UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MEDIR VIBRACIONES EN RODAMIENTOS

LUKAS MAURICIO MELLA HERNÁNDEZ

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Dr. Ing. DANILO ESTAY BARRIENTOS
PROFESOR CORREFERENTE: Dr. Ing. JORGE ARDILA REY

MAYO – 2022

Agradecimientos

Agradecer en primer lugar a mi familia, padres y hermano, por darme la oportunidad de poder de llegar a esta instancia, por su apoyo constante en este proceso y resguardo en momento difíciles. Sin ellos, nada de esto sería posible.

A mis amigos Anselmo, Fabian, Farid, Ignacio, Natalia, Pablo Z, Pablo E y todos los grandes amigos que hice durante este hermoso proceso. A lo largo de toda mi estadía en la universidad me sentí en familia y tranquilo. Gracias a todas estas amistades la cuales vivimos desafíos diarios, pero que gracias a ellos todo se hizo mucho más ameno.

A mis profesores guías Danilo y Jorge, los cuales fueron un factor clave a lo largo del desarrollo de esta memoria, gracias por su voluntad y disposición para siempre poder ayudarme. Muchas gracias por facilitarme sus conocimientos y experiencia para poder realizar un gran trabajo de ingeniería.

A los profesores que me ayudaron en la manufactura del diseño, al profesor Claudio Aravena y Gabriel Cornejo, su ayuda y disposición son cosas que pocas veces se encuentran, muchas gracias por su cercanía, su tiempo y constante consejos. Los llevare siempre e intentare aplicarlos a mi vida profesional.

En especial a la criatura que fue mi sustento, mi refugio, mi distracción para momentos difíciles, mi perrito Watón, si bien ya no esta con nosotros, gran parte de mi vida universitaria se la debo a él, te amare por siempre.

Finalmente, a todas las personas las cuales no pude mencionar, pero que fueron un aporte de alguna manera en mi universitaria, que formaron parte de esta hermosa experiencia, les deseo lo mejor y que cumplan sus sueños.

Lukas Mauricio Mella Hernández

Resumen

En esta memoria se diseñó y fabricó un banco de pruebas para medir vibraciones en rodamientos, con el fin de poder tener un equipo el cual tuviera carga en el sistema, para así poder estudiar fallas en rodamientos las cuales tuvieran dimensiones pequeñas, las cuales son más cercanas a la realidad industrial y así poder estudiar de mejor manera el método de mapeo de PRH y PRL de espectros vibracionales

Este diseño se realizó en el software de diseño Inventor y sus respectivos análisis de resistencias y análisis modales de frecuencia en ANSYS. Su fabricación estuvo a cargo de un técnico mecánico y arreglos hechos por el alumno en conjunto y profesores del departamento.

Finalmente, para verificar la utilidad de la máquina, se realizó una implementación la cual consiste medir y estudiar progresión de fallas en un rodamiento, específicamente fallas en la bola para ser comparadas con los datos del Case Western Reserve, resultando en resultados prometedores los cuales dan como conclusión que el prototipo de máquina simuladora de fallas sirve y es útil para proseguir con los estudios de vibraciones.

Abstract

In this memory a prototype of a failure simulator machine was designed and manufactured, in order to have a machine which has a load in the system, in order to study failures in bearings which have small dimensions, which are closer to the industrial reality and thus to study in a better way the PRH and PRL mapping method of vibrational spectra.
This design was made in Inventor design software and its respective resistance analysis and modal frequency analysis in ANSYS. Its fabrication was in charge of Marcelo Araya and arrangements were made by the student together with the help of Professor Gabriel Cornejo and Claudio Aravena.

Finally, to verify the usefulness of the machine, an implementation was made which consisted of measuring and studying the progression of failures in a bearing, specifically failures in the ball to be compared with the data of the Case Western Reserve, resulting in very promising results which give as a conclusion that the prototype of the failure simulator machine serves to continue with the vibration studies.

Índice

1.- Objetivos 8
1.1.- Objetivo General 8
1.2.- Objetivos Secundarios 8
2.- Introducción 8
3.- Marco Teórico 10
3.1.- Análisis de las vibraciones 10
3.2.- Análisis de espectro 10
3.3.- Fallas en Rodamientos y sus frecuencias asociadas 10
3.4.- Diagnóstico de vibraciones 12
3.5.- Clustering de Datos 14
3.6.- Mapa PRH-PRL 14
4.- Trabajos Anteriores 16
5.- Diseño 18
5.1.- Motivación y Descripción del problema 18
5.2.- Necesidades del diseño 18
5.3.- Diseño Propuesto. 19
5.4.- Lista Elementos 22
5.5.- Cálculo de Esfuerzos y frecuencias modales 23
6.- Manufactura 26
7.- Montaje y Arreglo 31
7.1.- Modificaciones y Alineamiento 32
8.- Implementación 33
8.1.- Instrumentos de medición 33
8.2.- Prueba de Clustering anterior 35
8.3.- Case Western Reserve Data 38
8.4.- Clustering de fallas con los datos del Case Western Reserve 39
8.5.- Progresión de falla con los datos de Case Western Reserve 40
8.6.- Manufactura de las fallas 41
8.7.- Procedimiento de Montaje 44
8.8.- Ensayos y medición de vibraciones 44
9.- Conclusiones 49
10.- Discusión y Recomendaciones para trabajos futuros 50

11.- Anexos 52
11.1.- Método de relojes comparadores alternos 52
11.2.- Código Matlab para la progresión de fallas con los datos tomando en la máquina del laboratorio 55
11.3.- Código Matlab para el primer clustering de datos en rodamientos sin fallas 61
11.4.- Código Matlab para progresión de falla con los datos de Case Western Reserve 62
11.5.- Archivos utilizados para el clustering de fallas en rodamiento con los datos del Case Western Reserve. 63
11.6.- Código Matlab para el clustering de fallas en mapa PRH y PRL con los datos del Case Western Reserve. 64
12.- Referencias 72

Índice de figuras

Figura 2.1: Estadística de los rodamientos y su deterioro [1]. 8
Figura 2.2: Espectro Evolvente para señal simulada [2] 9
Figura 3.1: Diagrama de componentes de un rodamiento. [5] 11
Figura 3.2: Etapas de falla y cómo afectan al espectro de vibraciones [3]..... 13
Figura 3.3: Ejemplo de clustering de datos.[9]..... 14
Figura 3.4: Representación gráfica de un mapa PRH-PRL [10] 15
Figura 4.1: Banco de pruebas.[3]..... 16
Figura 4.2: Fallas ocasionadas para su posterior estudio vibracional.[3]..... 16
Figura 4.3: Mapeo de fallas en mapa PRH-PRL. [3]..... 17
Figura 5.1: Vista 3D de la propuesta del diseño..... 19
Figura 5.2: Vista 3D del diseño propuesto, vista frente 20
Figura 5.3: Vista 3D del diseño propuesto, vista lateral..... 20
Figura 5.4: Vista 3D del diseño propuesto, vista debajo 21
Figura 5.5: Vista 3D del diseño propuesto, detalle sistema alineamiento 21
Figura 5.6: Componentes con los cuales se procedió con el cálculo de resistencia en ANSYS 24
Figura 5.7: Resultado de simulación de resistencias en ANSYS 24
Figura 5.8: Resultado de deformación total en ANSYS..... 25
Figura 5.9: Resultados de frecuencias modales del arreglo..... 26
Figura 6.1: Vista de la máquina en el laboratorio, vista de frente 27
Figura 6.2: Vista de la máquina en el laboratorio, vista lateral 27
Figura 6.3: Vista de la máquina en el laboratorio, enfoque acople flexible 28
Figura 6.4: Vista de la máquina en el laboratorio, vista desde arriba..... 28
Figura 6.5: Vista de la máquina en el laboratorio, enfoque sistema transmisión 29
Figura 6.6: Vista de la máquina en el laboratorio, enfoque sistema freno o carga..... 29
Figura 6.7: Vista del sistema de freno, el cual aportará carga al sistema 30
Figura 6.8: Vigas soporte motor 30
Figura 7.1: Tabla interpretativa para diferentes tipos de máquinas según norma ISO10816 [12] 31
Figura 7.2: Vástagos realizados en la universidad para método de relojes alternos 32
Figura 7.3: Método de relojes alternados en la máquina 33
Figura 8.1: Acelerómetro analizador de vibraciones SKF modelo CMSS2200 con acople magnético 34

Figura 8.2: Adquisidor de datos SKF Microlog Analizer serie GX. 34
Figura 8.3: Tacómetro modelo CMAC 5030 35
Figura 8.4: Clustering rodamientos sanos 36
Figura 8.5: Ejemplo de espectro vibracional entregado por el instrumento de medición [3] 36
Figura 8.6: Archivo entregado por el instrumento ya en computador..... 37
Figura 8.7: Arreglo de la universidad de Case Western Reserve 38
Figura 8.8: Archivos disponibles por el Case Western Reserve (CWR).[13] 38
Figura 8.9: CLustering de fallas con los datos de CWR 39
Figura 8.10: Progresión de falla en la bola con datos de CWR..... 40
Figura 8.11: Juego de brocas utilizado para hacer las fallas en la bola del rodamiento..... 42
Figura 8.12: CNC utilizada para hacer las fallas en las bolas del rodamiento 42
Figura 8.13: Arreglo con plástico para hacer machina con la bola y broca en proceso de perforación..... 43
Figura 8.14: Espectro de vibraciones de rodamiento sin falla..... 45
Figura 8.15: Espectro de vibraciones de rodamiento con falla de 0.3 [mm]. 45
Figura 8.16: Espectro de vibraciones de rodamiento con falla de 0.4 [mm]. 46
Figura 8.17: Espectro de vibraciones de rodamiento con falla de 0.5 [mm]. 46
Figura 8.18: Espectro de vibraciones de rodamiento con falla de 0.7 [mm]. 47
Figura 8.19: Clúster de Progreso falla en la bola en el prototipo hecho 48
Figura 9.1: Progreso de falla en bola de rodamiento en mapa PRH y PRL, donde en el gráfico a) están los datos tomados con el banco de pruebas y en el gráfico a) están los datos de CWR. 49
Figura 8.13: Arreglo para medición de vibraciones del Case Western Center [13]..... 50
Figura 10.1: Límites vibracionales para calcular PRH y PRL. [3]..... 51
Figura 11.1: Montaje del método de comparadores alternados..... 52
Figura 11.2: Relaciones geométricas en el método de comparadores alternados 53
Figura 11.3: Toma de datos en el método de relojes alternados 54

1.- Objetivos

1.1.- Objetivo General

- Diseñar un banco de pruebas para el estudio de la progresión de falla en rodamientos utilizando la técnica de clúster PRH y PRL.

1.2.- Objetivos Secundarios

- Estudiar métodos y estudios anteriores respecto a la técnica PRH y PRL
- Diseñar el banco de pruebas para el estudio de progresión de falla
- Realizar puesta en marcha del banco de pruebas
- Diseñar la metodología experimental y realizar pruebas aplicando la técnica del PRH y PRL.

2.- Introducción

Cada año se fabrican una cantidad estimada cerca de 10.000 millones de rodamientos a lo largo de todo el mundo, dentro de esta gran cantidad solo algunos llegan a la falla antes de ser reemplazados por mantenimiento preventivo.

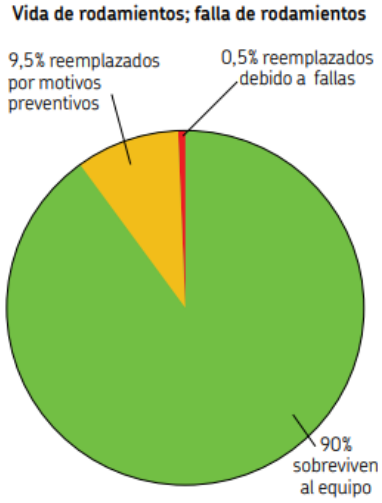


Figura 2.1: Estadística de los rodamientos y su deterioro [1].

Como se muestra en la figura 2.1 la gran mayoría de los rodamientos se mantienen en buen estado a lo largo de su funcionamiento, una menor parte cercana al 10% se cambian por mantenimiento preventivo y finalmente una muy pequeña parte, 0.5% se deben cambiar producto de fallas en el componente, si bien este número es pequeño hay que tener cuenta la gran cantidad de rodamientos los cuales se producen al año, es refleja que cerca de unos 50 millones de rodamientos son reemplazados por daños y fallas , entre estas fallas pueden ser producto de fatiga y problemas de lubricación entre los más comunes [1].

Los rodamientos son unos de los elementos vitales en máquinas dentro del proceso productivo, estos soportan exigencias y esfuerzos a lo largo de su funcionamiento, entre estas exigencias se encuentran una carga continua, fricción constante, calor debido a la fricción. Debido a que están expuestos a variables y que juegan un papel importante en la industria, es natural que sean objeto de estudio, con el fin de poder mejorar la calidad, tiempo de vida útil, así también estudiar sus tipos de fallas y las consecuencias.

Estas fallas se pueden detectar de manera temprana, los parámetros importantes a observar para la detección son el ruido, la temperatura y las vibraciones. Los rodamientos que presentan estos síntomas pueden ser estudiados con anticipación.

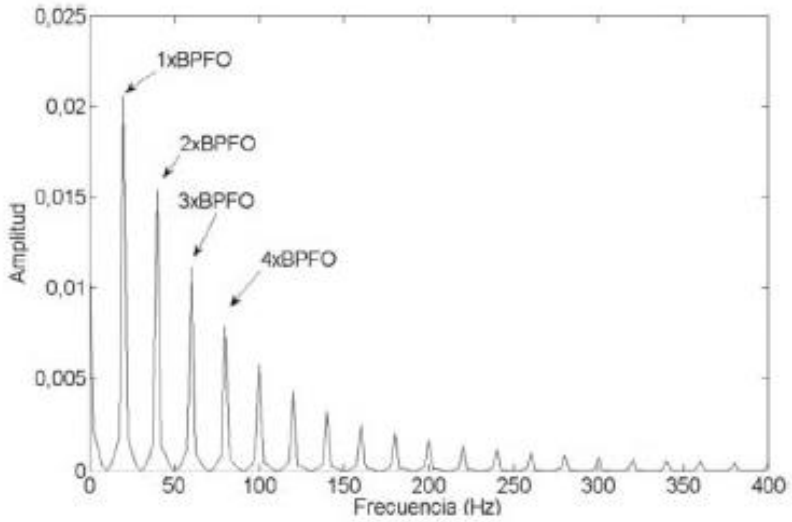


Figura 2.2: Espectro Evolvente para señal simulada [2]

Dentro de los puntos fundamentales para la práctica de esta investigación es la detección por monitoreo de vibraciones, como presenta en la figura 2.2 la detección de la falla en conjunto con el monitoreo de vibraciones viene con una aparición de incremento en los niveles de vibración estándar de la máquina y el estudio más profundo de este incremento de vibraciones puede dar una información más precisa respecto a las zonas comprometidas, las cuales se establecerán más adelante.

3.- Marco Teórico

3.1.- Análisis de las vibraciones

El análisis de vibraciones de la maquinaria industrial ha existido durante muchos años, ganando importancia a lo largo de este recorrido, utilizado en el mantenimiento predictivo. Cuando se habla del análisis de vibraciones se refiere principalmente al proceso de medir los niveles de intensidad y frecuencias de vibración presentes en la maquinaria industrial, con el fin de poder utilizar esta información para determinar el estado de la máquina o de alguna de sus componentes.

Cuando de utiliza este tipo de métodos su principal función es monitorear el rendimiento y la condición actual del equipo cuando este está trabajando con regularidad ya que se poseen frecuencias características del equipo en actividad, en este monitoreo se estudian las fluctuaciones y variaciones en las frecuencias y niveles para predecir probabilidades de fallas futuras en el equipo [3].

3.2.- Análisis de espectro

Cuando se desea analizar un espectro vibracional es clave tener en cuenta que este separa la vibración total de las frecuencias, esto con el fin de poder identificar con mayor facilidad el problema o anomalía en el espectro. Un aspecto fundamental dentro del análisis de espectros vibracionales es poder transformar los datos recopilados por unidades de tiempo, esto mediante la Transformada Rápida de Fourier o TRF. Este método convierte la señal original por unidad de tiempo en el dominio de frecuencia, esto es importante debido a que la información entregada en el dominio de las frecuencias nos entrega información a la hora de poder realizar un análisis, debido a que se puede estudiar distintos rangos de frecuencias con el fin de poder conocer plenamente el problema [4].

3.3.- Fallas en Rodamientos y sus frecuencias asociadas

A la hora de estudiar las fallas mediante el estudio de espectros vibracionales es importante tener claro que el rodamiento y sus componentes poseen un nivel de vibración normal en su estado óptimo de trabajo, por lo que al detectar anomalías es un claro indicio de presencia de fallas. Estas distintas fallas pueden estar presentes en cualquiera de los componentes de un rodamiento, el cual se compone generalmente de un anillo exterior, anillo interior, elemento rodante y la jaula de contención de elementos rodantes.

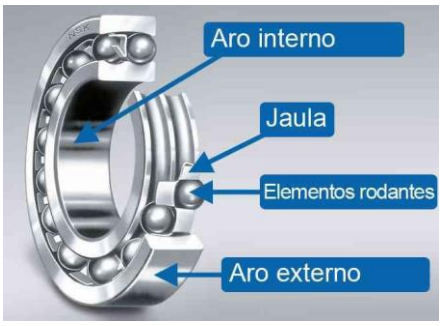


Figura 3.1: Diagrama de componentes de un rodamiento. [5]

Cada uno de los elementos mostrados en la figura 3.1 puede presentar una falla, esto ocasiona una perturbación en el espectro de vibraciones característica. Para el caso de la pista externa las fallas más comunes son por agrietamientos o desperfectos en la pista exterior. Para la pista interna las fallas más comunes son por agrietamiento del material. Para los elementos rodantes las fallas más comunes son por agrietamientos del material o desperfectos ocasionados por golpes no deseados y finalmente para la jaula de contención las fallas más comunes son por cualquier desperfecto que afecte negativamente la sujeción de los elementos rodantes. [6]

Como se mencionó anteriormente estas fallas que características de cada componente, tienes también frecuencias características las cuales nos permiten detectar su presencia en el espectro de vibraciones, estas frecuencias características son: [7]

- BPFO (Ball Pass Frequency of the Outer race): Frecuencia asociada al elemento rodante que pasa por alguna falla

- BPFI (Ball Pass Frequency of the Inner race): Frecuencia en la pista externa cuando el elemento rodante hace contacto con ella

- BSF (Ball Spin Frequency): Frecuencia con la cual gira cada elemento rodante sobre su propio eje, Cada falla presente en el elemento rodante impacta con la pieza interna, pero por la frecuencia del elemento rodante, debido a esto la frecuencia que se observa es el doble de la de frecuencia de giro del elemento rodante.

- FTF (Fundamental Train Frequency): Frecuencia de giro correspondiente a la jaula de contención.

Cada una de las frecuencias características de los elementos del rodamiento se pueden calcular de la siguiente manera:

$$BFPO = \frac{N_b}{2}\left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot cos\ (\theta)\right) \cdot RPM \quad (1)$$

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

$$BSF = \frac{P_b}{2 \cdot B_d}\left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d}\right)^2 \cdot (\theta)\right) \cdot RPM \quad (3)$$

$$FTF = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot cos\ (\theta)\right) \cdot RPM \quad (4)$$

Donde los términos son:

RPM: Revoluciones del giro del eje.

N_b: Número de elementos rodantes.

B_d: Diámetro de la bola [mm].

P_b: Diámetro efectivo del rodamiento [mm].

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

3.4.- Diagnóstico de vibraciones

Cuando se presentan fallas o anomalías en alguno de los elementos del rodamiento estos se ven reflejados en el espectro de vibraciones, de esta manera es posible hacer un diagnóstico de falla e identificar a qué elemento corresponde la falla detectada. También el espectro de vibraciones se ve afectado dependiendo del nivel de falla, pasando por etapas de evolución de las fallas reflejadas en el espectro.

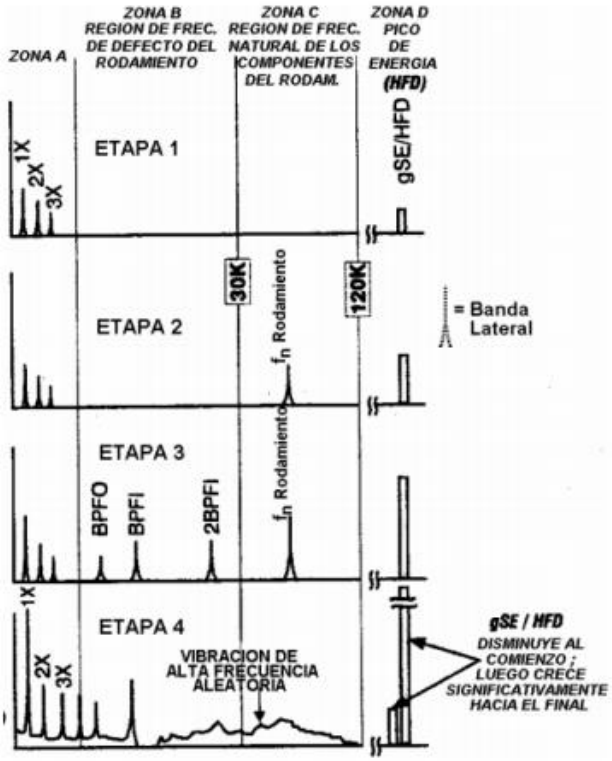


Figura 3.2: Etapas de falla y cómo afectan al espectro de vibraciones [3]

En la figura 3.2 se representa cómo evoluciona el espectro de vibraciones a medida que la falla evoluciona y cada etapa posee distintas frecuencias y características:

- Etapa 1: En la primera etapa se ven los indicios de falla a muy altas frecuencias, cercanas a 250.000 a 350.000 [Hz], si estas aumentan aún más pueden llegar a rangos entre 20.000 a 60.000 [Hz].

