplitud asociada a dicha frecuencia. Este archivo es de utilidad para el futuro procesamiento de los datos.

	A	B	C	D	E
1	Trazo 'Ch1 Y-Axis'	6400 líneas / 02 May 2019 16.26.05			
2	Proceso de trazo:	Espectro CH1			
3	Tipo de análisis:	Aceleración de espectro gE			
4	Detección:	rms			
5	Unidades:	Métrica (gE rms)			
6	Registrar fecha:	#####			
7	Número de líneas:	6400			
8	Rango de frecuencia:	2000 Hz			
9	Unidades del eje Y:	gE rms			
10	Tipo de sensor:	Acelerómetro			
11	Archivo fuente:	F:\Analyser\02 May 2019 16.25.56 F4J2.csv			
12	Fecha/hora del archivo fuente:	#####			
13	Entrada del canal:	Canal 1			
14	Velocidad:	0 RPM			
15	Tipo de ventana de FFT:	Hanning			
16	Nivel global:	0,121 gE rms rms			
17	RSS espectral:	0 Hz a 2000 Hz: 0,121 gE rms			
18	Hz	gE rms			
19		0	0		
20		0,3125	0,0042		
21		0,625	0,0031		
22		0,9375	0,0011		
23		1,25	0,0015		
24		1,5625	0,0029		
25		1,875	0,0064		
26		2,1875	0,0023		
27		2,5	0,005		
28		2,8125	0,0077		
29		3,125	0,0046		

Figura 4.27: Ejemplo de formato de archivo entregado por software SKF.

Para lograr un correcto procesamiento de la información es necesario importar los datos a un software de análisis numérico, para esto es necesario modificar el archivo Excel entregado por el software SKF, se necesita que el nuevo archivo contenga solamente las columnas asociadas al espectro de vibración, es decir, las columnas de frecuencia y amplitud. Para ello se modifica el archivo Excel eliminando todos datos mencionados anteriormente correspondientes a la información complementaria de la medición, de esta manera el archivo quedará en condiciones para ser importado al software de análisis numérico.

	A	B	C
1	0	0	
2	0,3125	0,0049	
3	0,625	0,0107	
4	0,9375	0,0148	
5	1,25	0,0135	
6	1,5625	0,0147	
7	1,875	0,033	
8	2,1875	0,0638	
9	2,5	0,0436	
10	2,8125	0,0103	
11	3,125	0,0093	
12	3,4375	0,0324	
13	3,75	0,0506	
14	4,0625	0,0546	
15	4,375	0,0439	
16	4,6875	0,0072	

Figura 4.28: Ejemplo de archivo preparado para importar a software de análisis numérico.

Al ser importado el archivo es necesario especificar los rangos de los intervalos de alta y baja frecuencia, así como el rango total de análisis de frecuencia con el fin de realizar los cálculos de los coeficientes porcentuales PRH y PRL, es importante destacar que la toma de datos del equipo SKF no siempre registra las frecuencias en números enteros por lo que se toma la frecuencia medida más cercana al valor definido en los rangos. A partir de esto se crea una matriz con ambos coeficientes, para luego proceder a graficar el punto asociado a la medición dentro del mapa PRH-PRL.

Este proceso se repite para cada una de las mediciones realizadas a todos los rodamientos bajo análisis.

4.5.2. Archivo de código numérico

El código numérico del software utilizado es un factor fundamental en el proceso de traducción de la información obtenida en las mediciones. Es a partir de esta etapa en la cual se transforman los datos medidos en los espectros vibratoriales y se generan los mapas PRH-PRL. El código se encarga principalmente de adaptar los datos de los espectros, fijar los rangos de frecuencias deseados para la elaboración del mapa, realizar el cálculo de los coeficientes porcentuales PRH-PRL y finalmente graficar los puntos obtenidos en un mapa representativo.

El código específico utilizado en la traducción se adjunta en el *Anexo I*. Dicho código está compuesto por diferentes secciones necesarias para el proceso de traducción. En términos generales, el primer paso es importar las mediciones obtenidas mediante el equipo SKF, las cuales se encuentran en archivos Excel, el software debe ser capaz de leer estos archivos e importar los datos a una matriz para tratarlas posteriormente. A continuación, se definen los valores de los rangos de frecuencia escogidos, debido a que el equipo SKF no entrega valores enteros para las frecuencias medidas, se debe aproximar las frecuencias escogidas en los rangos a los valores existentes más cercanos en las mediciones. Una vez con los rangos bien definidos se procede a calcular los coeficientes de energía espectral de alta y baja frecuencia PRH-PRL los cuales son agregados a una matriz final. Finalmente se procede a graficar cada uno de los puntos obtenidos generando el mapa final.

4.5.3. Rangos utilizados.

Como se explicó en la *Sección 3.10*, un elemento fundamental para el proceso de traducción de datos es la definición e implementación de los diferentes rangos de frecuencia a utilizar para la creación de los mapas PRH-PRL. Dependiendo del tipo de espectro que se obtenga en la medición se deberá evaluar el tipo de rangos de frecuencia que se utilicen para la implementación de los algoritmos PRH-PRL, esto debido a que la energía espectral acumulada difiere dependiendo si se observan las bajas o las altas frecuencias. A continuación, se presentarán los distintos tipos de rangos de frecuencia que se pueden utilizar para la confección de los mapas PRH-PRL, en los cuales varían tanto los rangos de bajas como de altas frecuencias, así como la frecuencia total de análisis.

4.5.3.1. Traspuestos.

En los intervalos de frecuencia traspuestos se tiene que los rangos de baja y alta frecuencia pueden tener intersecciones entre sí, es decir, el máximo valor del intervalo de baja frecuencia es mayor al mínimo valor del intervalo de alta frecuencia, de esta manera el tamaño de los intervalos puede variar siempre y cuando se cumpla la relación mencionada anteriormente. Por otro lado, el valor de la frecuencia total de análisis puede ser mayor o igual al máximo valor del intervalo de alta frecuencia.

Intervalo de baja frecuencia: 0-650 [hz].

Intervalo de alta frecuencia: 350-850 [hz].

Frecuencia total: 2000 [hz].

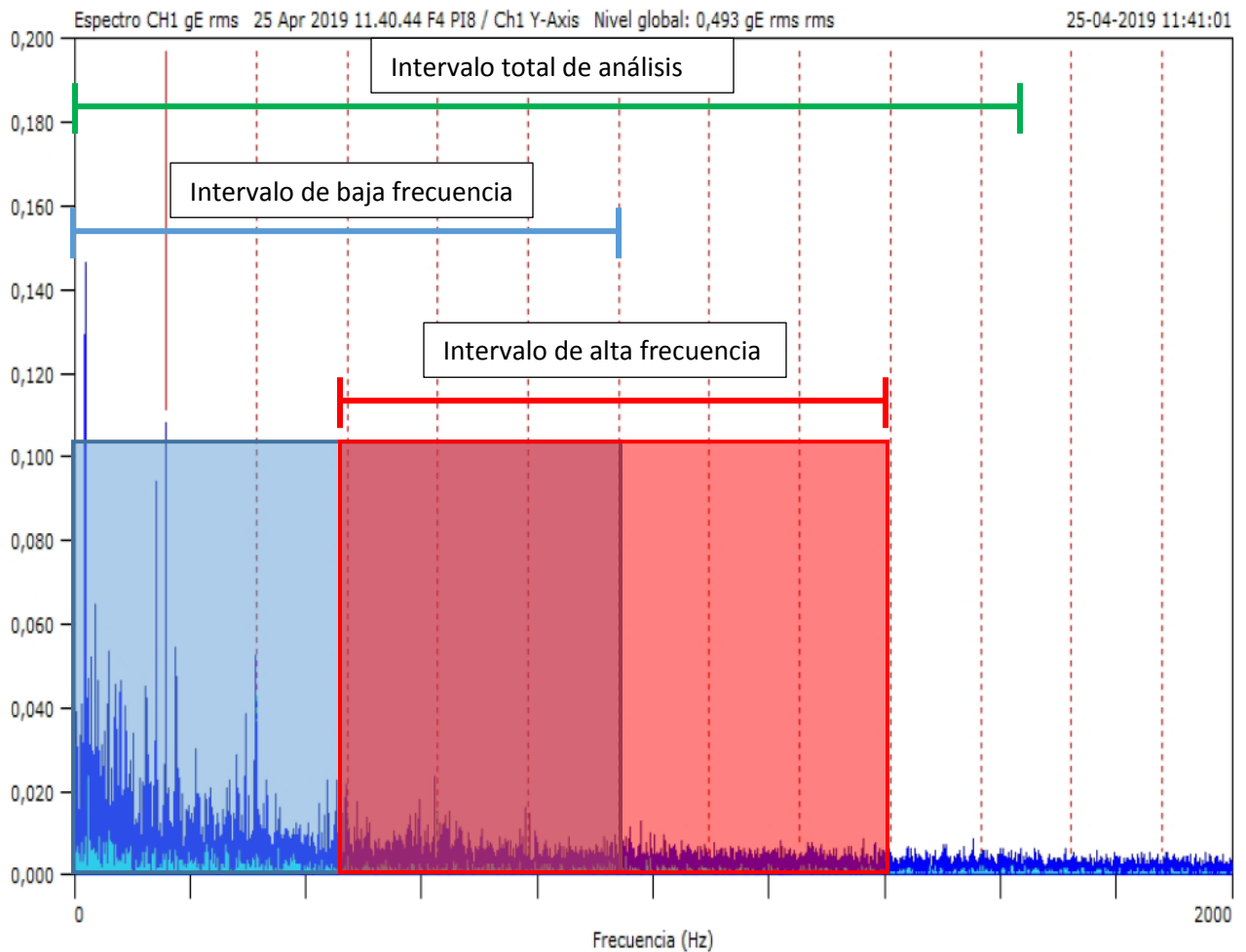


Figura 4.29: Ejemplo de intervalos de frecuencias traspuestos.

4.5.3.2. Complementarios.

Los intervalos complementarios se centran en la condición en la que el valor máximo del intervalo de baja frecuencia es igual al valor mínimo del intervalo de alta frecuencia, este tipo de intervalo es de utilidad en el caso en el que se presente información espectral relevante a lo largo de la mayoría del intervalo de análisis por lo que de esta forma no se pierde información de energía espectral a la hora de confeccionar el mapa PRH-PRL. A continuación, se presenta una figura explicativa de los intervalos complementarios.

Intervalo de baja frecuencia: 0-425 [hz].

Intervalo de alta frecuencia: 425-850 [hz]

Frecuencia total: 2000 [hz]

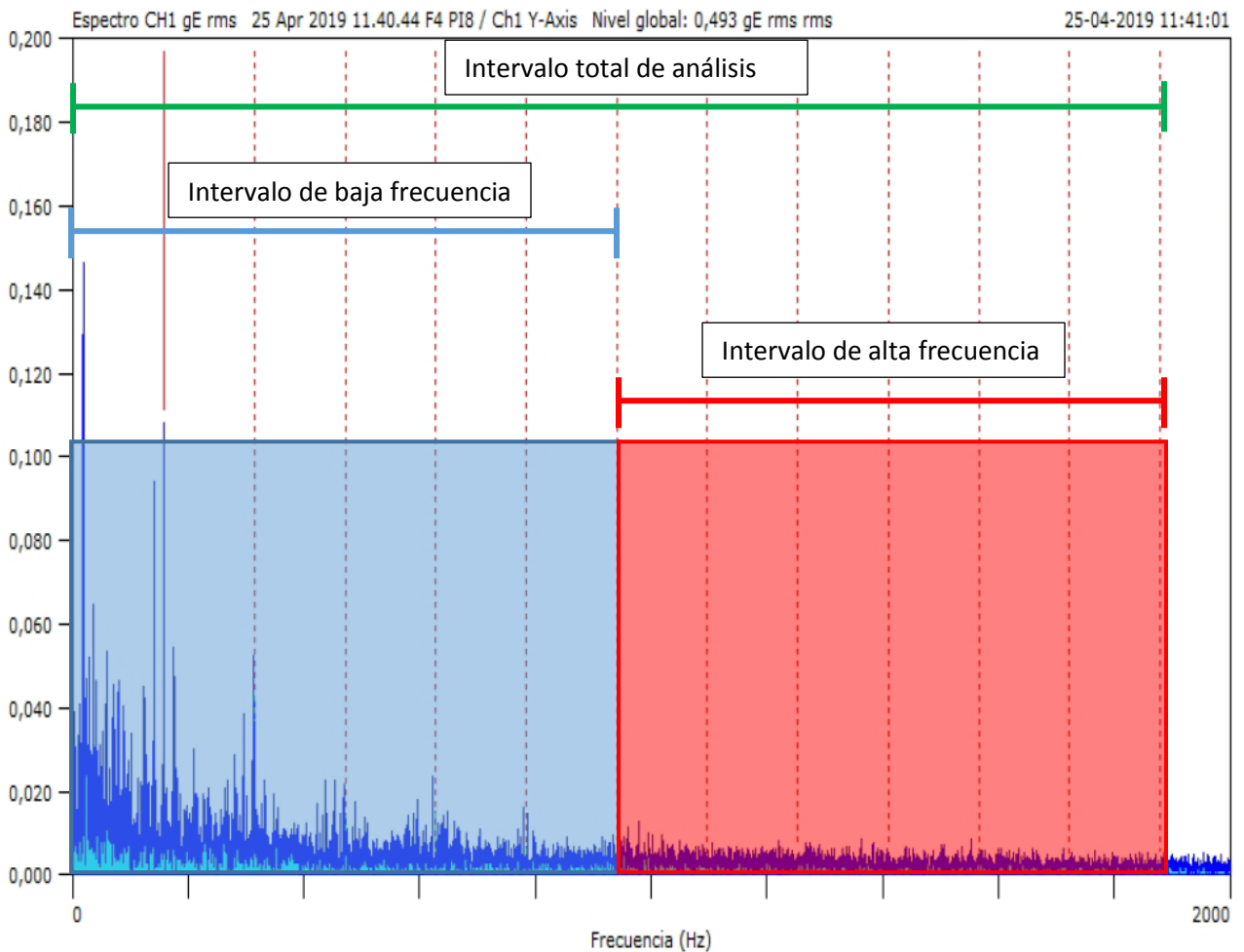


Figura 4.30: Ejemplo de intervalos de frecuencia complementarios.

4.5.3.3. Separados.

El tercer intervalo corresponde a intervalos que no se encuentran conectados entre sí, es decir, que no poseen rangos de frecuencia en común ni tampoco que sean contiguos, en otras palabras, se debe cumplir que el mínimo valor del intervalo de alta frecuencia debe ser estrictamente mayor que el máximo valor del intervalo de baja frecuencia, de esta manera los intervalos se sitúan en lugares específicos del espectro de manera separada. Este tipo de intervalo es útil para captar información espectral puntual como por ejemplos peaks de amplitud que se encuentren aislados.

Intervalo de baja frecuencia: 0-300 [hz].

Intervalo de alta frecuencia: 400-600 [hz]

Frecuencia total: 2000 [hz]

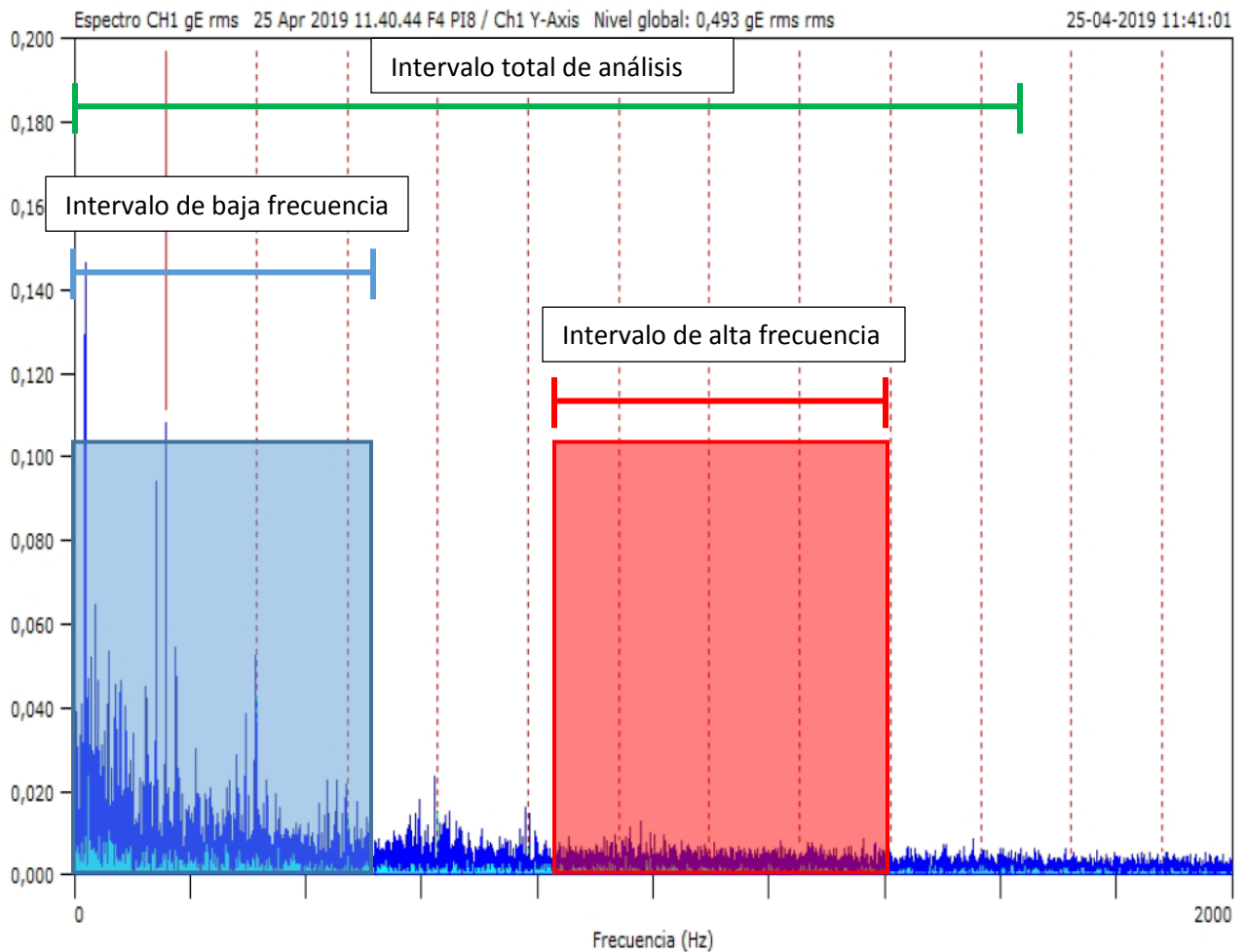


Figura 4.31: Ejemplo de intervalos de frecuencia separados.

4.5.4. Diagrama de flujo de mediciones.

Todo el proceso de medición consta de una serie de actividades y etapas que se repiten en función del número de fallas y rodamientos que se encuentran bajo estudio, así como también en la cantidad de mediciones que se deseen en el espacio muestral. De esta manera recopilando cada una de estas actividades y subprocesos se puede confeccionar un diagrama de flujo con el cual se puede describir la recopilación de información para el futuro análisis del método PRH-PRL.

Tomando lo anterior en cuenta se ha logrado dividir el proceso general de medición en dos etapas iterativas. En primer lugar, se encuentra la etapa de adquisición de datos en la cual se incluyen todas las actividades relacionadas con la toma de información vibracional por medio del equipo SKF y además el análisis espectral de cada una de las mediciones realizadas, esta etapa se repite para cada rodamiento o falla que se encuentre bajo análisis.

La segunda etapa del proceso corresponde a la traducción de los datos obtenidos en la primera etapa a los mapas PRH-PRL, la cual incluye la importación de las mediciones al software numérico, el cálculo de los coeficientes de energía espectral y finalmente el ploteo de los valores obtenidos para la generación de los mapas. Es necesario iterar esta etapa para cada una de las mediciones realizadas, incluyendo todas las fallas y rodamientos bajo análisis.

En la **Figura 4.32** se representa de manera esquemática un diagrama de flujo que incluye el detalle y ordenamiento de cada una de las actividades que incluye este proceso.

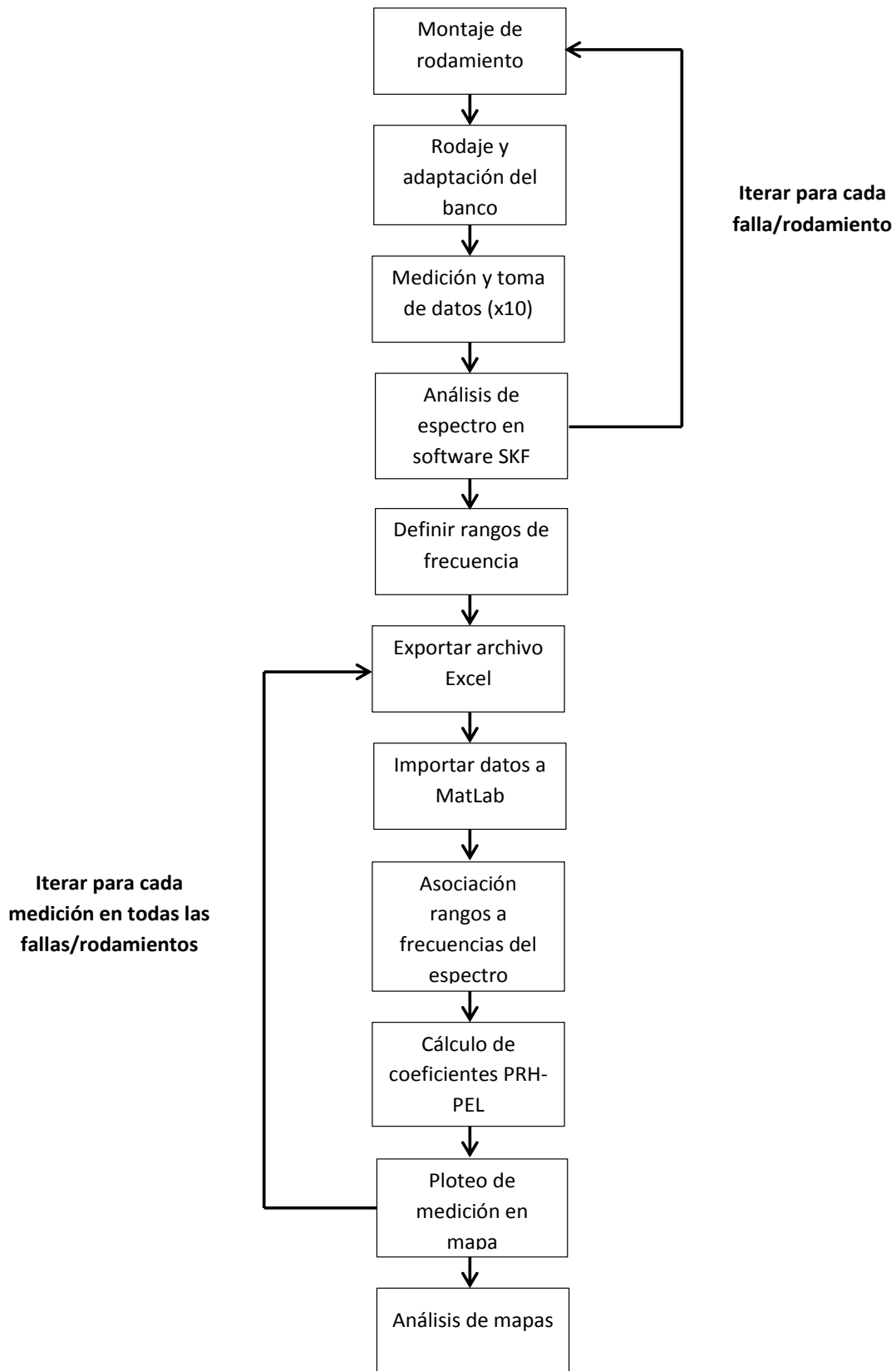


Figura 4.32: Esquema de etapas del proceso de medición.

5. Análisis.

A partir de esta sección se darán a conocer los resultados obtenidos de las mediciones de vibración realizadas a cada uno de los rodamientos para luego analizar el comportamiento que presenta cada falla en los espectros de frecuencias y posteriormente analizar la traducción de estos a Mapas PRH-PRL.

En primer lugar, se mostrarán los resultados de dos series de mediciones realizadas a conjuntos de rodamientos distintos, con el fin de comprobar si es posible replicar las fallas realizadas y obtener comportamientos similares. Una vez realizado esto se procede a realizar el análisis correspondiente a los espectros de frecuencias y relacionarlos con las frecuencias de falla de cada rodamiento. Luego, se realiza la traducción de cada uno de los espectros a los Mapas PRH-PRL y se continúa con el análisis de la distribución de las mediciones en la representación gráfica de los mapas. Finalmente se realizará un análisis de los resultados obtenidos en los mapas y de esta manera validar el método de detección de fallas por medio de la utilización de mapas de energía espectral.

5.1. Resultados experimentales.

A continuación, se presentan los espectros de frecuencias de envolvente correspondiente a las vibraciones obtenidas para dos conjuntos de rodamientos con fallas similares. Se realizaron mediciones en dos lotes de rodamientos con el fin de replicar las fallas y comportamientos de cada rodamiento.

Ambos conjuntos cuentan con defectos mecanizados en los principales componentes de cada rodamiento, pista interna, pista externa, jaula y elemento rodante. Además, en el segundo conjunto de rodamientos se agregó una nueva medición la cual consta de un rodamiento con fallas combinadas, es decir, con fallas en dos de sus componentes principales.

