



**TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO**  
ANALISIS DE FALLAS ASOCIADAS AL DEFECTO EN LA PISTA EXTERNA  
(BPFO) USANDO TECNICAS ESPECTRALES

**AUTORES**

OSCAR ANDRÉS CASAS GARCÍA -1096196162  
EMERSON DE JESÚS GARCÉS AGUILAR -1096227103  
HENRY JAVIER GALO BRAVO -1096191095

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERIA  
TECNOLOGIA EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECHANICO  
BARRANCABERMEJA

Fecha de Presentación: 21-08-2019



**TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO**  
**ANÁLISIS DE FALLAS ASOCIADAS AL DEFECTO EN LA PISTA EXTERNA**  
**(BPFO) USANDO TÉCNICAS ESPECTRALES**

**AUTORES**

OSCAR ANDRÉS CASAS GARCÍA -1096196162  
EMERSON DE JESÚS GARCÉS AGUILAR -1096227103  
HENRY JAVIER GALO BRAVO -1096191095

**Trabajo de Grado para optar al título de**  
**TECNÓLOGO EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO**

**DIRECTOR**

LUIS OMAR SARMIENTO ALVAREZ

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN – DIANOIA**

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERIA  
TECNOLOGIA EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO  
BARRANCABERMEJA

Fecha de Presentación: 21-08-2019

Nota de Aceptación

Trabajo de grado titulado: Análisis de fallas asociadas al defecto en la pista externa (BPFO) usando técnicas espectrales.

Presentado por: Henry Javier Galo bravo Oscar Andrés casas García -Emerson de Jesús Garcés Aguilar Para optar el título de Tecnólogo en operación y mantenimiento electromecánico.

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del Jurado

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo investigativo primeramente a Dios padre todo poderoso mayor exponente de la sabiduría y el conocimiento por este logro que me ha permitido alcanzar, a mis familiares, en especial a mis padres por el apoyo y la motivación que me han brindado a lo largo del proceso, y a todas aquellas personas que con sus aportes hicieron posible el alcance de esta meta.

**HENRY JAVIER GALO BRAVO**

Este proyecto está dirigido primordialmente a Dios el cual fue mi guía y respaldo durante el transcurso de este camino, quien a través de su amor infinito me capacito y me formo para alcanzar este logro que hoy veo culminado, a mi familia, amigos y compañeros que no cesaron de expresarme sus voces de aliento cuando sentía desfallecer, y aquellos que formaron parte fundamental durante este recorrido que hoy puedo ver concluido en victoria.

**OSCAR ANDRÉS CASAS GARCÍA**

Este logro es dedicado a Dios autor y creador de la sabiduría y conocimiento, por ser mi mayor respaldo a lo largo de este propósito que me permitió cumplir, a cada uno de mis familiares y amigos solo puedo expresar palabras de agradecimiento, por sus consejos y buenos deseos, a cada persona que hizo posible que hoy pueda dar por culminada esta etapa de mi vida, agradezco de forma especial.

**EMERSON DE JESÚS GARCÉS AGUILAR**

## AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer, en primer lugar, a Dios por guiarnos y fortalecernos espiritualmente para empezar un camino lleno de éxito.

Agradecemos por la realización del trabajo al ingeniero Luis Omar Sarmiento Álvarez por acompañarnos en nuestra última etapa de la carrera, la cual nos permitió adquirir conocimientos básicos del proyecto, que nos serán útil para nuestra vida profesional. Al igual nuestra gratitud a los docentes quienes estuvieron presentes en la realización de esta meta, de este sueño que es tan importante para nosotros, agradecer la ayuda, las palabras motivadoras, conocimientos, sus consejos y su dedicación.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN EJECUTIVO.....</b>	<b>13</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>14</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>16</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	16
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	19
1.3. OBJETIVOS .....	21
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	21
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	21
1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES.....	22
<b>2. MARCOS REFERENCIALES.....</b>	<b>27</b>
2.1. MARCO TEÓRICO.....	27
2.2. MARCO HISTÓRICO.....	33
2.3. MARCO CONCEPTUAL.....	37
2.4. MARCO LEGAL.....	45
<b>3. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO.....</b>	<b>46</b>
3.1. APLICACIÓN DE TÉCNICAS ESPECTRALES COMO HERRAMIENTA DE ESTUDIO PARA CUMPLIR CON EL OBJETIVO DE ANALIZAR LAS FALLAS ASOCIADAS AL DEFECTO EN LA PISTA EXTERNA DE RODAMIENTOS.....	46
3.2. SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE MATLAB DEL COMPORTAMIENTO DEL RODAMIENTO AL MOMENTO DE PRESENTAR UN DEFECTO EN LA PISTA EXTERNA (BFPO) EMPLEANDO LAS SEÑALES DE LA BASE DE DATOS 48K DRIVE END BEARING FAULT DATA. ....	57