- Etapa 2: En esta etapa se pueden empezar a apreciar las frecuencias naturales tanto de los rodamientos y de los elementos de sujeción, los cuales se encuentran dentro de 30.000 y 120.000 [Hz]

- Etapa 3: En esta etapa se pueden empezar a apreciar las frecuencias características de las fallas antes mencionadas, teniendo muchos más peaks de energía en la zona b y c, en esta etapa las fallas en el rodamiento son más visibles en el espectro debido a su ya gran avance.

- Etapa 4: En la última etapa se incrementan los niveles de las frecuencias naturales como 1X o 2X, así también comienzan a desaparecer las frecuencias características con la aparición de “ruido” en el espectro o vibraciones de altas frecuencias aleatorias.

3.5.- Clustering de Datos

El clustering de datos tiene como principal función el lograr agrupar conjuntos de datos, con el fin de poder lograr subconjuntos de datos los cuales denominan Clúster. Estos poseen datos no etiquetados los cuales se agrupan debido a que poseen según el análisis de estos mismo características similares, idealmente esto se logra con un gran conjunto de datos. [8]. Así como se muestra en la figura 3.3 la cual brinda un ejemplo claro de agrupamiento de datos.

Figura 3.3: Ejemplo de clustering de datos.[9]

3.6.- Mapa PRH-PRL

Los mapas PRH y PRL representan una técnica de clustering de datos, los cuales tienen como propósito agrupar diversos espectros de frecuencias, esto mediante el cálculo de potencia espectral dentro de 2 intervalos de frecuencia. En los mapas se tiene que calcular el PRL (Power Ratio for Low frequencies) y PRH (Power Ratio for High frequencies), estos valores son obtenidos mediante la transformada rápida de Fourier de cada espectro de frecuencias. Para que todas las mediciones estén relacionadas correctamente se tiene que utilizar un mismo intervalo de frecuencias tanto para bajas frecuencias y altas frecuencias. Estos intervalos tienen que captar idealmente las perturbaciones más características para ambas zonas del espectro de frecuencia. De esta manera los valores correspondientes a PRH y PRL de capa espectro de vibraciones se calcula de la siguiente manera: [10]

$$PRL = \frac{\sum_{f_1L}^{f_2L} \quad |s(f)|^2}{\sum_0^{f_T} \quad |s(f)|^2} \cdot 100 \tag{5}$$

$$PRH = \frac{\sum_{f_1H}^{f_2H} \quad |s(f)|^2}{\sum_0^{f_T} \quad |s(f)|^2} \cdot 100 \tag{6}$$

Donde cada término es:

- s(f): Magnitud de la transformada rápida de Fourier de cada pulso del espectro de frecuencias.
- $[f_1L, f_2L]$: Intervalo de bajas frecuencias.
- $[f_1H, f_2H]$: Intervalo de altas frecuencias.
- f_T: Frecuencia máxima del espectro analizado.

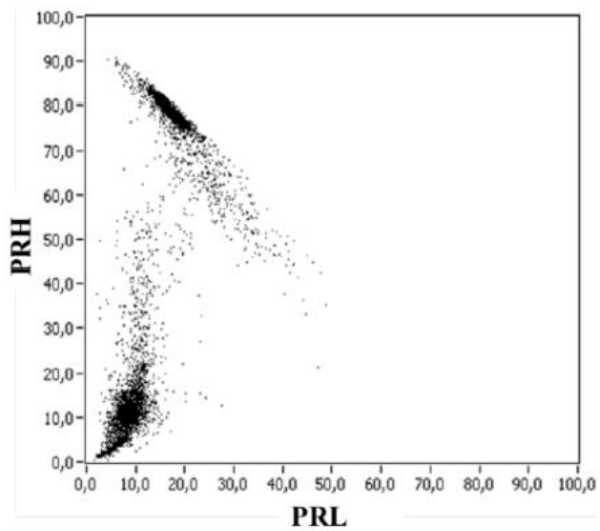


Figura 3.4: Representación gráfica de un mapa PRH-PRL [10]

Es importante a la hora de utilizar esta técnica de clustering de datos tener en cuenta ciertas consideraciones para los rangos de frecuencias utilizados. En primer lugar, se debe tener en cuenta que $0 < f_{1L} < f_{2L}, f_{1H} < f_{2H} \leq f_T$ y $f_{1L} < f_{2L}$. Estos intervalos como establecen estas directrices pueden solaparse y estar separadas completamente, esto se debe estudiar con el fin de poder lograr una mejor representación de un mapeo de los clústers.[10]

4.- Trabajos Anteriores

Dentro de los avances realizados en el área de investigación, está el aporte realizado por del memorista anterior, el cual para completar su proceso de titulación desarrollo los inicios de la implementación de mapa PRH y PRL para el análisis de fallas en rodamientos en su memoria titulada: “Análisis y Caracterización de fallas en rodamientos por medio de medición de espectros vibracionales.”. Dentro de esta memoria principalmente se estudia la veracidad de la teoría e implementación de clústeres de datos, PRH y PRL en el estudio de fallas de rodamiento.[3]

Figura 4.1: Banco de pruebas.[3]

El trabajo del memorista anterior consistió principalmente en el uso del banco de pruebas el cual se muestra en la figura 4.1, para hacer mediciones de vibraciones de un rodamiento de bola del tipo 1207 para poder realizar clústeres de datos con las distintas fallas ocasionadas al rodamiento.

Figura 4.2: Fallas ocasionadas para su posterior estudio vibracional.[3]

La fallas estudiadas y provocadas como se muestra en la figura 4.2 fueron fallas en el elemento rodante, fallas en la pista interna, falla en la pista externa y falla en la jaula. Estas fallas fueron estudiadas mediante un acelerómetro con el fin de poder obtener las distintas mediciones de vibraciones. Con estas mediciones el memorista fue capaz de identificar zonas dentro del mapa PRH y PRL.

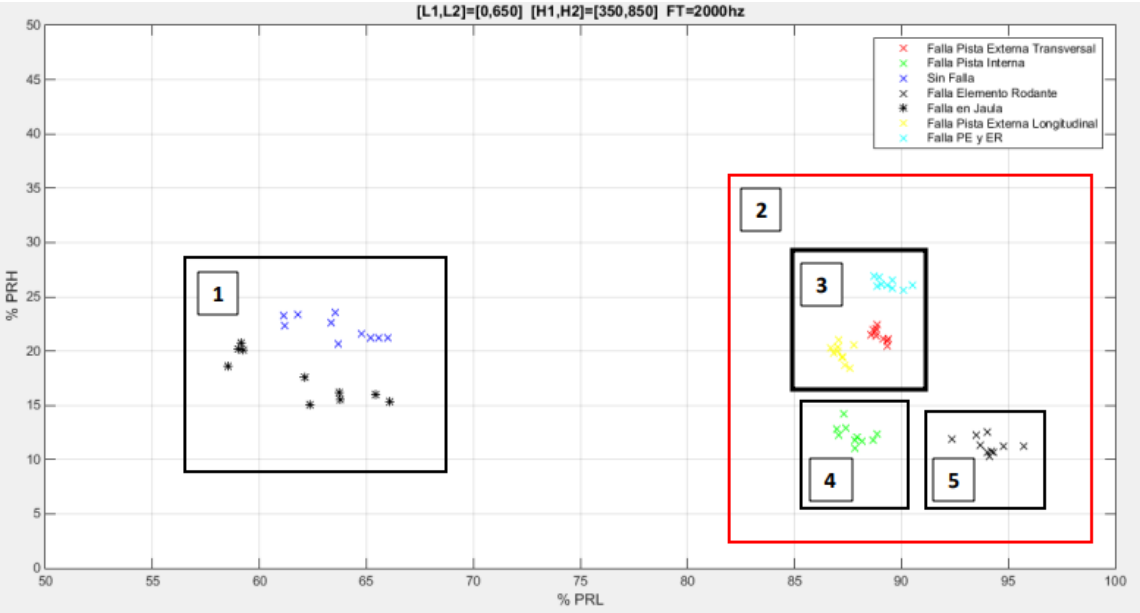


Figura 4.3: Mapeo de fallas en mapa PRH-PRL. [3]

Como se puede apreciar en la figura 4.3 la aplicación del método PRH-PRL dentro del estudio de falla de rodamiento es eficiente y funcional, dado que puede generar zonas donde se agrupan los datos, esto con el fin de poder identificar zonas de fallas. Las principales afirmaciones más importantes que se logró con el trabajo del memorista son:

- Logra agrupar tipos de falla en grupos independientes
- A través de los mapas se logra identificar rodamientos con altos y bajos niveles vibracionales
- Se generan zonas para los diferentes tipos de falla en el mapa PRH y PRL

5.- Diseño

5.1.- Motivación y Descripción del problema

Las principales motivaciones para proseguir con el estudio de las aplicaciones de los mapas PRH y PRL es el cómo progresan las fallas dentro de estos mismos mapas, para esto es necesario tener muestras de rodamientos con fallas progresivas. Para realizar este estudio de manera correcta es necesario que nuestro montaje posea carga, esto se refiere que el montaje señalado en la figura 4.1, este montaje pertenece a un montaje con eje libre de carga, el cual cuando se estudian sus vibraciones, las fallas pequeñas las cuales se quieren estudiar en el espectro de aceleraciones son imperceptibles, debido a esto es por lo que el memorista anterior realizó fallas visibles y exageradas a comparación con las que se encuentran normalmente en la industria. Es por esto por lo que es necesario la existencia de una carga aplicada al eje, para así aumentar el nivel de vibraciones en el eje con el fin de percibir en el espectro de vibraciones fallas pequeñas al nivel del que se quiere estudiar el cual está en el rango de décima de milímetro.[11]

5.2.- Necesidades del diseño

Las necesidades principales deben cumplir es poder obtener imágenes visibles de las fallas en el espectro de vibraciones, pero para el armado del prototipo es importante tener en cuenta los equipos con los cuales ya se cuenta, para aminorar costos y trabajo en búsqueda de materiales o máquinas. Los elementos los cuales ya se contaba en el laboratorio de tecnología mecánica son:

- Variador de frecuencia
- Motor Eléctrico 1.5 HP
- Descansos tipo SNL
- Eje de acero de 35 [mm]
- Poleas
- Correas

Teniendo en cuenta el material dispuesto, se necesitaba principalmente una configuración para poder tener carga en el sistema y que este fuera capaz de soportar los discos de desbalanceo, además de que la configuración para obtener la carga fuera con una especie de freno y este fuera transmitido mediante un sistema de poleas.

5.3.- Diseño Propuesto.

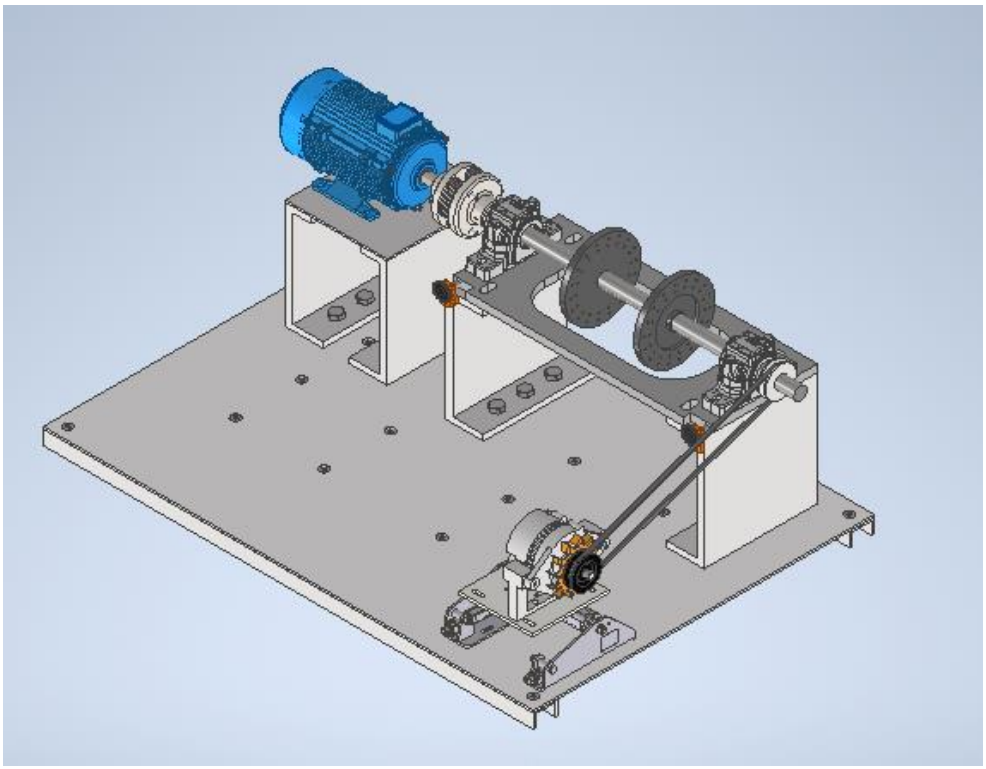


Figura 5.1: Vista 3D de la propuesta del diseño.

En la figura 5.1 se ve la vista en 3D del diseño propuesto, el cual consta principalmente de una base la cual soportaría la mayoría del armado, unas placas plegadas para soportar la placa principal que tendrá los rodamientos, un motor eléctrico para dar la potencia y un alternador para brindar la carga o resistencia al sistema eje-polea.

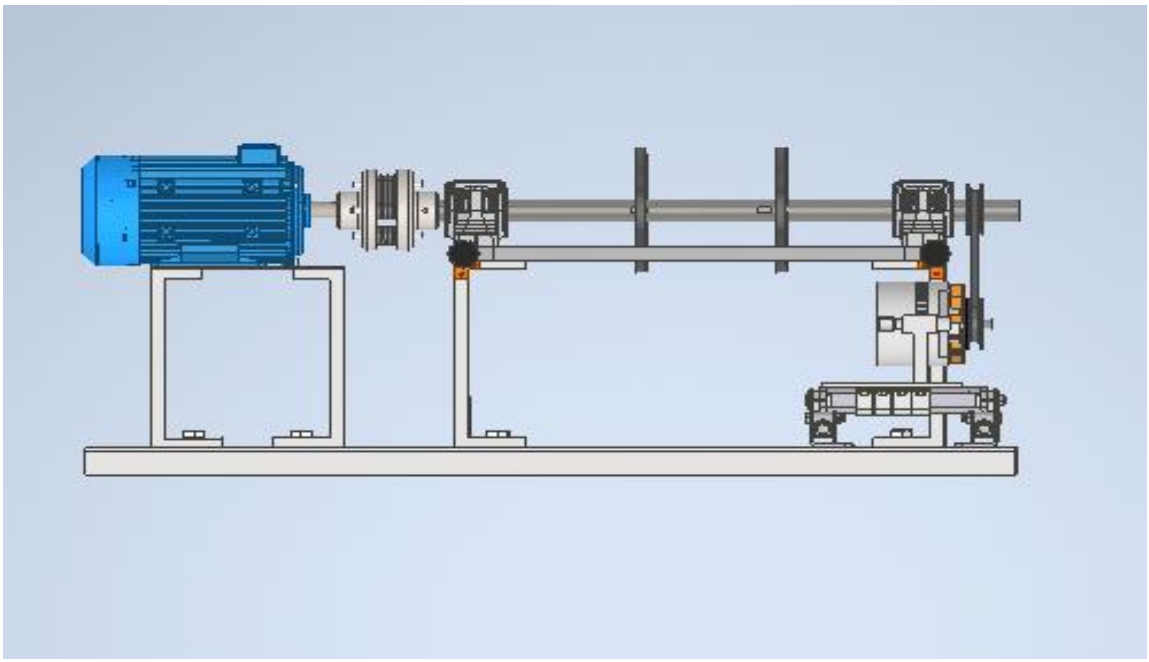


Figura 5.2: Vista 3D del diseño propuesto, vista frente

En la figura 5.2 en la figura anterior, puede ver una vista frontal la cual se puede apreciar en la parte izquierda en el motor eléctrico el cual se verá a detalle más adelante.

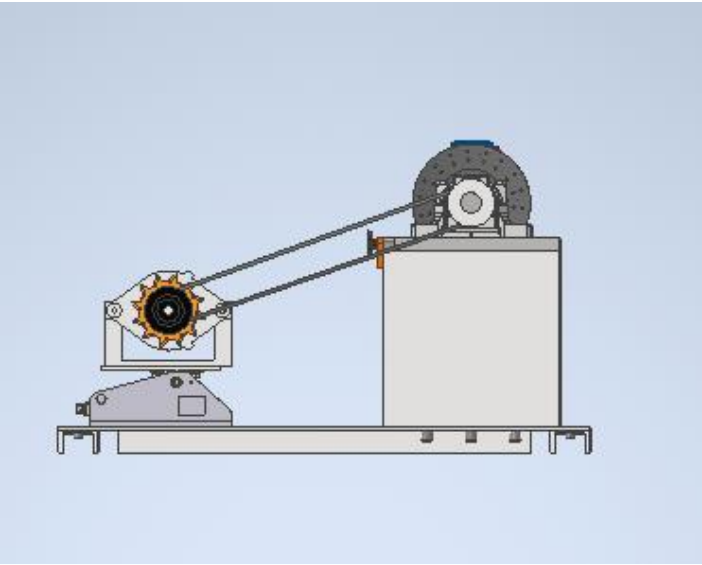


Figura 5.3: Vista 3D del diseño propuesto, vista lateral

En la vista de la figura 5.3 se puede ver la elección que se hizo en principio para otorgar una carga al eje, esta elección fue la de un alternador, el cual estará conectado al eje con un sistema de poleas con relación 1 a 1.

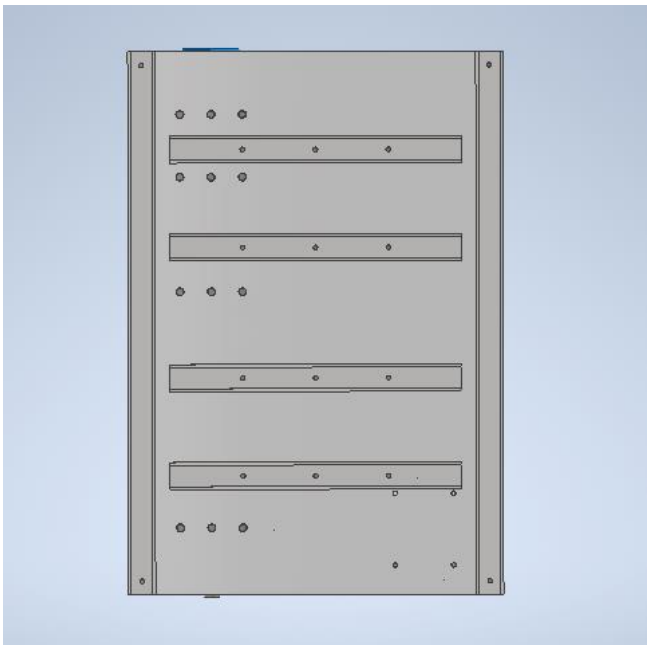


Figura 5.4: Vista 3D del diseño propuesto, vista debajo

En la parte inferior del diseño se muestra la propuesta de vigas C como refuerzo a la placa, con el fin de agregar mayor firmeza y resistencia a la placa base visto en la figura 5.4. Además, se puede apreciar en las partes laterales de la figura las vigas que tendrán contacto con el piso, parte vital para poder asegurar una estabilidad.

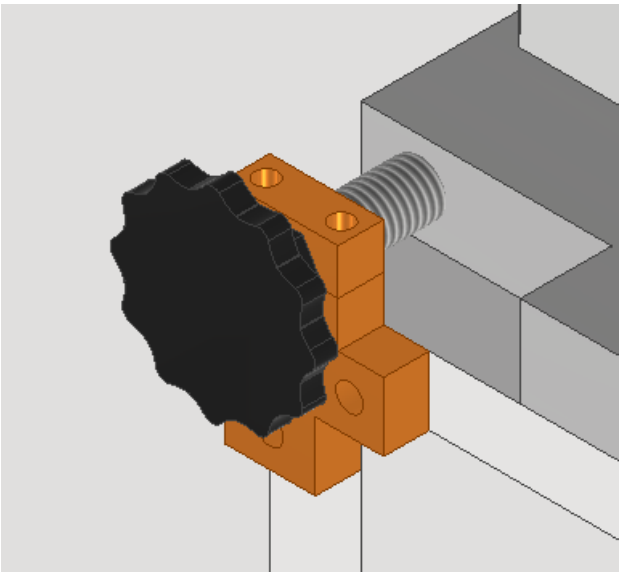


Figura 5.5: Vista 3D del diseño propuesto, detalle sistema alineamiento

En la vista en detalle de la figura 5.5 se puede ver un sistema de alineación el cual fue pensado como un tornillo sin fin, el cual el hilo de la rosca estará en la placa base, el tornillo con giro libre, se moverá a través de una manilla plástica para una más fácil manipulación, con el fin de poder alinear la placa y así obtener mejores condiciones para el estudio de vibraciones en el rodamiento.

5.4.- Lista Elementos

En el diseño hay gran variedad de partes que hace el conjunto final, la siguiente lista muestra las partes o elementos principales del conjunto:

- Eje: Este elemento se encarga de transmitir la potencia desde el motor hacia la carga establecida, soportado por los Soportes y con la facilidad de giro que aportan los rodamientos

- Viga C: Están bigas brindaran el apoyo a la base, ejerciendo una función como costillas, además de brindar el pie a la máquina en general.

- Plancha Base: Tiene como principal función hacer de unión para los distintos elementos del armado el cual consta principalmente de 3 partes, motor, eje y freno.

- Plancha gruesa: Esta plancha tiene como principal función hacer de unión para los elementos del eje, tanto como para soportes, eje y planchas plegadas.

- Plancha Plegada: De este elemento es un set de 4, un par de estos cumplen con la función de soportar el motor, el otro par con el armado de eje y soportes.