5.1.1. Primeras mediciones.

La primera tanda de mediciones consta de 4 rodamientos con fallas específicas en pista interna, pista externa, elemento rodante y un rodamiento en buen estado sin fallas con el fin de comparar los niveles de vibración. Se le realizan series de 10 mediciones a cada uno de estos rodamientos para tener muestras consistentes en cuanto al nivel y estado de vibración que posee el rodamiento al momento de entrar en funcionamiento.

La muestra de resultados será mediante un espectro de envolvente para cada rodamiento, el cual será representativo de las 10 mediciones realizadas a cada falla. Además, se adjuntará una tabla con los valores de frecuencias peak asociadas a cada falla, el análisis de estos valores se realizará en secciones posteriores.

- Rodamiento sin falla.

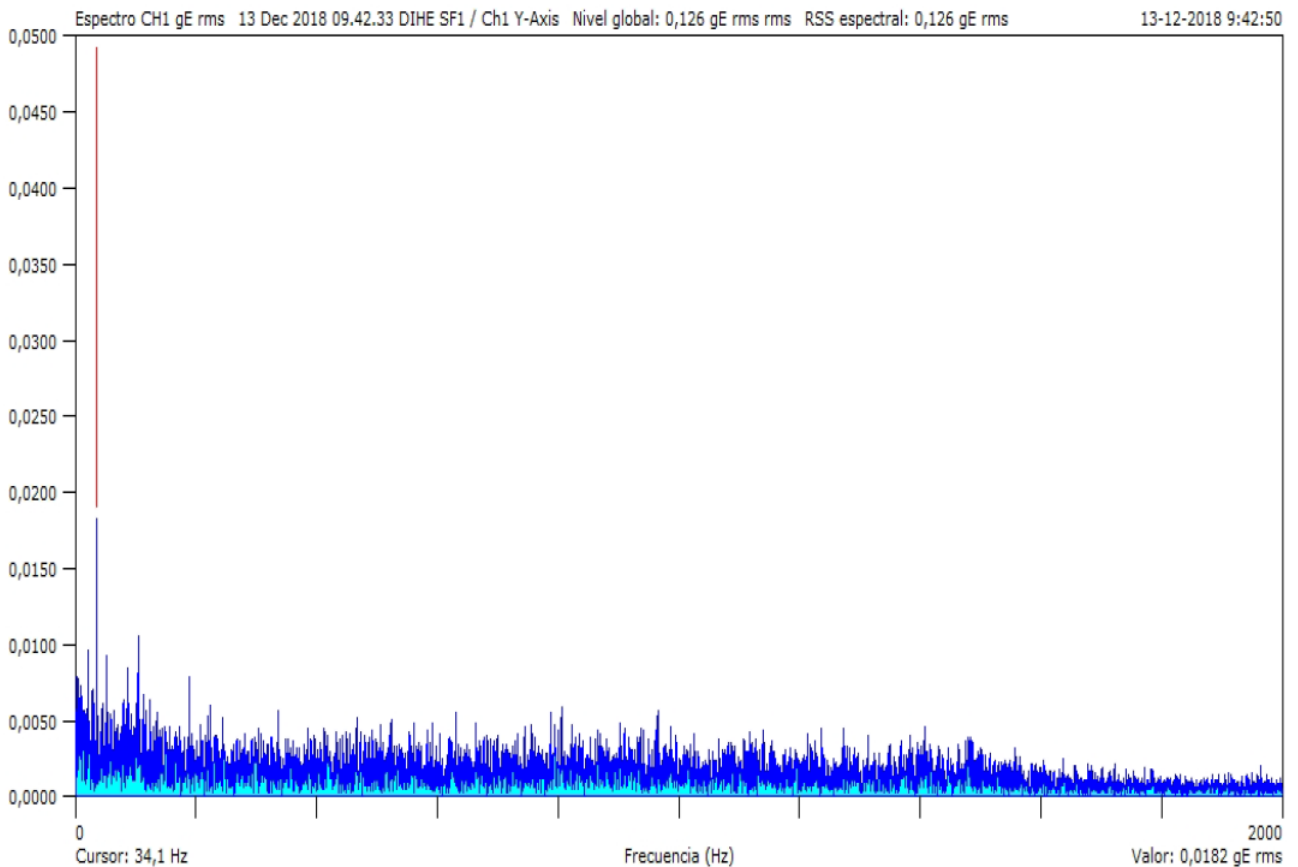


Figura 5.1: Medición número 1 para rodamiento sin falla.

- Falla pista interna.

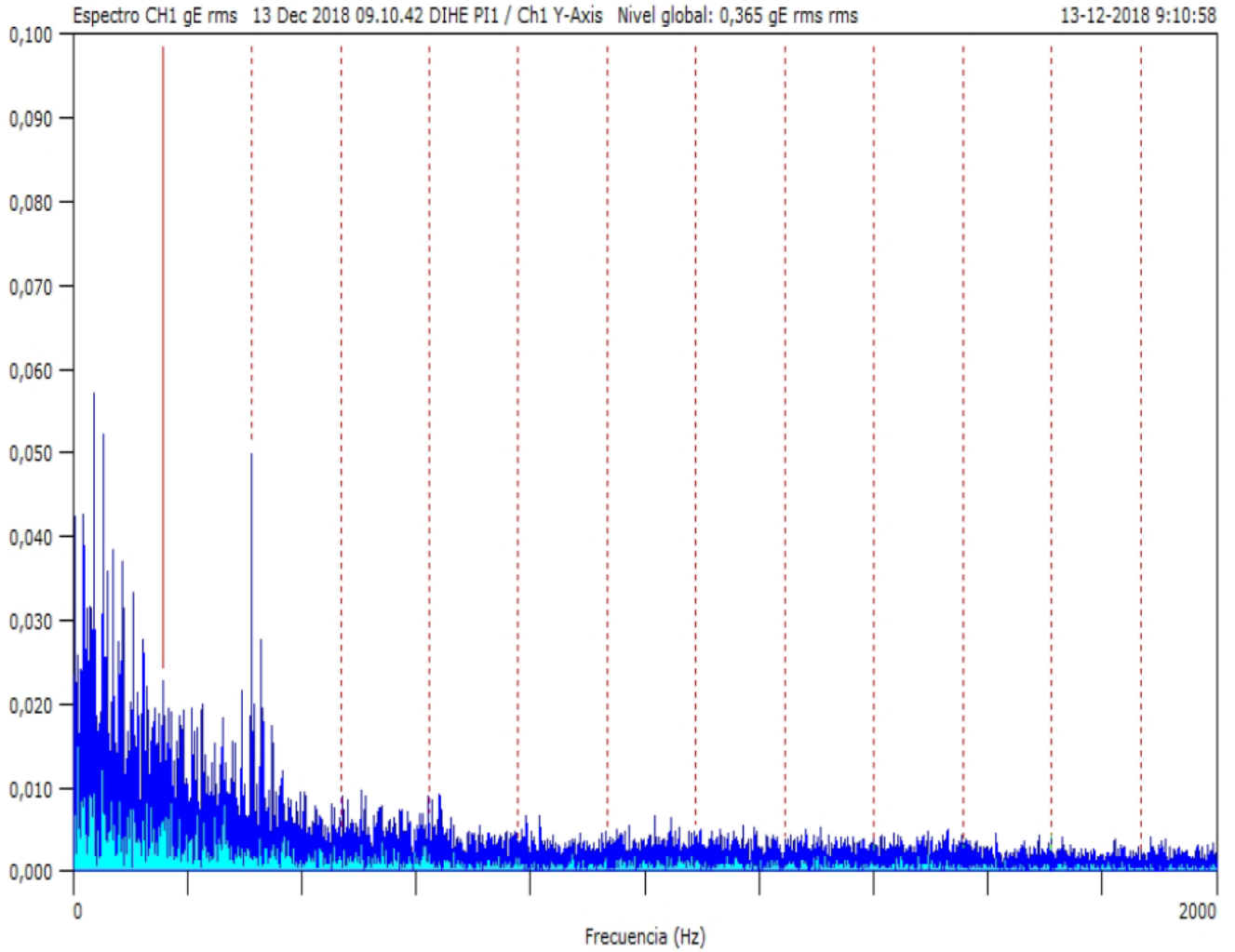


Figura 5.2: Medición número 1 para rodamiento con falla en la pista interna

Tabla 5.1: Tabla de valores de frecuencias asociadas a la falla en la pista interna.

	Hz	gE rms
1:	156	0,0226
2:	311	0,0499
3:	467	0,0030
4:	623	0,0053
5:	778	0,0020
6:	934	0,0030
7:	1089	0,0038
8:	1245	0,0024
9:	1401	6,19E-04
10:	1556	0,0010
11:	1712	8,92E-04
12:	1868	8,74E-04

Paso: 156 Hz

- Falla pista externa.

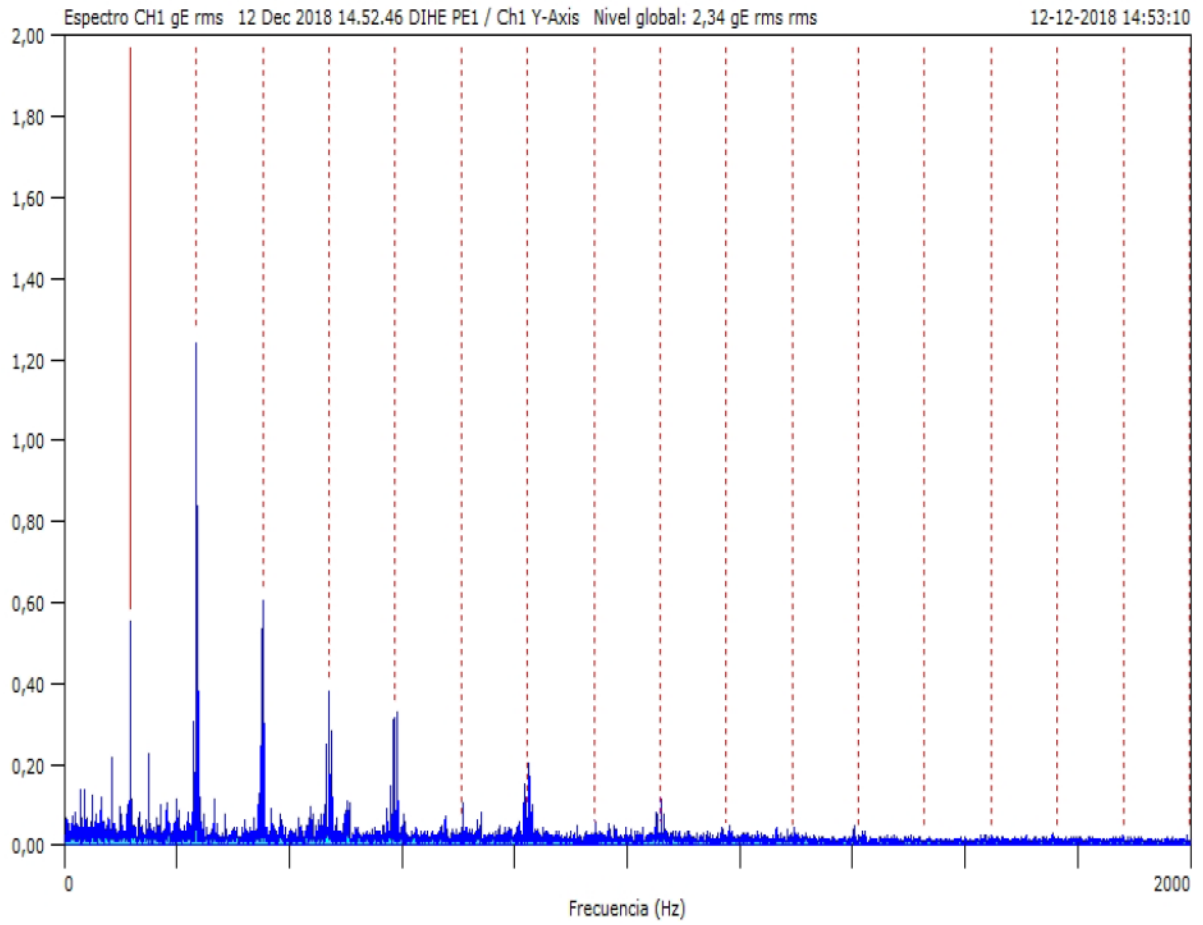


Figura 5.3: Medición número 1 para rodamiento con falla en la pista externa.

Tabla 5.2: Tabla de valores de frecuencias asociadas a la falla en la pista externa.

	Hz	gE rms
1:	118	0,553
2:	235	1,24
3:	353	0,603
4:	470	0,378
5:	588	0,311
6:	705	0,0407
7:	823	0,0649
8:	940	0,0269
9:	1058	0,0265
10:	1175	0,0204
11:	1293	0,0119
12:	1410	0,0185
13:	1528	0,0082
14:	1645	0,0174
15:	1763	0,0059
16:	1880	0,0157
17:	1998	0,0060

Paso: 118 Hz

- Falla en elemento rodante.

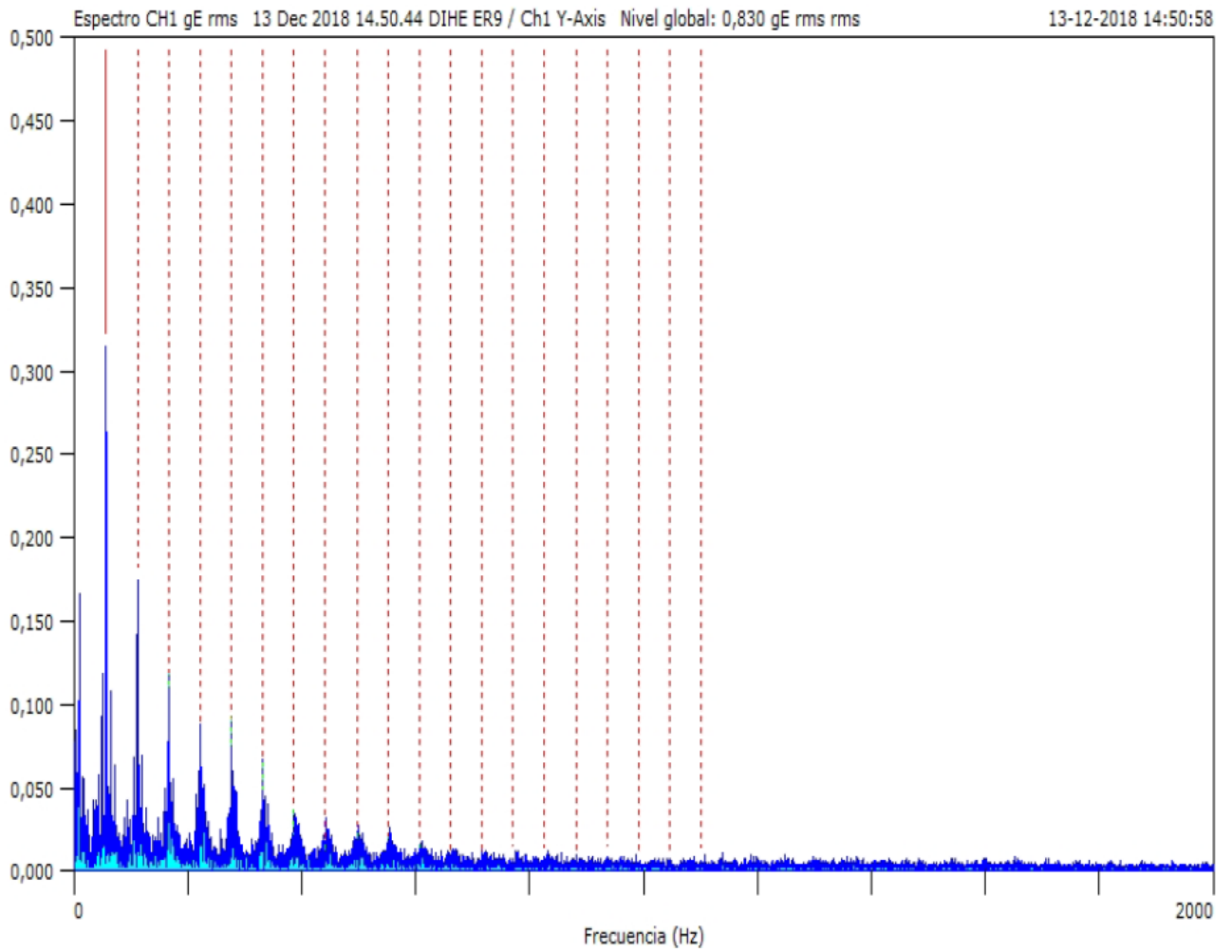


Figura 5.4: Medición número 9 para rodamiento con falla en el elemento rodante.

Tabla 5.3: Tabla de valores de frecuencias asociadas a la falla en el elemento rodante.

	Hz	gE rms
1:	55,0	0,315
2:	110	0,174
3:	165	0,102
4:	220	0,0779
5:	275	0,0656
6:	330	0,0407
7:	385	0,0133
8:	440	0,0026
9:	495	0,0096
10:	550	0,0107
11:	605	0,0060
12:	660	0,0031
13:	715	0,0036
14:	770	0,0064
15:	825	0,0059
16:	880	0,0044
17:	935	0,0072
18:	990	0,0025
19:	1045	0,0036
20:	1100	0,0054

Paso: 55,0 Hz

5.1.2. Segundas mediciones.

Para el segundo set de mediciones se tomó un nuevo lote de rodamientos a los cuales se les mecanizaron fallas similares a las realizadas para el primer set de rodamientos, esto se realizó con el fin de verificar la posibilidad de volver a replicar las fallas en los componentes y obtener el mismo comportamiento vibracional. Además, se incluyeron 4 mediciones adicionales, de las cuales 2 corresponden nuevas fallas realizadas en componentes específicos, estas fallas son: falla en jaula y falla longitudinal en la pista externa. Por otro lado, se incluyeron 2 rodamientos con fallas combinadas, es decir, rodamientos con presencia de desperfectos en dos de sus componentes, los cuales corresponden a rodamiento con falla en la pista externa y en elemento rodante y otro rodamiento con falla en la pista interna y en elemento rodante.

A continuación, se mostrarán los espectros de frecuencia de envolvente de cada una de las mediciones mencionadas anteriormente, junto con las tablas de las frecuencias peak asociadas a cada falla, las cuales se analizarán en secciones posteriores. Para cada rodamiento se realizaron 10 mediciones consecutivas, por lo que es espectro que se presentará corresponderá a la medición más representativa de cada rodamiento.

- Rodamiento sin falla.

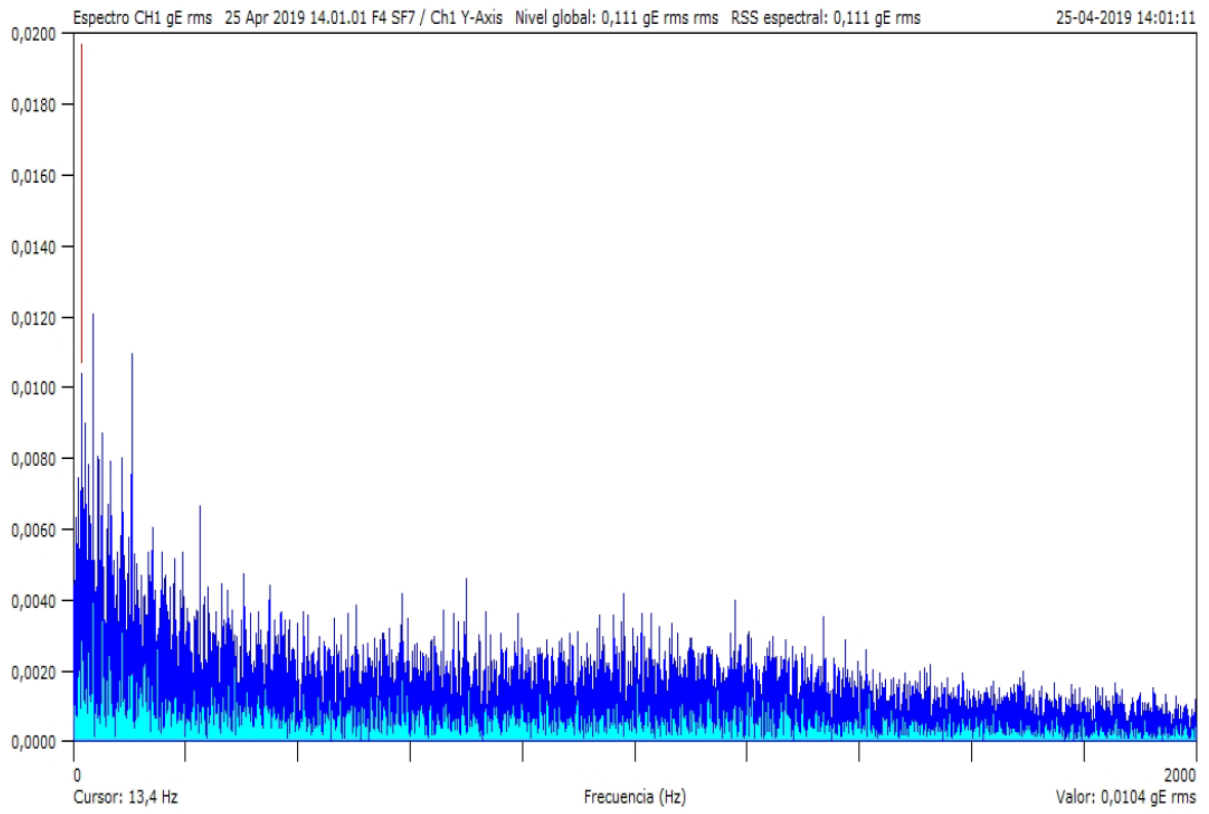


Figura 5.5: Medición número 7 para rodamiento sin falla.

- Falla en pista interna.

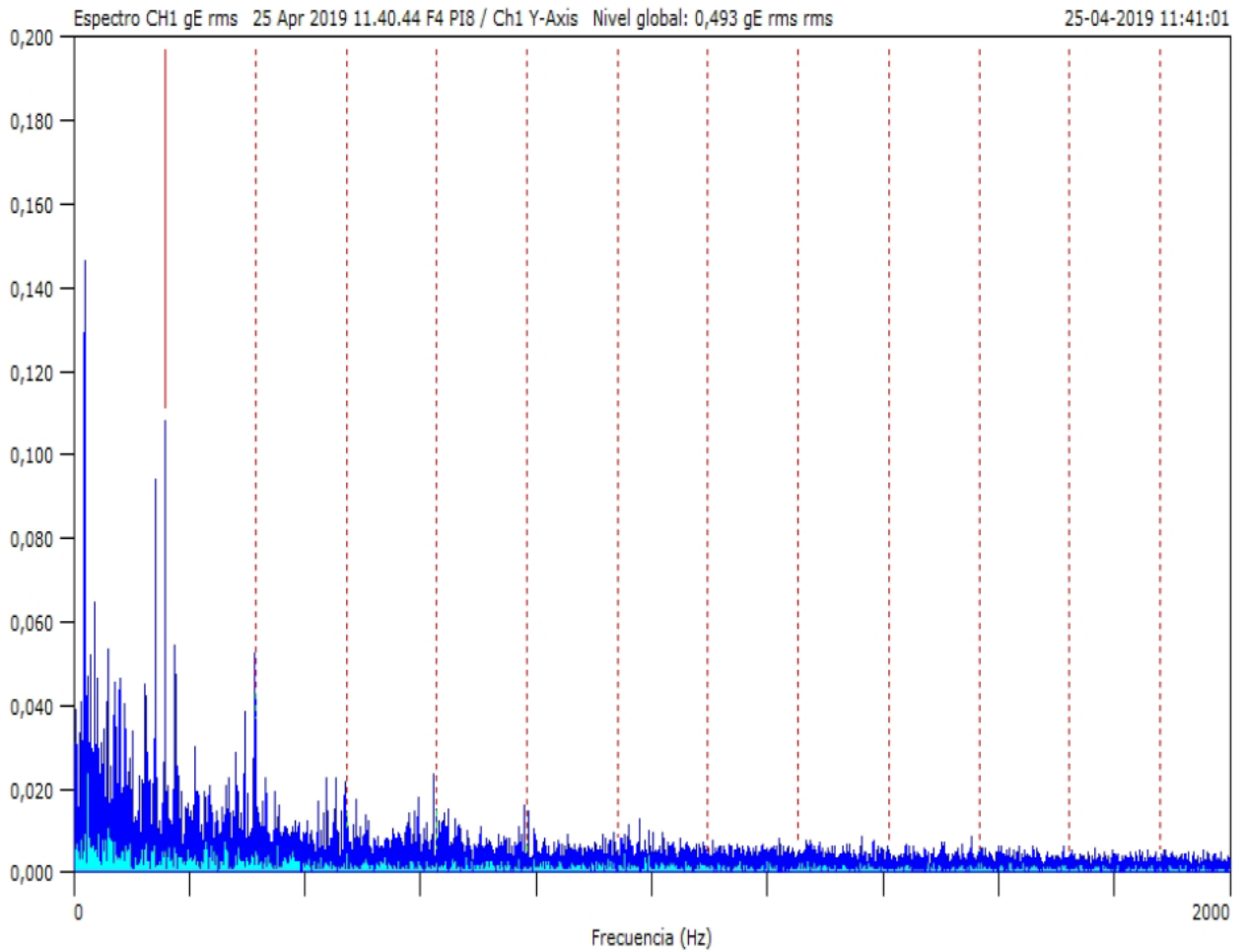


Figura 5.6: Medición número 8 para rodamiento con falla en la pista interna.