<b>3.3. INTERPRETAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SEÑAL SIMULADA DEL ANÁLISIS ESPECTRAL CON EL FIN DE EVALUAR EL GRADO DE SEVERIDAD DE LA FALLA. ....</b>	<b>66</b>
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>71</b>
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>72</b>
<b>6. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>74</b>
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>76</b>
<b>8. ANEXOS.....</b>	<b>80</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Dimensiones principales de un rodamiento .....	27
<b>Figura 2.</b> Profundidad de falla .....	32
<b>Figura 3.</b> Swen Wingquist, inventa el rodamiento de bolas de doble hilera autoajutable. ....	35
<b>Figura 4.</b> El ingeniero de SKF, Arvid Palmgren, diseña el rodamiento de rodillos esféricos.....	35
<b>Figura 5.</b> pirit of St Louis equipado con rodamientos SKF en el primer vuelo sin escalas desde Nueva York a París.....	36
<b>Figura 6.</b> SKF celebra 60 años de asociación técnica con Ferrari .....	37
<b>Figura 7.</b> Constitución de un rodamiento .....	41
<b>Figura 8.</b> Rodamiento rígido a bolas 6205.....	53
<b>Figura 9.</b> Tabla número de rodamiento.....	54
<b>Figura 10.</b> Medidas de rodamiento. ....	55
<b>Figura 11.</b> Grafica de fallas 237 “Mat” .....	63
<b>Figura 12.</b> Script de la carga y procesar la falla grave; <b>Error! Marcador no definido.</b>	
<b>Figura 13.</b> Grafica de falla 237. “Mat” frecuencia transformada rápida de Fourier “FFT” .....	63
<b>Figura 14.</b> script de la extracción envolvente Hilbert.....	64
<b>Figura 15.</b> Pantalla principal de Matlab.....	65
<b>Figura 16.</b> Frecuencia natural .....	66
<b>Figura 17.</b> Aplicación de la transformada rápida de Fourier “FFT” .....	67
<b>Figura 18.</b> Aplicación de la transformada de Hilbert .....	68

**LISTA DE TABLAS**

<b>Tabla 1.</b> Medidas del diámetro	52
<b>Tabla 2.</b> Medidas del anillo	52
<b>Tabla 3.</b> Medidas del diámetro	52
<b>Tabla 4.</b> medidas del anillo.	52
<b>Tabla 5.</b> %Ploteo de los datos descargados	54
<b>Tabla 6.</b> Datos sin fallas	58
<b>Tabla 7.</b> Datos fallas leves	59
<b>Tabla 8.</b> datos fallas medianas	60
<b>Tabla 9.</b> datos fallas graves	61
<b>Tabla 10.</b> Selección de la falla a simular	62
<b>Tabla 11.</b> Datos del rodamiento seleccionado	67

### LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Acercamiento de frecuencias cerca al valor de BPFO y sus armónicos	80
<b>Anexo 2.</b> 1 BPFO .....	80
<b>Anexo 3.</b> 2 BPFO .....	81
<b>Anexo 4.</b> 3 BPFO .....	81
<b>Anexo 5.</b> 4 BPFO .....	82
<b>Anexo 6.</b> Código Matlab .....	82

## RESUMEN EJECUTIVO

Entre los métodos para detectar y dignosticar las fallas en rodamientos se encuentra una diversidad de técnicas basadas en análisis de vibración, temperatura, corriente, sonido, entre otras. Es bien sabido que los análisis basados en señales de vibración son los más utilizados y mejores resultados tienen. Este trabajo no se limitó al desarrollo de esa técnica sino que abordó el estudio de otras técnicas que serán enunciadas en el cuerpo del presente proyecto.