- 2 soporte tipo SNL: Los soportes tipo SNL con soportes para rodamientos los cuales tienen como principal característica que son partidos, es decir que la parte superior puede ser desmontada para un más simple desmonte y del eje y cambio de rodamientos.

- 2 rodamientos 1207: Componente principal del estudio a realizar, brinda un soporte y facilidad de giro al eje.

- Acople Flexible: Debido que la alineación del armado no es tan precisa como se quiere, es importante que para la transmisión de potencia desde el motor al eje no

sea rígida, es por esto por lo que un acople el cual pueda soportar desviaciones pequeñas.

- Motor 1 HP: Elemento que brinda la potencia al sistema

- Alternador Konigmann: Parte del armado la cual otorgará la carga y resistencia al eje, con el fin de poder aumentar los niveles de vibración en el espectro.

- Base Tensora de motor MB27: Elemento el cual tiene como función mover el alternador o freno para tensar la correa de transmisión.

- Poleas de Aluminio: Elemento que aloja la correa de transmisión desde el alternador o freno hacia el eje

- Correa: Elemento de transmisión desde el eje hacia el freno o alternador.

5.5.- Cálculo de Esfuerzos y frecuencias modales

Para el estudio de resistencias hay consideraciones importantes:

- La base tensora utilizada es una más pesada, posee una masa aproximadamente de 30 kilogramos, además con una carga de 1000 N en su parte superior simulando el sistema de freno.
- En la base del motor eléctrico para simular este mismo se ubica una fuerza de 1000 [N], mucho mayor a la de un motor eléctrico convencional de 1 HP.
- Tensión en la correa de 150 [N]
- Aplicación de la fuerza de gravedad, considerando la mayoría de los materiales acero al carbono A36.

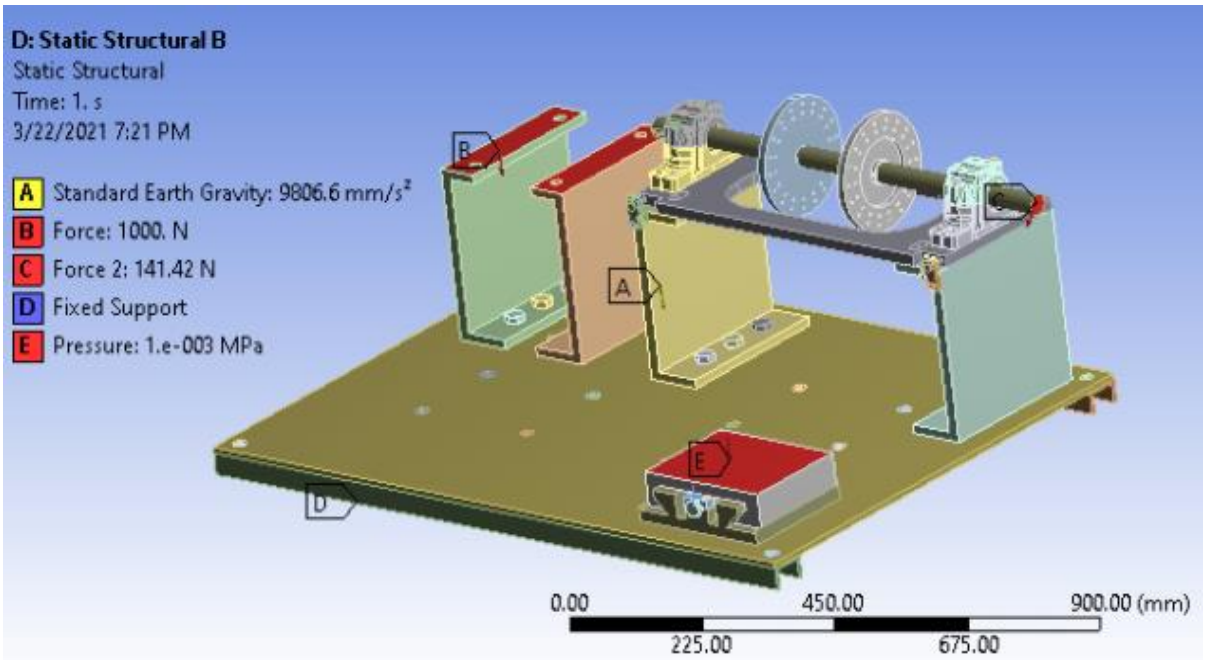


Figura 5.6: Componentes con los cuales se procedió con el cálculo de resistencia en ANSYS

En la figura se muestra la configuración con la cual se realizaron los estudios de resistencias para los cuales los resultados son:

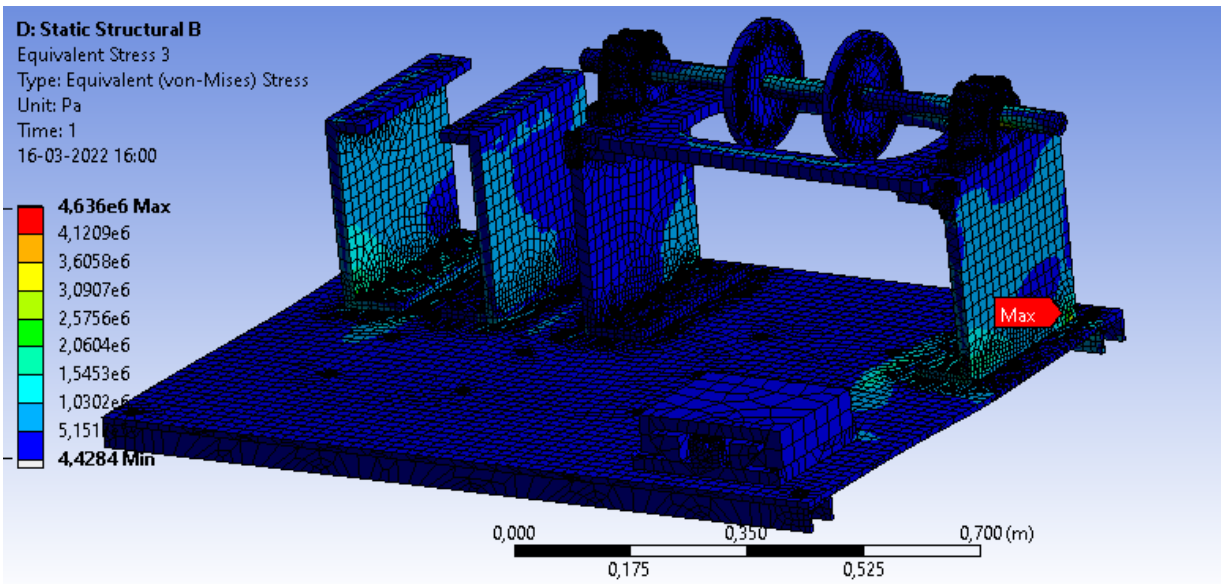


Figura 5.7: Resultado de simulación de resistencias en ANSYS

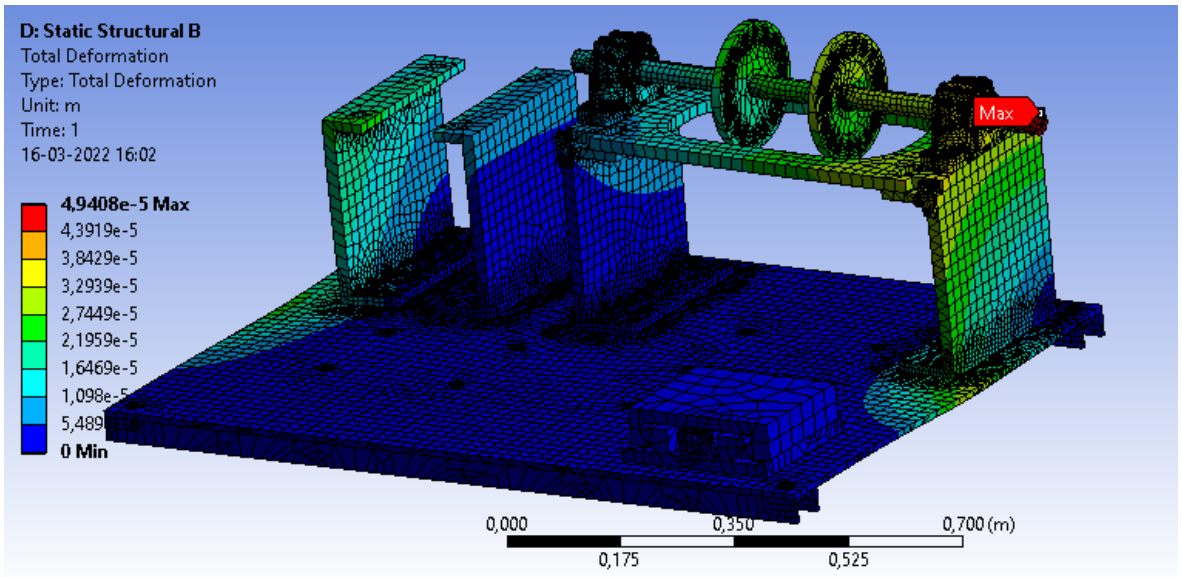


Figura 5.8: Resultado de deformación total en ANSYS.

En la figura 5.7 se muestra que los esfuerzos máximos en la configuración del prototipo son muy bajas a comparación con la fluencia del metal escogido, en este caso para casi todos los arreglos se utilizó un acero estándar A36 con 250 [MPa] esfuerzo de fluencia. Además, en la figura 5.8 también se confirmó la deformación máxima en el arreglo, la cual llega a hacer del orden de la milésima de milímetro por lo que no es preocupante el arreglo ante posibles fallas.

Una parte importante para el arreglo es el estudio de sus frecuencias naturales debido a que en el arreglo se tiene un eje girando constantemente mientras se estudian vibraciones en los rodamientos, hay que cerciorarse que las frecuencias naturales del arreglo no estén cerca de la frecuencia de giro del motor, es por esto por lo que también se realizó un estudio con ANSYS apreciar de mejor manera las frecuencias naturales del arreglo.

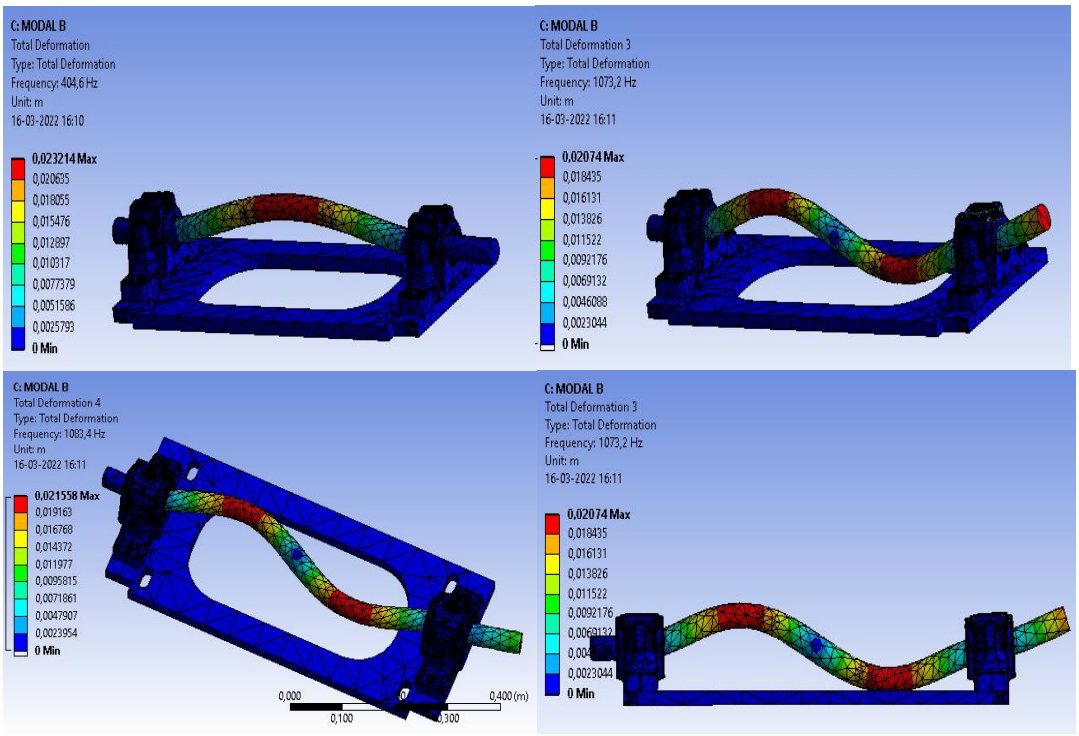


Figura 5.9: Resultados de frecuencias modales del arreglo.

Para los resultados de los estudios modales de vibración de la figura 5.9 del arreglo se tiene sus mínimas frecuencias naturales son cercanas a los 400 Hz, en concreto en los 404.6 Hz y así aumentando, es por esto por lo que no hay preocupaciones debido a que la frecuencia de giro del eje es cercana a los 15 Hz, muy por debajo de las frecuencias naturales del sistema.

Teniendo todos los cálculos realizados tanto de resistencia y frecuencias modales se asume como el diseño listo para su manufactura.

6.- Manufactura

Para iniciar el proceso de manufactura se contó con el servicio de un técnico mecánico, el cual se le contrató para realizar el diseño antes visto. Tanto al principio de la presentación del diseño y también a lo largo del proceso de manufactura el diseño sufrió distintos cambios debido al presupuesto y facilidades para la manufactura. El diseño se muestra en detalle en las siguientes figuras:

Figura 6.1: Vista de la máquina en el laboratorio, vista de frente

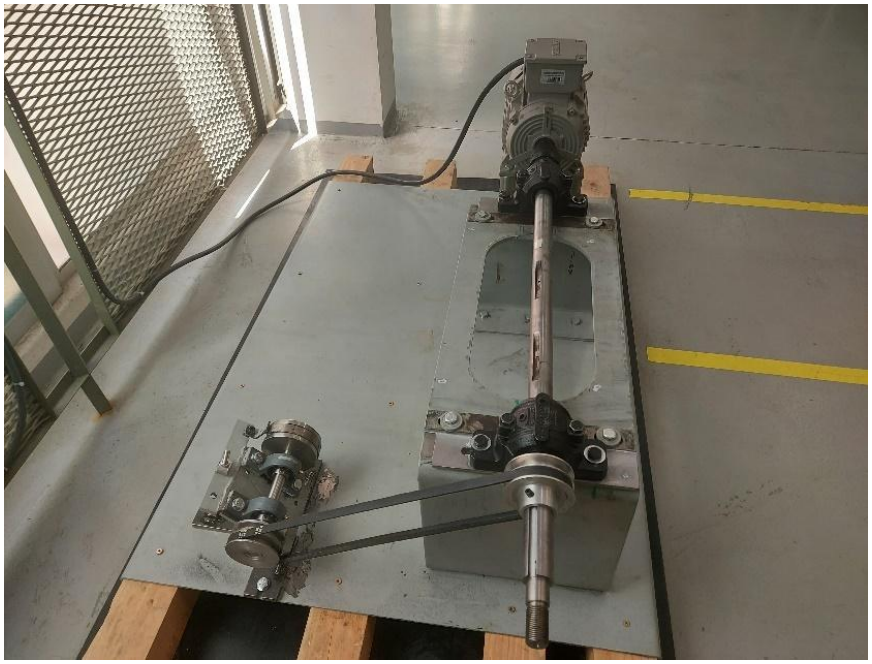


Figura 6.2: Vista de la máquina en el laboratorio, vista lateral

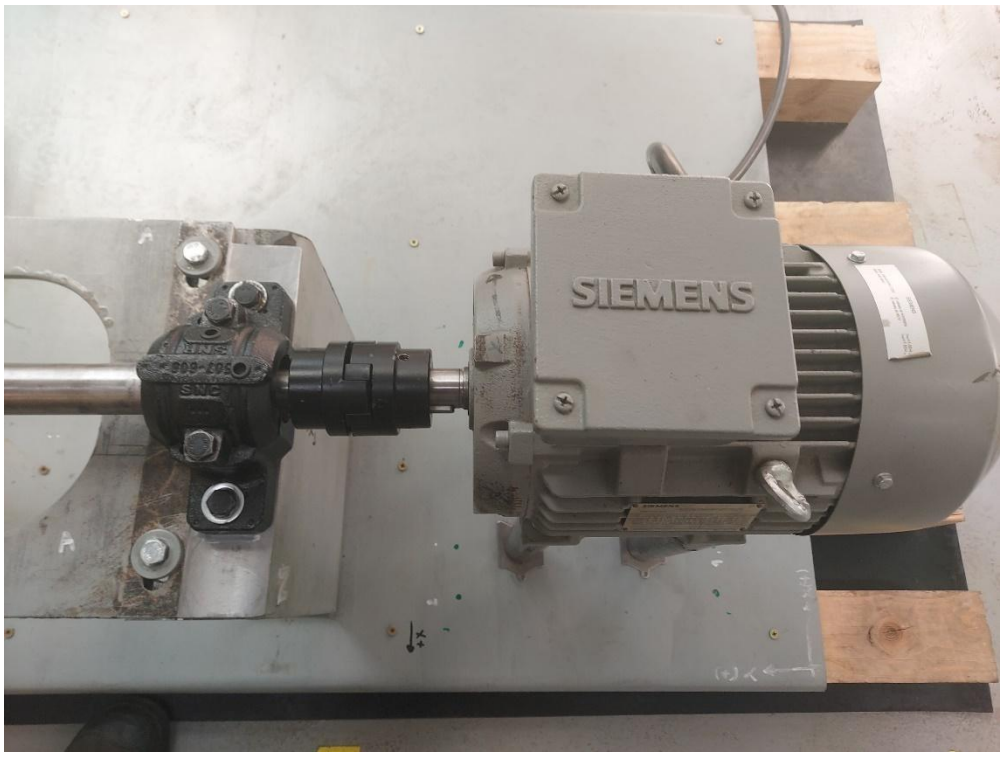


Figura 6.3: Vista de la máquina en el laboratorio, enfoque acople flexible

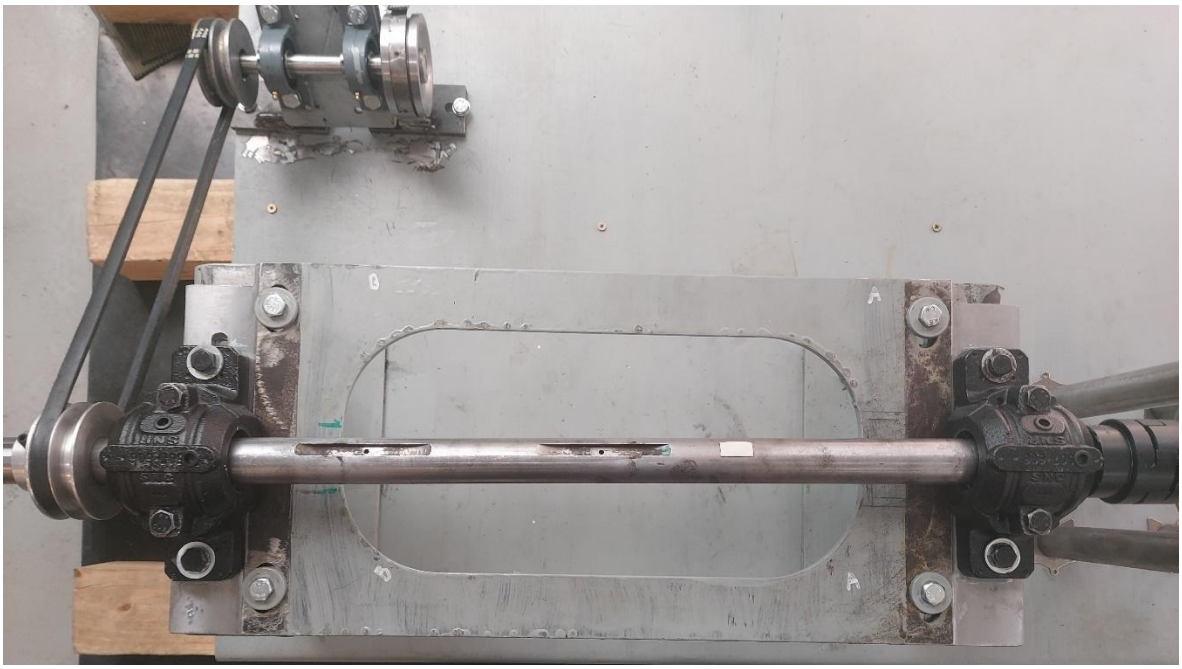


Figura 6.4: Vista de la máquina en el laboratorio, vista desde arriba

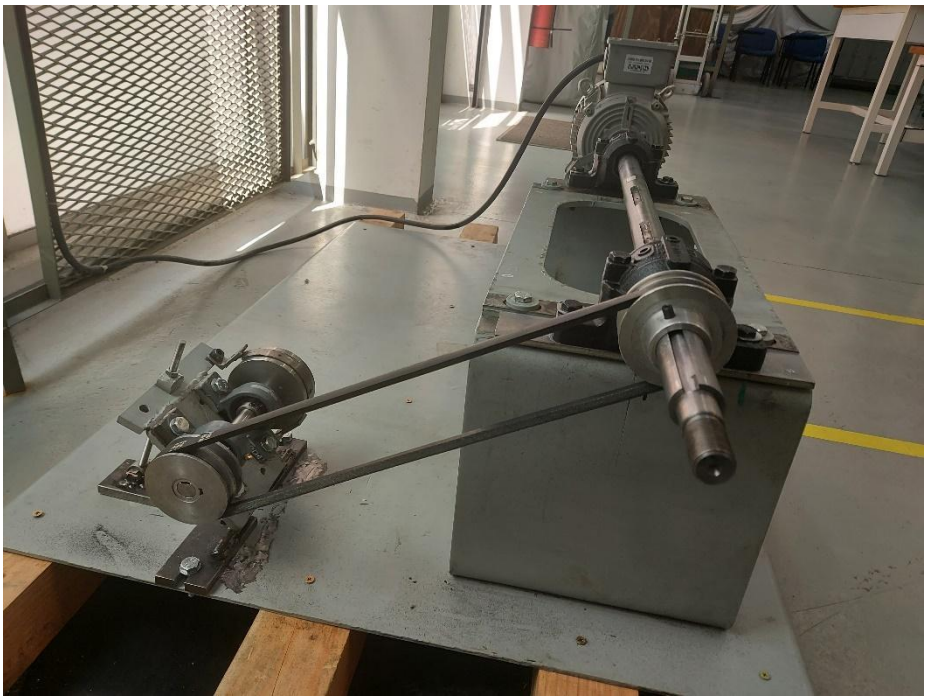


Figura 6.5: Vista de la máquina en el laboratorio, enfoque sistema transmisión

Figura 6.6: Vista de la máquina en el laboratorio, enfoque sistema freno o carga

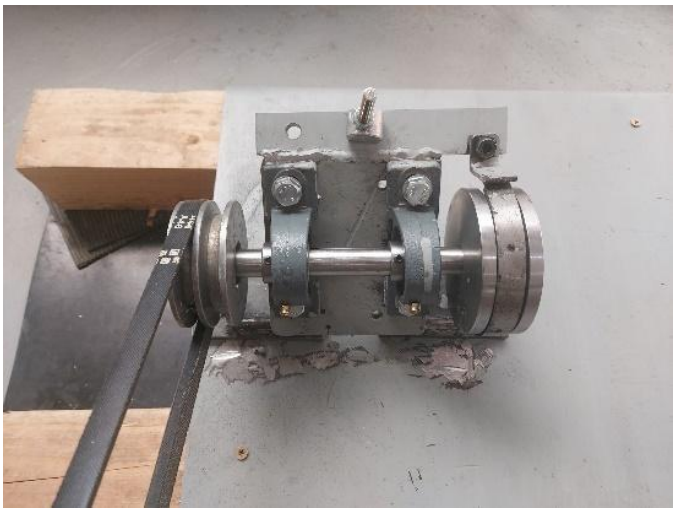


Figura 6.7: Vista del sistema de freno, el cual aportará carga al sistema

Figura 6.8: Vigas soporte motor

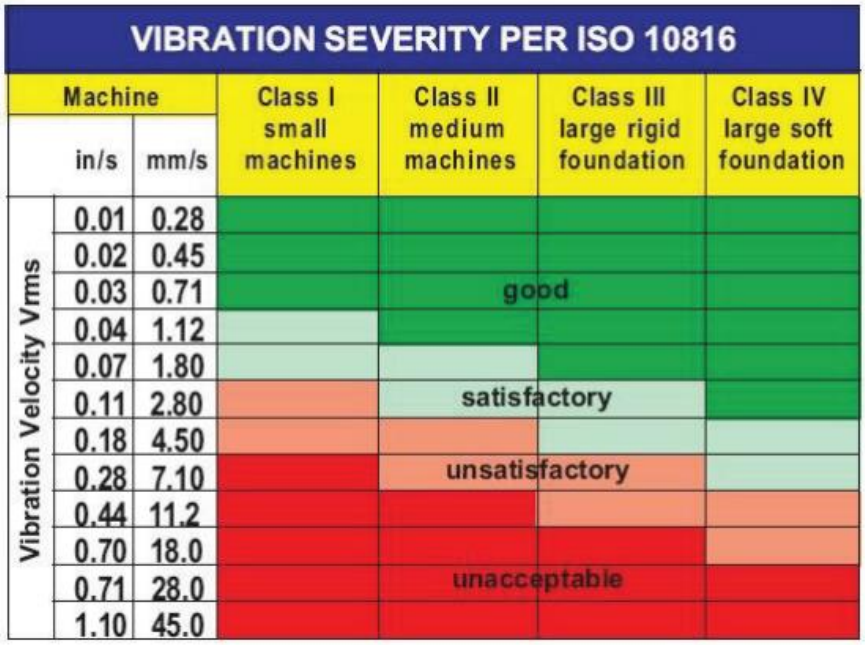
Como se puede ver en las figuras hay muchos cambios respecto al diseño original, esto mencionado anteriormente, es por esto por lo que se describirán a mejor medida modificación a modificación:

- Modificación sistema Freno: En un principio se tenía en mente utilizar un alternador para brindar carga al sistema, esto se cambió por un sistema de balata por facilidad de fabricación y costos, se aprecia en la figura 6.7.
- Modificación base: La base fue modificada por una placa más delgada por facilidad de fabricación y costos, esta se aprecia en la figura 6.1.
- Modificación de barras C: Estas se reemplazaron por vigas de madera cepillada para evitar flexión en la placa más delgada, además de proporcionar rigidez al arreglo, esta se aprecia en la figura 6.1.

- Instalación de alfombra de goma: Se instaló una alfombra de goma para poder amortiguar vibraciones del arreglo al piso, esta se aprecia en la figura 6.1.
- Modificación base Motor: El cambio principal que se hizo es reemplazar la base de viga C, por varas macizas de acero. Esto se realizó debido a facilidades de fabricación y reducción de costos, como se aprecia en la figura 6.8.
- Modificación de tensión de correa transmisora: En principio para el diseño se tenía en mente un sistema de tensión con una base tensora, la cual funcionaba con un sistema de tornillo sinfín, este fue reemplazado por un sistema basculante el cual para agregar más tensión se utilizaba otro tornillo con tuerca, esto se aprecia en la figura 6.6 y 6.7.

7.- Montaje y Arreglo

Para pasar a la fase de implementación y cerciorarse que al utilizar el prototipo fuera eficiente y funcionara de la manera correcta, era necesario medir vibraciones en el lugar en el cual se haría las pruebas, es por esto por lo que con la ayuda del Profesor del laboratorio se procedió a medir con el acelerómetro SKF de la universidad. Para medir y comparar se utilizó la norma ISO10816 la cual se caracteriza por la siguiente tabla.



VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816						
Machine			Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
	in/s	mm/s				
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28				
	0.02	0.45				
	0.03	0.71		good		
	0.04	1.12				
	0.07	1.80				
	0.11	2.80		satisfactory		
	0.18	4.50				
	0.28	7.10		unsatisfactory		
	0.44	11.2				
	0.70	18.0				
	0.71	28.0		unacceptable		
	1.10	45.0				

Figura 7.1: Tabla interpretativa para diferentes tipos de máquinas según norma ISO10816 [12]

Teniendo en cuenta que nuestro armado y arreglo pertenecía a la clase 1 (maquinas pequeñas), nuestras primeras vibraciones debían de estar por debajo de 2.8 mm/s, esto para que logre un buen funcionamiento y en el estudio de vibraciones de rodamientos no tenga "vibraciones parásitas" las cuales no se quieren ver en las lecturas de espectros. Para la primera medición se tuvo un resultado del orden de 20 mm/s, como se aprecia esto pertenecería a inaceptable en la norma ISO, es por esto por lo que antes de poder hacer la

fase de implementación era necesario aplicar muchos arreglos a la máquina. Uno de los principales arreglos los cuales se debían de hacer era el alineamiento de Motor-Eje-Freno, este problema se podía ver a simple vista por lo que para bajar los niveles vibracionales era muy necesario solucionar este problema.

7.1.- Modificaciones y Alineamiento

Para saber qué cambios eran necesarios en la máquina y para poder hacer un alineamiento adecuado es muy importante saber de antemano qué técnica de alineamiento se utilizará, dadas las herramientas presentes en el laboratorio de Tecnología mecánica y los conocimientos del profesor del laboratorio, se escogió el método de relojes comparadores alternos. Este método se explicará a mayor detalle más adelante en el anexo, pero una principal característica de este método y que comparte con otras técnicas es que siempre debe haber una parte móvil y otra parte fija. En nuestro armado todas las partes eran fijas por lo que se decidió hacer los soportes tipo SNL del eje móviles, para hacer un buen alineado en primera parte del Eje-Motor.

El primer cambio para poder hacer un alineamiento fue otorgar un "juego" a los agujeros de la placa base de los soportes tipo SNL del eje, para así poder moverlos libremente en sentido perpendicular al eje, este trabajo se hizo a mano con lima y también se contó con la ayuda del profesor del taller mecánico, utilizando la fresa del taller metalmecánico. El segundo cambio importante fue hacer agujero con hilo al acople flexible, con el fin de instalar los relojes comparadores y así poder realizar un alineamiento con la técnica antes mencionada.

Figura 7.2: Vástagos realizados en la universidad para método de relojes alternos

Así también además de cambios en la máquina se necesitó de la manufactura de vástagos los cuales irían en el acople flexible para poder realizar de manera correcta la alineación, estos se pueden ver en la figura 7.2, estos vástagos fueron realizados en el torno de la universidad en el taller metalmecánico con la ayuda del profesor de torno.

Figura 7.3: Método de relojes alternados en la máquina

En la figura 7.3 se puede ver cómo era el arreglo para realizar el método de relojes comparadores alternos, es una vista desde arriba donde la parte fija es el motor eléctrico (izquierda) y la parte móvil el eje con sus soportes tipo SNL (derecha). El método está más a detalle en el anexo (11.1).

8.- Implementación

8.1.- Instrumentos de medición

En la toma de datos en la universidad, el laboratorio de Tecnología Mecánica cuenta con instrumentos los cuales son utilizados normalmente en la industria, en este caso se cuenta con un acelerómetro de marca SKF y un colector de datos o adquisidor de datos el cual procesa las imágenes, de este último se obtienen los datos y archivos para trabajarlos posteriormente en Matlab.

Figura 8.1: Acelerómetro analizador de vibraciones SKF modelo CMSS2200 con acople magnético

Figura 8.2: Adquisidor de datos SKF Microlog Analizer serie GX.

Para este último en la etapa de medición, se le aplicó una configuración la cual estará presente en todas las mediciones en la máquina, la cual corresponde a:

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

Figura 8.3: Tacómetro modelo CMAC 5030

Además, para medir las RPM del eje a la hora de trabajar con carga se contó con la ayuda de un tacómetro el cual está conectado al adquisidor de datos SKF.

8.2.- Prueba de Clustering anterior

A la hora de comenzar con la implementación es importante tener en cuenta los trabajos anteriores a los estudios que se realizaron para proceder de manera correcta. En primer lugar, anterior a las propuestas de diseño se realizaron estudios de clustering de datos con la configuración del anterior memorista Diego de Arcas, este estudio se realizó para comparar el clustering de 2 rodamientos completamente nuevos.

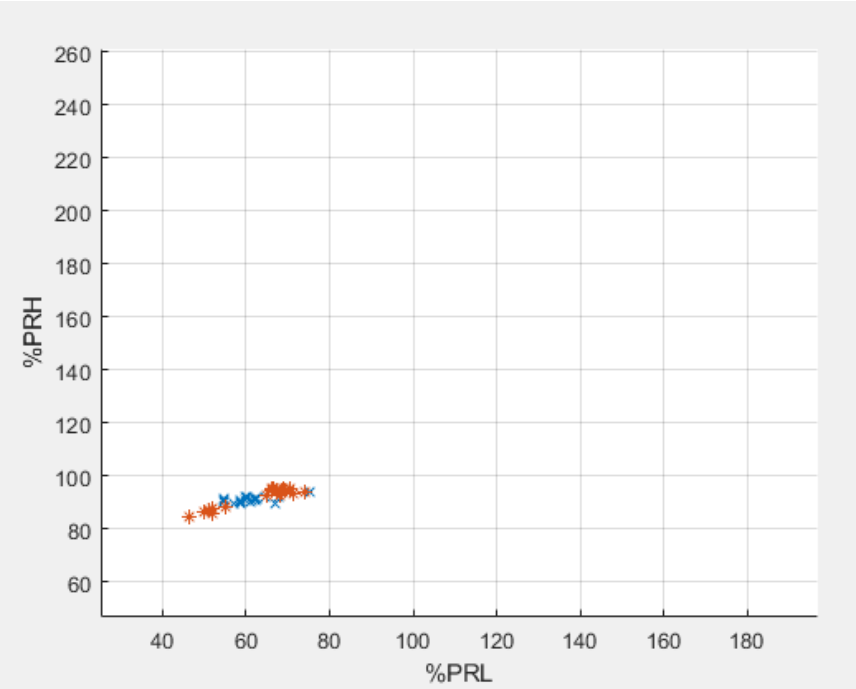


Figura 8.4: Clustering rodamientos sanos

En la figura se muestra el resultado del primer estudio de clustering, en el cual se verificó que el clúster de PRH y PRL en rodamientos sin fallas si se agrupan por lo que el cluster si se forma. Con esto en mente se volvió a plantear la propuesta de estudiar la progresión de fallas en rodamientos. Con esto en mente se necesitaba tener una referencia de datos para poder tener puntos de comparación y verificar que el arreglo mecánico del prototipo funcionaba para poder estudiar las vibraciones.

Para obtener este clustering, se obtienen datos desde los instrumentos SKF, estos miden vibraciones y las muestran como espectros vibracionales.

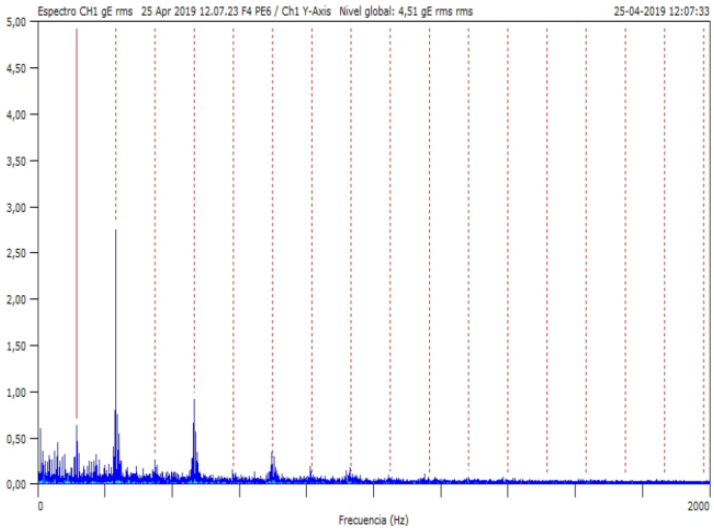


Figura 8.5: Ejemplo de espectro vibracional entregado por el instrumento de medición [3]

El instrumento al entregar los archivos los entrega en formato CSV, muy parecido al formato Excel, este último es capaz de leerlo, pero para poder trabajarlo en Matlab es necesario hacer modificaciones a los archivos borrando principalmente información respecto a la medición realizada.

	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 F4 J2.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 8.6: Archivo entregado por el instrumento ya en computador

En la figura 8.6 se muestra el formato en el cual el dispositivo de medición entrega los datos para posteriormente ser trabajados en Matlab. Los códigos utilizados en Matlab se encuentran en el anexo

8.3.- Case Western Reserve Data

Los datos que se usaron en comparación pertenecen a Case Western Reserve, en el cual se midieron las vibraciones de muchas fallas con distintas profundidades de fallas.

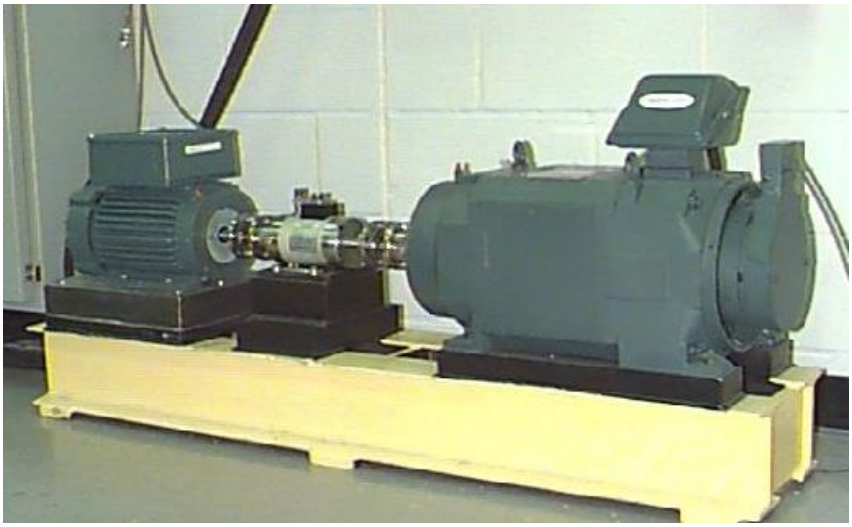


Figura 8.7: Arreglo de la universidad de Case Western Reserve

En la figura se puede ver el arreglo para el estudio de Case Western Reserve, el cual consta de un motor eléctrico de 2 HP, un codificador de torque y un dinamómetro. Las fallas por estudiar en las cuales se realizaron las mediciones fueron fallas de diámetro equivalentes a 0.007 [pulg], 0.014 [pulg], 0.021 [pulg], y 0.028 [pulg]. Las mediciones fueron tomadas usando acelerómetros los cuales fueron puestos en el armado usando bases magnéticas, las muestras y muestras vibracionales fueron obtenidas a unas frecuencias de 12000 datos por segundo, también fueron obtenidas a una velocidad de 48000 muestras por segundo.

* = Data not available

Fault Diameter	Motor Load (HP)	Approx. Motor Speed (rpm)	Inner Race	Ball	Outer Race Position Relative to Load Zone (Load Zone Centered at 6:00)		
					Centered @6:00	Orthogonal @3:00	Opposite @12:00
0.007"	0	1797	IR007_0	B007_0	OR007@6_0	OR007@3_0	OR007@12_0
	1	1772	IR007_1	B007_1	OR007@6_1	OR007@3_1	OR007@12_1
	2	1750	IR007_2	B007_2	OR007@6_2	OR007@3_2	OR007@12_2
	3	1730	IR007_3	B007_3	OR007@6_3	OR007@3_3	OR007@12_3
0.014"	0	1797	IR014_0	B014_0	OR014@6_0	*	*
	1	1772	IR014_1	B014_1	OR014@6_1	*	*
	2	1750	IR014_2	B014_2	OR014@6_2	*	*
	3	1730	IR014_3	B014_3	OR014@6_3	*	*
0.021"	0	1797	IR021_0	B021_0	OR021@6_0	OR021@3_0	OR021@12_0

Figura 8.8: Archivos disponibles por el Case Western Reserve (CWR).[13]

Los documentos constan de un archivo de Matlab, el cual simplemente es una columna con, en este caso 12000 intensidades de vibraciones como se aprecia en la figura 8.8.

Las fallas realizadas por la Reserva de Western son en la pista interna, en la bola y en la pista externa, estas fallas fueron realizadas en los rodamientos mediante electroerosión, cabe recalcar que el modelo del rodamiento utilizado es el 6205, muy parecido a 1207 el cual se utilizó en la implementación de nuestro arreglo mecánico.

8.4.- Clustering de fallas con los datos del Case Western Reserve

Antes de poder avanzar con el estudio de progresión de fallas con los datos del CWR, era importante utilizar la teoría de la memoria anterior para poder verificar que el mapeo de zonas de fallas fuera correcto, ya que el estudio del memorista anterior dio un buen resultado, se repitió el mismo procedimiento, pero con los datos del CWR, esto era importante para el análisis ya que confirma que se avanza en el proyecto con buena dirección.

Para el cluster de datos de fallas del CWR se utilizaron muchos archivos los cuales estarán detallados en el anexo, con estos datos de vibraciones se procedió a utilizar el método antes mencionado.

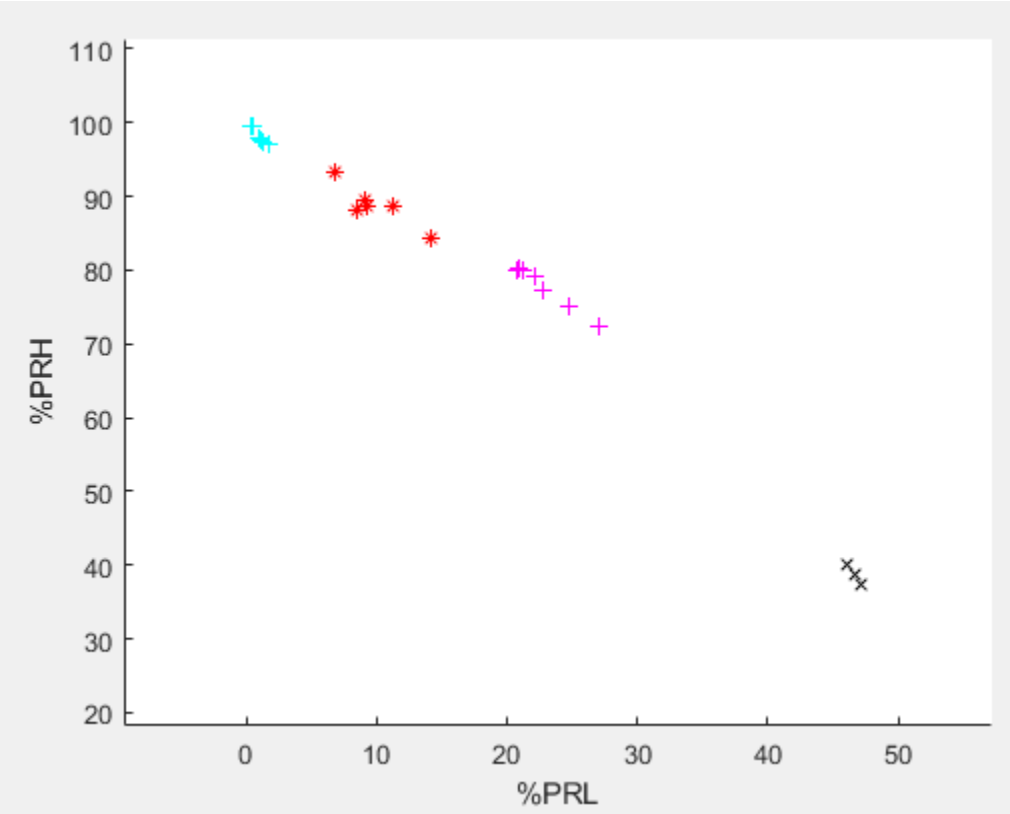


Figura 8.9: CLustering de fallas con los datos de CWR

Como ser aprecia en la figura 8.9 hay una clara agrupación de datos, lo que confirma el trabajo hecho por el memorista anterior, donde los datos del espectro de vibraciones de las distintas fallas se agrupan en el mapeo PRH y PRL, siendo los datos de color negro un rodamiento sin fallas, los colores morados fallas en la bola, los datos de color rojo fallas en la pista interna y los datos de color celeste son fallas en la pista externa.