Tabla 5.4: Tabla de valores de frecuencias asociadas a la falla en la pista interna.

	Hz	gE rms
1:	157	0,108
2:	313	0,0337
3:	470	0,0075
4:	626	0,0023
5:	783	9,02E-04
6:	939	0,0049
7:	1096	0,0017
8:	1253	0,0038
9:	1409	0,0039
10:	1566	0,0011
11:	1722	3,42E-04
12:	1879	0,0024

Paso: 157 Hz

- Falla en pista externa transversal.

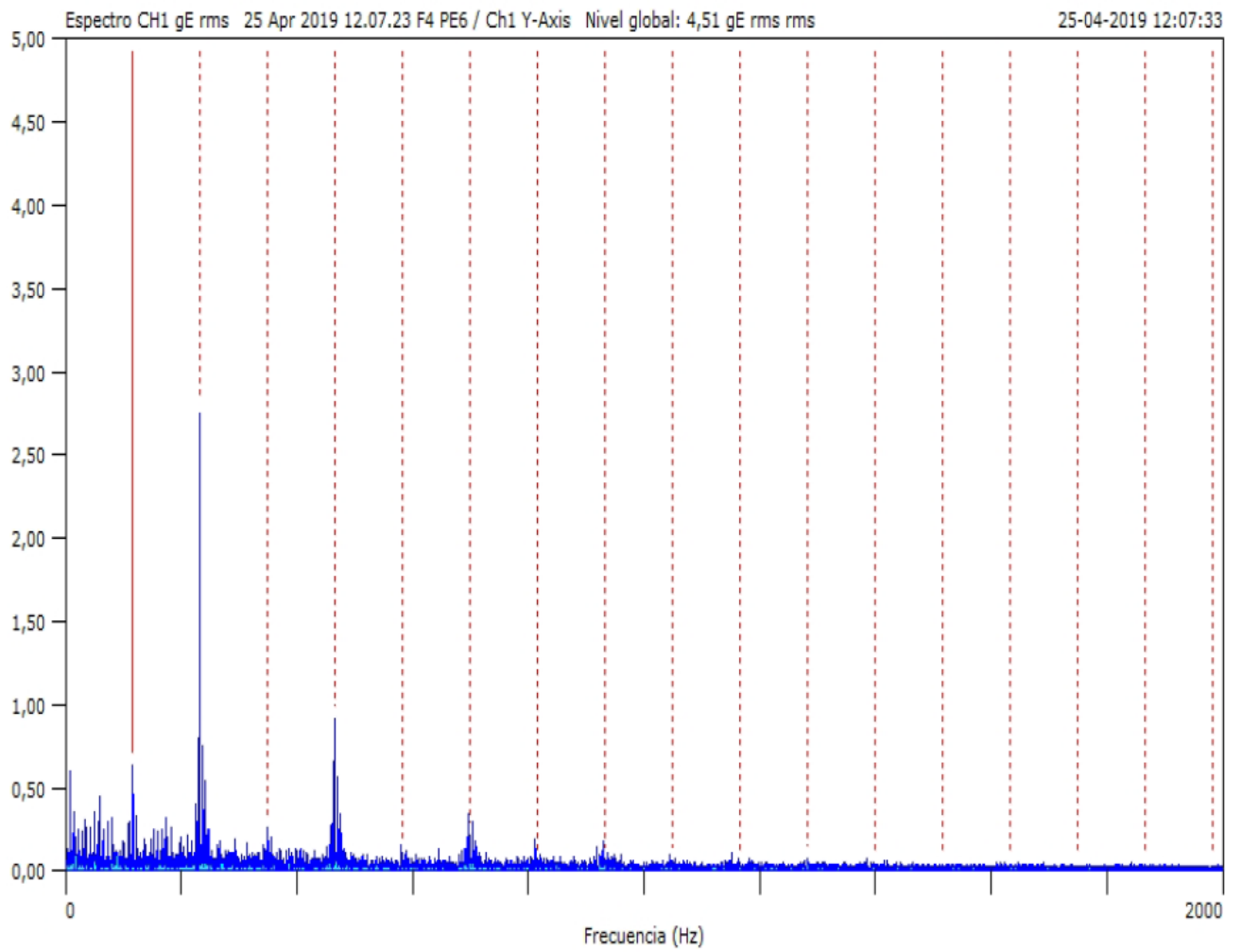


Figura 5.7: Medición número 6 para rodamiento con falla en la pista externa transversal.

Tabla 5.5: Tabla de valores de frecuencias asociadas a la falla en la pista externa transversal.

	Hz	gE rms
1:	117	0,624
2:	233	2,75
3:	350	0,259
4:	466	0,911
5:	583	0,103
6:	699	0,208
7:	816	0,0147
8:	933	0,0544
9:	1049	0,0543
10:	1166	0,0338
11:	1282	0,0622
12:	1399	0,0336
13:	1515	0,0270
14:	1632	0,0242
15:	1748	0,0162
16:	1865	0,0086
17:	1982	0,0145

Paso: 117 Hz

- Falla en pista externa longitudinal.

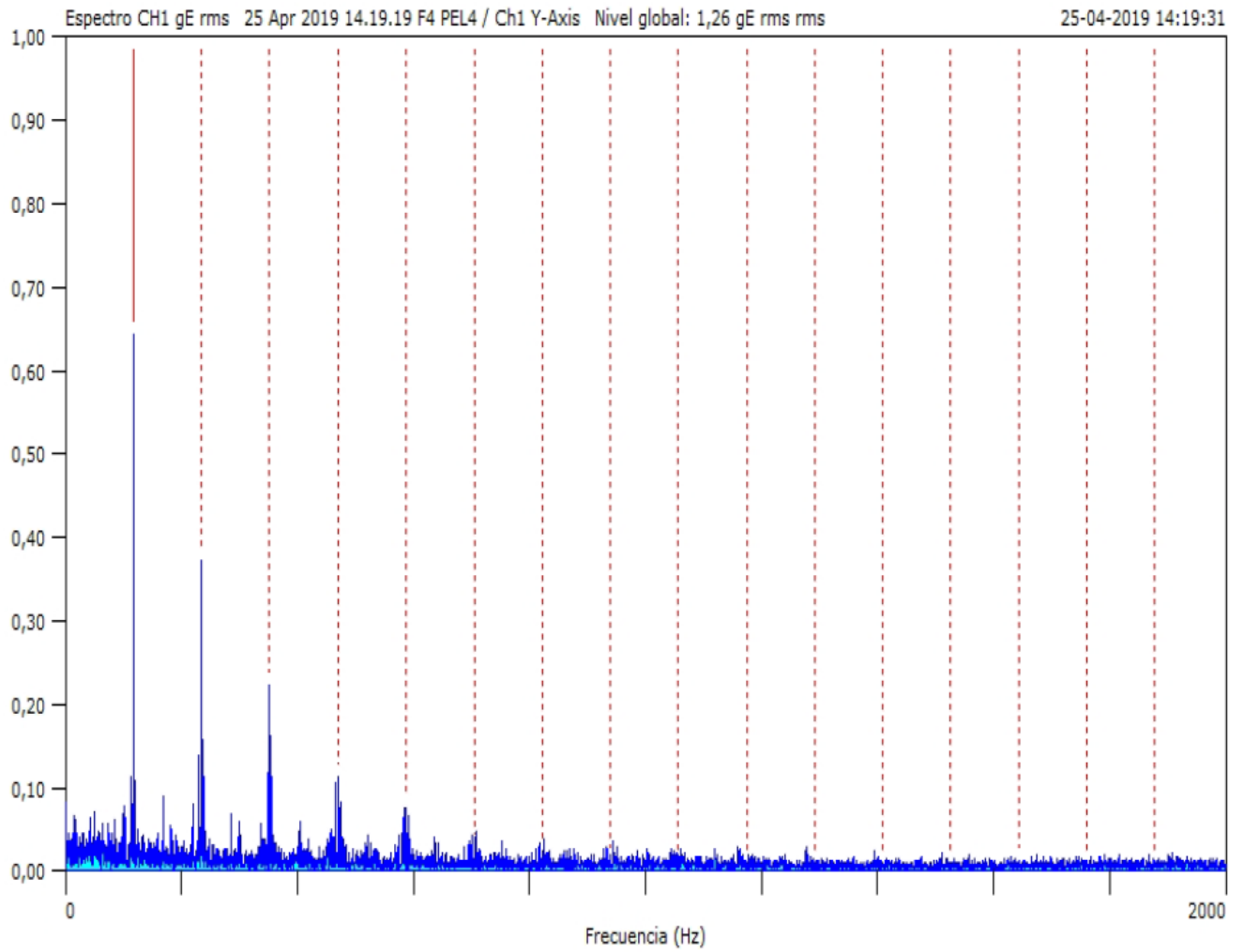


Figura 5.8: Medición número 4 para rodamiento con falla en la pista externa longitudinal.

Tabla 5.6: Tabla de valores de frecuencias asociadas a la falla en la pista externa longitudinal.

	Hz	gE rms
1:	118	0,642
2:	235	0,371
3:	352	0,222
4:	469	0,112
5:	587	0,0732
6:	704	0,0266
7:	822	0,0210
8:	939	0,0114
9:	1056	8,15E-04
10:	1173	0,0074
11:	1291	0,0093
12:	1408	0,0080
13:	1525	0,0083
14:	1643	0,0119
15:	1760	0,0062
16:	1877	0,0027

Paso: 117 Hz

- Falla en elemento rodante.

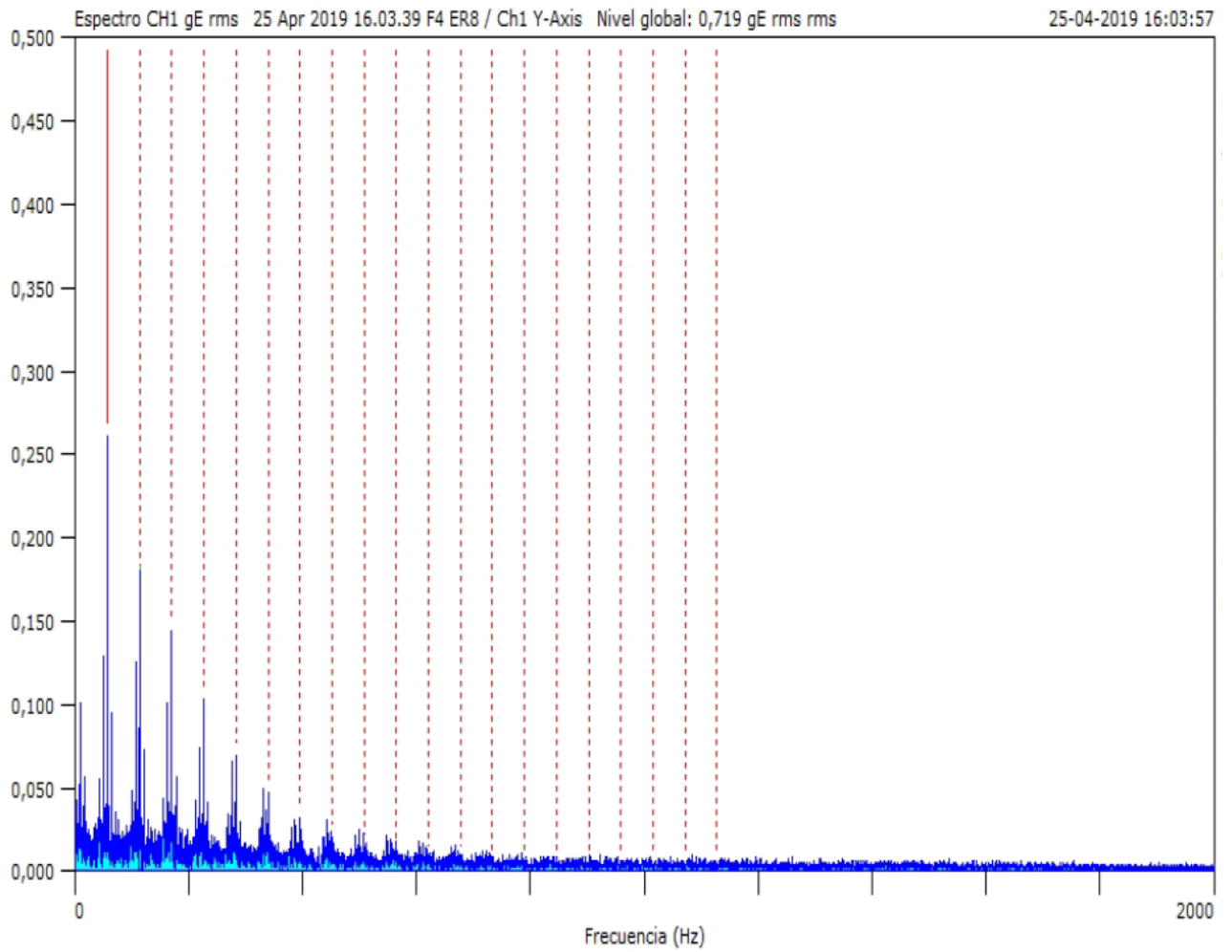


Figura 5.9: Medición número 8 para rodamiento con falla en el elemento rodante.

Tabla 5.7: Tabla de valores de frecuencias asociadas a la falla en el elemento rodante.

	Hz	gE rms
1:	56,3	0,261
2:	113	0,170
3:	169	0,143
4:	225	0,103
5:	282	0,0685
6:	338	0,0469
7:	394	0,0315
8:	451	0,0196
9:	507	0,0137
10:	563	0,0111
11:	620	0,0062
12:	676	0,0064
13:	733	0,0039
14:	789	0,0031
15:	845	0,0035
16:	902	0,0019
17:	958	7,61E-04
18:	1014	0,0010
19:	1071	0,0014
20:	1127	0,0018

Paso: 56,3 Hz

- Falla en pista externa y elemento rodante.

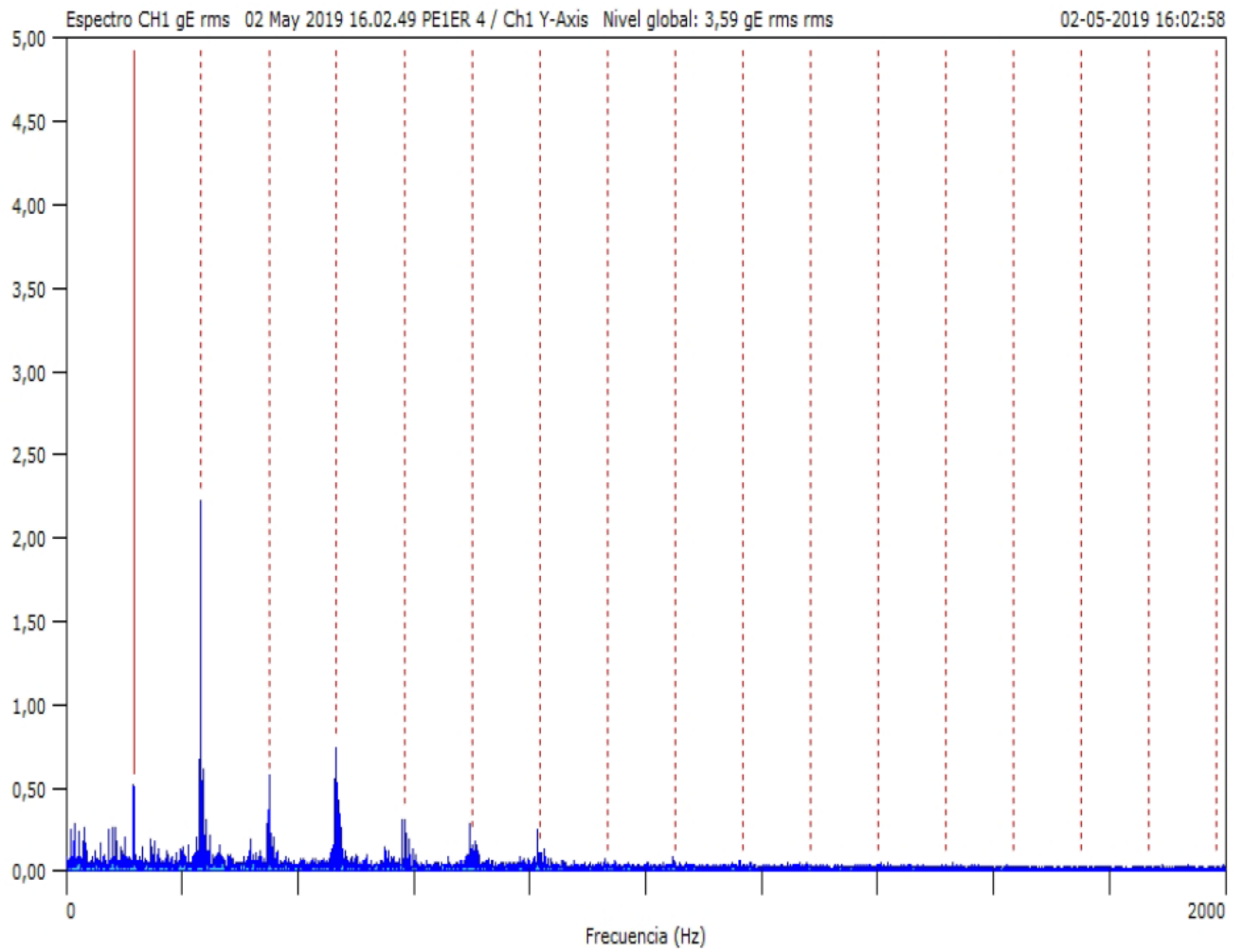


Figura 5.10: Medición número 4 para rodamiento con falla combinada en la pista externa y elemento rodante.

Tabla 5.8: Tabla de valores de frecuencias asociadas a la falla combinada de pista externa y elemento rodante.

	Hz	gE rms
1:	117	0,500
2:	233	2,22
3:	350	0,518
4:	467	0,737
5:	583	0,298
6:	700	0,151
7:	817	0,101
8:	933	0,0398
9:	1050	0,0096
10:	1167	0,0288
11:	1283	0,0251
12:	1400	0,0079
13:	1517	0,0353
14:	1633	0,0143
15:	1750	0,0215
16:	1867	0,0134
17:	1983	0,0122

Paso: 117 Hz

- Falla en pista interna y elemento rodante.

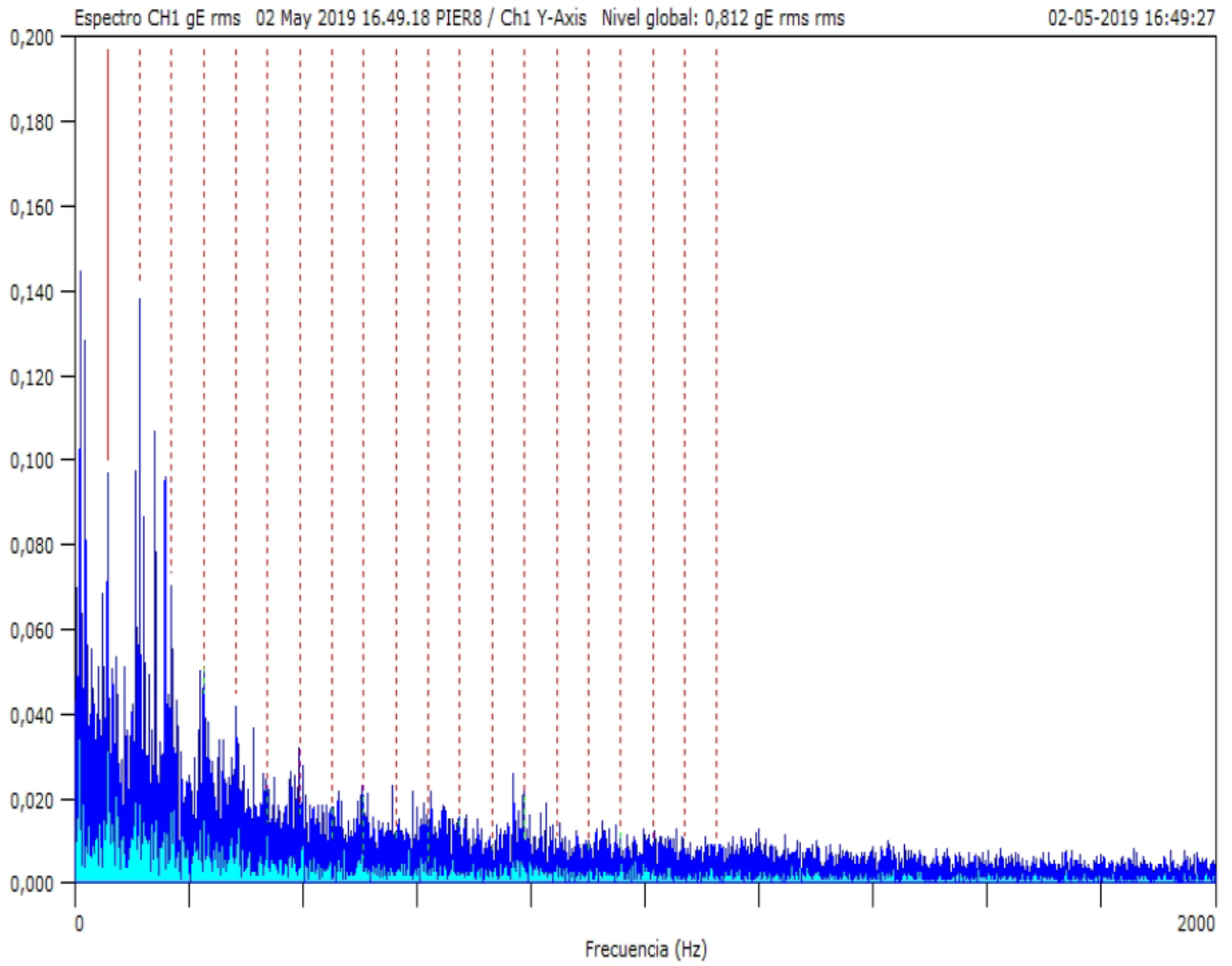


Figura 5.11: Medición número 8 para rodamiento con falla combinada en la pista interna y elemento rodante.

Tabla 5.9: Tabla de valores de frecuencias asociadas a la falla combinada de pista interna y elemento rodante.

	Hz	gE rms
1:	56,3	0,0969
2:	113	0,138
3:	169	0,0702
4:	225	0,0414
5:	281	0,0416
6:	338	0,0112
7:	394	0,0121
8:	450	0,0068
9:	506	0,0026
10:	563	0,0072
11:	619	0,0019
12:	675	0,0085
13:	731	0,0039
14:	788	0,0061
15:	844	0,0076
16:	900	0,0046
17:	956	0,0053
18:	1013	0,0066
19:	1069	0,0080
20:	1125	0,0058

Paso: 56,3 Hz

- Falla en jaula.

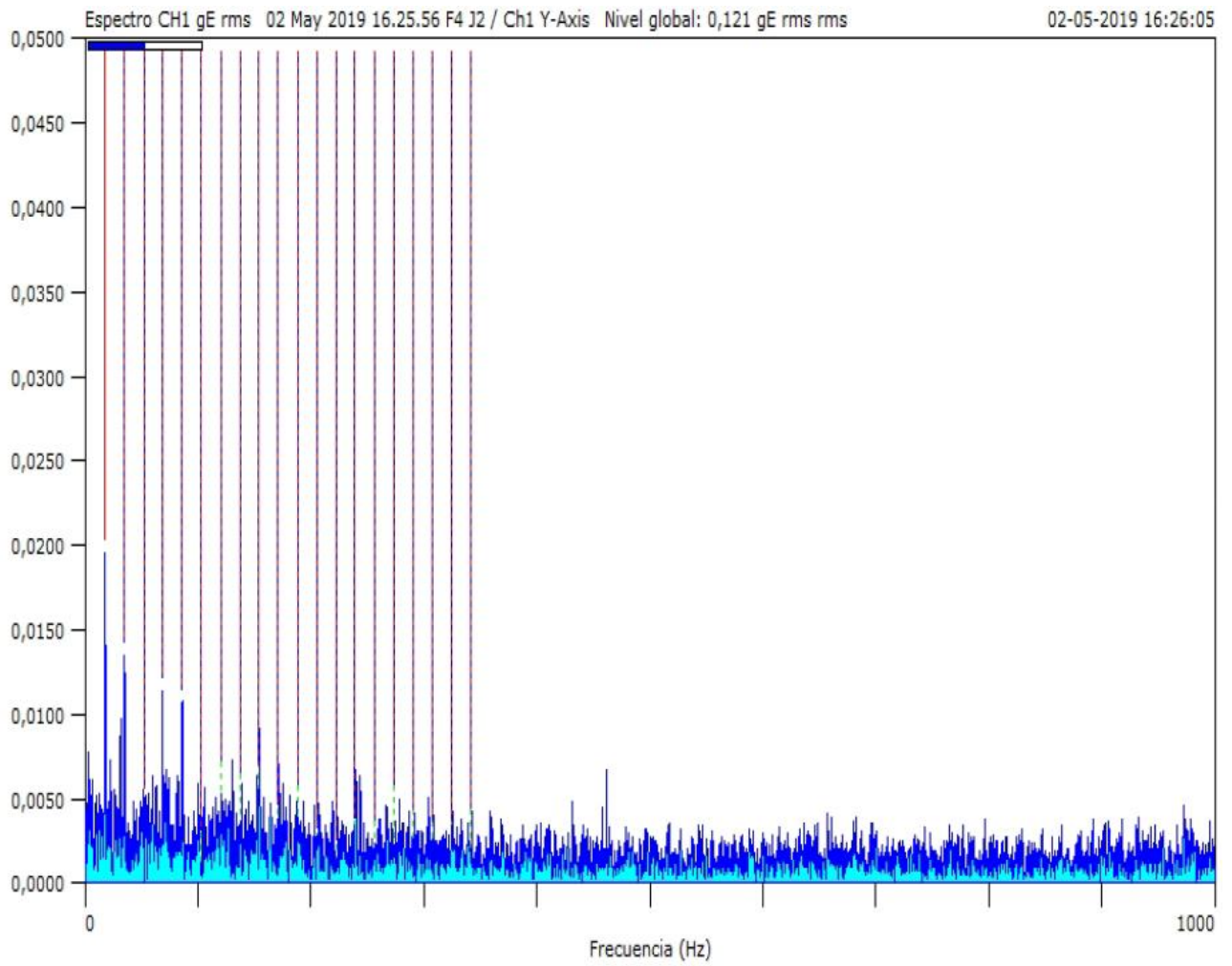


Figura 5.12: Medición número 8 para rodamiento con falla en la jaula.