El propósito de este trabajo, es analizar las fallas asociadas al defecto en la pista externa (BPFO), usando técnicas espectrales derivadas de la Transformada Rapida Fourier (FFT), haciendo un análisis en el entorno de programación Matlab. Adicionalmente en el presente proyecto de grado se analiza las vibraciones en el contexto del mantenimiento predictivo, enfocado al tratamiento de fallas prematuras e incipientes en los rodamientos, específicamente defectos localizados en el anillo interior, los elementos rodantes (bola) y la pista de rodadura exterior.

La metodología que se utilizó es de tipo descriptivo, en la cual se indagaron diferentes tipos de métodos espectrales que se encuentran en la actualidad para evitar la ocurrencia de fallas en una máquina. Lo anterior es de vital importancia para garantizar una operación confiable y segura de una instalación. Anticipar y evitar potenciales anomalías en un equipo minimiza el riesgo de que una máquina quede fuera de servicio como consecuencia de una falla. Los rodamientos son un componente esencial en cualquier máquina eléctrica, su capacidad de carga y confiabilidad son importantes para el desempeño general de la máquina.

## INTRODUCCIÓN

Los rodamientos son componentes mecánicos presentes en la mayoría de las máquinas rotativas. Su duración útil depende de una serie de factores: la carga, la velocidad de trabajo, la lubricación, el montaje, la temperatura, las fuerzas exteriores causadas por desviaciones, inestabilidades, etc., de ahí que sea prácticamente imposible establecer la duración por métodos analíticos (Carmona, 2016). La importancia y criticidad de estos componentes hace necesaria el uso de técnicas modernas de mantenimiento preventivo (basadas en el análisis de vibraciones) que contribuyan a un mejor reconocimiento de su estado y, por lo tanto, de la disponibilidad de las máquinas rotativas en las que están instalados (Fernandez, 2017)

Existen fallas que son imposibles o muy difíciles de detectar mediante los métodos análisis de las vibraciones tradicionales (Jiménez & Salamanca, 2014). El análisis en frecuencia (o espectral), es la técnica más comúnmente empleada para el diagnóstico de fallas por medio del análisis de vibraciones. Se pueden identificar fallas típicas tales como desbalanceo de rotor, desalineamiento, soldaduras mecánicas y defectos en rodamientos. La idea fundamental del análisis frecuencia es encontrar la relación existente entre la frecuencia de las componentes discretas presentes en el espectro y la frecuencia de las fuerzas dinámicas que generan las vibraciones (Estupiñan y Saveedra, 2015)

Al respecto, Carreño, Mejía y Duarte (2011), destacan que, en estas últimas décadas, los métodos de detección y diagnóstico de fallas se han convertido en un tópico de considerable interés dentro de la comunidad de investigadores pertenecientes al área de control, esto es debido a los crecientes requerimientos de operaciones confiables de control. El análisis espectral y de la onda en el período es definitivo a la hora de determinar un deterioro de un rodamiento permitiendo en

el proyecto, una comparación de la evolución de las amplitudes espectrales, llegar a predecir el nivel de deterioro y planificar su cambio con la suficiente anticipación.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, el diagnóstico de fallas sigue siendo un requerimiento indispensable en toda planta industrial del mundo. En los últimos años ha tenido una gran evolución debido principalmente a la aparición de sistemas cada vez más complejos, que traen consigo un incremento en la cantidad de procesos que necesitan ser controlados. Como respuesta a dichas necesidades producto de los mismos cambios tecnológicos, han surgido distintas metodologías y teorías para la detección e identificación de fallas como solución a problemas que pueden perjudicar el correcto funcionamiento de dichos procesos.

Hurtado & Mendoza, indican que, en la actualidad, la detección de fallas sigue siendo un requerimiento necesario para todas las industrias del mundo. En los años anteriores se ha logrado un avance muy importante, principalmente, por la aparición de métodos cada vez más complejos que brindan un incremento en la suma de procesos que se deben controlar en el ámbito de los rodamientos. Como respuesta a estas necesidades que son producidas por los mismos cambios tecnológicos, gracias a esto, distintas metodologías y teorías han nacido para el diagnóstico e identificación de falencias como solución a dificultades que afectan el correcto funcionamiento de dichos procesos.