8.5.- Progresión de falla con los datos de Case Western Reserve

Los archivos los cuales fueron utilizados para realizar un progreso de falla con los datos del Case Western Reserve son los pertenecientes a 12 mil datos obtenidos y con motor load 1, esto fue escogido debido a que se poseía mayor cantidad de datos para la progresión de falla, en concreto los archivos utilizados fueron B007_1, B0014_1, B0021_1 y B0028_1 y el dato sin falla Normal_3.

Para el estudio de progresión de fallas con los datos de Case Western Reserve se escogió la progresión de fallas con falla en la bola, esto debido a que replicar la misma falla en nuestro armado era mucho más simple. Los intervalos de frecuencia para obtener este mapeo son, para el intervalo de baja frecuencia de 30 a 830 Hz y para el intervalo de alta frecuencia de 660 a 1660 Hz. Con la ayuda del software Matlab se pudo realizar un mapeo PRH y PRL para las distintas fallas en la bola con los datos de CWR.

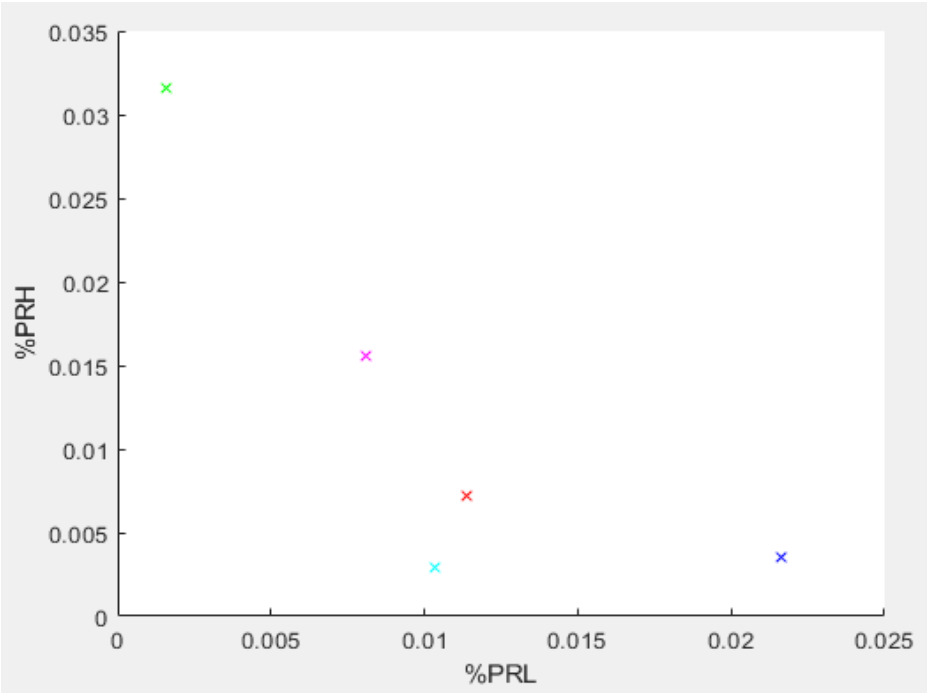


Figura 8.10: Progresión de falla en la bola con datos de CWR

Como se aprecia en la figura 8.10 de progresión de falla, se puede apreciar que con el mapeo de datos PRH y PRL hay una línea de tendencia, donde el dato azul es la falla de menor profundidad y la falla verde es la falla de mayor profundidad. Esto Marca el objetivo a alcanzar con el prototipo, obtener una tendencia en la progresión de falla en la bola mediante el mapeo de PRH y PRL. En la siguiente lista se establece a qué punto pertenece cada falla. Los códigos utilizados en Matlab se encuentran en el anexo:

- Punto azul: Sin falla
- Punto Magenta: Falla de 0.17 milímetros de diámetro
- Punto Celeste: Falla de 0.35 milímetros de diámetro
- Punto Morado: Falla de 0.53 milímetros de diámetro
- Punto Verde: Falla de 0.71 milímetros de diámetro

8.6.- Manufactura de las fallas

Uno de los principales retos poder replicar los ensayos de Case Western Reserve es ser capaz de hacer fallas tan pequeñas, para recordar las fallas hechas en la bola son:

- 0.007 pulgadas de diámetro = 0.17 milímetros de diámetro
- 0.014 pulgadas de diámetro = 0.35 milímetros de diámetro
- 0.021 pulgadas de diámetro = 0.53 milímetros de diámetro
- 0.028 pulgadas de diámetro = 0.71 milímetros de diámetro

Estas fallas todas tienen una profundidad de 0.11 pulgadas o 0.27 milímetros. Es por esto por lo que significa un gran reto recrear estas fallas, principalmente porque en la universidad no hay una máquina de electroerosión y contratar una empresa externa tiene un costo demasiado alto.

Después de mucha búsqueda se pudo encontrar brocas muy pequeñas de distintos diámetros, estas brocas se usarían en una CNC, que en este caso se contó con la ayuda del Fablab. Estas brocas no poseen los mismos diámetros por lo que usaron medidas que se acomodan de mejor manera a las medidas utilizadas en el Case Western Reserve y son las siguientes:

- 0.17 milímetros de diámetro --- Broca de 0.3 milímetros
- 0.35 milímetros de diámetro --- Broca de 0.4 milímetros
- 0.53 milímetros de diámetro --- Broca de 0.5 milímetros
- 0.71 milímetros de diámetro --- Broca de 0.7 milímetros

Figura 8.11: Juego de brocas utilizado para hacer las fallas en la bola del rodamiento

Si bien las medidas de las brocas son cercanas a las hechas con CWR, la más lejana es la broca de 0.3 milímetros, se estudió la posibilidad de obtener una broca de diámetro más pequeño pero los costos no lo permitían ni las condiciones de operación.

Como se mencionó anteriormente las condiciones de operación para realizar las fallas en la bola no eran las óptimas, esto porque las brocas que se utilizaron de la figura 8.11 están diseñadas para trabajar a velocidades de 30.000 RPM, en la universidad el máximo que se puede obtener con las máquinas CNC de la universidad, en concreto en el Fablab son de 18.000 RPM.

Figura 8.12: CNC utilizada para hacer las fallas en las bolas del rodamiento

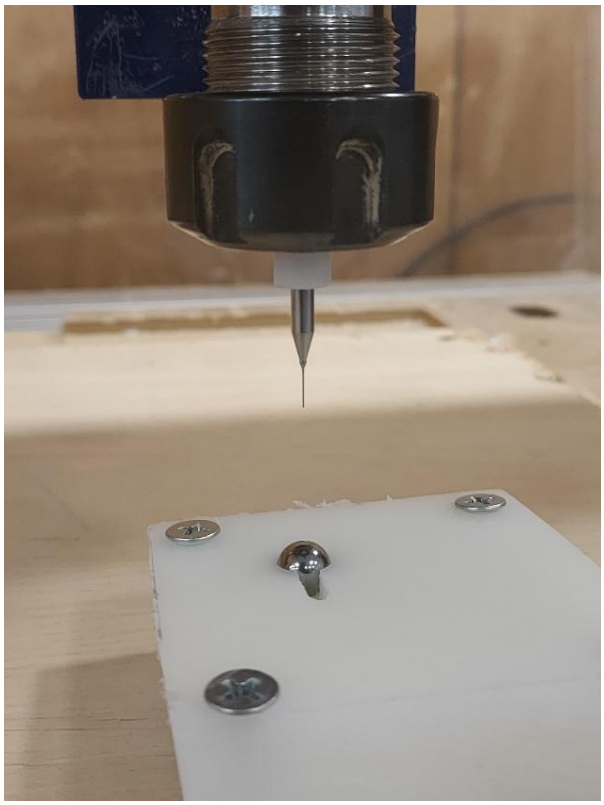


Figura 8.13: Arreglo con plástico para hacer machina con la bola y broca en proceso de perforación

En el proceso de hacer las fallas la principal preocupación era que las brocas se rompieran en el proceso, debido a que no se cumplían con las velocidades que recomienda el fabricante y no son brocas diseñadas para perforar metal, sino que están hechas para trabajar con plástico, debido a esto se procedió con mucho cuidado. A lo largo de todas las perforaciones no hubo problemas, hasta que se llegó a diámetros más pequeños, hubo ruptura de broca en los diámetros de 0.4 milímetros y 0.3 milímetros, por lo que se tuvo que contar con otro juego de brocas. Todas las fallas se pudieron hacer son complicación a una profundidad de 0.2 milímetros excepto por el diámetro de 0.3 milímetros la cual solo se pudo realizar una perforación de 0.1 milímetros. Con esto las fallas realizadas en las distintas bolas del rodamiento fueron:

- Broca de 0.3 milímetros de diámetro con 0.1 milímetros de profundidad
- Broca de 0.4 milímetros de diámetro con 0.2 milímetros de profundidad
- Broca de 0.5 milímetros de diámetro con 0.2 milímetros de profundidad
- Broca de 0.7 milímetros de diámetro con 0.2 milímetros de profundidad

Es necesario aclarar que las pruebas fueron hechas con rodamientos distintos, los cuales poseían una falla distinta cada rodamiento, por lo que el montaje fue realizado 5 veces, un rodamiento distinto con una distinta falla.

8.7.- Procedimiento de Montaje

Para proceder a hacer las mediciones requiere una serie de pasos, los cuales se necesitan seguir en un orden y cuidado, con el fin de poder tener una medición buena y sin vibraciones las cuales no se desean en el espectro. Son las siguientes:

- En primer lugar, se debe desatornillar el sistema basculante para librar la correa y así poder liberar el eje.
- Después se deben desatornillar los soportes tipo SNL para poder liberar la carcasa (solo liberar la carcasa debido a que la base debe estar fija para poder mantener el alineamiento).
- Desatornillar los prisioneros del acople flexible para poder retirar el eje con sus rodamientos y anillos.
- Quitar rodamiento e instalar el rodamiento deseado para su posterior estudio de vibraciones.
- El descanso en el cual se trabajará será el descanso más alejado del motor y más cercano a la correa del freno.
- Al tener los rodamientos instalados en el eje se puede ubicar el eje con cuidado para no dañar los componentes.
- Con el eje instalado se deben poner las tablas de los soportes tipo SNL, atornillar y apretar nuevamente prisioneros del acople flexible.
- Alinear poleas del eje y del freno para instalar posteriormente la correa del sistema basculante.
- Tensar el sistema basculante para poder tener mayor fuerza en la correa y tener mejor transmisión de momento.
- Instalar acelerómetro en la parte posterior del descanso más lejano al motor
- Con todo el arreglo listo se puede comenzar la toma de mediciones, esto se debe hacer con cuidado ya que el freno se debe ir instalando poco a poco midiendo constantemente el amperaje del motor eléctrico.
- Después de haber alcanzado el amperaje deseado medir vibraciones.
- Después de medir vibraciones apagar y comenzar de nuevo para instalar otro rodamiento con otra profundidad de falla.

8.8.- Ensayos y medición de vibraciones

Con las fallas ya hechas en las bolas de rodamientos, los cuales son rodamientos tipo 1207 de diámetro 35 milímetros, los mismos utilizados en el trabajo del memorista anterior y con el arreglo del prototipo alineado lo máximo posible ya es posible realizar las mediciones y obtener los resultados.

Para realizar las mediciones se contó con un freno tipo balata, por lo que tener un freno cuantificado no era posible, el problema era que no era reconocible la cantidad de freno o carga que tenía el sistema. La principal solución que se obtuvo fue cuantificar el amperaje del motor eléctrico, cuanto más freno tenía el sistema más amperaje aumentaba en el variador de frecuencia del laboratorio. El amperaje base del motor es de 3 amperios y su máximo era de 6 amperios, por lo que se decidió que se aumentara el freno o carga al sistema hasta que se llegara a 4.5 amperios visualizados en el variador de frecuencia.

Mediante el acelerómetro se pudo medir las vibraciones del rodamiento correspondiente a cada falla, con las mediciones de las vibraciones y con trabajo hecho en Matlab es posible obtener el espectro de vibraciones. En las siguientes figuras se representa un espectro de vibraciones característico para cada falla, es decir para la sin falla, falla de 0.3 [mm], falla de 0.4 [mm], falla de 0.5 [mm] y falla de 0.7 [mm]

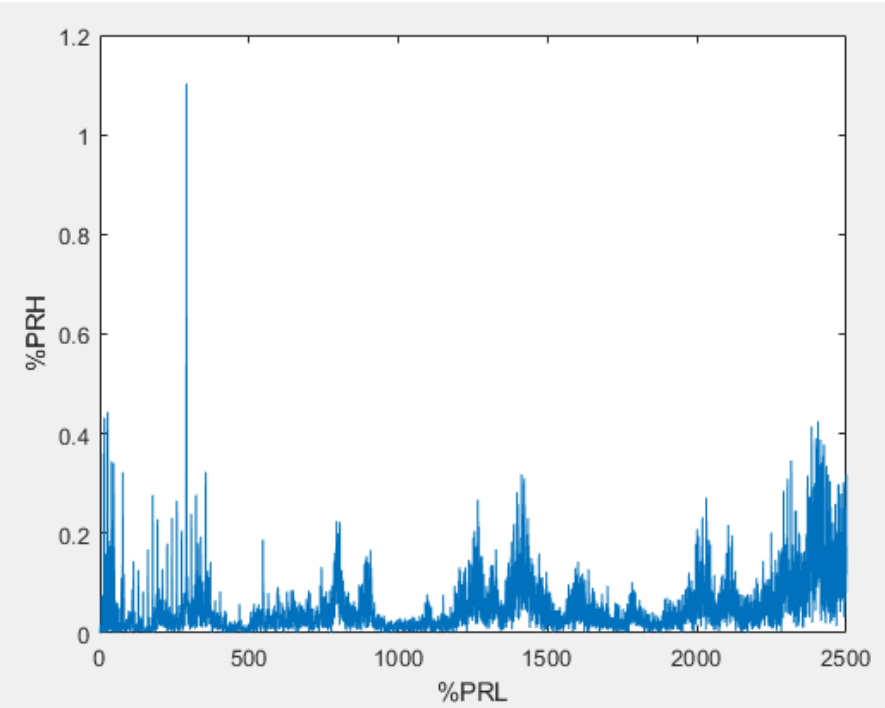


Figura 8.14: Espectro de vibraciones de rodamiento sin falla.

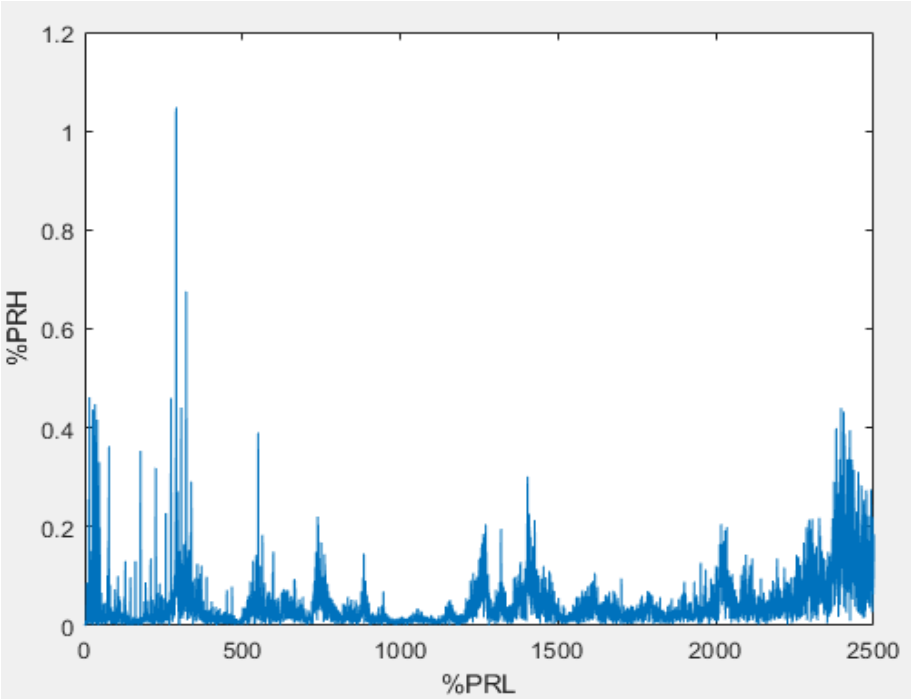


Figura 8.15: Espectro de vibraciones de rodamiento con falla de 0.3 [mm].

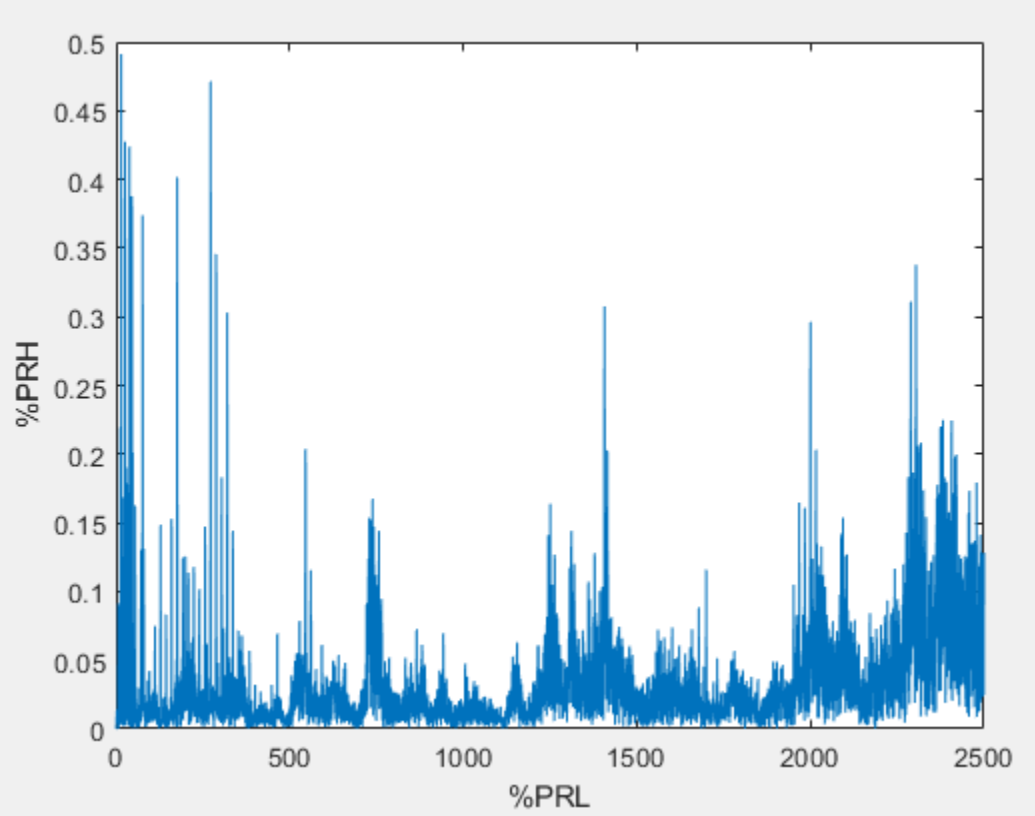


Figura 8.16: Espectro de vibraciones de rodamiento con falla de 0.4 [mm].

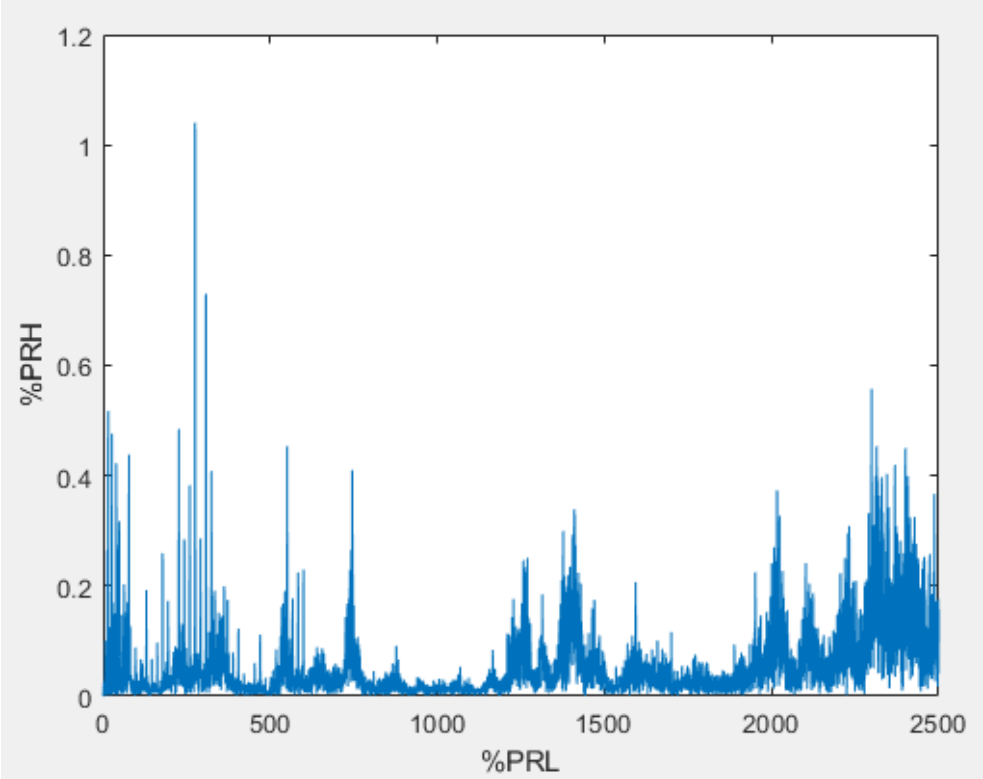


Figura 8.17: Espectro de vibraciones de rodamiento con falla de 0.5 [mm].