Tabla 5.10: Tabla de valores de frecuencias asociadas a la falla en la jaula.

	Hz	gE rms
1:	17,2	0,0195
2:	34,1	0,0135
3:	51,3	0,0047
4:	68,1	0,0113
5:	85,3	0,0106
6:	102	4,88E-04
7:	119	0,0046
8:	136	0,0029
9:	153	0,0047
10:	170	0,0031
11:	188	0,0031
12:	204	0,0021
13:	222	6,21E-04
14:	238	0,0027
15:	256	0,0015
16:	273	0,0015
17:	290	0,0019
18:	307	0,0018
19:	324	0,0027
20:	341	0,0012

Paso: 16,9 Hz

5.2. Análisis de espectros.

En las secciones siguientes se procederá a realizar un análisis de los espectros de frecuencias obtenidos en la sección anterior. En base a este análisis de las vibraciones presentes en cada rodamiento se podrá establecer si efectivamente las fallas presentes en cada rodamiento muestran el comportamiento esperado según las distintas teorías de análisis de vibraciones más utilizadas.

En primer lugar, se realizará una recopilación de las frecuencias que presenten los peaks más altos de amplitud para cada rodamiento, además de ver si existe o no la presencia de armónicos en los espectros. Una vez que se tengan claras las frecuencias que resaltan en cada rodamiento se procederá a relacionarlas con las frecuencias características de cada falla, de esta manera de logrará deducir a que factores o elementos se pueden atribuir dichas vibraciones y verificar que la detección de fallas por medio de la teoría de las frecuencias de falla detallada en la *Sección 3.6* se cumple.

Finalmente se realizará una comparación entre los espectros obtenidos en los ambos sets de mediciones realizados, además de analizar los niveles globales de vibraciones obtenidos en cada rodamiento con el fin de evaluar el estado en el que se encuentra cada uno.

5.2.1. Frecuencias presentes.

Se analizarán los dos sets de mediciones por separado para observar que frecuencias se presentan en cada una de ellas.

- **Primer set.**

En primera instancia se analizarán las frecuencias presentes en las mediciones de un rodamiento **sin fallas**, es decir, nuevo y en buen estado. En este caso se obtendrá un comportamiento netamente asociado a los componentes del banco de pruebas y al montaje realizado para la medición, ya que el rodamiento al estar en perfectas condiciones no debería presentar efectos en la señal del espectro.

Si se observa la **Figura 5.1** se puede ver que la frecuencia marcada muestra la mayor amplitud, la cual corresponde a 34,1[hz], seguida por un peak en 102,5 [hz], y por una frecuencia en 188,13[hz]. En siguiente tabla se muestran las frecuencias con sus respectivos valores de amplitud. En este caso las frecuencias corresponden al 2x, 6x y 11x de la frecuencia de giro del eje la cual corresponde a 17[hz].

Tabla 5.11: Tabla de valores de frecuencias asociadas a rodamiento sin falla.

Frecuencia	Amplitud
34,1[hz]	0,0182 [gE]
102,5[hz]	0,0105 [gE]
188,13[hz]	0,0078 [gE]

En el rodamiento que presenta falla en la **pista interna** se pudo observar un claro cambio en las frecuencias excitadas presentes en el espectro de envolvente. Si se observa la **Figura 5.2** se puede ver la existencia de vibraciones a bajas frecuencias que no se observaban anteriormente. En primer lugar, se puede apreciar que aparecen frecuencias asociadas a la frecuencia de giro del eje la cual corresponde a 16,9 [hz] y a su vez los armónicos asociados llegando hasta la 5x de la frecuencia de giro del eje. Por otro lado, en este caso es claramente visible una frecuencia excitada cercana a los 300 [hz], en la **Tabla 5.12** se pueden observar todos los armónicos asociados a la frecuencia. A continuación, se muestra un resumen de las frecuencias presentes en el rodamiento con falla en la pista externa.

Tabla 5.12: Tabla de valores de frecuencias para rodamiento con falla en la pista interna.

Frecuencia	Amplitud
16,9[hz]	0,0425 [gE]
34,1[hz]	0,0569 [gE]
51,3[hz]	0,0521 [gE]
68,4[hz]	0,0382 [gE]
85,6[hz]	0,0370 [gE]
156[hz]	0,0226 [gE]
311[hz]	0,0499 [gE]

Para el rodamiento que presenta falla en la **pista externa** se obtuvo el espectro mostrado en la **Figura 5.3**, el cual muestra gran diferencia respecto a los espectros obtenidos anteriormente, en este caso se puede ver claramente un patrón en el comportamiento de las frecuencias excitadas. Las frecuencias que se aprecian en el espectro corresponden a los armónicos de la frecuencia de 118[hz], las cuales aparecen desde el 1x hasta 7x de dicha frecuencia. En la **Tabla 5.13** se muestran todos los armónicos de la frecuencia que más presencia tienen en el espectro.

Tabla 5.13: Tabla de valores de frecuencias asociadas para rodamiento con falla en la pista externa.

Frecuencia	Amplitud
118[hz]	0,553 [gE]
235[hz]	1,24 [gE]
353[hz]	0,603 [gE]
470[hz]	0,378 [gE]
588[hz]	0,311 [gE]
708,4[hz]	0,101[gE]
826[hz]	0,201[gE]

El último rodamiento del primer set de mediciones corresponde al rodamiento con falla en el **elemento rodante** del cual se obtuvo el espectro mostrado en la **Figura 5.4**, en dicho espectro nuevamente se ve un patrón característico de frecuencias excitadas, entre las cuales aparece claramente la 1x de la frecuencia de 55 [hz] y al igual que en el caso anterior aparecen armónicos de esta frecuencia llegando hasta la 10x de la frecuencia recién mencionada. Además, también se encuentra presente la frecuencia de 7,18 [hz] con una amplitud de 0,166 [gE]. En la siguiente tabla se muestran las frecuencias que mostraron peaks de amplitud en las mediciones realizadas.

Tabla 5.14: Tabla de valores de frecuencias para rodamiento con falla en el elemento rodante.

Frecuencia	Amplitud
7,18 [hz]	0,166 [gE]
55 [hz]	0,315 [gE]
110 [hz]	0,174 [gE]
164,7 [hz]	0,118 [gE]
220 [hz]	0,0779 [gE]
275,6 [hz]	0,0913 [gE]
330,6 [hz]	0,0665 [gE]
385,6 [hz]	0,0361 [gE]
442,8[hz]	0,0311 [gE]
498,8[hz]	0,0261 [gE]
552,5 [hz]	0,0243 [gE]

- **Segundo Set.**

Para el rodamiento **sin falla** se obtuvo el espectro de la **Figura 5.5**, el cual muestra 3 frecuencias con amplitudes relativamente altas en comparación al resto del espectro, dichas frecuencias son 13,4 [hz], 34,1 [hz] y 102,5 [hz]. El resto de las frecuencias del espectro poseen amplitudes similares que no muestran mayor trascendencia. A continuación, se muestra una tabla con las amplitudes correspondientes a las frecuencias excitadas.

Tabla 5.15: Tabla de valores de frecuencias asociadas a rodamiento sin falla.

Frecuencia	Amplitud
13,4[hz]	0,0104 [gE]
34,1[hz]	0,0121 [gE]
102,5[hz]	0,011 [gE]

Al observar el espectro de la **Figura 5.6** correspondiente al rodamiento con falla en la **pista interna** se puede observar un peak de amplitud en la frecuencia de 17,2 [hz], luego

se puede observar un patrón de frecuencias que resalta en 157 [hz] y en los armónicos desde la 2x hasta la 5x de dicha frecuencia. Además, se puede ver la existencia de bandas laterales en frecuencias cercanas a cada uno de los armónicos mencionados anteriormente. En la siguiente tabla se muestran las frecuencias principales que se muestran en el espectro junto con sus respectivas amplitudes.

Tabla 5.16: Tabla de valores de frecuencias asociadas para rodamiento con falla en la pista interna.

Frecuencia	Amplitud
17,1[hz]	0,146 [gE]
157 [hz]	0,108 [gE]
312,8 [hz]	0,0525 [gE]
469,4 [hz]	0,0215 [gE]
621,9 [hz]	0,0234 [gE]
785,9 [hz]	0,0143 [gE]

Para este set de mediciones se realizaron dos tipos de fallas en la **pista externa** de los rodamientos como se mencionó anteriormente, cada una de estas fallas se midió de forma independiente.

En primer lugar se realizaron mediciones sobre una falla que se presenta en la pista de manera **transversal**, similar a la realizada en el set anterior de rodamientos, la cual mostró un comportamiento que se aprecia en la **Figura 5.7**, en dicho espectro se ve un patrón de excitación en ciertas frecuencias, la primera frecuencia presente corresponde a 117 [hz] y luego con mayor amplitud se pueden ver los armónicos 2x, 4x y 6x, quedando ausentes los armónicos 3x y 5x. En la siguiente tabla se muestra un resumen de las frecuencias presentes de mayor amplitud.

Tabla 5.17: Tabla de valores de frecuencias presentes para rodamiento con falla transversal en la pista externa.

Frecuencia	Amplitud
117 [hz]	0,624 [gE]
233[hz]	2,75 [gE]
466[hz]	0,911 [gE]
699[hz]	0,208 [gE]

Por otro lado, se realizó otra falla en la pista externa, la cual posee una dirección de mecanizado **longitudinal** en la pista, para este rodamiento se obtuvo el espectro que se muestra en la **Figura 5.8**, nuevamente en este espectro se ve un patrón similar al anterior relacionado con la frecuencia de 118 [hz], en donde también se encuentran presentes los armónicos 2x, 3x, 4x, 5x y 6x los cuales disminuyen progresivamente en amplitud. En la siguiente tabla se muestra un resumen de dichas frecuencias junto con sus amplitudes respectivas.

Tabla 5.18: Tabla de valores de frecuencias asociadas para rodamiento con falla longitudinal en la pista externa.

Frecuencia	Amplitud
118[hz]	0,642 [gE]
235[hz]	0,371 [gE]
352 [hz]	0,222 [gE]
469 [hz]	0,112 [gE]
587 [hz]	0,0732 [gE]
704 [hz]	0,0266 [gE]

En el rodamiento que presenta falla en **elemento rodante** se obtuvo el espectro que se muestra en la **Figura 5.9**, al observar las frecuencias que presentan peaks de amplitud se puede ver un claro patrón asociado a la frecuencia de 56,3 [hz] en el cual resaltan sus armónicos respectivos desde el 2x hasta aproximadamente el 9x en donde las amplitudes descienden hasta casi desaparecer. También se puede observar un peak de baja frecuencia

presente en los 7,5 [hz]. Además, cabe mencionar la existencia de pequeñas bandas laterales en cada armónico presente. En la tabla que se presenta a continuación se pueden ver las frecuencias presentes junto con sus valores de amplitud.

Tabla 5.19: Tabla de valores de frecuencias para rodamiento con falla en el elemento rodante.

Frecuencia	Amplitud
7,5 [hz]	0,101 [gE]
56,3 [hz]	0,261 [gE]
113 [hz]	0,182 [gE]
169 [hz]	0,143 [gE]
225 [hz]	0,103 [gE]
282 [hz]	0,0685 [gE]
338 [hz]	0,0469 [gE]
394 [hz]	0,0315 [gE]
450,6 [hz]	0,0196 [gE]
505 [hz]	0,0219 [gE]

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos para rodamientos con **fallas combinadas**, como se mencionó anteriormente estos rodamientos presentan más de un componente dañado, con el fin de observar cómo afecta la presencia de ambas fallas en los espectros y en las señales de vibración.

En primera instancia se midieron las vibraciones en un rodamiento que presentaba fallas tanto en la **pista externa como en un elemento rodante**, cabe mencionar que la falla presente en la pista externa posee una dirección transversal en la pista. El espectro de esta medición se presenta en la **Figura 5.10**. En este caso se puede observar la presencia de la frecuencia de 117 [hz] así como los armónicos 2x, 3x, 4x, 5x, 6x y 7x de dicha frecuencia. También se pueden observar algunas perturbaciones en rangos de baja frecuencia del espectro, principalmente bajo los 200 [hz]. En la siguiente la tabla se muestra un resumen de las frecuencias presentes junto con sus amplitudes.

Tabla 5.20: Tabla de valores de frecuencias rodamiento con falla transversal en la pista externa y falla en un elemento rodante.

Frecuencia	Amplitud
117[hz]	0,5 [gE]
233[hz]	2,22 [gE]
350[hz]	0,518 [gE]
467[hz]	0,737 [gE]
583[hz]	0,298 [gE]
696,6[hz]	0,278[gE]
813,1[hz]	0,238[gE]

El segundo rodamiento con falla combinada que fue sometido a mediciones fue un rodamiento con **fallas en la pista interna y con falla en un elemento rodante**, el espectro obtenido de dicho rodamiento se muestra en la *Figura 5.11*. Se puede observar que a diferencia de los rodamientos anteriores en este caso no se puede ver un patrón de frecuencias a simple vista, las frecuencias excitadas que se pueden observar se encuentran en rangos de baja frecuencia bajo los 200 [hz], los valores de amplitud más elevados se pueden ver en las frecuencias de 7,2[hz], 56,3[hz], 113[hz] y 139,4[hz] y la presencia de bandas laterales asociadas a estas frecuencias, además se presentan los armónicos 2x, 3x y 4x de la frecuencia 56,3[hz] pero con menores valores de amplitud. A continuación, se muestra una tabla con las frecuencias que presentan mayores peaks de amplitud en el espectro.

Tabla 5.21: Tabla de valores de frecuencias para rodamiento con falla en la pista externa y falla en el elemento rodante.

Frecuencia	Amplitud
7,2 [hz]	0,144 [gE]
56,3[hz]	0,0969 [gE]
113 [hz]	0,138 [gE]
139,4[hz]	0,107 [gE]
156,6 [hz]	0,0957 [gE]
224,7[hz]	0,0503 [gE]
281[hz]	0,0416 [gE]

Finalmente, el último rodamiento presenta una falla en la **jaula de sujeción** de los elementos rodantes, el comportamiento obtenido se aprecia en la **Figura 5.12**, en dicho espectro se puede ver que en su mayoría las frecuencias presentes son de baja amplitud y se encuentran asociadas principalmente a la frecuencia de giro del eje que corresponde a aproximadamente a 17[hz], en base a esto se pueden observar los armónicos 2x, 4x y 5x de esta frecuencia. A continuación, se muestran las amplitudes de las frecuencias mencionadas.

Tabla 5.22: Tabla de valores de frecuencias presentes para rodamiento con falla en la jaula de sujeción.

Frecuencia	Amplitud
17,2 [hz]	0,0195 [gE]
34,1[hz]	0,0135 [gE]
68,1 [hz]	0,0113 [gE]
85,3 [hz]	0,0106 [gE]

5.2.2. Asociaciones de fallas presentes con frecuencias características.

Según los comportamientos generales observados en la sección anterior es posible realizar un análisis de los principales patrones presentes y de las frecuencias que predominan en cada uno de los casos de estudio realizados. Esta sección está destinada a asociar el comportamiento experimental de las fallas presentes en cada rodamiento con el comportamiento esperado según las principales teorías de fallas de rodamientos. Esto tiene el fin de comprobar la validez de la teoría y al mismo tiempo verificar que las fallas realizadas en los rodamientos efectivamente demuestran el comportamiento esperado para tales defectos.

Para dicho análisis se observarán en conjunto ambos sets de mediciones realizados para cada tipo de falla, para el caso de las fallas combinadas solo se analizarán las mediciones obtenidas en el segundo set de mediciones.

- **Falla pista interna**

Ambas mediciones realizadas para la falla en la pista interna del rodamiento entregaron un comportamiento similar en cuanto a las frecuencias excitadas. Como se pudo observar en las *Tablas 5.12 y 5.16* se puede apreciar que en ambas mediciones aparece una frecuencia de aproximadamente 17[hz] además de los armónicos 2x y 3x de esta. Esta frecuencia corresponde a la frecuencia de giro del eje principal del banco de pruebas, según los principales métodos de detección de fallas en rodamientos la presencia de esta frecuencia se le puede atribuir principalmente al montaje efectuado del rodamiento y a factores propios del banco de pruebas utilizado, tales como alineamiento del eje entre los descansos, deslizamiento entre el rodamiento y el eje, tensión de la correa de transmisión de movimiento. Si bien a la hora de realizar el montaje se tuvo la precaución del disminuir lo máximo posible el efecto de estos factores, debido a las características propias del banco de pruebas es posible que estos efectos sigan siendo visibles en las mediciones.

Por otro lado, otro comportamiento que se puede notar con claridad es la presencia de una excitación en la frecuencia de 156 [hz] así como los armónicos de hasta la 2x para la primera medición y hasta la 5x para la segunda medición. Esta frecuencia corresponde a la

frecuencia característica BPGI para la pista interna del rodamiento utilizado, según lo estipulado en la *Sección 3.6*. Según el espectro mostrado en la *Figura 5.6* se puede ver claramente como las frecuencias excitadas corresponden a los armónicos de la frecuencia BPGI llegando a estar presente hasta el 5x de dicha frecuencia. De esta manera ambos espectros obtenidos para el rodamiento que presenta falla en la pista interna entregaron resultados acordes al tipo de falla presenta, verificando que el tipo de falla realizada es válida para el procedimiento experimental.

- **Falla pista externa**

Para la falla en la pista externa se analizaron un total de 3 rodamientos, en el primer set se utilizó un rodamiento con una falla en la pista externa transversal al anillo exterior, mientras que en el segundo set de rodamientos se utilizaron dos rodamientos, uno replicando la misma falla transversal que se usó anteriormente y otro rodamiento con una falla en la pista externa en dirección longitudinal al anillo exterior. Cabe mencionar que generalmente las fallas en la pista externa que se pueden ver en la industria se presentan de manera longitudinal en la mayoría de los casos, principalmente debido al exceso de carga presente sobre los ejes de trabajo, es por esta razón que se decidió añadir este tipo de falla al análisis. Las fallas transversales también se pueden ver en la industria, pero son de menor frecuencia.

Al analizar los espectros de los tres rodamientos en las *Figuras 5.3, 5.7 y 5.8* se observó un comportamiento similar para cada uno de ellos. La frecuencia predominante en todas las mediciones es de 118 [hz] y sus respectivos armónicos llegando a estar presente hasta el 7x de dicha frecuencia. Esta frecuencia de 118 [hz] corresponde a la BPFO calculada en la *Sección 3.6* para este tipo de rodamiento según las condiciones de funcionamiento establecidas, por lo que las frecuencias presentes en los espectros son directamente atribuibles a las fallas presentes en cada uno de los rodamientos. En ambos rodamientos con fallas transversales se obtuvo el peak máximo de amplitud en el armónico 2x de la BPFO el cual disminuye en los armónicos siguientes, por otro lado, para el rodamiento con falla longitudinal la amplitud máxima se dio en el 1x de la BPFO, a pesar de esta diferencia se puede decir que el comportamiento de la falla es similar para los tres rodamientos debido a las frecuencias que se encuentran excitadas.

Cabe destacar que existen algunas variaciones en cuanto a las amplitudes de las frecuencias presentes en los espectros. Las frecuencias excitadas en los rodamientos con fallas transversales presentan mayores amplitudes que en el rodamiento con falla longitudinal, esto principalmente a que al encontrarse en movimiento la falla transversal entra en contacto de manera más abrupta con el elemento rodante que en el caso de la falla longitudinal, en la cual el contacto con la falla se da de manera más gradual. Sin embargo, a

pesar de esta diferencia en amplitudes los patrones de comportamiento y las frecuencias excitadas de estas fallas resultan similares en todos los casos.

De esta manera es posible validar las fallas realizadas en la pista externa ya que muestran el comportamiento esperado para una falla de este tipo según los métodos más utilizados para la detección de fallas en rodamientos.

- **Falla en elemento rodante**

Estos rodamientos son los que entregaron los resultados con mayor similitud entre las primeras y segundas mediciones. Al observar los espectros de las *Figuras 5.4 y 5.9* en conjunto con las *Tablas 5.14 y 5.19* se observa claramente que las frecuencias excitadas que muestran mayor amplitud de vibración son las mismas para ambos casos además de que ambas mediciones muestran un patrón de vibración similar en sus espectros.

La frecuencia de mayor amplitud que se registra corresponde 56 [hz] aproximadamente y en ambos casos se aprecia la presencia pulsos armónicos desde la 2x hasta la 10x de dicha frecuencia, los cuales van disminuyendo progresivamente. La frecuencia de 56 [hz] mencionada coincide con la BPF calculada según la *Sección 3.6* de acuerdo a las condiciones de funcionamiento del montaje, con esto se puede corroborar que las frecuencias presentes y sus respectivos armónicos están asociadas a la falla presente en un elemento rodante.

- **Falla combinada en pista externa y elemento rodante**

La medición de fallas combinadas se realizó solamente en el segundo set de mediciones. En el caso del rodamiento con fallas en la pista externa de manera transversal y en el elemento rodante se obtuvo el espectro correspondiente a la *Figura 5.10* el cuál presenta las frecuencias establecidas en la *Tabla 5.20*, la frecuencia predominante es 233 [hz] la cual coincide con la 2x de la BPFO calculada en la *Sección 3.6* según las condiciones de funcionamiento, además de la presencia de armónicos asociados a esta, de esta manera es posible atribuir la frecuencia presente a la falla existente en la pista externa del rodamiento.

Si bien el rodamiento también presenta una falla en un elemento rodante se aprecia que la frecuencia BPF asociada a dicha falla no se ve presente en el espectro obtenido, esto se puede deber a que la falla en la pista externa genera niveles vibracionales mucho más elevados que los que genera la falla en el elemento rodante por lo que las frecuencias excitadas por el elemento rodante se ven opacadas por las vibraciones que produce la falla en la pista externa que son de mayor amplitud.

- **Falla combinada en pista interna y elemento rodante**

La segunda falla combinada que se realizó consta de una falla en la pista interna y de una falla en uno de los elementos rodantes. Según el espectro que se muestra en la *Figura 5.11* se aprecia que no existe un patrón definido de frecuencias excitadas, sin embargo, se ve la existencia de algunos armónicos relacionados con la frecuencia de 56 [hz] la cual coincide con la BSF del rodamiento, cabe destacar que estos armónicos también se ven opacados por la presencia aleatoria de otras frecuencias en el rango de las 0 [hz] a 200 [hz]. Por otro lado, se aprecia que la falla en la pista interna no se ve representada por ninguna frecuencia en el espectro, esto puede ocurrir debido a que las vibraciones generadas por el elemento rodante son de mayor amplitud que las generadas por la falla en la pista interna lo que genera que las frecuencias asociadas a la pista interna se encuentren ocultas bajo los altos niveles de vibración del elemento rodante.

- **Falla en jaula de sujeción**

El último componente que se analizó fue la jaula de sujeción de los elementos rodantes, el comportamiento de este tipo de falla se vio reflejado en el espectro de la *Figura 5.12* y se obtuvieron las frecuencias excitadas presentes en la *Tabla 5.22*, se ve claramente que la frecuencia predominante corresponde a la de 17 [hz] y se resaltan los armónicos 2x, 4x y 5x. Si bien las vibraciones generadas excitan la frecuencia de giro del eje y sus respectivos armónicos no se ven presentes las frecuencias características asociadas a una falla en la jaula de sujeción, de esta manera no es posible asociar este tipo de comportamiento a la falla presente en el rodamiento sólo con el espectro obtenido.

Cabe destacar que en este tipo de rodamientos la jaula es un componente poco robusto y el cuál no genera mayor incidencia sobre los otros componentes a nivel de

vibración, debido a esto lograr una falla que genere un comportamiento característico para este componente es más complejo que en las pistas o elementos rodantes, esto referido al modelo de rodamiento específico utilizado.

5.2.3. Comparación entre mediciones I y II.

Un aspecto fundamental para analizar en cuanto a las mediciones realizadas en los rodamientos de estudio es el nivel de reproducibilidad que poseen los distintos tipos de fallas mecanizadas en los componentes. Es por esta razón que se realizaron mediciones en dos sets con los mismos tipos de fallas. El hecho de comprobar la reproducibilidad de las fallas es importante debido a que de esta manera se puede verificar si es posible lograr el mismo comportamiento al replicar la misma falla en un rodamiento nuevo, con el fin de validar el tipo de falla que se está realizando.

El elemento de comparación que se utilizará será el espectro de envolvente en el cual se verá la forma de espectro y las distintas frecuencias excitadas tanto en el primer como en el segundo set de rodamientos. Las tres fallas principales que se buscan comparar son la falla en la pista interna, falla en pista externa y falla en elemento rodante.

- **Falla Pista Interna**

A continuación, se compararán los espectros obtenidos para ambos rodamientos con falla en la pista interior. Al comparar directamente los espectros de las *Figuras 5.2 y 5.6* correspondientes a las primeras y segundas mediciones respectivamente, se puede observar que la similitud entre ambos espectros no se aprecia a simple vista, sin embargo, si se analizan algunas de las frecuencias excitadas se pueden encontrar algunos aspectos en común. En el espectro de la *Figura 5.2* se ve que resalta la frecuencia de 311[hz] como una de las con mayor amplitud, dicha frecuencia corresponde a la 2x de la BPFÍ y una frecuencia de 34[hz] que corresponde a la 2x de la frecuencia de giro del eje. Por otro lado, en la *Figura 5.6* la presencia de la frecuencia BPFÍ y sus armónicos es predominante por sobre el resto de las frecuencias, además se ve la presencia de 17 [hz] la cuál es asociada al giro del eje.

Si bien la forma del espectro de ambos rodamientos no es exactamente la misma, existe la presencia en ambos rodamientos del armónico $2x$ de la BPFI y ambas amplitudes se encuentran dentro del mismo rango de magnitud por lo que se puede decir que la falla es válida para ambos rodamientos. Las diferencias presentes se pueden atribuir a que la forma y profundidad de la falla mecanizada variaron entre ambos rodamientos, lo que puede generar comportamientos relativamente distintos en ambos rodamientos.

- **Falla Pista Externa**

Para los rodamientos con fallas en sus pistas externas se comparan directamente los espectros de las *Figuras 5.3 y 5.7*. Ambos espectros muestran formas similares con prácticamente las mismas frecuencias excitadas, las cuales corresponden a la frecuencia de 117 [hz] asociada a la BPFO y sus respectivos armónicos aproximadamente hasta la $8x$. Los aspectos que cambian entre ambos rodamientos es la amplitud total de las frecuencias y que para el espectro del rodamiento correspondiente al segundo set las frecuencias $3x$ y $5x$ de la BPFO no se encuentran excitadas, esto nuevamente puede deberse a la forma de la falla mecanizada lo que genera distintos comportamientos vibraciones en el conjunto. Sin embargo, el nivel de similitud entre ambos rodamientos es tal que se puede decir que es posible reproducir el comportamiento para un rodamiento con falla en la pista externa.

- **Falla Elemento Rodante**

Al comparar los espectros de las *Figuras 5.4 y 5.9* correspondientes a la falla en un elemento rodante, se puede apreciar claramente que el patrón de comportamiento de los espectros se repite para ambos casos, la forma característica de los espectros se representa por medio de la excitación de las frecuencias de 56 [hz] que corresponde a la frecuencia BSF y sus respectivos armónicos hasta el $11x$ respectivamente los cuales disminuyen gradualmente su amplitud hasta desaparecer a medida que aumentan los rangos de frecuencia.

Dentro de todos los tipos de fallas analizados la falla en el elemento rodante fue la que presentó una mayor reproducibilidad debido a la poca diferencia obtenida entre los dos rodamientos medidos.

5.2.4. Niveles globales (RMS).

Con el fin de analizar el nivel de vibración que genera cada falla en el conjunto del banco de pruebas es posible comparar los niveles globales de vibración generado por cada rodamiento. Esta comparación se realizará en base a los rodamientos en buen estado y tomando en cuenta ambos sets de rodamientos, con el objetivo de observar las variaciones en los niveles vibratoriales presentes en cada falla.

Tabla 5.23: Comparación de niveles globales de amplitudes RMS para cada tipo de falla en ambos sets de mediciones.

Tipo de Falla	Set 1 [gE]	Set 2 [gE]
Sin falla	0,126	0,111
Pista Interna	0,365	0,493
Pista Externa	2,340	4,510
Elemento Rodante	0,830	0,719
Jaula de sujeción	-	0,121
Pista Externa	-	1,260
Longitudinal		
Pista Externa y Elemento Rodante	-	3,590
Pista interna y Elemento Rodante	-	0,812

Según la **Tabla 5.23** para el primer set de rodamientos se puede ver que como es de esperarse el rodamiento con menores vibraciones es el que tiene no presenta ningún tipo de falla. Luego lo siguen los rodamientos asociados a fallas en la pista interna y en elementos rodantes, mientras que la falla que presentó la mayor variación vibratorial fue la pista externa, la cual alcanzó hasta casi 20 veces el valor vibratorial obtenido por un rodamiento en buen estado.

En el segundo set de rodamientos se presentan 4 rodamientos adicionales en comparación al primer set, ya que se incluyeron nuevos tipos de falla en la pista externa, además de dos tipos de fallas combinadas y una nueva falla en la jaula de sujeción. Según los niveles globales obtenidos se ve que tanto el rodamiento en buen estado como aquel que presenta falla en la jaula de sujeción muestran valores de amplitud de la misma magnitud, de la misma manera como se vio en el primer set, le siguen las fallas en la pista interna y elemento rodante con niveles más elevados. De las fallas combinadas, la combinación pista externa y elemento rodante presentó los valores globales más altos llegando a 3,59 [gE] lo que corresponde a más de 30 veces el valor asociado al rodamiento sin fallas. Finalmente, la falla que presentó mayores niveles en este set fue la pista externa de la misma manera que en el primer set.

5.3. Análisis de mapas obtenidos

En esta sección se tiene toda la información proveniente de los espectros traducida a los mapas PRH-PRL, por lo que a continuación se procederá a entregar los resultados que muestran estos mapas y posteriormente a analizarlos con el fin de validar la utilización de este método para la identificación de fallas. Se evaluarán los resultados obtenidos según los distintos intervalos de frecuencia utilizados y se procederá con un análisis más profundo con el intervalo que muestre los resultados más representativos en cuanto al agrupamiento de mediciones según la falla presente.

Como ya se ha mencionado el objetivo principal de este análisis se centrará en verificar el uso de este tipo de mapas para la identificación y diagnóstico de los distintos tipos de fallas analizados, es decir, se busca encontrar una relación entre las fallas presentes y los distintos tipos de clusters entregados por los mapas. Se realizará un análisis sectorial de los mapas en el cual se buscará una asociación entre las fallas observadas y la ubicación de los clusters dentro del mapa. Por otro lado, se buscará evaluar el nivel de reproducibilidad del método realizando una comparación de los mapas entre el primer y segundo set de mediciones.

Las fallas en las que se centrará el estudio de mapas serán principalmente las mismas en las que se basó el estudio espectral de la *Sección 5.2*, enfocándose en el segundo set de mediciones. Cabe mencionar que algunas fallas vistas en la *Sección 5.2* no entregaron resultados representativos por lo que se omitirán en esta sección, en resumen, las fallas que califican para el análisis de mapas serán:

- Pista Externa Transversal
- Pista Externa Longitudinal
- Pista Interna
- Elemento Rodante
- Jaula
- Combinada pista externa y elemento rodante
- Rodamiento sin falla

5.3.1. Mapas obtenidos.

Según lo descrito en la **Sección 4.5.3** y al aplicar los distintos tipos de intervalos de frecuencia válidos para este método se obtuvieron los mapas PRH-PRL presentados a continuación, los cuales entregan distintas representaciones de las fallas bajo análisis. En base a los resultados obtenidos se evaluará cuál de los intervalos es el que entrega un mapa con las mejores características para someterlo a un análisis y evaluación de manera más profunda.

- **Intervalo Traspuesto**

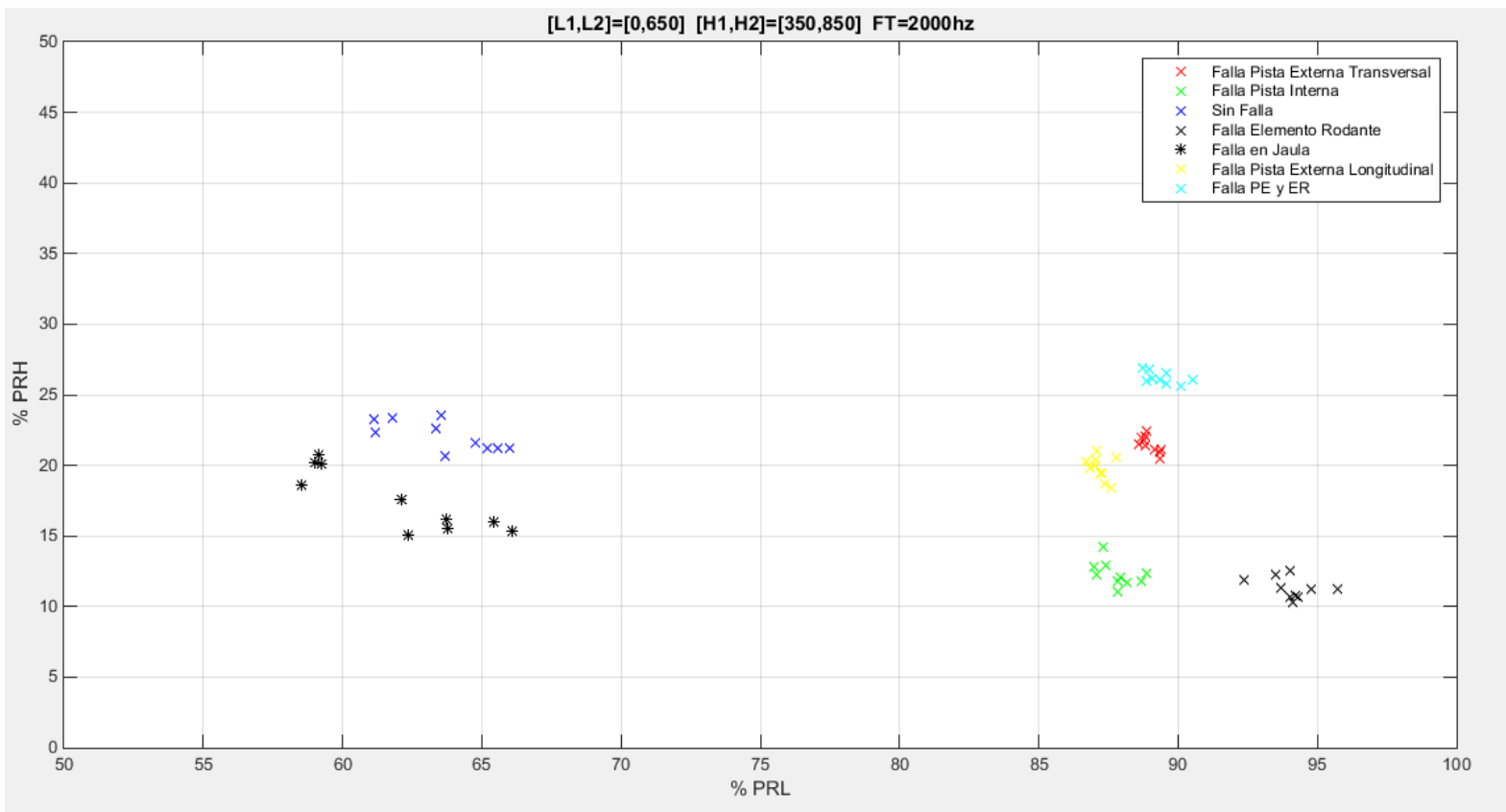


Figura 5.13: Mapa obtenido a partir de intervalos de frecuencia traspuestos.

El mapa correspondiente a los intervalos traspuestos muestra claramente que la distribución de los datos se encuentra bien definida en distintos clusters asociados a cada falla, se ve como la agrupación de las mediciones es capaz de diferenciar una falla de otra y

a la vez diferenciar las mediciones correspondientes a rodamientos en buen estado a los rodamientos con fallas en sus componentes. Cabe destacar que la **Figura 5.13** presenta un acercamiento en el cuarto cuadrante del mapa original con el fin de poder analizar de mejor manera las agrupaciones.

- **Intervalo Complementario**

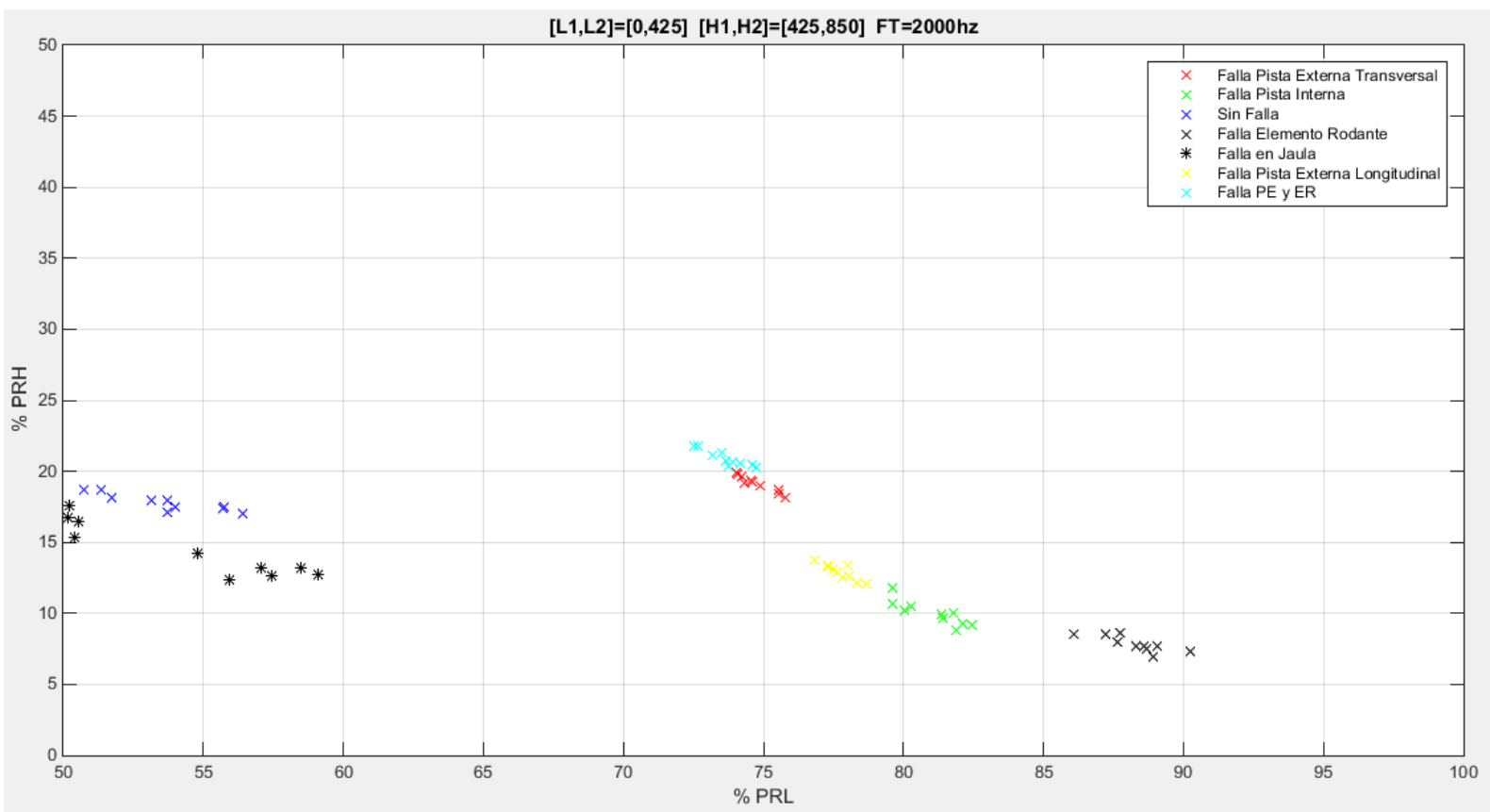


Figura 5.14: Mapa obtenido a partir de intervalos de frecuencia complementarios.

El mapa obtenido a través de un intervalo complementario de frecuencias muestra una representación y comportamiento más lineal de las mediciones en comparación con el intervalo observado anteriormente. En este caso se puede ver que incluso algunas mediciones correspondientes a un tipo de falla llegan a mezclarse con agrupaciones asociadas a otras fallas, además es posible notar que las distancias relativas entre ciertos cluster son menores por lo que las agrupaciones de datos se sitúan más cerca unas de las otras.

- Intervalo Separado

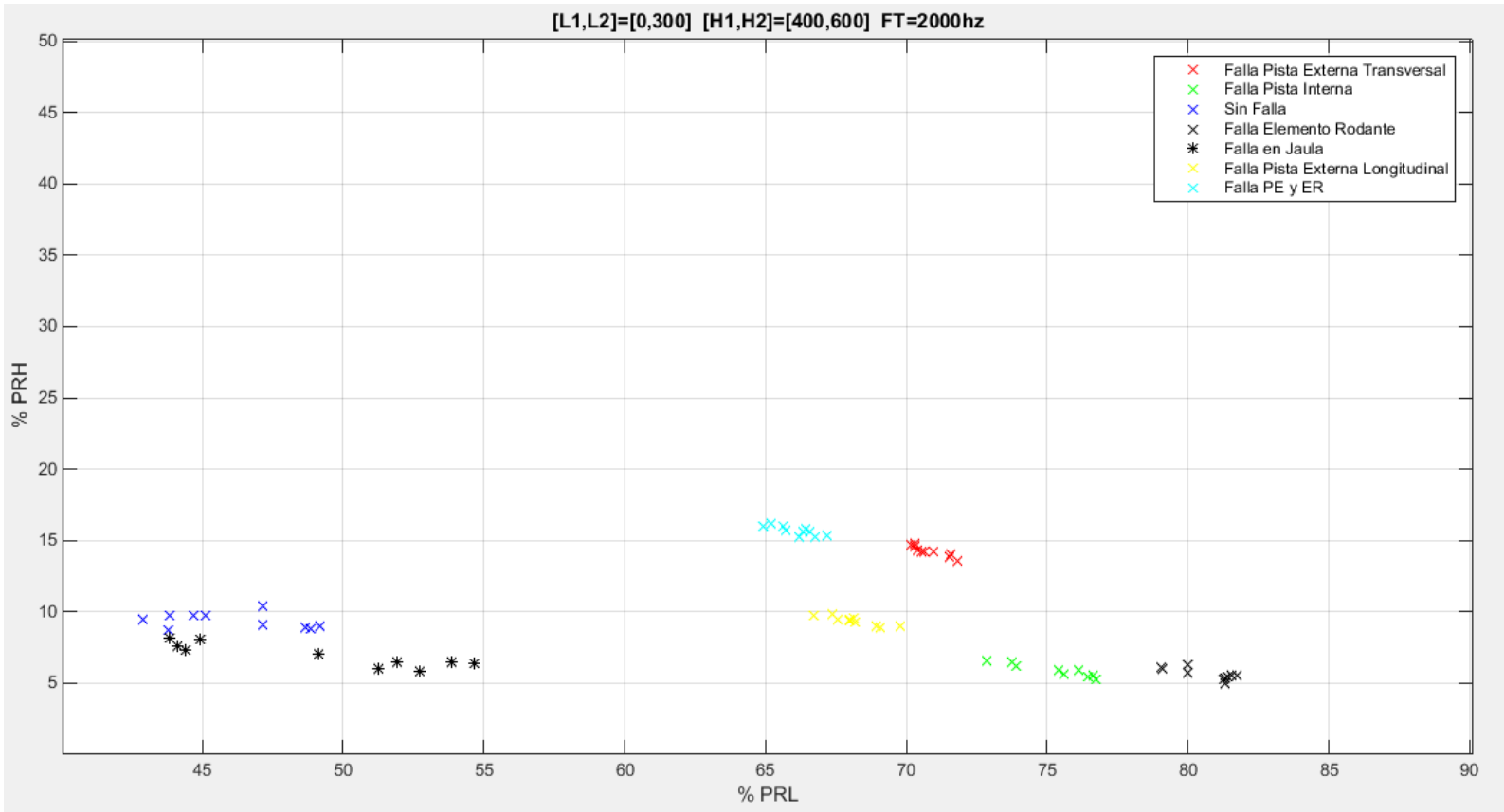


Figura 5.15: Mapa obtenido a partir de intervalos de frecuencia separados.

A través de este intervalo se obtuvo un mapa que muestra un comportamiento similar al obtenido con intervalos complementarios, en el que los datos adoptan una tendencia lineal de agrupamiento en cada uno de los clusters visibles, sin embargo, a diferencia del intervalo anterior, al aplicar intervalos separados se observa que existe separación entre los grupos asociados a distintas fallas, lo cual indica una mejora en la representatividad de los datos en el mapa respecto del mapa anterior.

Al observar los tres mapas obtenidos se llegó a la conclusión de que en mapa que entrega la mejor representación de la distribución de las fallas es el mapa obtenido a través de los intervalos traspuestos el cuál se ve en la **Figura 5.13**, ya que como se mencionó anteriormente muestra los grupos de mediciones bien definidos y una distribución de los clusters adecuada para ser sometido a un análisis más profundo de este método.

5.3.2. Asociación de fallas a sectores del mapa.

A continuación, se procederá a estudiar el comportamiento de las mediciones obtenidas en el mapa con intervalo traspuesto de acuerdo al sector en el cual estas se presentan dentro del mapa. Lo esencial es encontrar una relación entre las fallas presentes en las distintas agrupaciones y el lugar que estas ocupan dentro de mapa, y de esta forma poder definir un criterio de diagnóstico para diferenciar el estado de un rodamiento mediante este método.

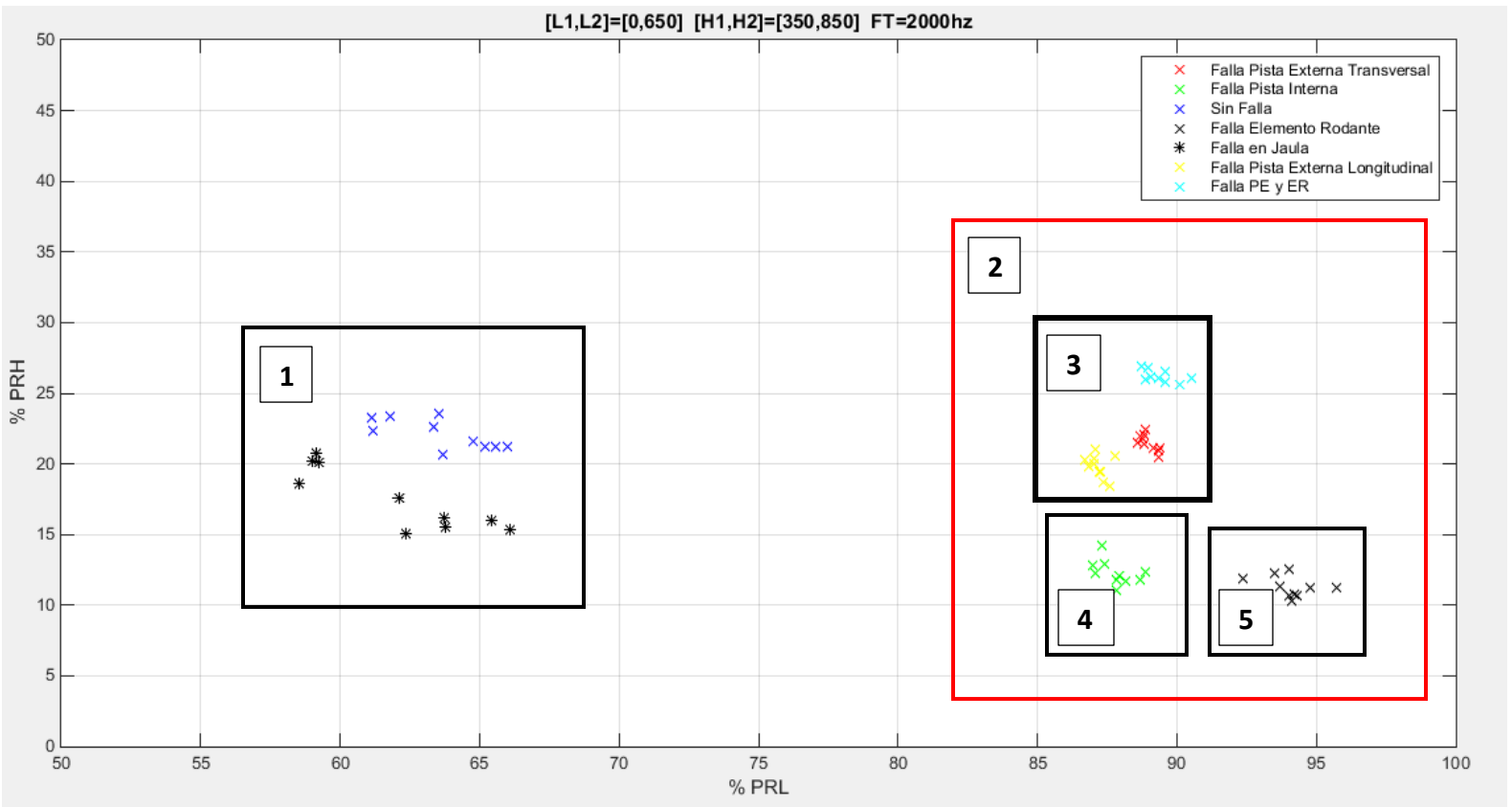


Figura 5.16: Diferenciación de sectores del mapa PRH-PRL.