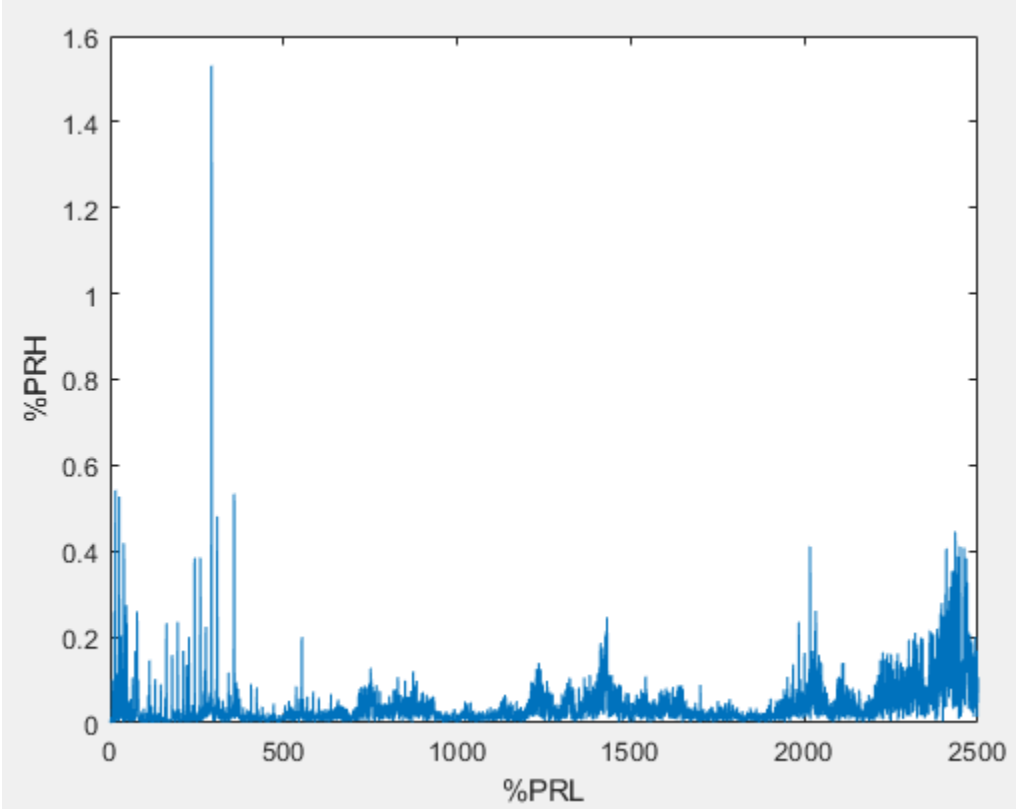


Figura 8.18: Espectro de vibraciones de rodamiento con falla de 0.7 [mm].

En las figuras anteriores figuras se representan los espectros vibraciones característicos de las fallas en rodamientos, estos corresponden a una muestra característica, la figura 8.14 corresponde a la sin falla, la figura 8.15 corresponde a la falla de 0.3 [mm], la figura 8.16 a la falla de 0.4 [mm], la figura 8.17 a la falla de 0.5 [mm] y la figura 8.18 a la falla de 0.7 [mm].

Finalmente, con los espectros vibracionales de todas las fallas, esto implicaba hacer cambio de rodamientos en cada medición por lo que no se podía hacer seguido, esto solo implicó más tiempo del proceso.

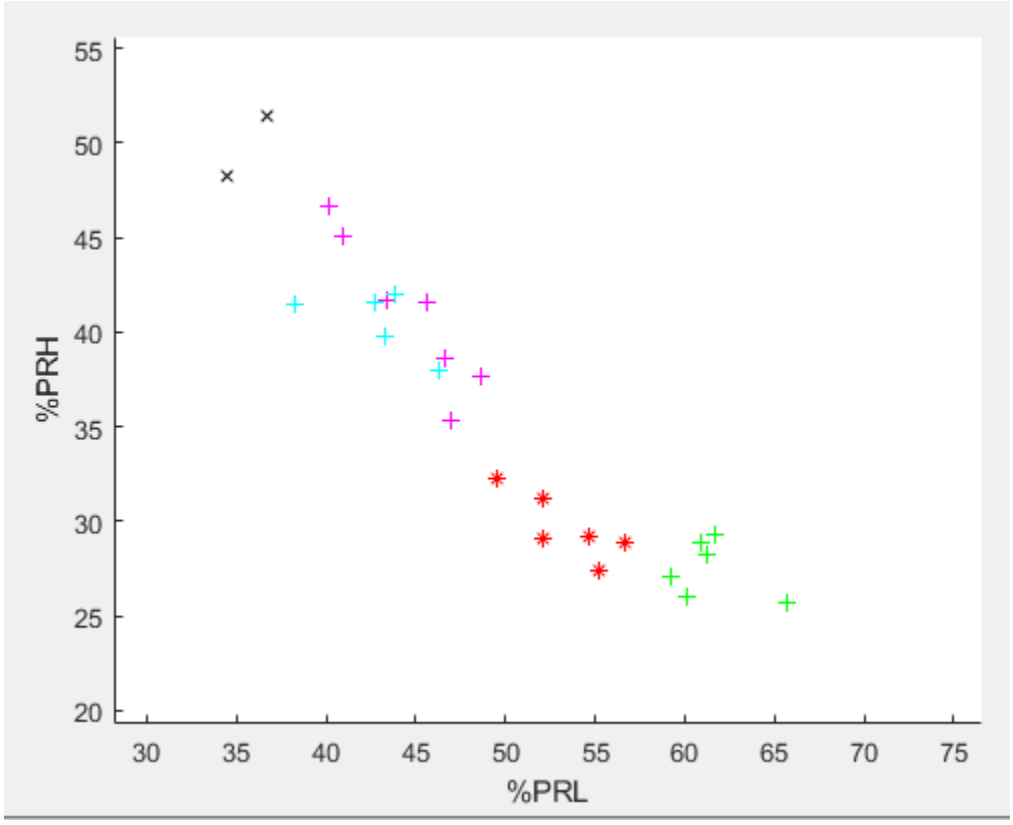


Figura 8.19: Clúster de Progreso falla en la bola en el prototipo hecho

Como se aprecia en la figura 8.14 al medir las vibraciones en el arreglo, y trabajar con ellas en Matlab también se pudo obtener una tendencia de datos en el mapa de PRH y PRL, donde los puntos negros es la falla es la sin falla y la verde es la falla de mayor diámetro. Esta tendencia también está hecha con un clúster de datos los cuales otorgan mayor valor estadístico a los resultados obtenidos. Los intervalos para poder obtener este mapeo son para el intervalo de baja frecuencia de 0 a 1040 Hz y para el intervalo de alta frecuencia de 1300 a 2080 Hz. Los códigos de Matlab se encuentran en el anexo. En la siguiente lista se identificará qué punto pertenece a qué falla de bola.

- Puntos Negros: Sin falla
- Puntos Magentas: Falla de 0.3 milímetros de diámetro
- Puntos Celestes: Falla de 0.4 milímetros de diámetro
- Puntos Rojos: Falla de 0.5 milímetros de diámetro
- Puntos Verdes: Falla de 0.7 milímetros de diámetro

9.- Conclusiones

Al realizar análisis de los métodos y estudios anteriores respecto a las técnicas de PRH y PRL en vibraciones, no se pudo apreciar avance y estudios ya realizados, más allá de los trabajos del profesor correferente y principalmente por parte del memorista anterior, específicamente en el estudio de espectros vibracionales en rodamientos y mapeo de distintas fallas con la técnica de PRH y PRL, este estudio se hizo con la base de distintos estudios de clúster de datos en experimentos de electricidad, donde los datos se agrupan en zonas del mapa PRH y PRL. El estudio realizado en este trabajo complementa el estudio ya hecho avanzando en el estudio de progreso de falla.

El diseño del banco de pruebas para estudiar vibraciones en rodamientos se realizó de manera satisfactoria, con un modelo 3D diseñado en Inventor y el estudio tanto de frecuencias modales y esfuerzos máximos se hizo en el software de cálculo ANSYS.

Al realizar la puesta en marcha del banco de pruebas presentó dificultades, debido principalmente a que el prototipo estaba desalineado y con niveles de vibración por sobre la norma, debido a esto se requirió realizar un alineamiento mediante método de relojes comparadores alternos, así también como la manufactura de piezas adicionales para realizar dicho método. Gracias a lo anterior, se pudo lograr y realizar estudios posteriores e implementaciones del banco de pruebas, adaptando distintas piezas del banco de pruebas. Con las mejoras realizadas se logró bajar las vibraciones totales del equipo más de un 75%, llegando a niveles de vibración de 1.41 [m/s].

Para realizar la implementación con el banco de pruebas se realizó una metodología para poder instalar distintos rodamientos para estudiar tanto distintas fallas y distintas profundidades de falla, además para la implementación y estudios de técnica de PRH y PRL se realizaron mediciones de vibraciones para distintas profundidades de fallas en la bola de rodamiento, utilizando 5 rodamientos distintos, esto se realizó mediante el acelerómetro antes mencionado.

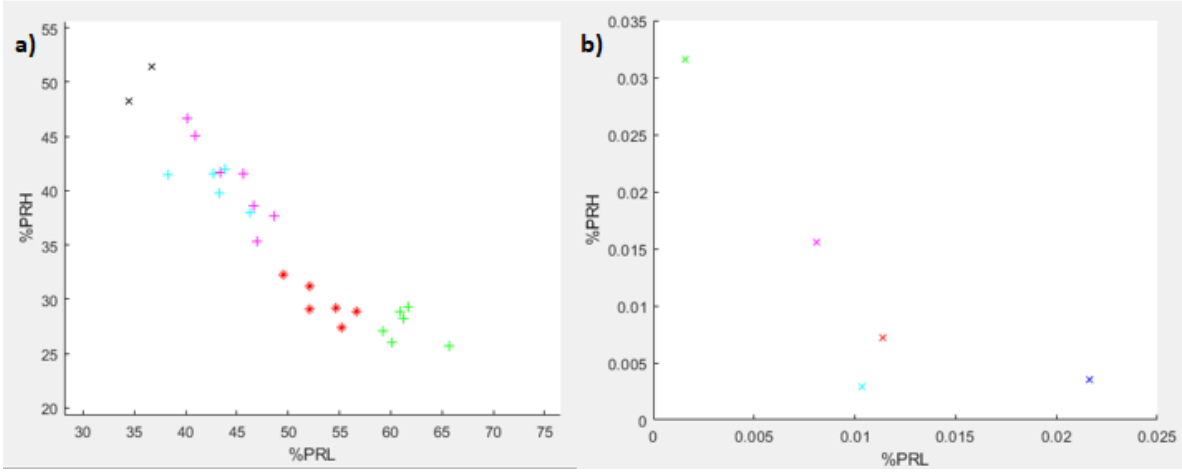


Figura 9.1: Progreso de falla en bola de rodamiento en mapa PRH y PRL, donde en el gráfico a) están los datos tomados con el banco de pruebas y en el gráfico a) están los datos de CWR.

Para finalizar el último punto de la implementación del diseño del banco de pruebas, es importante apreciar la figura 9.1, en la cual se puede ver la similitud en las líneas de tendencia que forman los progresos de falla en la bola, donde en el gráfico b) se pueden ver la línea de tendencia formada por los datos obtenidos por el Case Western Reserve y en el gráfico a) los datos tomados en el laboratorio de Tecnología Mecánica en la Universidad, con el uso del banco de pruebas. Si bien ambos muestran una línea de tendencia, esta es inversa, ya que los datos de CWS denotan una línea de tendencia decreciente cuando se aumenta la falla en la bola del rodamiento, en cambio los datos obtenidos en el laboratorio muestran una línea ascendente a medida que se aumenta el diámetro de falla en la bola. Los resultados experimentales muestran una clara similitud a la hora de estudiar los espectros vibraciones ocasionados por fallas en los rodamientos, por lo tanto, se puede concluir que el banco de pruebas sirve y funciona para poder estudiar más a cabalidad los espectros vibracionales y técnica PRH y PRL en espectro vibracionales de rodamientos.

10.- Discusión y Recomendaciones para trabajos futuros

Si bien se pudo trabajar de manera correcta con la máquina, esto no está libre de cosas las cuales pudieron haber afectado las mediciones tomadas, se pudo ver una clara similitud en análisis de las vibraciones dentro del mapa PRH y PRL, pero en primer lugar unos de los grandes problemas que surgieron fue a la hora de la manufactura, en el diseño original se tenía una base robusta la cual tenía como principales soportes 3 vigas C las cuales brinda mucha rigidez al sistema, al hacer el cambio por una placa delgada la cual se le tuvieron que instalar maderos para que no existiera la posibilidad de alguna flexión, esto hizo que el trabajo a la hora de realizar existieron “vibraciones parásitas” las cuales pueden venir de las vibraciones de la base, las cuales no se quieren ver en el espectro de vibraciones.

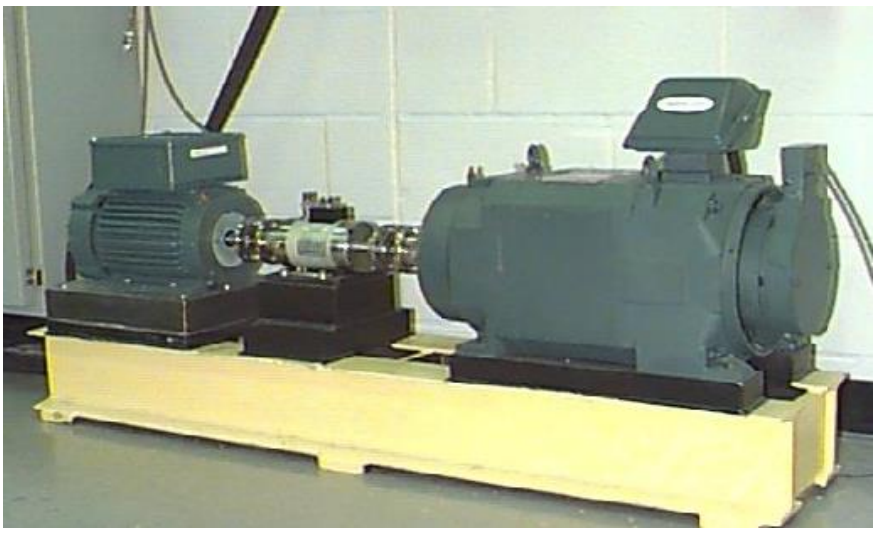


Figura 8.13: Arreglo para medición de vibraciones del Case Western Center [13]

Como se muestra en la figura 8.13 que se mostró en la parte de implementación se muestra una bancada o base para el arreglo hecho de fundición, este material es muy bueno para aislar y absorber las vibraciones, este mismo material es usado tanto en fresas y tornos, por lo que se recomienda para futuros arreglos o mejoras a la máquina reemplazar la base actual con una de acero de función para poder tener mediciones más limpias y sin vibraciones no deseadas en los espectros vibracionales.

Algo importante a considerar es la relevancia que posee el cambio de carga en el motor en los datos de CWR, en sus datos en las mediciones de vibraciones, estas poseen distintas cargas, las cuales van desde 0 a 3 HP de carga. Lo que se espera es que entre más carga más niveles de vibraciones, pero como se aprecia en la figura 8.9, las fallas se agrupan mucho a pesar de tener distintos niveles de carga, es por esto por lo que se debe tener reservas respecto a la consideración final de los datos del CWR.

Un punto muy importante a la hora de realizar la implementación y trabajar con los mapas PRH y PRL, es la elección de los intervalos para calcular los PRL y PRH.

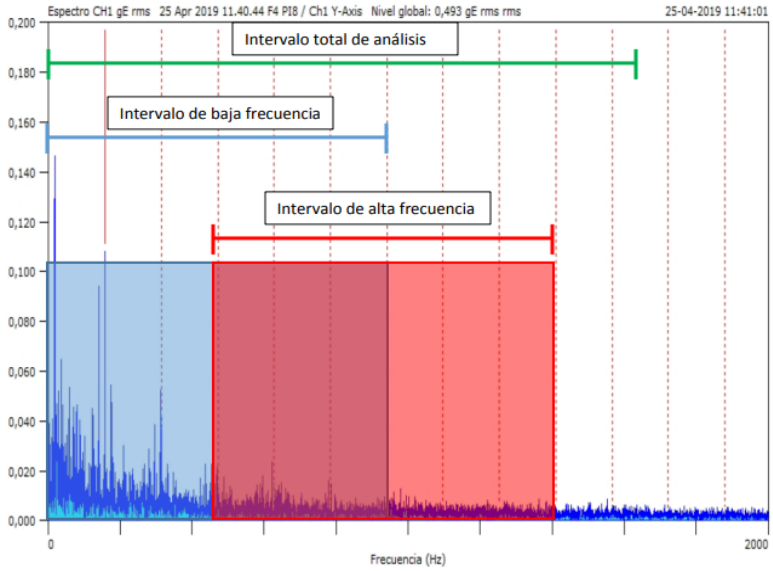


Figura 10.1: Límites vibracionales para calcular PRH y PRL. [3]

En la figura 10.1 se muestra cómo estos límites son escogidos o trabajados, estos límites (zona roja y azul), pueden solaparse, no estar juntos, solo compartir los límites. Es por esto por lo que se necesita una forma más formal para escoger los límites, si bien hay solo recomendaciones, sería ideal tener alguna especie de código que pudiera iterar y obtener los mejores mapas PRH y PRL que se requieren o estudiar el método en profundidad para encontrar relaciones matemáticas para trabajar los datos.

Para trabajos futuros se recomienda utilizando la máquina caracterizar de mejor manera distintos tipos de fallas, en la magnitud que estas sean reales, con esto se refiere a que las fallas no sean tan grandes, sino que sean como las que se encuentran en la industria, así también como estudiar relaciones de estudio de falla con rodamientos más grandes o rodamientos de distinto tipo, ya sean cónicos u otro tipo.

11.- Anexos

11.1.- Método de relojes comparadores alternos

El método de relojes comparadores alternos fue el escogido para realizar el armado, este método se basa en la utilización de 2 relojes comparadores. Sin embargo, cada uno de los comparadores está fijo a cada una de las partes de la máquina, de ambos lados del acoplamiento.

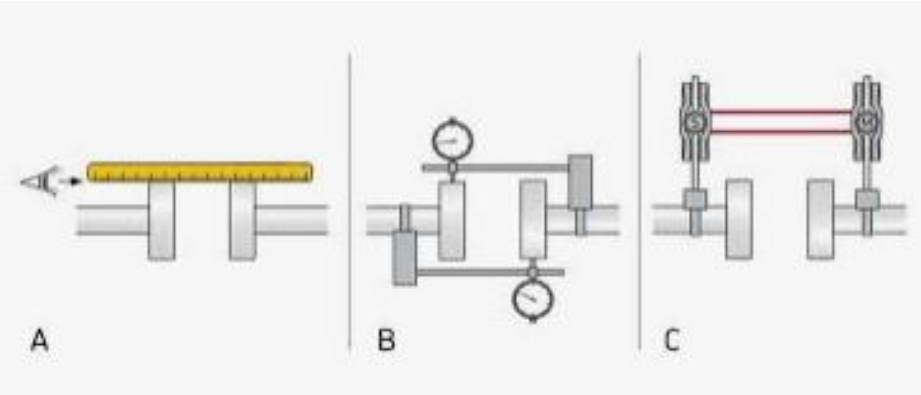


Figura 11.1: Montaje del método de comparadores alternados

Así existirá un comparador que se moverá solidariamente con el eje de la parte fija de la máquina y el otro con el eje de la parte móvil. La alineación también se realiza de forma independiente en los 2 planos, horizontal y vertical. Para la toma de medidas se giran simultáneamente los 2 ejes. A partir de las medidas tomadas se determinan los desplazamientos de los apoyos cercano (DAC) y lejano (DAL) de la parte móvil para lograr la alineación óptima.