Tomando como base el mapa que muestra la **Figura 5.13** y analizando los grupos en los cuales se diferencian las mediciones se logró hacer la distinción de 5 zonas dentro del mapa con el fin de clasificar los clusters presentes.

En primer lugar, se puede observar una división general de las agrupaciones en dos zonas principales que abarcan más de un cluster cada una. Como muestra la **Figura 5.16** estos sectores corresponden a las zonas 1 y 2, en las cuales la zona 1 abarca a los rodamientos sin falla y con falla en la jaula de sujeción. Por otro lado, la zona 2 está constituida por los clusters correspondientes a los rodamientos con fallas presentes en las pistas internas, externas y elementos rodantes.

Al comparar los tipos de fallas presentes en ambas zonas es que se pudo observar que los rodamientos presentes en la zona 1 muestran los niveles globales de vibración más bajos de todas las mediciones realizadas con valores menores a 0,15 [gE], en cambio los rodamientos presentes en la zona 2 corresponden a aquellos con niveles de vibración más elevados, los cuales ya podrían ser clasificados como rodamientos defectuosos, tomando valores globales desde los 0,5 [gE] y llegando a niveles superiores a 4,5 [gE]. De esta manera ya se tiene una primera noción acerca de a qué áreas del mapa se les puede asociar una característica propia del estado en el cual se encuentran los rodamientos bajo análisis.

Por otro lado, dentro de estas zonas es posible encontrar subdivisiones en cuanto a las agrupaciones de datos. Si se observa la zona 2 presente en la **Figura 5.16** se puede ver que esta se compone de otras tres zonas principales, las cuales corresponden a los sectores 3, 4 y 5 como se muestra en la misma figura. Al analizar estas zonas, se puede ver que la zona 3 está compuesta por 3 clusters los cuales están todos asociados a fallas en la pista externa, la zona 4 corresponde a mediciones con falla en la pista externa mientras que finalmente la zona 5 incluye los rodamientos con fallas presentes en los elementos rodantes.

Dentro de la zona 3 se encuentran las mediciones asociadas a falla en la pista externa en sentido longitudinal, transversal y una falla combinada entre pista externa y elemento rodante. Si bien uno de estos rodamientos presenta una falla en el elemento rodante además de la falla en la pista externa, se ve que la falla en la pista externa predomina a nivel vibracional por sobre la falla en el elemento rodante tal cual como se abordó en la **Sección 5.2.2**, es por esta razón que este rodamiento logra situarse dentro de la zona del mapa característica para las fallas en la pista externa.

Ahora, en la zona 1 del mapa se ven presentes las mediciones correspondientes a los rodamientos con falla en la jaula de sujeción y a los rodamientos en buen estado, si bien

es de esperar que estos dos rodamientos se encuentren en zonas distintas, el resultado obtenido muestra que ambos rodamientos coinciden en el mismo sector, este comportamiento puede ser asociado al hecho de que el rodamiento con falla en la jaula de sujeción presenta bajos niveles vibracionales y un espectro de frecuencias similar al obtenido en el rodamiento sin falla, tal como se mostró en la *Sección 5.2.2* y al comparar las *Figuras 52 y 59*, de esta manera la energía espectral de ambas mediciones llega a ser muy parecida lo que tiene como consecuencia que estas mediciones entreguen clusters cercanos entre sí. Como se mencionó en secciones anteriores esto se debe principalmente a que la falla en jaulas en este tipo de rodamientos no logra generar los efectos vibracionales necesarios para ser diagnosticada como una falla relevante en el estado del rodamiento.

De esta manera es posible llegar a la asociación directa de las zonas especificadas con rangos aproximados del mapa en el cual se encuentran sus clusters respectivos:

Tabla 5.24: Rangos de coordenadas aproximadas para zonas de clusters.

	% PRH	% PRL	Comportamiento/Falla asociado
Zona 1	10 - 30	56 - 68	Bajos niveles de vibración
Zona 2	5 - 35	83 - 97	Altos niveles de vibración
Zona 3	16 - 30	85 - 93	Pista Externa
Zona 4	8 - 15	81 - 90	Pista Interna
Zona 5	8 - 15	92 - 97	Elemento Rodante

Los límites de coordenadas presentados en la *Tabla 5.24* son valores aproximados basados en los resultados obtenidos en la *Figura 5.16* por lo que se encuentran sujetos a posibles variaciones. Estos límites representan una noción de los sectores en los que se sitúan las mediciones de cada falla especificada.

5.3.3. Comparación con rodamientos en buen estado.

En esta sección se procederá a realizar una comparación directa entre los clusters entregados por los rodamientos en buen estado y los rodamientos con las distintas fallas que se encuentran bajo estudio. Lo que se busca es realizar un seguimiento de la posición que ocupan los rodamientos dentro del mapa una vez que estos han sido intervenidos por algún tipo de falla y de esta manera lograr encontrar zonas del mapa que ayuden a indicar a primera vista la presencia de fallas en el rodamiento.

Para lograr lo mencionado anteriormente es necesario fijar un punto de referencia en el cual basarse para estudiar los diferentes desplazamientos de las señales entregadas por el mapa que se encuentran asociadas a fallas. Dicho punto de referencia serán las mediciones del rodamiento que no presenta ninguna falla, se tendrá en cuenta la premisa de que este es el comportamiento característico de un rodamiento en buen estado con el fin de poder comparar las demás mediciones.

Con el fin de tener una noción más exacta de las zonas en las que se encuentra cada medición se ha calculado el centroide de cada cluster para así representar de mejor manera las ubicaciones de cada conjunto de mediciones y realizar un análisis concreto de cada sector.

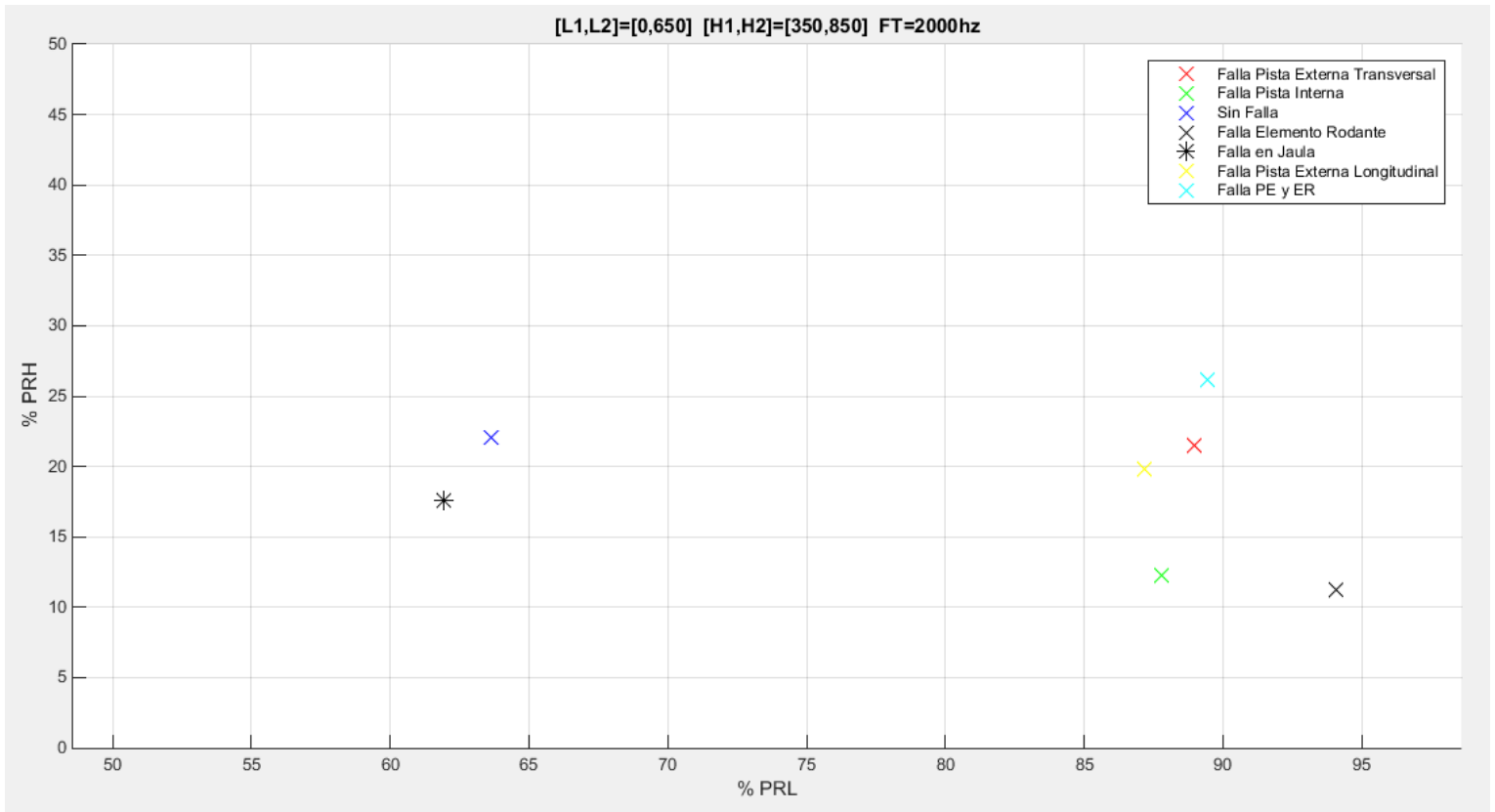


Figura 5.17: Centroides de cada conjunto de mediciones realizado.

En la **Figura 5.17** se observa la representación de los centroides obtenidos para cada conjunto de mediciones realizadas. Dichos puntos representan una ubicación promedio de todas las mediciones realizadas, en base a estos puntos se realizará la comparación de los rodamientos con fallas presentes respecto de los rodamientos en buen estado, a continuación, se muestran las coordenadas obtenidas para cada centroe especificado en la **Figura 5.17**.

Tabla 5.25: Coordenadas de centroides para cada tipo de rodamiento.

Rodamiento	%PRL	%PRH
Falla Pista Externa Trans.	88.9806	21.4982
Falla Pista Interna	87.8055	12.3044
Sin falla	63.6188	22.0895
Falla Elemento Rodante	94.0692	11.2808
Falla Jaula	61.9438	17.5448
Falla Pista Externa Long.	87.1890	19.8256
Falla Pista Externa y Elemento Rodante	89.4346	26.1844

Analizando los centroides obtenidos se puede decir que todos los rodamientos poseen porcentajes relativamente similares de energía espectral de alta frecuencia (% PRH), es decir que estos valores se mueven en un rango relativamente bajo de 15 puntos porcentuales aproximadamente, a diferencia de los rangos de energía espectral de baja frecuencia (% PRL) que es donde más diferencia existe entre los rodamientos en buen estado y los rodamientos con fallas presentes, los cuales se mueven en un rango aproximado de 30 puntos porcentuales según los valores mostrados en la **Tabla 5.25**.

En base a lo anterior es correcto señalar que los rangos de energía espectral de baja frecuencia (% PRL) son los que finalmente son capaces de determinar el estado de falla del rodamiento, es decir, los rodamientos con fallas presentes muestran valores de porcentaje PRL más elevados que aquellos que se encuentran en buen estado, tal como se muestra en la **Tabla 5.25** los rodamientos con fallas en las pistas interna, externa y elemento rodante muestran los niveles más altos de energía espectral de baja frecuencia (% PRL), la única excepción a esta afirmación es el caso del rodamiento con falla en la jaula de sujeción ya que como se mencionó anteriormente el nivel de falla en este componente no logra generar los niveles vibracionales necesarios para ser considerado como un rodamiento defectuoso.

Lo mencionado anteriormente es de esperar ya que al analizar los espectros vibracionales en la **Sección 5.1.2** se ve que las principales diferencias de amplitud se dan en

los rangos de baja frecuencias de los espectros, entre los 0 [hz] y los 600 [hz] aproximadamente.

Otro parámetro para evaluar el comportamiento los rodamientos con fallas es el cálculo de la distancia porcentual que existe entre los centroides de cada rodamiento con falla con respecto al centroide correspondiente al rodamiento en buen estado, de esta manera es posible tener una noción de cómo es desplazamiento de los clusters sobre el mapa PRH-PRL cuando se presenta una falla. En la **Figura 5.18**, se presentarán las distancias existentes entre el centroide de las mediciones del rodamiento sin falla y los centroides correspondientes al resto de los rodamientos con presencia de fallas.

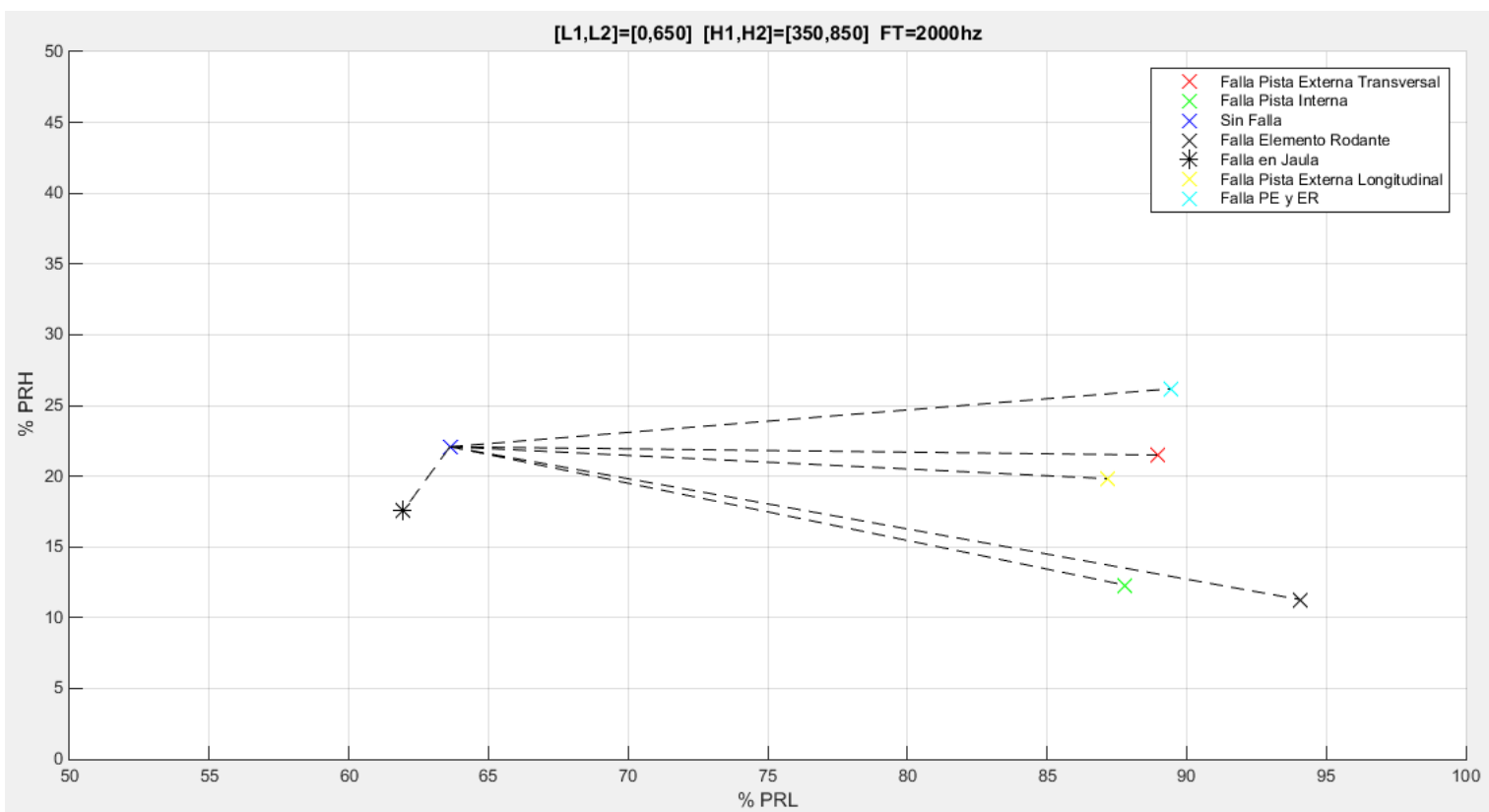


Figura 5.18: Representación de las distancias entre centroides a calcular.

Tabla 5.26: Valores de las distancias porcentuales representadas en la Figura 5.18.

Rodamiento con falla	Distancia %
Pista Externa Trans.	25.3687
Pista Interna	26.0910
Elemento Rodante	32.3119
Jaula de sujeción	4.8435
Pista Externa Long.	23.6787
Pista Externa y Elemento Rodante	26.1385

La **Tabla 5.26** muestra los valores de las distancias de los centroides con respecto al rodamiento en buen estado, según estos valores se puede observar que los rodamientos con fallas relevantes se encuentran considerablemente más alejados del rodamiento en buen estado, dichas distancias varían entre los 23 y 32 puntos porcentuales. Por las razones que ya se han mencionado la falla presente en la jaula de sujeción es el rodamiento que más se acerca al rodamiento en buen estado. De esta manera se puede confirmar que los rodamientos con presencia de fallas se encuentran agrupados en zonas diferentes y a la vez alejadas del sector en el cual se encuentran los rodamientos en buen estado y que muestran bajos niveles vibracionales.

5.3.4. Diferenciación de fallas por medio de método “K-means”.

Hasta este punto todos los análisis a los mapas PRH-PRL se han realizado con el conocimiento previo acerca de cuáles mediciones pertenecen a cada tipo de rodamiento bajo estudio, es decir, se sabe de antemano las fallas asociadas a cada medición realizada. Es por esta razón que a continuación se realizará un análisis de agrupamiento de datos partiendo de la base que se desconoce el rodamiento de origen de cada medición y por medio de un algoritmo de agrupamiento se intentará separar dichas mediciones en grupos característicos.

Como se mencionó en la *Sección 3.9* los métodos de agrupamiento de datos son ampliamente utilizados en diversas áreas del tratamiento de la información, para este caso se utilizará uno de los métodos de agrupamiento más comunes para este tipo de datos, el cual corresponde al método de agrupamiento “K-means” el cual como se plantea en [12] consiste en la partición de un grupo de datos en subconjuntos por medio de la iteración y cálculo de centroides en el mapa PRH-PRL. Para este caso por medio de un software de análisis numérico se realizará el algoritmo iterativo el cual generará n centroides de partida arbitrarios y asignará los puntos de cada medición al centroide más cercano generando así n clusters, de esta manera se recalcula el centroide de los nuevos clustes y se vuelve a realizar la iteración.

Para este método se deberán ingresar ciertos parámetros de partida, los cuales son necesarios para la ejecución del algoritmo, estos parámetros corresponden a el conjunto de vectores a agrupar, es decir el total de mediciones realizadas, y el número aproximado de clusters a encontrar, el cual está dado por los tipos de fallas existentes en los rodamientos.

La *Figura 5.19* que se muestra a continuación corresponde al mismo mapa obtenido de los rangos traspuestos que se muestra en la *Figura 5.13* con la diferencia de que en este caso las mediciones no se encuentran demarcadas según el rodamiento del cual provienen, es decir, se desconoce el rodamiento de origen y la falla a la cual están

asociadas. De esta manera solo se tiene un conjunto general representado en el mapa PRH-PRL de todos los datos obtenidos.

Realizar este tipo de análisis es de gran interés ya que normalmente cuando se hacen análisis de vibraciones en la industria no se sabe de antemano cual es el tipo de falla presente en el rodamiento bajo estudio, es por esta razón que se necesita saber si el método de los mapas PRH-PRL es capaz de diferenciar los conjuntos de mediciones para cada rodamiento.

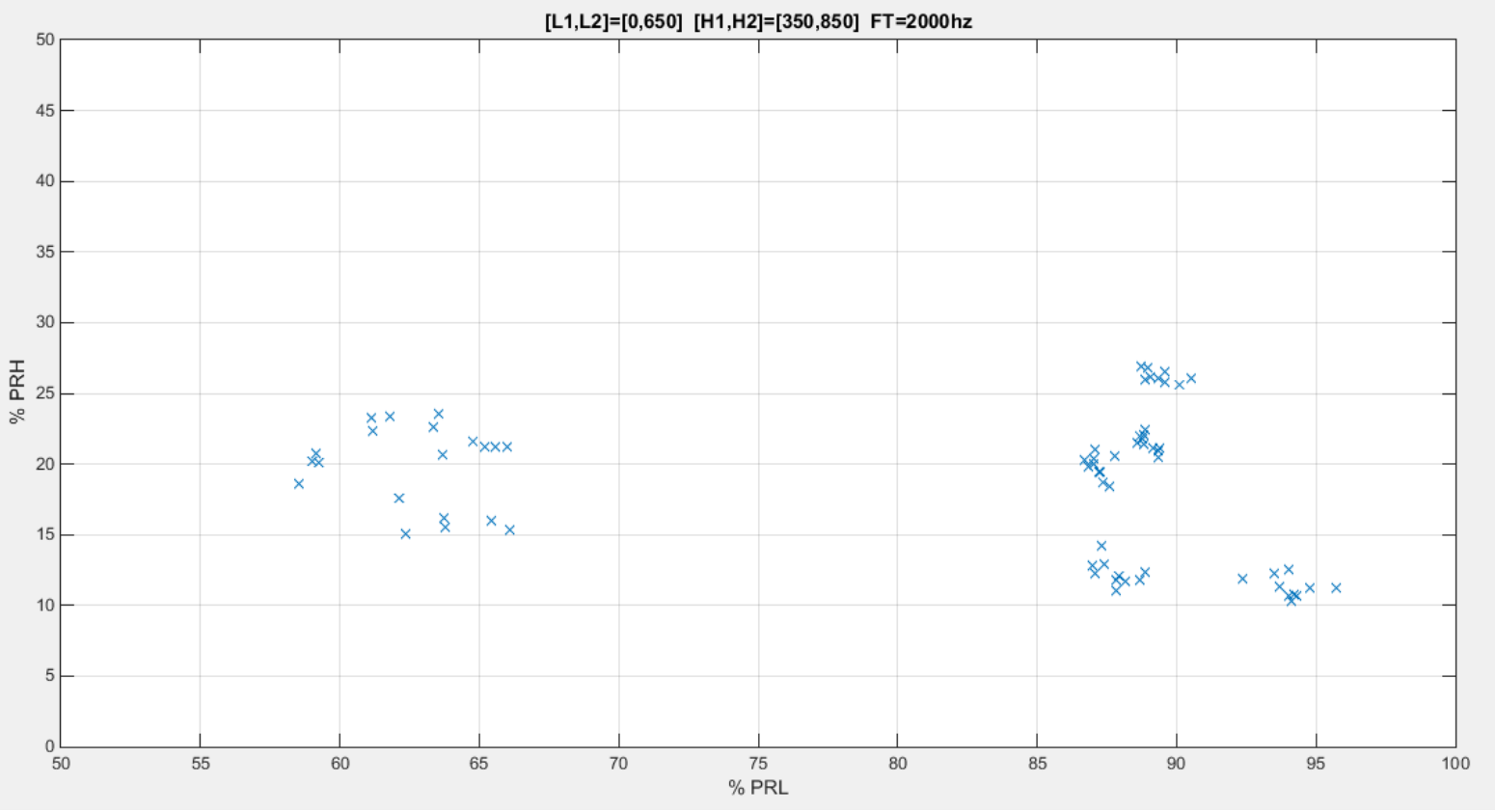


Figura 5.19: Conjunto de mediciones sin denominación de origen.

Como se mencionó anteriormente la **Figura 5.19** muestra la forma en la que se vería un mapa PRH-PRL para el caso en el que se desconoce el origen de la medición, es decir, cuando no se sabe el tipo de defecto que presenta el rodamiento que se está monitoreando. En base a esta representación es que se realizará la aplicación de método

“K-means” para el reconocimiento y separación de cada uno de los clusters que podrían estar presentes en el conjunto de mediciones.

En la **Figura 5.20** se muestran los clusters obtenidos una vez que se ha aplicado el método de agrupamiento, para tener una noción acerca de la certeza de los resultados es que se procede a comparar la figura mencionada con el mapa PRH-PRL de la **Figura 5.13** y de esta manera tener un punto de comparación válido. Además, también se realizará una comparación en base a los centroides de los clusters tanto de los obtenidos por el método “K-means” como de los centroides ya conocidos de la **Figura 5.17**.