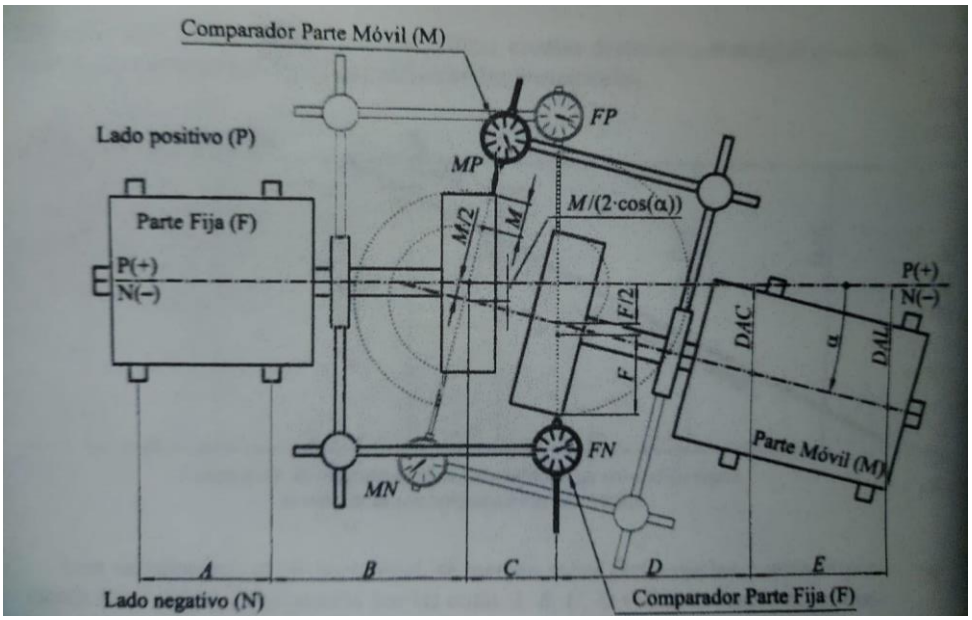


Figura 11.2: Relaciones geométricas en el método de comparadores alternados

La diferencia entre ambas medidas es la distancia recorrida por el comparador y equivale a la desalineación diametral en el punto medido.

$$F = FP - FN \tag{7}$$

$$M = MP - MN \tag{8}$$

Una vez que se han obtenido las medidas de las desea desalineación coma a partir de ellas se pueden determinar los desplazamientos necesarios en la parte móvil para conseguir la alineación perfecta. Esto puede realizarse gráfica o analíticamente. Después de hacer un trabajo matemático con los valores de la figura se obtienen finalmente las siguientes fórmulas.

$$DAC = -\frac{F}{2} - D \cdot \frac{F+M}{2C} \tag{9}$$

$$DAL = -\frac{F}{2} - (D + E) \cdot \frac{F+M}{2C} \tag{10}$$

Donde M y F son variables con signos y C, D y E son cotas o dimensiones sin signo. Estos valores obtenidos son las distancias que se han de elevar los apoyos del eje de la parte móvil para una correcta alineación en el plano vertical. Un signo negativo en los desplazamientos obtenidos de las ecuaciones indicaría una necesidad de descenso del apoyo correspondiente, aunque sea realizado el desarrollo para el plano vertical este sería igualmente válido para el plano horizontal.

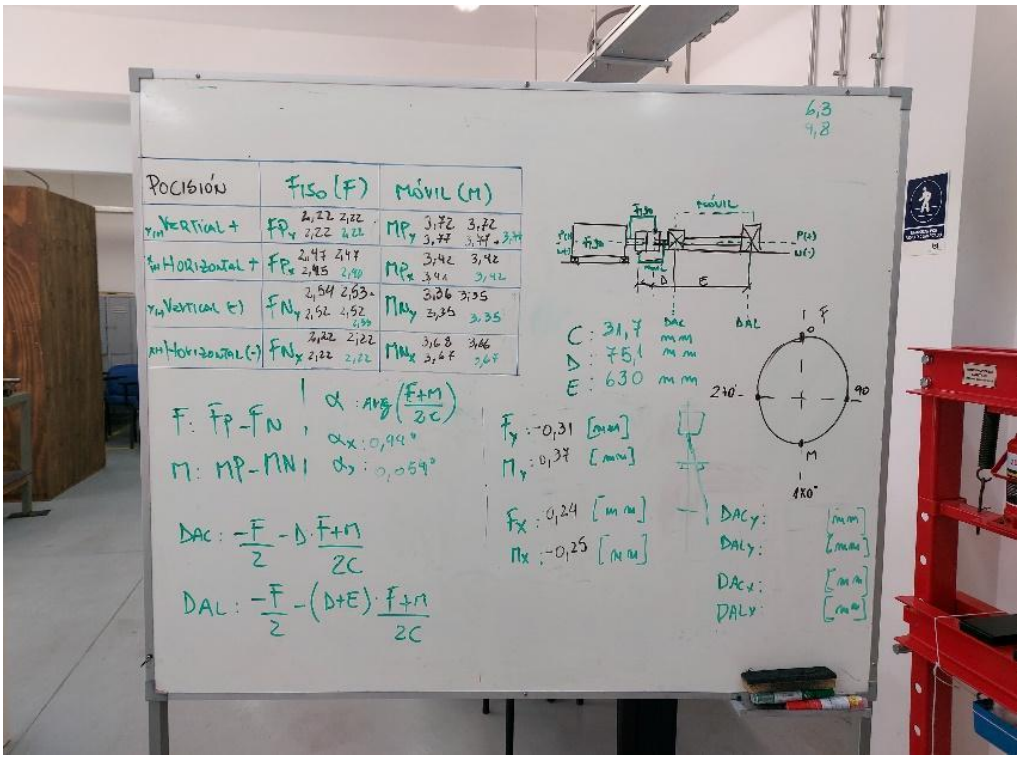


Figura 11.3: Toma de datos en el método de relojes alternados

En la figura 11.3 se aprecia como se instalaron los relojes comparadores en el acople flexible para poder realizar las lecturas de las desviaciones presentes en el arreglo motor-eje. Además, en la figura 11.3 se logra ver la toma de datos que se realizó, así también como los cálculos realizados, estos fueron realizados con calculador en mano y Excel, dando ambos siempre el mismo resultado. Este proceso se debe realizar varias veces para ir llegando cada vez a una alineación necesaria cercana a 0.

Después de haber hecho varias alineaciones y llegar a unos valores cercanos a la décima de milímetro de corrección, se procedió a medir nuevamente las vibraciones globales de la máquina, llegando un valor de 4.3 [mm/s], este valor obtenido de los promedios, el máximo local global de la 1x de las vibraciones se encontraba en 3.2 [mm/s], por lo que según la norma que se aplicó se pudo lograr un nivel insatisfactorio. Cabe mencionar que trabajos póstumos a las implementaciones con discos de desbalance se pudo llegar a un nivel de vibraciones de 1.2 [mm/s], por lo que es posible llegar a niveles muy bajos de vibraciones para poder estudiar vibraciones.

11.2.- Código Matlab para la progresión de fallas con los datos tomando en la máquina del laboratorio

```
format long
clear
clc
F1L=1;
F2L=1200;
F1H=2600;
F2H=4800;
colores=["b","m","c","r","g"];

datos1=xlsread("Falla0-1");
PRL=sum(datos1(F1L:F2L,2).*datos1(F1L:F2L,2))*100/sum(datos1(F1L:F2H,2).*
datos1(F1L:F2H,2));
PRH=sum(datos1(F1H:F2H,2).*datos1(F1H:F2H,2))*100/sum(datos1(F1L:F2H,2).*
datos1(F1L:F2H,2));
vectorPRL(1)=PRL;
vectorPRH(1)=PRH;
len=length(datos1);


datos2=xlsread("Falla0-2");
PRL = sum(datos2(F1L:F2L,2).* datos2(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos2(F1L:F2H,2).*datos2(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos2(F1H:F2H,2).* datos2(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos2(F1L:F2H,2).*datos2(F1L:F2H,2));
vectorPRL(2)=PRL;
vectorPRH(2)=PRH;


datos3=xlsread("Falla0-3");
PRL = sum(datos3(F1L:F2L,2).* datos3(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos3(F1L:F2H,2).*datos3(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos3(F1H:F2H,2).* datos3(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos3(F1L:F2H,2).*datos3(F1L:F2H,2));
vectorPRL(3)=PRL;
vectorPRH(3)=PRH;

datos4=xlsread("Falla3-1");
PRL = sum(datos4(F1L:F2L,2).* datos4(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos4(F1L:F2H,2).*datos4(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos4(F1H:F2H,2).* datos4(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos4(F1L:F2H,2).*datos4(F1L:F2H,2));
vectorPRL(4)=PRL;
vectorPRH(4)=PRH;

datos5=xlsread("Falla3-2");
PRL = sum(datos5(F1L:F2L,2).* datos5(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos5(F1L:F2H,2).*datos5(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos5(F1H:F2H,2).* datos5(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos5(F1L:F2H,2).*datos5(F1L:F2H,2));
vectorPRL(5)=PRL;
vectorPRH(5)=PRH;
```

```
datos6=xlsread("Falla3-3");
PRL = sum(datos6(F1L:F2L,2).* datos6(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos6(F1L:F2H,2).*datos6(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos6(F1H:F2H,2).* datos6(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos6(F1L:F2H,2).*datos6(F1L:F2H,2));
vectorPRL(6)=PRL;
vectorPRH(6)=PRH;


datos7=xlsread("Falla3-4");
PRL = sum(datos7(F1L:F2L,2).* datos7(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos7(F1L:F2H,2).*datos7(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos7(F1H:F2H,2).* datos7(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos7(F1L:F2H,2).*datos7(F1L:F2H,2));
vectorPRL(7)=PRL;
vectorPRH(7)=PRH;


datos8=xlsread("Falla3-5");
PRL = sum(datos8(F1L:F2L,2).* datos8(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos8(F1L:F2H,2).*datos8(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos8(F1H:F2H,2).* datos8(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos8(F1L:F2H,2).*datos8(F1L:F2H,2));
vectorPRL(8)=PRL;
vectorPRH(8)=PRH;


datos9=xlsread("Falla3-6");
PRL = sum(datos9(F1L:F2L,2).* datos9(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos9(F1L:F2H,2).*datos9(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos9(F1H:F2H,2).* datos9(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos9(F1L:F2H,2).*datos9(F1L:F2H,2));
vectorPRL(9)=PRL;
vectorPRH(9)=PRH;


datos10=xlsread("Falla3-7");
PRL = sum(datos10(F1L:F2L,2).* datos10(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos10(F1L:F2H,2).*datos10(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos10(F1H:F2H,2).* datos10(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos10(F1L:F2H,2).*datos10(F1L:F2H,2));
vectorPRL(10)=PRL;
vectorPRH(10)=PRH;


datos11=xlsread("Falla3-8");
PRL = sum(datos11(F1L:F2L,2).* datos11(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos11(F1L:F2H,2).*datos11(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos11(F1H:F2H,2).* datos11(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos11(F1L:F2H,2).*datos11(F1L:F2H,2));
vectorPRL(11)=PRL;
vectorPRH(11)=PRH;
```

```
datos12=xlsread("Falla4-1");
PRL = sum(datos12(F1L:F2L,2).* datos12(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos12(F1L:F2H,2).*datos12(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos12(F1H:F2H,2).* datos12(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos12(F1L:F2H,2).*datos12(F1L:F2H,2));
vectorPRL(12)=PRL;
vectorPRH(12)=PRH;


datos13=xlsread("Falla4-2");
PRL = sum(datos13(F1L:F2L,2).* datos13(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos13(F1L:F2H,2).*datos13(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos13(F1H:F2H,2).* datos13(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos13(F1L:F2H,2).*datos13(F1L:F2H,2));
vectorPRL(13)=PRL;
vectorPRH(13)=PRH;


datos14=xlsread("Falla4-3");
PRL = sum(datos14(F1L:F2L,2).* datos14(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos14(F1L:F2H,2).*datos14(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos14(F1H:F2H,2).* datos14(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos14(F1L:F2H,2).*datos14(F1L:F2H,2));
vectorPRL(14)=PRL;
vectorPRH(14)=PRH;


datos15=xlsread("Falla4-4");
PRL = sum(datos15(F1L:F2L,2).* datos15(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos15(F1L:F2H,2).*datos15(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos15(F1H:F2H,2).* datos15(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos15(F1L:F2H,2).*datos15(F1L:F2H,2));
vectorPRL(15)=PRL;
vectorPRH(15)=PRH;


datos16=xlsread("Falla4-5");
PRL = sum(datos16(F1L:F2L,2).* datos16(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos16(F1L:F2H,2).*datos16(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos16(F1H:F2H,2).* datos16(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos16(F1L:F2H,2).*datos16(F1L:F2H,2));
vectorPRL(16)=PRL;
vectorPRH(16)=PRH;


datos17=xlsread("Falla4-6");
PRL = sum(datos17(F1L:F2L,2).* datos17(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos17(F1L:F2H,2).*datos17(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos17(F1H:F2H,2).* datos17(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos17(F1L:F2H,2).*datos17(F1L:F2H,2));
vectorPRL(17)=PRL;
vectorPRH(17)=PRH;
```

```
datos18=xlsread("Falla4-7");
PRL = sum(datos18(F1L:F2L,2).* datos18(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos18(F1L:F2H,2).*datos18(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos18(F1H:F2H,2).* datos18(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos18(F1L:F2H,2).*datos18(F1L:F2H,2));
vectorPRL(18)=PRL;
vectorPRH(18)=PRH;


datos19=xlsread("Falla5-1");
PRL = sum(datos19(F1L:F2L,2).* datos19(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos19(F1L:F2H,2).*datos19(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos19(F1H:F2H,2).* datos19(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos19(F1L:F2H,2).*datos19(F1L:F2H,2));
vectorPRL(19)=PRL;
vectorPRH(19)=PRH;


datos20=xlsread("Falla5-2");
PRL = sum(datos20(F1L:F2L,2).* datos20(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos20(F1L:F2H,2).*datos20(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos20(F1H:F2H,2).* datos20(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos20(F1L:F2H,2).*datos20(F1L:F2H,2));
vectorPRL(20)=PRL;
vectorPRH(20)=PRH;


datos21=xlsread("Falla5-3");
PRL = sum(datos21(F1L:F2L,2).* datos21(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos21(F1L:F2H,2).*datos21(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos21(F1H:F2H,2).* datos21(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos21(F1L:F2H,2).*datos21(F1L:F2H,2));
vectorPRL(21)=PRL;
vectorPRH(21)=PRH;


datos22=xlsread("Falla5-4");
PRL = sum(datos22(F1L:F2L,2).* datos22(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos22(F1L:F2H,2).*datos22(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos22(F1H:F2H,2).* datos22(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos22(F1L:F2H,2).*datos22(F1L:F2H,2));
vectorPRL(22)=PRL;
vectorPRH(22)=PRH;


datos23=xlsread("Falla5-5");
PRL = sum(datos23(F1L:F2L,2).* datos23(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos23(F1L:F2H,2).*datos23(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos23(F1H:F2H,2).* datos23(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos23(F1L:F2H,2).*datos23(F1L:F2H,2));
vectorPRL(23)=PRL;
vectorPRH(23)=PRH;
```

```
datos24=xlsread("Falla5-6");
PRL = sum(datos24(F1L:F2L,2).* datos24(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos24(F1L:F2H,2).*datos24(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos24(F1H:F2H,2).* datos24(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos24(F1L:F2H,2).*datos24(F1L:F2H,2));
vectorPRL(24)=PRL;
vectorPRH(24)=PRH;


datos24=xlsread("Falla5-7");
PRL = sum(datos24(F1L:F2L,2).* datos24(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos24(F1L:F2H,2).*datos24(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos24(F1H:F2H,2).* datos24(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos24(F1L:F2H,2).*datos24(F1L:F2H,2));
vectorPRL(24)=PRL;
vectorPRH(24)=PRH;


datos25=xlsread("Falla5-8");
PRL = sum(datos25(F1L:F2L,2).* datos25(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos25(F1L:F2H,2).*datos25(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos25(F1H:F2H,2).* datos25(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos25(F1L:F2H,2).*datos25(F1L:F2H,2));
vectorPRL(25)=PRL;
vectorPRH(25)=PRH;


datos26=xlsread("Falla7-1");
PRL = sum(datos26(F1L:F2L,2).* datos26(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos26(F1L:F2H,2).*datos26(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos26(F1H:F2H,2).* datos26(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos26(F1L:F2H,2).*datos26(F1L:F2H,2));
vectorPRL(26)=PRL;
vectorPRH(26)=PRH;


datos27=xlsread("Falla7-2");
PRL = sum(datos27(F1L:F2L,2).* datos27(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos27(F1L:F2H,2).*datos27(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos27(F1H:F2H,2).* datos27(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos27(F1L:F2H,2).*datos27(F1L:F2H,2));
vectorPRL(27)=PRL;
vectorPRH(27)=PRH;


datos28=xlsread("Falla7-3");
PRL = sum(datos28(F1L:F2L,2).* datos28(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos28(F1L:F2H,2).*datos28(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos28(F1H:F2H,2).* datos28(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos28(F1L:F2H,2).*datos28(F1L:F2H,2));
vectorPRL(28)=PRL;
vectorPRH(28)=PRH;
```

```
datos29=xlsread("Falla7-4");
PRL = sum(datos29(F1L:F2L,2).* datos29(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos29(F1L:F2H,2).*datos29(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos29(F1H:F2H,2).* datos29(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos29(F1L:F2H,2).*datos29(F1L:F2H,2));
vectorPRL(29)=PRL;
vectorPRH(29)=PRH;


datos30=xlsread("Falla7-5");
PRL = sum(datos30(F1L:F2L,2).* datos30(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos30(F1L:F2H,2).*datos30(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos30(F1H:F2H,2).* datos30(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos30(F1L:F2H,2).*datos30(F1L:F2H,2));
vectorPRL(30)=PRL;
vectorPRH(30)=PRH;


datos31=xlsread("Falla7-6");
PRL = sum(datos31(F1L:F2L,2).* datos31(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos31(F1L:F2H,2).*datos31(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos31(F1H:F2H,2).* datos31(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos31(F1L:F2H,2).*datos31(F1L:F2H,2));
vectorPRL(31)=PRL;
vectorPRH(31)=PRH;


datos32=xlsread("Falla7-7");
PRL = sum(datos32(F1L:F2L,2).* datos32(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos32(F1L:F2H,2).*datos32(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos32(F1H:F2H,2).* datos32(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos32(F1L:F2H,2).*datos32(F1L:F2H,2));
vectorPRL(32)=PRL;
vectorPRH(32)=PRH;


datos33=xlsread("Falla7-8");
PRL = sum(datos33(F1L:F2L,2).* datos33(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos33(F1L:F2H,2).*datos33(F1L:F2H,2));
PRH = sum(datos33(F1H:F2H,2).* datos33(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos33(F1L:F2H,2).*datos33(F1L:F2H,2));
vectorPRL(33)=PRL;
vectorPRH(33)=PRH;

hold on

c=1;
u=1;
for j=u:2
    plot(vectorPRL(j),vectorPRH(j),"k"+"x")
    u=u+1;
    %c=c+1;
end
u=5;
```

```
for j=u:11
    plot(vectorPRL(j),vectorPRH(j),"r"+"*")
    u=u+1;
    %c=c+1;
end
u=12;
for j=u:18
    plot(vectorPRL(j),vectorPRH(j),"m"+"+")
    u=u+1;
    %c=c+1;
end
u=19;
for j=u:25
    plot(vectorPRL(j),vectorPRH(j),"c"+"+")
    u=u+1;
    %c=c+1;
End

u=26;

for j=u:33
    plot(vectorPRL(j),vectorPRH(j),"g"+"+")
    u=u+1;
end

xlabel("%PRL")
ylabel("%PRH")
```

11.3.- Código Matlab para el primer clustering de datos en rodamientos sin fallas

- Código Matlab para el primer clustering de datos en rodamientos

```
format long
F1L=1;
F2L=350;
F1H=300;
F2H=850;
myDir=uigetdir;
myFiles=dir(fullfile(myDir,"*.xls"));
vectorPRH=[];
vectorPRL=[];
colores=["y","m","c","r","g","b","k","k"];
c=0;
u=1;
for i=1:length(myFiles)
    nombrearch=myFiles(i).name;
    datos1=xlsread(nombrearch);
    PRL = sum(datos1(F1L:F2L,2).* datos1(F1L:F2L,2)) * 100 /
sum(datos1(1:6401,2).*datos1(1:6401,2));
    PRH = sum(datos1(F1H:F2H,2).* datos1(F1H:F2H,2)) * 100 /
sum(datos1(1:6401,2).*datos1(1:6401,2));
    vectorPRL(i)=PRL;
    vectorPRH(i)=PRH;
```

```
    if mod(i,10)==0
        c=c+1;
        hold on
        for j=u:i
            plot(vectorPRL(j),vectorPRH(j),colores(c)+"x")
            u=u+1;
        end

    end

end
xlabel("%PRL")
ylabel("%PRH")
grid on
```

11.4.- Código Matlab para progresión de falla con los datos de Case Western Reserve

```
clear
clc
format long
%carga de sin falla
load Normal0-1797rpm.mat
n1=size(X097_DE_time,1);
y1=abs(fft(X097_DE_time))/n1;
w1=linspace(0,12000/2,round(n1/2));
% plot(w1,y1(1:round(n/2)));
%carga ball 0007
load Ball-0007-1.mat
n2=size(X118_DE_time,1);
y2=abs(fft(X118_DE_time))/n2;
w2=linspace(0,12000/2,round(n2/2));
%carga carga de 0014
load Ball-0014-1.mat
n3=size(X185_DE_time,1);
y3=abs(fft(X185_DE_time))/n3;
w3=linspace(0,12000/2,round(n3/2));
%carga de 0021
load Ball-0021-1.mat
n4=size(X222_DE_time,1);
y4=abs(fft(X222_DE_time))/n4;
w4=linspace(0,12000/2,round(n4/2));
%carga del 0028
load Ball-0028-1.mat
n5=size(X048_DE_time,1);
y5=abs(fft(X048_DE_time))/n5;
w5=linspace(0,12000/2,round(n5/2));
%PRH PRL
F1L=1;
F2L=10000;
F1H=35000;
F2H=50000;
```

```
colores=["b","m","c","r","g","b","k","k"];
c=1;
u=1;
PRL1=sum(y1((F1L:F2L)).*y1((F1L:F2L)))*100/sum(y1(1:n1/2));
PRH1=sum(y1((F1H:F2H)).*y1((F1H:F2H)))*100/sum(y1(1:n1/2));
PRL2=sum(y2((F1L:F2L)).*y2((F1L:F2L)))*100/sum(y2(1:n2/2));
PRH2=sum(y2((F1H:F2H)).*y2((F1H:F2H)))*100/sum(y2(1:n2/2));
PRL3=sum(y3((F1L:F2L)).*y3((F1L:F2L)))*100/sum(y3(1:n3/2));
PRH3=sum(y3((F1H:F2H)).*y3((F1H:F2H)))*100/sum(y3(1:n3/2));
PRL4=sum(y4((F1L:F2L)).*y4((F1L:F2L)))*100/sum(y4(1:n4/2));
PRH4=sum(y4((F1H:F2H)).*y4((F1H:F2H)))*100/sum(y4(1:n4/2));
PRL5=sum(y5((F1L:F2L)).*y5((F1L:F2L)))*100/sum(y5(1:n5/2));
PRH5=sum(y5((F1H:F2H)).*y5((F1H:F2H)))*100/sum(y5(1:n5/2));

vectorPRH=[PRH1,PRH2,PRH3,PRH4,PRH5];
vectorPRL=[PRL1,PRL2,PRL3,PRL4,PRL5];
hold on
for j=u:5
    plot(vectorPRL(j),vectorPRH(j),colores(c)+"x")
    u=u+1;
    c=c+1;

end
xlabel("%PRL")
ylabel("%PRH")
```

11.5.- Archivos utilizados para el clustering de fallas en rodamiento con los datos del Case Western Reserve.