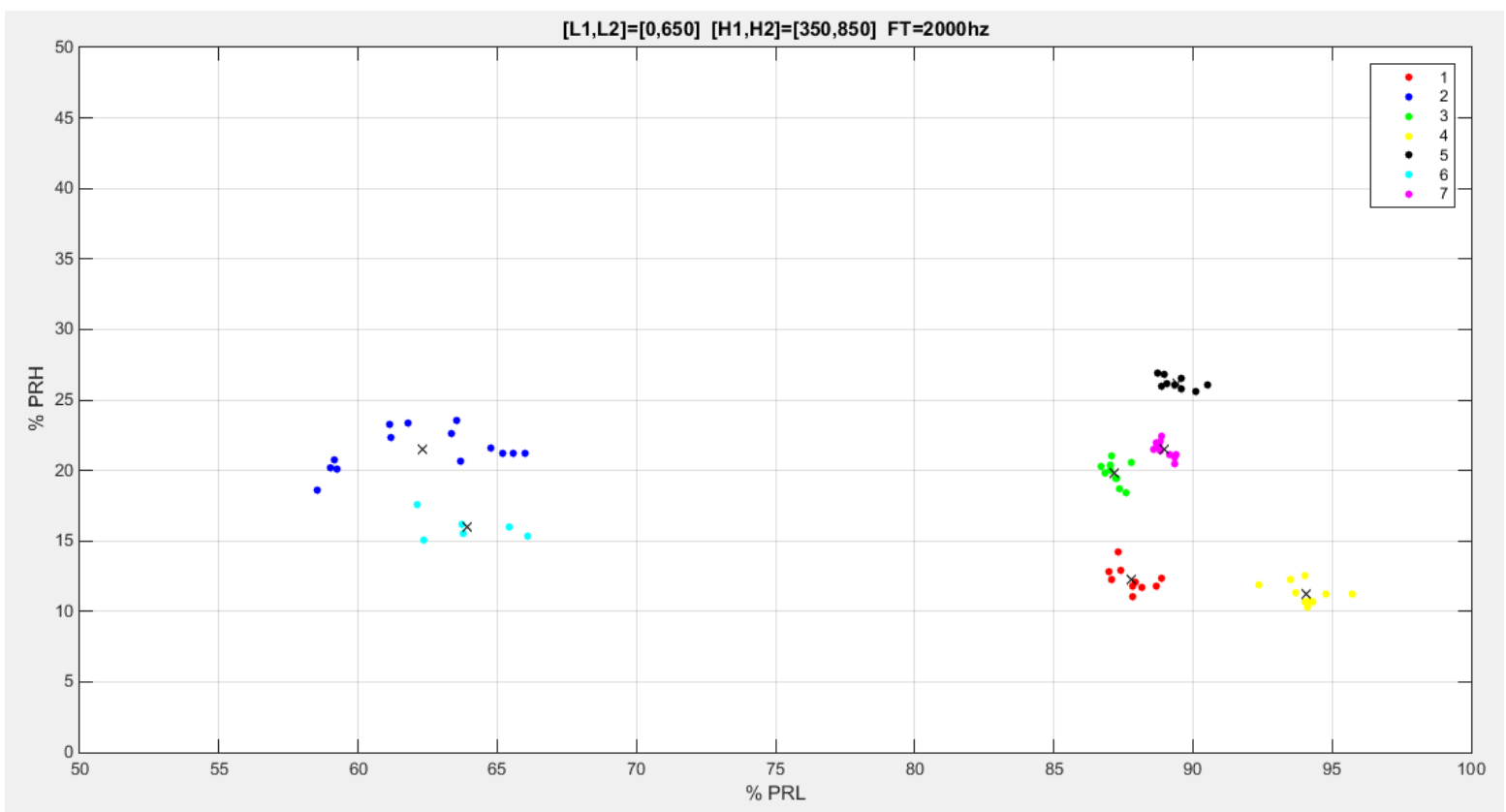


Figura 5.20: Resultado de agrupamiento obtenido a través de método “K-means”.

Tabla 5.27: Coordenadas de centroides obtenidos por método “K-means”.

Rodamiento	%PRL	%PRH
Falla Pista Externa Trans.	88.9806	21.4982
Falla Pista Interna	87.8055	12.3044
Sin falla	62.2934	21.4661
Falla Elemento Rodante	94.0692	11.2808
Falla Jaula	63.9197	15.9695
Falla Pista Externa Long.	87.1890	19.8256
Falla Pista Externa y Elemento Rodante	89.4346	26.1844

La *Figura 5.20* muestra los resultados que entregó la aplicación del método “K-means”, al comparar este mapa con el mapa que muestra la *Figura 5.13* se ve claramente que los clusters encontrados por el algoritmo en la *Figura 5.20* coinciden en su gran mayoría con los clusters vistos en la *Figura 5.13* en los cuales ya se conocía de antemano los rodamientos de origen de dónde provenía cada medición. Al realizar la comparación directa de ambas figuras se observa que los únicos clusters que difieren entre sí son los clusters correspondientes al rodamiento sin falla y al rodamiento con defecto en la jaula de sujeción, de acuerdo a la *Figura 5.20* ciertas mediciones que correspondían al rodamiento con falla en la jaula de sujeción fueron agrupadas en el cluster asociado al grupo correspondiente al rodamiento en buen estado. Este tipo de confusión entre estos tipos de rodamientos ya se ha visto de manera recurrente durante todo el análisis, por lo que en este caso se vuelve a confirmar que la falla en la jaula de sujeción no logra reunir las condiciones para ser diferenciada en su totalidad de un rodamiento en buen estado. Por otro lado, el resto de los clusters bajo análisis obtenidos por el método “K-means” coincidieron de manera efectiva con los grupos de mediciones ya conocidos en la *Figura 5.13*.

Para tener una mejor visualización de los cambios en los clusters es posible observar la *Tabla 5.27* que muestra las coordenadas de los centroides de cada grupo obtenido por medio del algoritmo “K-means”, al comparar estas coordenadas con las coordenadas de los centroides de la *Tabla 5.25* se ve que los rodamientos en buen estado y

con falla en la jaula de sujeción entregaron cambios en las coordenadas de sus respectivos centroides, mientras que las demás fallas asociadas a las pistas internas, externas y elemento rodante mantuvieron los mismo valores. Esto se debe a que como se mencionó anteriormente el algoritmo “K-means” asoció ciertas mediciones correspondientes a la falla en la jaula al grupo de mediciones del rodamiento en buen estado.

Si bien el método “K-means” es capaz de diferenciar las mediciones del mapa PRH-PRL en grupos específicos, este no es capaz de asociar directamente cada uno de esos grupos al tipo de falla presente en cada rodamiento. Pese a esto, cabe destacar que el método de mapas PRH-PRL entrega una distribución de datos con las características necesarias para realizar un análisis de diferenciación entre cada grupo de mediciones y lograr una clasificación adecuada de cada una de ellas.

5.3.5. Reproducibilidad de mapas en mediciones I y II.

Un factor importante para el análisis de mapas, tal como se vio para el análisis espectral en la **Sección 5.2.3**, es la comparación de resultados entre el primer y el segundo set de rodamientos bajo estudio. La realización de esta comparación es fundamental para lograr observar el nivel de reproducibilidad que posee el método PRH-PRL de acuerdo a los tipos de fallas mecanizadas, es decir, como cambian los mapas de acuerdo a set de rodamientos diferentes con las mismas fallas mecanizadas.

Para esta comparación se analizarán las fallas que presentan más impacto a nivel vibracional en relación a los rodamientos en buen estado. Las fallas bajo análisis serán pista interna, pista externa transversal y elemento rodante, además de la comparación de dos rodamientos en buen estado. La idea principal de esta comparación es utilizar los mismos parámetros asociados a las mediciones y a los mapas PRH-PRL para cada uno de los sets de rodamientos, con el fin de solo observar el efecto de la falla mecanizada en cada rodamiento. Por lo anterior se mantendrán los mismos rangos de análisis en los mapas para cada medición, así como las mismas condiciones de mediciones en el banco de pruebas para ambos sets.

A continuación, se representarán los mapas por separado para ambos sets de rodamientos para luego proceder realizar una comparación de ambos conjuntos de mediciones dentro del mismo mapa para así obtener una comparación visual del cambio en ambos sets.

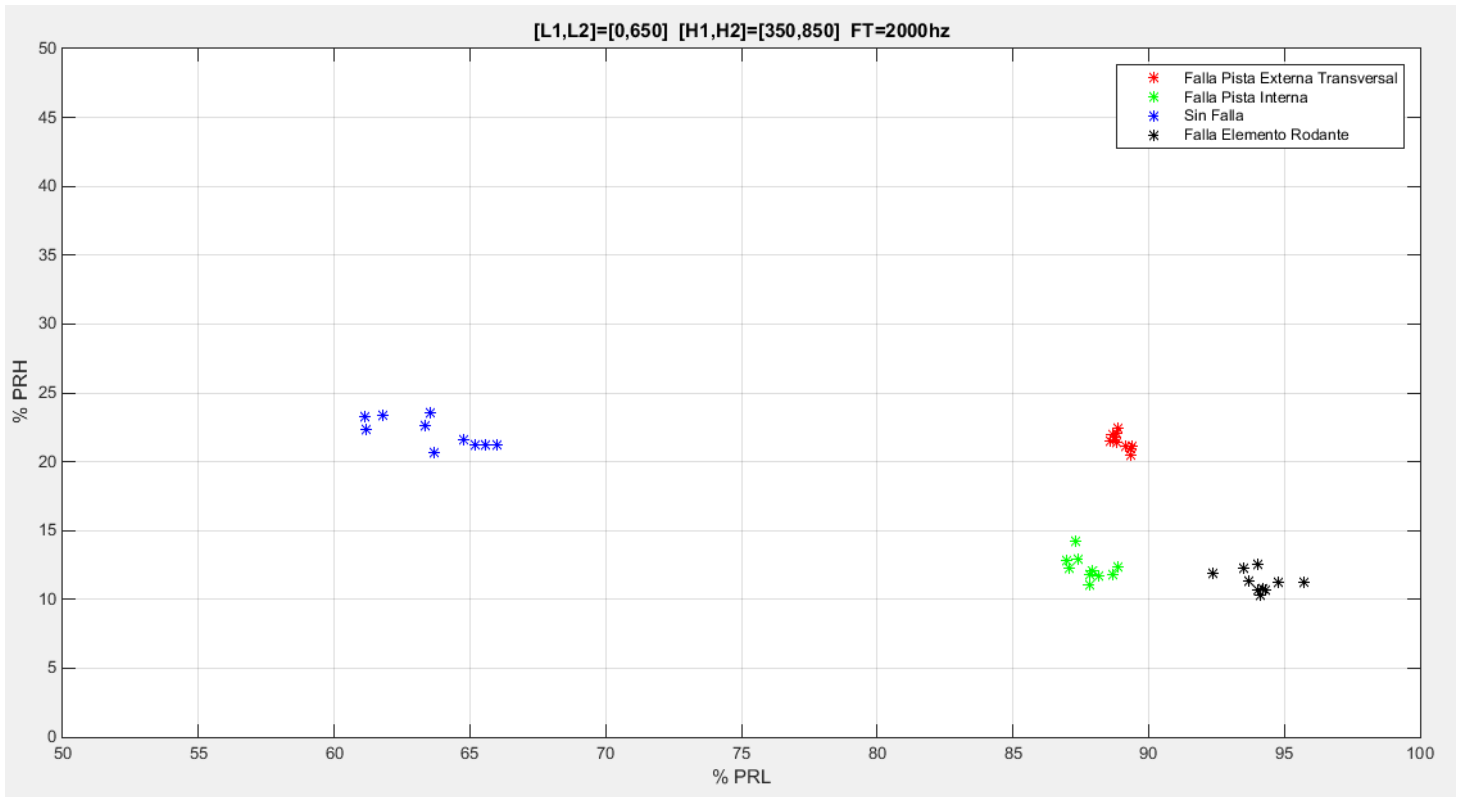


Figura 5.22: Mapa obtenido con mediciones correspondientes al segundo set de rodamientos

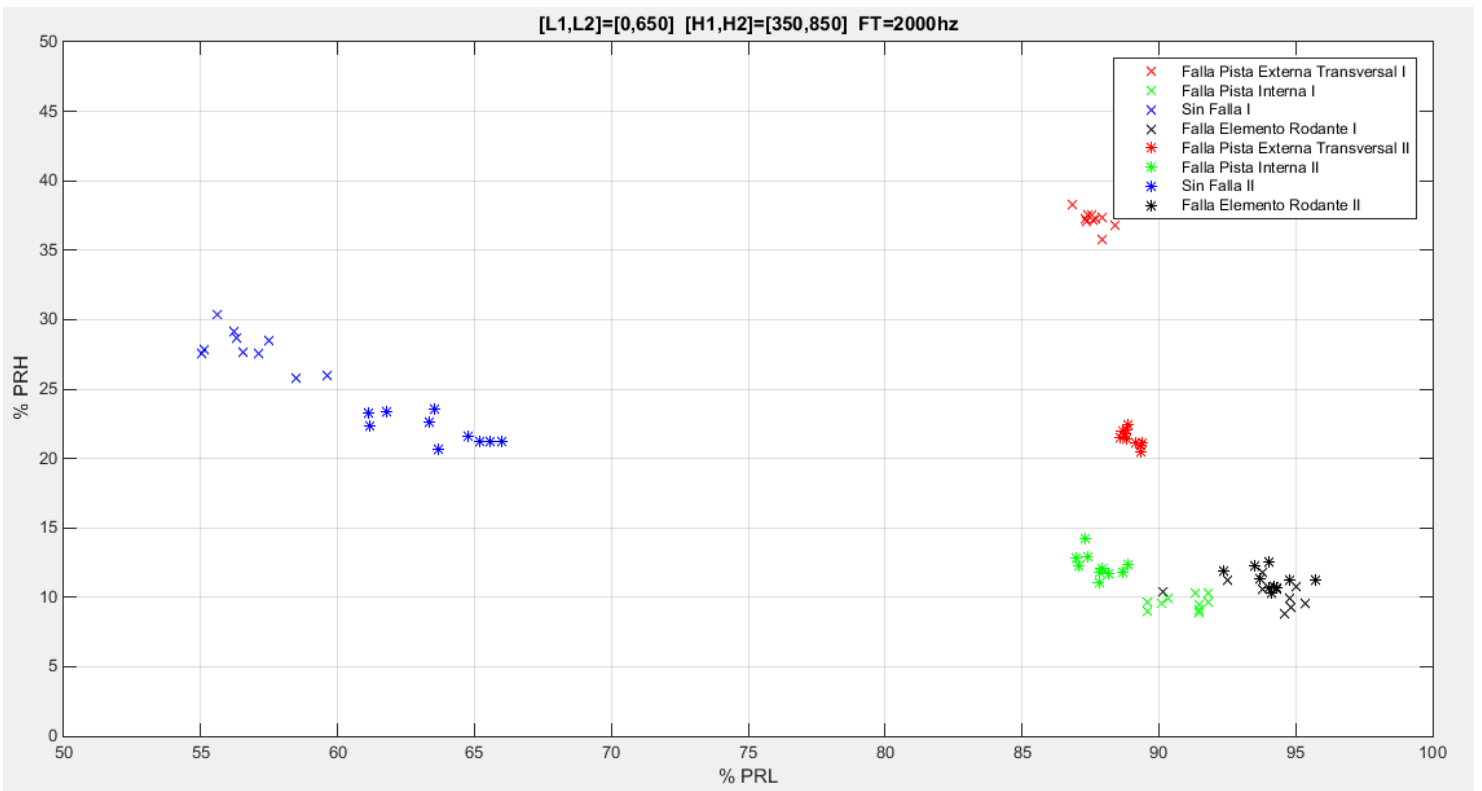


Figura 5.23: Mapa de comparación para ambos sets de rodamientos.

Al observar la **Figura 5.23** se puede ver la diferencia existente entre las ubicaciones de las mediciones de ambos sets, si bien en general los sectores en los que se encuentra cada tipo de falla son relativamente similares, se vio la existencia de desplazamientos entre las mediciones de algunas fallas. En la **Figura 5.23** las mediciones correspondientes al primer set de muestran como “x” mientras que las del segundo set se denotan con el símbolo “*”, al comparar todas las fallas de ambos sets se puede determinar que las fallas en el elemento rodante (color negro) y las fallas en la pista interna (color verde) fueron las fallas que menos desplazamiento tuvieron en el mapa, se puede ver que en el caso de la falla en el elemento rodante las mediciones de ambos sets se encuentran sobrepuestas en el mismo cuadrante del mapa, mientras que para la falla en la pista interna se vio un leve desplazamiento.

En el caso de las mediciones de los rodamientos en buen estado (color azul), estas sufrieron un desplazamiento de ubicación en el mapa, pero aun así ambas se mantuvieron en el mismo sector. La falla que experimentó un mayor desplazamiento fue la asociada a la pista externa desplazándose alrededor de casi 15 puntos porcentuales en el eje PRH, sin embargo, se mantuvo el valor de los niveles de baja frecuencia PRL.

Si bien en estas fallas muestran cambios de posición entre ambos sets cabe destacar que pese a los desplazamientos estas se mantuvieron dentro de las mismas zonas de niveles vibratoriales planteadas en la **Sección 5.3.2**, es decir que los rodamientos en buen estado permanecieron dentro de la zona 1 que fue asociada a rodamientos con bajos niveles vibratoriales mientras que los rodamientos con presencia de fallas se mantienen dentro de la zona 2 especificada en dicha sección la cual se asocia con niveles más elevados de vibración.

Las diferencias entre los mapas obtenidos en las **Figuras 5.21 y 5.22** son atribuibles a factores que ya se han mencionado con anterioridad a lo largo del análisis, principalmente relacionados tanto al banco de prueba como a falla mecanizada en cada rodamiento, dentro de dichos factores se encuentra la alineación entre los descansos de los rodamientos, los niveles de tensión de la correa de distribución, la rigidez del banco, tamaño y forma de cada falla mecanizada etc.

Como se mencionó anteriormente, si bien existen desplazamientos en las mediciones de cada set, los resultados obtenidos se encuentran dentro de las zonas del mapa esperadas para los niveles de vibración que muestra cada rodamiento, lo que se puede traducir en un nivel de reproducibilidad aceptable para las fallas mecanizadas considerando los factores que pueden afectar la toma de mediciones.

CONCLUSIONES

La realización de este trabajo se guiaba bajo de idea de evaluar y verificar la validez de la aplicación del método de los Mapas PRH-PRL en la detección y diagnóstico de fallas en los principales componentes de rodamientos utilizados en sistemas mecánicos giratorios. Para lograr lo mencionado anteriormente se ha realizado un estudio relacionado con las teorías y métodos clásicos de diagnóstico de fallas en rodamientos además de un análisis enfocado en torno al funcionamiento del método de Mapas PRH-PRL y a la aplicación de este.

Basándose en lo anterior se han obtenido una serie de resultados de los que derivan un número de conclusiones para sintetizar lo realizado en este trabajo.

- **Estudio de fallas presentes.**

En primer lugar, para el estudio y diagnóstico de fallas para el rodamiento auto-alineantes modelo 1207, se utilizó uno de los métodos más usados en la industria para la detección y diagnóstico el cual corresponde al análisis espectral de vibraciones. Normalmente para este tipo de análisis es común utilizar los espectros de frecuencias asociados a la velocidad o aceleración dependiendo del caso, sin embargo, dadas las condiciones presentes en el banco de pruebas y a la metodología de montaje de los descansos y rodamiento es que factores externos al estado de los rodamientos se vieron reflejados en los espectros de velocidad aceleración.

Debido a lo anterior es que se decidió utilizar los espectros de envolvente de frecuencia, los cuales según la *Sección 3.8* son capaces de demodular las señales de frecuencias y de esta manera aislar la mayor parte de las vibraciones ajenas a las de interés, que en este trabajo corresponden a las asociadas directamente a las fallas en los rodamientos. Por esta razón es que los espectros de envolvente son los que mostraron los mejores resultados y se optó por definir este tipo de espectros para todo el análisis espectral.

Una vez definido el tipo de espectro a utilizar para el estudio, se obtienen las mediciones para cada una de las fallas realizadas en los componentes principales (pista

externa, pista interna, elemento rodante, jaula de sujeción) y compararlos según la teoría de diagnóstico de fallas presente en las *Secciones 3.6 y 3.7*. Los espectros que se presentan en la *Sección 5.1* muestran excitadas en su mayoría las frecuencias características asociadas a cada falla (BPFO, BPFI, BSF) descritas en la *Sección 4.3.4*, por lo que se puede confirmar lo expuesto en la teoría de frecuencias características para este modelo de rodamiento. Por lo tanto, dentro de los componentes bajo estudio, los que obtuvieron un comportamiento esperado según la teoría de diagnóstico de fallas en base a espectros vibracionales fueron las pistas internas, externas y elementos rodantes, mientras que el componente de la jaula de sujeción, para este modelo específico de rodamiento, no logró mostrar el comportamiento espectral esperado, debido a que la jaula del rodamiento bajo estudio al ser poco compacta en relación al resto de los componentes con los cuales interactúa, no logra ser influyente a nivel vibracional.

Por otro lado, se observó que los efectos vibracionales visibles en el banco de pruebas producidos por las distintas fallas fueron considerables, ya que se percibió la aparición de ruidos y movimientos en el banco claramente asociados a los rodamientos sin la necesidad de realizar pruebas de vibraciones, por lo que las fallas mecanizadas en su mayoría lograron ser influyentes en el funcionamiento del banco de pruebas.

- **Medición de vibraciones en rodamientos.**

Con el conjunto de mediciones obtenidas y en base a los espectros presentados en la *Sección 5.1* fue posible realizar el estudio de las vibraciones observadas respecto a todas las fallas y rodamientos bajo estudio, de esta manera se logró evaluar los grados de severidad que se perciben en relación al comportamiento de los rodamientos en buen estado y comparar los cambios en los valores globales de vibraciones según las diferentes fallas bajo análisis.

De acuerdo a lo presentado en la *Sección 5.2.4*, la comparación entre los niveles de vibración de ambos sets de rodamientos fue de gran utilidad para obtener una noción de cuales de las fallas realizadas fueron las que generaban mayores efectos vibracionales en el banco de prueba. En ambos sets se observó claramente que las fallas que presentaron las

más altas perturbaciones vibratorias a niveles globales fueron las fallas asociadas a los componentes de las pistas externas y elementos rodantes de ambos sets, además de las fallas combinadas que incluyen algunas de estos componentes mencionados. Estos componentes llegan a alcanzar hasta casi 7 veces los valores de un rodamiento en buen estado para el caso de la falla en el elemento rodante y hasta 30 veces para las fallas asociadas a la pista externa.

Además de las comparaciones, en relación a los rodamientos en buen estado también se pudo observar las variaciones en los niveles globales entre ambos sets de mediciones. En términos generales los valores obtenidos en ambos conjuntos corresponden a órdenes de magnitud similares, la existencia en las variaciones en los valores se debe principalmente a los factores asociados a las geometrías y tipos de fallas realizadas entre ambos sets de rodamientos, es decir, las fallas mecanizadas varían en forma, grosor y profundidad por lo que estas no se comportan exactamente igual al ser reproducidas. El concepto de reproducibilidad se analizó de manera más profunda en la *Sección 5.3.5* en donde se puede asociar con los mapas PRH-PRL.

- **Aplicación de método de Mapas PRH-PRL.**

Una vez que se tiene conocimiento del comportamiento y nivel de severidad de cada falla por medio de los métodos tradicionales de análisis, en el siguiente objetivo corresponde realizar la aplicación del método de Mapas PRH-PRL, con el fin de tener una representación preliminar de la utilización de los mapas en estos tipos de señales.

Lo primero que hay que destacar es el proceso de traducción de las mediciones desde el formato en el que se entregan los espectros de frecuencia hasta la obtención del mapa en sí. Este proceso, como se observó en la *Sección 4.5*, considera una serie de modificaciones asociadas a los archivos en los que se entrega la información recopilada de cada medición, estas modificaciones son necesarias para importar la información a los softwares que son los encargados de entregar el mapa PRH-PRL final, si bien para este trabajo el proceso antes mencionado resultó funcional y efectivo en cuanto a los mapas finales, para el caso del análisis de un número más extenso, ya sea de mediciones o de

numero de rodamientos, este proceso presentará ciertas desventajas considerables ya que podría llegar a resultar tedioso y requeriría de mucho tiempo de procesamiento debido a que para cada medición obtenida se necesita modificar y adaptar su formato para obtener los mapas finales.

En cuanto a la funcionalidad del método, una vez que fue posible traducir todas las mediciones espectrales y poder representarlas en los mapas, se puede evaluar los tipos de mapas obtenidos. Según lo expuesto en la *Sección 5.3.1*, se puede decir que en términos generales los mapas obtenidos resultaron coherentes de acuerdo a lo que era esperado basándose en la teoría del método PRH-PRL expuesto en la *Sección 3.10* en donde se esperaba que al tener señales de frecuencia distintas y ser representadas por medio de las ecuaciones (7) y (8) entregaran como resultado puntos en distintos sectores del mapa, lo que efectivamente se vio reflejado a grandes rasgos en las *Figuras 5.13, 5.14 y 5.15*.

Ahora para un análisis más específico de los mapas se buscó el tipo de rango que muestra los mapas más representativos en cuanto a la diferenciación de cada falla, según lo planteado en las *Secciones 3.10 y 4.5.3* existen tres tipos de rangos aplicables a la confección de un mapa, debido a que no existen criterios concretos para la elección de dichos rangos estos se escogieron de manera que se cumplan las condiciones necesarias para cada tipo de rango. De esta manera se llegó a la afirmación de que para este tipo de mediciones y según los espectros obtenidos el rango que presentó el mapa con mejor representatividad en cuanto a los tipos de falla presente fue el rango de intervalos traspuestos de la *Figura 5.13*.

- **Relación entre fallas y ubicación dentro del mapa PRH-PRL.**

Un punto determinante para el análisis y validación de este método es encontrar la relación existente entre las mediciones de cada tipo de falla bajo estudio y como estas se representan dentro de los mapas PRH-PRL.