- Ball-0007-0-48k
- Ball-0007-0-
- Ball-0007-1-48k
- Ball-0007-1
- Ball-0007-2-48k
- Ball-0007-2-
- Ball-0007-3-48k
- Ball-0007-3
- InnerRace-0007-0-48k
- InnerRace-0007-0
- InnerRace-0007-1-48k
- InnerRace-0007-1
- InnerRace-0007-2-48k
- InnerRace-0007-2
- InnerRace-0007-3-48k
- InnerRace-0007-3
- OuterRace-0007-0-C6-48k
- OuterRace-0007-0-C6
- OuterRace-0007-1-C6-48k
- OuterRace-0007-1-C6

- OuterRace-0007-2-C6-48k
- OuterRace-0007-2-C6
- OuterRace-0007-3-C6-48k
- OuterRace-0007-3-C6

11.6.- Código Matlab para el clustering de fallas en mapa PRH y PRL con los datos del Case Western Reserve.

```
clear
clc
format long
FM=24000;

%Carga de Datos
%Carga Normal 1797
load Normal0-1797rpm.mat
resam1=resample(X097_DE_time,1,2);
n1=size(resam1,1);
z1=fft(resam1);
y1=2*(abs(z1(1:n1/2)/n1));
vectorfrec1=FM.*(0:(n1/2)-1)./n1;

%Carga Normal 1772
load Normal1-1772rpm.mat
resam2=resample(X098_DE_time,1,4);
n2=size(resam2,1);
z2=fft(resam2);
y2=2*(abs(z2(1:n2/2)/n2));
vectorfrec2=FM.*(0:(n2/2)-1)./n2;

%Carga Normal 1750
load Normal2-1750rpm.mat
resam3=resample(X099_DE_time,1,4);
n3=size(resam3,1);
z3=fft(resam3);
y3=2*(abs(z3(1:n3/2)/n3));
vectorfrec3=FM.*(0:(n3/2)-1)./n3;

%Carga Normal 1730
load Normal3-1730rpm.mat
resam4=resample(X100_DE_time,1,4);
n4=size(resam4,1);
z4=fft(resam4);
y4=2*(abs(z4(1:n4/2)/n4));
vectorfrec4=FM.*(0:(n4/2)-1)./n4;

%Carga Ball-0007-0-48k
load Ball-0007-0-48k.mat
resam5=resample(X122_DE_time,1,2);
n5=size(resam5,1);
z5=fft(resam5);
y5=2*(abs(z5(1:n5/2)/n5));
vectorfrec5=FM.*(0:(n5/2)-1)./n5;
```

```
%Carga Ball-0007-1-48k
load Ball-0007-1-48k.mat
resam6=resample(X123_DE_time,1,4);
n6=size(resam6,1);
z6=fft(resam6);
y6=2*(abs(z6(1:n6/2)/n6));
vectorfrec6=FM.*(0:(n6/2)-1)./n6;

%Carga Ball-0007-2-48k
load Ball-0007-2-48k.mat
resam7=resample(X124_DE_time,1,4);
n7=size(resam7,1);
z7=fft(resam7);
y7=2*(abs(z7(1:n7/2)/n7));
vectorfrec7=FM.*(0:(n7/2)-1)./n7;

%Carga Ball-0007-3-48k
load Ball-0007-3-48k.mat
resam8=resample(X125_DE_time,1,4);
n8=size(resam8,1);
z8=fft(resam8);
y8=2*(abs(z8(1:n8/2)/n8));
vectorfrec8=FM.*(0:(n8/2)-1)./n8;

%Carga Ball-0007-0
load Ball-0007-0.mat
n9=size(X118_DE_time,1);
z9=fft(X118_DE_time);
y9=2*(abs(z9(1:n9/2)/n9));
vectorfrec9=FM.*(0:(n9/2)-1)./n9;

%Carga Ball-0007-1
load Ball-0007-1.mat
n10=size(X119_DE_time,1);
z10=fft(X119_DE_time);
y10=2*(abs(z10(1:n10/2)/n10));
vectorfrec10=FM.*(0:(n10/2)-1)./n10;

%Carga Ball-0007-2
load Ball-0007-2.mat
n11=size(X120_DE_time,1);
z11=fft(X120_DE_time);
y11=2*(abs(z11(1:n11/2)/n11));
vectorfrec11=FM.*(0:(n11/2)-1)./n11;

%Carga Ball-0007-3
load Ball-0007-3.mat
n12=size(X121_DE_time,1);
z12=fft(X121_DE_time);
y12=2*(abs(z12(1:n12/2)/n12));
vectorfrec12=FM.*(0:(n12/2)-1)./n12;

%Carga InnerRace-0007-0-48k
load InnerRace-0007-0-48k.mat
```

```
resam13=resample(X109_DE_time,1,2);
n13=size(resam13,1);
z13=fft(resam13);
y13=2*(abs(z13(1:n13/2)/n13));
vectorfrec13=FM.*(0:(n13/2)-1)./n13;

%Carga InnerRace-0007-1-48k
load InnerRace-0007-1-48k.mat
resam14=resample(X110_DE_time,1,4);
n14=size(resam14,1);
z14=fft(resam14);
y14=2*(abs(z14(1:n14/2)/n14));
vectorfrec14=FM.*(0:(n14/2)-1)./n14;

%Carga InnerRace-0007-2-48k
load InnerRace-0007-2-48k.mat
resam15=resample(X111_DE_time,1,4);
n15=size(resam15,1);
z15=fft(resam15);
y15=2*(abs(z15(1:n15/2)/n15));
vectorfrec15=FM.*(0:(n15/2)-1)./n15;

%Carga InnerRace-0007-3-48k
load InnerRace-0007-3-48k.mat
resam16=resample(X112_DE_time,1,4);
n16=size(resam16,1);
z16=fft(resam16);
y16=2*(abs(z16(1:n16/2)/n16));
vectorfrec16=FM.*(0:(n16/2)-1)./n16;

%Carga InnerRace-0007-0
load InnerRace-0007-0.mat
n17=size(X105_DE_time,1);
z17=fft(X105_DE_time);
y17=2*(abs(z17(1:n17/2)/n17));
vectorfrec17=FM.*(0:(n17/2)-1)./n17;

%Carga InnerRace-0007-1
load InnerRace-0007-1.mat
n18=size(X106_DE_time,1);
z18=fft(X106_DE_time);
y18=2*(abs(z18(1:n18/2)/n18));
vectorfrec18=FM.*(0:(n18/2)-1)./n18;

%Carga InnerRace-0007-2
load InnerRace-0007-2.mat
n19=size(X107_DE_time,1);
z19=fft(X107_DE_time);
y19=2*(abs(z19(1:n19/2)/n19));
vectorfrec19=FM.*(0:(n19/2)-1)./n19;

%Carga InnerRace-0007-3
load InnerRace-0007-3.mat
n20=size(X108_DE_time,1);
z20=fft(X108_DE_time);
y20=2*(abs(z20(1:n20/2)/n20));
```

```
vectorfrec20=FM.*(0:(n20/2)-1)./n20;

%Carga OuterRace-0007-0-C6-48k
load OuterRace-0007-0-C6-48k.mat
resam21=resample(X135_DE_time,1,2);
n21=size(resam21,1);
z21=fft(resam21);
y21=2*(abs(z21(1:n21/2)/n21));
vectorfrec21=FM.*(0:(n21/2)-1)./n21;

%Carga OuterRace-0007-1-C6-48k
load OuterRace-0007-1-C6-48k.mat
resam22=resample(X136_DE_time,1,4);
n22=size(resam22,1);
z22=fft(resam22);
y22=2*(abs(z22(1:n22/2)/n22));
vectorfrec22=FM.*(0:(n22/2)-1)./n22;

%Carga OuterRace-0007-2-C6-48k
load OuterRace-0007-2-C6-48k.mat
resam23=resample(X137_DE_time,1,4);
n23=size(resam23,1);
z23=fft(resam23);
y23=2*(abs(z23(1:n23/2)/n23));
vectorfrec23=FM.*(0:(n23/2)-1)./n23;

%Carga OuterRace-0007-3-C6-48k
load OuterRace-0007-3-C6-48k.mat
resam24=resample(X138_DE_time,1,4);
n24=size(resam24,1);
z24=fft(resam24);
y24=2*(abs(z24(1:n24/2)/n24));
vectorfrec24=FM.*(0:(n24/2)-1)./n24;

%Carga OuterRace-0007-0-C6
load OuterRace-0007-0-C6.mat
n25=size(X130_DE_time,1);
z25=fft(X130_DE_time);
y25=2*(abs(z25(1:n25/2)/n25));
vectorfrec25=FM.*(0:(n25/2)-1)./n25;

%Carga OuterRace-0007-1-C6
load OuterRace-0007-1-C6.mat
n26=size(X131_DE_time,1);
z26=fft(X131_DE_time);
y26=2*(abs(z26(1:n26/2)/n26));
vectorfrec26=FM.*(0:(n26/2)-1)./n26;

%Carga OuterRace-0007-2-C6
load OuterRace-0007-2-C6.mat
n27=size(X132_DE_time,1);
z27=fft(X132_DE_time);
y27=2*(abs(z27(1:n27/2)/n27));
vectorfrec27=FM.*(0:(n27/2)-1)./n27;
```

```
%Carga OuterRace-0007-3-C6
load OuterRace-0007-3-C6.mat
n28=size(X133_DE_time,1);
z28=fft(X133_DE_time);
y28=2*(abs(z28(1:n28/2)/n28));
vectorfrec28=FM.*(0:(n28/2)-1)./n28;


%PRH PRL RANGOS de Frecuencia Hz
F1L=0;
F2L=4500;
F1H=3500;
F2H=8500;

for i=1:length(vectorfrec1)
    datos1=vectorfrec1(i);
    if round(datos1)-F1L==0
        FF1L=i;
    end
    if round(datos1)-F2L==0
        FF2L=i;
    end
    if round(datos1)-F1H==0
        FF1H=i;
    end
    if round(datos1)-F2H==0
        FF2H=i;
    end
end


PRL1=(sum(y1((FF1L:FF2L)).*y1((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y1(1:n1/2).*y1(1:n1
/2)));
PRH1=(sum(y1((FF1H:FF2H)).*y1((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y1(1:n1/2).*y1(1:n1
/2)));

PRL2=(sum(y2((FF1L:FF2L)).*y2((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y2(1:n2/2).*y2(1:n2
/2)));
PRH2=(sum(y2((FF1H:FF2H)).*y2((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y2(1:n2/2).*y2(1:n2
/2)));

PRL3=(sum(y3((FF1L:FF2L)).*y3((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y3(1:n3/2).*y3(1:n3
/2)));
PRH3=(sum(y3((FF1H:FF2H)).*y3((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y3(1:n3/2).*y3(1:n3
/2)));

PRL4=(sum(y4((FF1L:FF2L)).*y4((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y4(1:n4/2).*y4(1:n4
/2)));
PRH4=(sum(y4((FF1H:FF2H)).*y4((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y4(1:n4/2).*y4(1:n4
/2)));

PRL5=(sum(y5((FF1L:FF2L)).*y5((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y5(1:n5/2).*y5(1:n5
/2)));
PRH5=(sum(y5((FF1H:FF2H)).*y5((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y5(1:n5/2).*y5(1:n5
/2)));
```

```
PRL6=(sum(y6((FF1L:FF2L)).*y6((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y6(1:n6/2).*y6(1:n6
/2)));
PRH6=(sum(y6((FF1H:FF2H)).*y6((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y6(1:n6/2).*y6(1:n6
/2)));

PRL7=(sum(y7((FF1L:FF2L)).*y7((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y7(1:n7/2).*y7(1:n7
/2)));
PRH7=(sum(y7((FF1H:FF2H)).*y7((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y7(1:n7/2).*y7(1:n7
/2)));

PRL8=(sum(y8((FF1L:FF2L)).*y8((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y8(1:n8/2).*y8(1:n8
/2)));
PRH8=(sum(y8((FF1H:FF2H)).*y8((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y8(1:n8/2).*y8(1:n8
/2)));

PRL9=(sum(y9((FF1L:FF2L)).*y9((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y9(1:n9/2).*y9(1:n9
/2)));
PRH9=(sum(y9((FF1H:FF2H)).*y9((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y9(1:n9/2).*y9(1:n9
/2)));

PRL10=(sum(y10((FF1L:FF2L)).*y10((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y10(1:n10/2).*y1
0(1:n10/2)));
PRH10=(sum(y10((FF1H:FF2H)).*y10((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y10(1:n10/2).*y1
0(1:n10/2)));

PRL11=(sum(y11((FF1L:FF2L)).*y11((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y11(1:n11/2).*y1
1(1:n11/2)));
PRH11=(sum(y11((FF1H:FF2H)).*y11((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y11(1:n11/2).*y1
1(1:n11/2)));

PRL12=(sum(y12((FF1L:FF2L)).*y12((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y12(1:n12/2).*y1
2(1:n12/2)));
PRH12=(sum(y12((FF1H:FF2H)).*y12((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y12(1:n12/2).*y1
2(1:n12/2)));

PRL13=(sum(y13((FF1L:FF2L)).*y13((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y13(1:n13/2).*y1
3(1:n13/2)));
PRH13=(sum(y13((FF1H:FF2H)).*y13((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y13(1:n13/2).*y1
3(1:n13/2)));

PRL14=(sum(y14((FF1L:FF2L)).*y14((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y14(1:n14/2).*y1
4(1:n14/2)));
PRH14=(sum(y14((FF1H:FF2H)).*y14((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y14(1:n14/2).*y1
4(1:n14/2)));

PRL15=(sum(y15((FF1L:FF2L)).*y15((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y15(1:n15/2).*y1
5(1:n15/2)));
PRH15=(sum(y15((FF1H:FF2H)).*y15((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y15(1:n15/2).*y1
5(1:n15/2)));

PRL16=(sum(y16((FF1L:FF2L)).*y16((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y16(1:n16/2).*y1
6(1:n16/2)));
PRH16=(sum(y16((FF1H:FF2H)).*y16((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y16(1:n16/2).*y1
6(1:n16/2)));
```

```
PRL17=(sum(y17((FF1L:FF2L)).*y17((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y17(1:n17/2).*y1
7(1:n17/2)));
PRH17=(sum(y17((FF1H:FF2H)).*y17((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y17(1:n17/2).*y1
7(1:n17/2)));

PRL18=(sum(y18((FF1L:FF2L)).*y18((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y18(1:n18/2).*y1
8(1:n18/2)));
PRH18=(sum(y18((FF1H:FF2H)).*y18((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y18(1:n18/2).*y1
8(1:n18/2)));

PRL19=(sum(y19((FF1L:FF2L)).*y19((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y19(1:n19/2).*y1
9(1:n19/2)));
PRH19=(sum(y19((FF1H:FF2H)).*y19((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y19(1:n19/2).*y1
9(1:n19/2)));

PRL20=(sum(y20((FF1L:FF2L)).*y20((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y20(1:n20/2).*y2
0(1:n20/2)));
PRH20=(sum(y20((FF1H:FF2H)).*y20((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y20(1:n20/2).*y2
0(1:n20/2)));

PRL21=(sum(y21((FF1L:FF2L)).*y21((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y21(1:n21/2).*y2
1(1:n21/2)));
PRH21=(sum(y21((FF1H:FF2H)).*y21((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y21(1:n21/2).*y2
1(1:n21/2)));

PRL22=(sum(y22((FF1L:FF2L)).*y22((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y22(1:n22/2).*y2
2(1:n22/2)));
PRH22=(sum(y22((FF1H:FF2H)).*y22((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y22(1:n22/2).*y2
2(1:n22/2)));

PRL23=(sum(y23((FF1L:FF2L)).*y23((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y23(1:n23/2).*y2
3(1:n23/2)));
PRH23=(sum(y23((FF1H:FF2H)).*y23((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y23(1:n23/2).*y2
3(1:n23/2)));

PRL24=(sum(y24((FF1L:FF2L)).*y24((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y24(1:n24/2).*y2
4(1:n24/2)));
PRH24=(sum(y24((FF1H:FF2H)).*y24((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y24(1:n24/2).*y2
4(1:n24/2)));

PRL25=(sum(y25((FF1L:FF2L)).*y25((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y25(1:n25/2).*y2
5(1:n25/2)));
PRH25=(sum(y25((FF1H:FF2H)).*y25((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y25(1:n25/2).*y2
5(1:n25/2)));

PRL26=(sum(y26((FF1L:FF2L)).*y26((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y26(1:n26/2).*y2
6(1:n26/2)));
PRH26=(sum(y26((FF1H:FF2H)).*y26((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y26(1:n26/2).*y2
6(1:n26/2)));

PRL27=(sum(y27((FF1L:FF2L)).*y27((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y27(1:n27/2).*y2
7(1:n27/2)));
PRH27=(sum(y27((FF1H:FF2H)).*y27((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y27(1:n27/2).*y2
7(1:n27/2)));
```

```
PRL28=(sum(y28((FF1L:FF2L)).*y28((FF1L:FF2L)))*100)/(sum(y28(1:n28/2).*y2
8(1:n28/2)));
PRH28=(sum(y28((FF1H:FF2H)).*y28((FF1H:FF2H)))*100)/(sum(y28(1:n28/2).*y2
8(1:n28/2)));

%Vectores para el Cluster ploteo
vectorPRH=[PRH1,PRH2,PRH3,PRH4,PRH5,PRH6,PRH7,PRH8,PRH9,PRH10,PRH11,PRH12
,PRH13,PRH14,PRH15,PRH16,PRH17,PRH18,PRH19,PRH20,PRH21,PRH22,PRH23,PRH24,
PRH25,PRH26,PRH27,PRH28];
vectorPRL=[PRL1,PRL2,PRL3,PRL4,PRL5,PRL6,PRL7,PRL8,PRL9,PRL10,PRL11,PRL12
,PRL13,PRL14,PRL15,PRL16,PRL17,PRL18,PRL19,PRL20,PRL21,PRL22,PRL23,PRL24,
PRL25,PRL26,PRL27,PRL28];
hold on
% colores=["k","m","c","r"];
% c=1;
 u=2;
for j=u:4
    plot(vectorPRL(j),vectorPRH(j),"k"+"x")
    u=u+1;
    %c=c+1;
end
u=6;
for j=u:12
    plot(vectorPRL(j),vectorPRH(j),"r"+"*")
    u=u+1;
    %c=c+1;
end
u=14;
for j=u:20
    plot(vectorPRL(j),vectorPRH(j),"m"+"+")
    u=u+1;
    %c=c+1;
end
u=22;
for j=u:28
    plot(vectorPRL(j),vectorPRH(j),"c"+"+")
    u=u+1;
    %c=c+1;
end
xlabel("%PRL")
ylabel("%PRH")
```

12.- Referencias

[1] SKF. (2019). Bearing Failures. 2021, de SKF Sitio web: https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d196807d76f8-Bearing-failures---14219_2-ES-AR_tcm_201-297619.pdf

[2] Jabid E. Quiroga. (2012). Estudio de fallas incipientes en rodamientos usando la técnica de la envolvente y cepstrum. 2020, de Scielo Sitio web: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052012000300009

[3] Diego De Arcas Orellana. (2020). Análisis y caracterización de fallas en rodamientos por medio de medición de espectros vibracionales. USM, -, 7-19. 2021, De Repositorio USM Base de datos.

[4] Jonathan Trout. (2021). ANÁLISIS DE VIBRACIONES EXPLICADO. 2021, de Congreso de Mantenimiento y Confiabilidad Sitio web: https://cmc-latam.com/2020/02/19/anlasis-de-vibraciones-explicado/

[5] Equipo de Redacción PartesDel.com. (2017). Partes del Rodamiento. 2022, de Partesdel Sitio web: https://www.partesdel.com/rodamiento.html

[6]]TIMKEM. (2015). Análisis de daños en los rodamientos Timken y Guía de referencia sobre lubricación. 2021, de TIMKEM Sitio web: https://www.timken.com/resources/5892sp-analisis-de-daños-en-rodamientos-timken-y-guia-de-referencia-sobre-lubricacion/

[7] Alonso Fernandez. (2015). Componentes y frecuencias de fallo de un rodamiento. 2021, de Power-MI Sitio web: https://power-mi.com/es/content/componentes-y-frecuencias-de-fallo-de-un-rodamiento.

[8] 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.

[9] Jose Martinez Heras. (2020). Clustering (Agrupamiento), K-Means con ejemplos en python. 2022, de IArtificial.net Sitio web: https://www.iartificial.net/clustering-agrupamiento-kmeans-ejemplos-en-python/

[10] Ardila Rey, J.A., Martinez Tarifa, J.M., Robles Muñoz G. (2013). España. 2,512,040. Leganés, Madrid. Oficina española de marcas y patentes.

[11] Sabariego Andux. (2010). METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE LOS EJERCICIOS EXPE. 2021, de INIMET Sitio web: https://www.redalyc.org/pdf/2230/223017811004.pdf

[12] A Pramono. (2011). Analysis of vibration due to misalignment in the clutch cluster installation of centrifugal pump. 2021, de Researche Gate Sitio web: https://www.researchgate.net/figure/Standard-vibration-machine-according-to-ISO10816_fig3_350335727

[13] Case Western Reserve. (2015). Bearing Data Center. 2021, de Case Western Reserve Sitio web: https://engineering.case.edu/bearingdatacenter