Teniendo en cuenta lo observado en la *Sección 5.3*, bajo todo el análisis realizado se han encontrado ciertos aspectos relevantes en cuanto al comportamiento de los mapas bajo estudio. En primer lugar se puede destacar el tipo de dispersión de las mediciones en

los mapas, específicamente en la **Figura 5.13**, se puede ver en primera instancia que los mapas son capaces de agrupar todas las mediciones procesadas según los distintos tipos de fallas analizadas, es decir, cada rodamiento entrega una agrupación distinta de mediciones asociadas a la falla específica, esto en coherencia con el hecho de que los espectros para cada tipo de rodamiento son distintos entre sí lo que también se traduce en grupos distintos de mediciones al ser traducidas a los mapas PRH-PRL. Debido a esto es posible afirmar que el método es capaz de entregar los grupos de mediciones de manera separada entre ellos, es decir, que las fallas principales no se mezclan entre sí y los grupos no se superponen unos con otros en su mayoría, salvo en el caso del componente de la jaula de sujeción, que tiende a mezclarse en algunas mediciones con los rodamientos en buen estado lo que es directamente atribuible al tipo de falla realizada sobre el componente.

Uno de los puntos más importantes del análisis es la identificación de ciertos sectores y ubicaciones de los mapas y asociarlos a los diferentes tipos de fallas, como se demostró en la **Sección 5.3.2**, se han logrado determinar zonas en las que se agrupan mediciones con ciertas características. Como se muestra en la **Figura 5.16** el método PRH-PRL es capaz de diferenciar dos zonas principales en las que se agrupan los dos primeros conjuntos de mediciones reconocibles, dichas zonas 1 y 2 corresponden a los rodamientos con bajos y altos niveles globales de vibración logrando de esta manera generar una primera separación entre rodamientos en buen estado, que clasifican en la zona 1, y rodamientos con fallas relevantes que entran en la zona 2 del mapa. Este aspecto genera gran interés ya que ayuda a percibir de manera rápida la existencia de algún desperfecto en el funcionamiento de un rodamiento, al incluir este método de detección de manera continua en los procesos de monitoreo de máquinas rotativas sería posible encontrar alzas en los niveles vibracionales de rodamientos en tiempo real.

Siguiendo en la misma línea, es posible seguir asociando sectores del mapa a las fallas existentes de manera más específica, es decir, como se mencionó anteriormente identificar los tipos de fallas específicas con sus respectivas ubicaciones dentro del mapa. En la **Figura 5.16** se puede observar la presencia de subconjuntos de mediciones dentro de la zona 2 del mapa asociada a mediciones de altos niveles vibracionales. Dentro de esta zona los subconjuntos que se pueden observar corresponden a los sectores en donde se

logran diferenciar cada uno de los tipos de fallas, en la zona 3 se agrupan todas las fallas asociadas con la pista externa del rodamiento, en la zona 4 aquellas relacionadas con la pista interna y finalmente en la zona 5 corresponde a las fallas en los elementos rodante. Con estas representaciones se puede afirmar que como primera aplicación de este método al análisis de rodamientos es posible diferenciar y asociar zonas del mapa a cada uno de los desperfectos y fallas presentes para este modelo de rodamiento.

Trabajos futuros.

Si bien ya se logró obtener una primera visión de la utilización de los mapas PRH-PRL en área de análisis de vibraciones en rodamientos, este trabajo crea la posibilidad de continuar con el estudio e investigación de este método aplicado a este tipo de procedimientos de diagnóstico, con el fin de entender de mejor manera y a mayor profundidad su funcionamiento y como podría desarrollarse este método a futuro.

A continuación, se presentan ciertos tópicos enfocados a continuar el estudio y mejorar las condiciones de mediciones en cuanto a la aplicación del método PRH-PRL.

- **Optimización del proceso de mapeo.**

Como se observó en la *Sección 4.5* la obtención de los mapas PRH-PRL puede llegar a ser larga y tediosa dependiendo del número de mediciones y rodamientos que se encuentren bajo análisis debido a que para cada medición es necesario realizar un proceso de modificación en los archivos relacionado con el formato de las mediciones desde el equipo SKF hasta la obtención de los mapas, por lo que estos no se obtienen en tiempo real y es necesario emplear una cantidad considerable de tiempo en la traducción.

Por estas razones es que la optimización del proceso de mapeo y la adaptación del este método a un sistema de monitoreo continuo para la medición de vibraciones contribuiría de manera considerable al estudio e investigación del método PRH-PRL en esta área.

- **Método de selección de rangos.**

La utilización de los diferentes tipos de rangos de frecuencias aceptables para este método fue un parámetro de gran importancia para la obtención de los mapas, en este trabajo la elección del tipo de rango que entregaba los mejores resultados fue intuitiva y basada en la prueba y error de distintos rangos posibles, para luego seleccionar el más adecuado y representativo.

Por esta razón es que se propone la confección un método que ayude a seleccionar el rango de frecuencia que entregue los resultados más representativos, con el fin de encontrar la relación entre la forma de los espectros de vibraciones y el tipo de rango a elegir, por medio de análisis estadísticos según los niveles de vibración en las distintas zonas del espectro.

- **Aplicación de mejoras en banco de pruebas.**

A lo largo de todo el proceso de mediciones se experimentaron diversos problemas relacionados con el banco de pruebas utilizado en laboratorio, si bien estos factores se lograron minimizar en la mayor medida posible no fueron eliminados por completo por lo que la presencia de estos elementos influyo a lo largo del trabajo, entre estos factores pueden ser considerados elementos como el alineamiento de los descansos del banco, los deslizamientos entre el eje y los rodamientos, la estabilidad de la estructura del banco y el procedimiento de montaje de rodamientos.

La aplicación de ciertas mejoras en el banco de pruebas ayudaría a disminuir de manera efectiva estos tipos de desperfectos para aislar de la mejor manera posible las vibraciones asociadas a los daños en los rodamientos que se analicen.

Validación método de mapas PRH-PRL.

A través de todo el análisis realizado enfocado al método PRH-PRL, se ha logrado evaluar su funcionamiento aplicado al análisis vibracional de rodamientos, con lo que se han obtenido ciertas afirmaciones en cuanto al comportamiento y funcionamiento de los mapas PRH-PRL

- Logra agrupar tipos de falla en grupos independientes.
- A través de los mapas se logra identificar rodamientos con altos y bajos niveles vibratoriales.
- Se generan zonas características para los diferentes tipos de fallas.
- Es capaz de diferenciar entre rodamientos en buen estado y rodamientos dañados.
- Presenta coherencia respecto a resultados obtenidos en espectros de frecuencias vibratoriales.
- Los resultados están directamente ligados a los rangos de frecuencias utilizados y al modelo específico de rodamiento bajo estudio.

Basándose en lo anterior queda claro que este método presenta características válidas para ser considerado como un método efectivo en la detección y diagnóstico de fallas en rodamientos, si bien el desarrollo del método y la implementación de este a un sistema de monitoreo continuo podría entregar más información acerca de su funcionamiento, ya es posible afirmar que como primera implementación de los mapas PRH-PRL en este tipo de estudios los resultados logrados han sido de carácter positivo y pueden dar paso a continuar desarrollando estas técnicas para lograr a futuro la posibilidad de implementarlo y probarlos a nivel industrial.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] RAO pag 56 Singiresu S.R. (1995), Chapter 1: Fundamentals of Vibration. En *Mechanical Vibrations* (5ta Edición) (pp. 1-123). University of Miami, Prentice Hall.
- [2] Berry, J.E., *Illustrated Diagnostic Wall Chart* (8va Edición). Technical Associates of Charlotte, P.C.
- [3] Torres C.E. (2018). Manual Análisis de Vibraciones. *Power-MI Cloud Condition Monitoring*, www.power-mi.com
- [4] Ardila-Rey, J. A., Martínez-Tarifa, J. M., Robles, G., & Rojas-Moreno, M. V. (2013). Partial discharge and noise separation by means of spectral-power clustering techniques. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20(4), 1436-1443.
- [5] Ardila Rey, J.A., Martinez Tarifa, J.M., Robles Muñoz G. (2013). España. 2,512,040. Leganés, Madrid. Oficina española de marcas y patentes.
- [6] Li, C., de Oliveira, J. V., Cerrada, M., Pacheco, F., Cabrera, D., Sanchez, V., & Zurita, G. (2016). Observer-biased bearing condition monitoring: From fault detection to multi-fault classification. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 50, 287-301.
- [7] Li, C., Cerrada, M., Cabrera, D., Sanchez, R. V., Pacheco, F., Ulutagay, G., & Valente de Oliveira, J. (2018). A comparison of fuzzy clustering algorithms for bearing fault diagnosis. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 34(6), 3565-3580.
- [8] Wei, Z., Wang, Y., He, S., & Bao, J. (2017). A novel intelligent method for bearing fault diagnosis based on affinity propagation clustering and adaptive feature selection. *Knowledge-Based Systems*, 116, 1-12.
- [9] Zhang, X., Zhao, J., Li, H., & Sun, F. (2016, March). Bearing Fault Recognition Based on Feature Extraction and Clustering Analysis. In *2016 4th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology*. Atlantis Press.
- [10] Kai, L., Bo, L., Tao, M., Xuefeng, Y., & Guangming, W. (2017, December). Unsupervised Learning—A Novel Clustering Method for Rolling Bearing Faults Identification. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 280, No. 1, p. 012013). IOP Publishing.
- [11] NTN-SNC ROULEMENTS. (2015). SNC The Pillow Block Range, SNC 507-606.
- [12] J.A. Hartigan (1975). Clustering algorithms. John Wiley & Sons, Inc.

ANEXOS.

Anexo 1: Código numérico para generación de mapa PRH-PRL

```
clc
clear all

Mapa=[];
for i=1:70
    num(i).archivos=xlsread(['medicion',num2str(i),'.xlsx']);
    fft=num(i).archivos;
    %plot(fft(:,1),fft(:,2))

    frec=fft(:,1);
    ampl=fft(:,2);

    %intervalos de frecuencias en hz
    L1=0;
    L2=650;

    H1=350;
    H2=850;

    FT=2000;

    %posiciones de valores de intervalos frecuencias
    [f11,l1]=min(abs(fft(:,1)-L1));
    [f12,l2]=min(abs(fft(:,1)-L2));

    [fh1,h1]=min(abs(fft(:,1)-H1));
    [fh2,h2]=min(abs(fft(:,1)-H2));

    [frect,ft]=min(abs(fft(:,1)-FT));

    %factores de potencia
    %PRL
    for n=l1:l2
        f(n)=(abs(fft(n,2)))^2;
        s1=sum(f);
    end
end
```

```

for m=1:ft
    g(m)=(abs(fft(m,2)))^2;
    s2=sum(g);
end

PRL=(s1/s2)*100;

%PRH
for p=h1:h2
    h(p)=(abs(fft(p,2)))^2;
    s3=sum(h);
end

for q=1:ft
    r(q)=(abs(fft(q,2)))^2;
    s4=sum(r);
end

PRH=(s3/s4)*100;

pto=[PRL,PRH];
Mapa=[Mapa;pto];
end

Mapa

plot(
    Mapa(1:10,1),Mapa(1:10,2),'rx',
    Mapa(11:20,1),Mapa(11:20,2),'gx',
    Mapa(21:30,1),Mapa(21:30,2),'bx',
    Mapa(31:40,1),Mapa(31:40,2),'kx',
    Mapa(41:50,1),Mapa(41:50,2),'k*',
    Mapa(51:60,1),Mapa(51:60,2),'yx',
    Mapa(61:70,1),Mapa(61:70,2),'cx') %medicaciones 2

grid on;
xlabel('% PRL')
ylabel('% PRH')

legend(
    'Falla Pista Externa Transversal',
    'Falla Pista Interna','Sin Falla',
    'Falla Elemento Rodante',
    'Falla en Jaula',

```

```

'Falla Pista Externa Longitudinal',
'Falla PE y ER')

title(['[L1,L2]=' , '[' , num2str(L1) , ',' , num2str(L2) , ']' , '
' , '[H1,H2]=' , '[' , num2str(H1) , ',' , num2str(H2) , ']' , ' ' , 'FT=' , num2str(FT) , 'hz'])

axis([0 100 0 100])

```


Anexo 2: Valores de coeficientes porcentuales Figura 5.13.

Mapa =

88.8442	21.4501
89.3204	20.9270
88.6728	21.9801
88.7823	21.8180
88.5807	21.5354
89.1481	21.1709
89.4062	21.1511
88.8219	22.0727
88.8742	22.4149
89.3553	20.4619
87.0524	12.2502
87.8348	11.0572
88.1474	11.6820
88.7002	11.7620
88.8494	12.3732
87.9259	12.0764
86.9846	12.8668
87.4116	12.9501
87.3297	14.2482
87.8187	11.7783
61.7790	23.3584
63.6595	20.6158
61.1919	22.3693
63.3649	22.5809
64.7729	21.5998
61.1195	23.2691
65.5623	21.1789
65.2160	21.1987
63.5448	23.5180
65.9771	21.2056
94.2958	10.7157
93.4817	12.2391

95.7283	11.2376
93.7121	11.3010
94.0190	12.5676
94.7823	11.1982
94.0952	10.2977
94.0073	10.6721
94.2132	10.7288
92.3572	11.8500
58.9968	20.1501
59.2599	20.1343
63.7918	15.5198
63.7239	16.1886
58.5210	18.6314
62.3807	15.0829
62.1049	17.6222
66.1076	15.3656
65.4091	16.0379
59.1423	20.7150
86.6771	20.3266
87.0852	21.0460
87.0261	20.0530
87.3552	18.7474
87.7810	20.5742
87.2387	19.4091
86.8257	19.8497
87.2692	19.4310
87.0149	20.3695
87.6168	18.4496
90.5209	26.0347
90.1152	25.6442
89.5582	25.7694
89.5636	26.5345
89.0666	26.1932
88.7127	26.9180
89.3473	26.1068
89.5923	25.7798
88.9874	26.8414
88.8812	26.0216

Anexo 3: Ficha Técnica Motor Siemens.

Producto	Valores
<p>SE300200</p> <p>Familia: Motores Eléctricos Código: SE300200 Marca: SIEMENS Descripción: M. SIE FRAME 100 2HP 6 POLOS Modelo: 1LE0102-1AC42-2AA4 Potencia: 1,5KW / 2 HP Frame: 100L RPM: 940 FS: 1,1 Tensión Volts: 230V / 400V Eficiencia: 0,752 Corriente Nominal: 3,80 A Diametro de Eje: 28 mm Peso Total: 32 KG Grado Protección: IP55 Factor de Potencia: 0,76 Rodamiento DE: 6206 2Z C3 Rodamiento NDE: 6206 2Z C3</p>	<p>M. SIE FRAME 100 2HP 6 POLOS</p> 

Anexo 4: Ficha Técnica Acelerómetro SKF.

CMSS 2200 / CMSS 2200-M8

Industrial accelerometer, side exit

The CMSS 2200 accelerometer is a good multi-purpose sensor. The sensor is most commonly deployed in the following industries:

- Power Generation (Fossil, Nuclear, Hydro)
 - Pulp and Paper
 - Mineral Processing
 - Food and Beverage
- 技术咨询与报价
电话: 18823303057 QQ:2104028976



Features

- For use with all SKF on-line systems, protection systems and the portable data collection instruments
- Rugged, economical and all around general purpose sensor
- 100 mV/g sensitivity to optimize use in multiple applications
- Exceptional bias voltage (BV) stability at elevated temperatures
- Designed for exceptional low noise level over a wide temperature range
- Meets stringent CE, EMC requirements
- Captive mounting bolts (1/4-28, M6 x 1,00 or M8 x 1,25) provided
- Corrosion resistant and hermetically sealed for installation in high humidity areas
- Reverse polarity wiring protection

Recommended connector/cable assembly

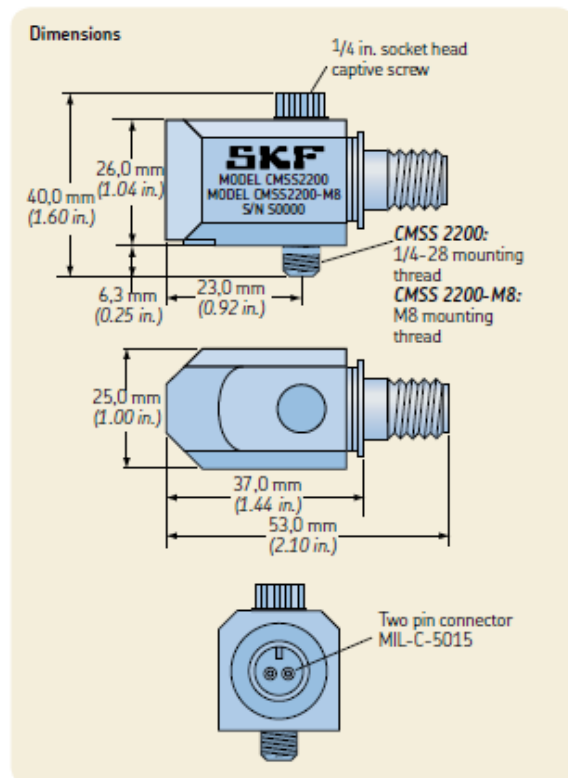
- CMSS 932 series

Specifications

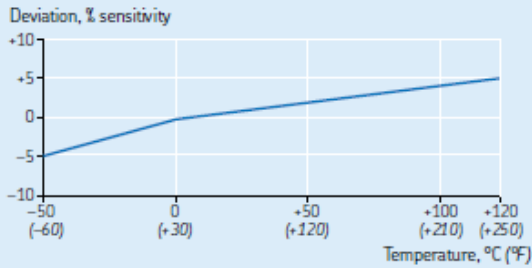
Specifications conform to ISA-RP-37.2 (1-64) and are typical values referenced at 24 °C (75 °F), 24 V DC supply, 4 mA constant current and 100 Hz.

Dynamic

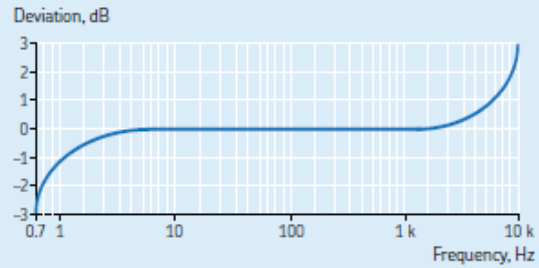
- Sensitivity: 100 mV/g
- Sensitivity precision: ±10% at 25 °C (75 °F)
- Acceleration range: 80 g peak
- Amplitude linearity: 1%
- Frequency range:
 - ±10%: 1,0 to 5 000 Hz
 - ±3 dB: 0,7 to 10 000 Hz
- Resonance frequency, mounted, minimum: 22 kHz
- Transverse sensitivity: ≤ 5% of axial
- Temperature response: See graph



Typical temperature response



Typical frequency response



Environmental

- Temperature range: -50 to +120 °C (-60 to +250 °F) operating temperature
- Vibration limit: 500 g peak
- Shock limit: 5 000 g peak
- Electromagnetic sensitivity, equivalent g, maximum: 70 µg/gauss
- Sealing: Hermetic
- Base strain sensitivity: 200 µg/µstrain
- CE: According to the generic immunity standard for Industrial Environment EN 50082-2
 - Acceptance criteria: The generated "false equivalent g level" under the above test conditions should be less than 2 mg measured peak to peak

Physical

- Dimensions: See drawing
- Weight: 145 g (5.1 oz.)
- Case material: 316L stainless steel
- Mounting: M6 × 1,0 and 1/4-28 captive mounting bolts provided
- Mounting torque: 3,4 Nm (30 in. lbs.)
- Connections:
 - Pin A: Signal/Power
 - Pin B: Common
- Mating connector: CMSS 932-68LC or CMSS 932-68TL, two pin, IP 68, locking collar or twist lock
- Recommended cable: CMSS 932-SY-XXM and CMSS 932-DY-XXM, two conductor, twisted pair, single or double shielded, yellow

Anexo 5: Ficha Técnica Equipo adquisidor SKF.

Performance characteristics

Acceleration, velocity, and displacement from hand-held or installed vibration sensors or monitoring systems:

- AC / DC sensors
- Pressure sensors
- Temperature sensors
- Keyboard entry: Measurements read from indicators or installed instruments entered in engineering units
- Universal tachometer
- Visual inspections: Added to measurement as coded notes

Envelope (demodulator): With four selectable input filters for enhanced bearing and gear mesh fault detection

gE filter selections:

- 5 Hz to 100 Hz
- 50 Hz to 1 kHz
- 500 Hz to 10 kHz
- 5 kHz to 40 kHz

Input parameters:

- Tachometer: TTL / analogue programmable to ± 25 V
- RPM range 1 to 99 999
- Tachometer power supply output +5 V at 100 mA

Input over-voltage protection:

- AC ± 50 V peak
- DC ± 50 V sustained

Dynamic range: >90 dB (24 bit ADC sigma-delta)

Input connectors:

- CH1: Six pin Fischer, CH1, CH2, CH3, CH4
- CH2: Six pin Fischer, CH2, CH3, CH4
- USB host / CHR / headphone: USB keyboard, CHR, headphones
- USB Device / power / trigger: Seven pin Fischer trigger in, trigger tachometer power supply, USB COMMS, charger

Input signal range: ± 25 V maximum

Signal: RMS/Peak/Peak-Peak/True Peak/True Peak-Peak

Transducer check: Bias Voltage Integrity (0/C and S/C detection)

Auto range: Yes

Frequency range: DC to 80 kHz

Bearing condition: gE

FFT resolution: 100 to 25 600 lines

Time block length: 256 to 65 536 samples

Alarms: Overall, Spectrum and Exponential (Peak and RMS level)

Measurement

Range:

- Route measurements: DC to 80 kHz (GX-R: 80 kHz)
- Non-route measurements: DC to 80 kHz (not available in GX-R)

Averaging: 1 to 255 time averages, 1 to 4 096 spectral averages

Averaging type: RMS, Time, Peak Hold, Exponential

Cursor: Fixed and cursor lock. Single, harmonic and peak pick.

Trigger modes: Free run or external trigger (trigger slope and amplitude)

Measurement

Resolution: Programmable 100, 200, 400, 800, 1 600, 3 200, 6 400, 12 800 and 25 600 lines

Measurement windows: Hanning, flat top, hamming and rectangular

Measurement parameters: Acceleration, velocity, displacement, gE, temperature, phase, voltage, user specified

Measurement types: Overall, spectrum, time waveform, cross phase, orbits, shaft centerline

Multi-point automation: Up to 12 measurements can be listed for one button push automated data collection at each measurement location

Accuracy: $\pm 2.5\%$ of full scale range

Data display:

- Single and dual channel spectrum, single and dual channel time, phase table, process, orbit, cross channel phase (GX-R: single-channel spectrum, time, phase table, and process)
- Simultaneous spectrum, time waveform, peak hold averaging
- Up to 12 bands (fixed or order base) downloadable from host software

Power

Battery:

- Li-ion smart battery pack
- Eight hours continuous operation minimum

Physical data

Dedicated keys: Up, down, right, and left two enter keys for right and left hand operation, four function keys

Hot keys: Peak find, harmonic, expand

LCD screen: $\frac{1}{4}$ VGA color TFT screen, 320 x 240 pixels resolution

Case: High impact ABS with IP 65 dust and splash rating

Weight: 715 g (1.6 lb.)

Size (height x width):

- Narrowest point: 186 x 93 mm (7.4 x 3.7 in.)
- Widest point: 186 x 134 mm (7.4 x 5.4 in.)

Drop test: 2 m (6.6 ft.), to MIL STD 810F specifications

Environmental

Certifications:

- **Special conditions per certifications**
- ATEX: II 3 G Ex ic IIC T4 Gc (Ta = -10 °C to +50 °C)
- IECEx: Ex ic IIC T4 Gc (Ta = -10 °C to +50 °C)
- CE rated
- CSA, Class I, Division 2, Groups A, B, C, D, temperature code T4@Ta = 50 °C



IP Rating: IP 65

Temperature ratings:

- Operating temperature: -10 to +50 °C (14 to +122 °F)
- Storage temperature: -20 to +60 °C (-4 to +140 °F)

Humidity: 95% non-condensing

Vibration: MIL STD 810 transportation

Anexo 6: Ficha Técnica Tacómetro Laser.

CMAC 5030K Instructions - Laser Speed Sensor

⚠ Warning!

Laser radiation! Do not stare into Beam Class II Laser product.

Specifications

Optical Range: 100 to 2000 mm

Supply: 5 V at 30 mA typically

Pin Connections

	Moulded Cable	
Pin 1	Brown	Positive Supply 5 V
Pin 3	Blue	Ground
Pin 4	Black	Signal output (NPN, 4K7 pull-up)

Using Reflective Tape

- Attach the reflective tape to the disc or shaft, as displayed in Figure 1.
- The minimum size of the reflective target in the direction of travel should be twice the size of the light source image.
- Arrange the sensor location so the beam hits the center of the tape.
- With the sensor connected, the LED should light when a signal is received from the target. On fast rotating targets, the LED appears to light continuously.

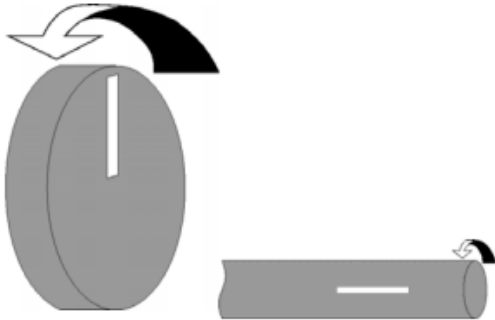


Figure 1. Tape orientation for use on discs or shafts.