En Chile, se realizó un estudio para los rodamientos que son muy usados en la industria, principalmente como elementos capaces de transmitir carga entre componentes rotatorias de elementos mecánicos. A partir de esto, Moncada Marino, estableció una investigación basado en técnicas espectrales con el fin de predecir cuándo un rodamiento está con algún tipo de falla, esto implica conocer todo lo que

se pueda sobre las características de este elemento, investigar sobre las fallas típicas que experimentan éstos y cómo van evolucionando.

Hurtado, Tello, Pérez, & Sarduy (2016), señalan que en México se presenta una metodología empleando señales de vibración capturadas a través de transductores de aceleración, para procesar las señales de vibración se emplea el algoritmo conocido como densidad espectral de potencia, se analizan las señales de vibración resultantes de rodamientos, sin falla y con falla artificial; por su importancia en la generación eléctrica global se hace necesaria la anticipación a la ocurrencia de fallas que puedan llegar a producir problemas indeseados.

Según Quiroga, Trujillo, & Quintero (2012), en Bucaramanga se presenta un estudio comparativo del desempeño de los métodos de detección de fallas de rodamientos, con el método envolvente y cepstrums, usando señales de vibración. Cuando se presenta un desperfecto en la pista interna o externa del rodamiento, el elemento rodante produce un pequeño impulso de baja energía, provocando que el rodamiento vibre.

Con base a lo señalado anteriormente, se considera la elaboración de un proyecto investigativo en el que se establece un estudio del desempeño de los métodos de detección de fallas incipientes en rodamientos FFT, envolvente y cepstrums usando señales de vibración. Diferentes condiciones de fallas son estudiadas, desde incipientes hasta severas a tates de un banco de prueba construido para ese propósito.

Finalmente, se considera que a partir de la elaboración del proyecto investigativo presentado se percibe la importancia que representa que el estudiante del área electromecánica conozca este tipo de temas, permitiendo crear una idea de las

posibles fallas e inconvenientes que se pueden presentar al momento de estar en campo e intervenir equipos electromecánicos los cuales incluyen sistemas de rodamiento. Por otra parte, se plantea la siguiente pregunta problema ¿Cómo analizar las fallas asociadas al defecto en la pista externa (BPFO) usando técnicas espectrales?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

La actividad propuesta para el análisis de fallas en rodamientos busca como objetivo diseñar un modelo donde se identifiquen y cuantifique los parámetros de rendimiento del sistema de control de velocidad en el análisis de fallas asociadas. Una de las herramientas fundamentales con que se cuenta en la actualidad para el mantenimiento predictivo orientado al tratamiento de fallas tempranas en los rodamientos de una máquina es la medición y análisis de vibraciones. Con base a la problemática planteada, se establece como alternativa de solución el análisis de los parámetros de fallas asociadas al defecto en la pista externa (BPFO), usando técnicas espectrales en el mantenimiento de los rodamientos de las máquinas para estudiar los niveles de vibración de éstos, con y sin defectos a diferente velocidad de giro.

Se realizará un análisis con el software Matlab, para a continuar con un estudio estadístico de los niveles de vibración obtenidos en los distintos niveles de velocidad. Todas las máquinas tienen un nivel de vibración que puede ser considerado normal o inherente a su funcionamiento. Adicionalmente, se utilizan registros de vibraciones obtenidos, para evaluar el desempeño de las técnicas. Las técnicas de aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) Envolvente, implementadas en un ambiente Matlab son aplicadas a las señales de vibración en cada caso de estudio. La técnica envolvente muestra un desempeño satisfactorio en detección de fallas incipientes, ubicándolas como técnicas apropiadas para ser parte de un sistema de monitoreo en maquina rotativa.

Con el fin de que, en un futuro, cuando se presente una situación similar en el campo laboral, emplear los saberes adquiridos del análisis de fallas asociadas al defecto de pistas externas durante el proceso de enseñanza, permita afrontar y solucionar

inconvenientes industriales, así como conocer el funcionamiento de un conjunto de elementos de máquinas y diseño de los mismos, para suplir necesidades y/o averías en sistemas potencia. La creación de alternativas de perfeccionamiento y creatividad.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo general

Analizar las fallas asociadas al defecto en la pista externa (BPFO) simulando y usando técnicas espectrales en busca de mejorar los procesos de control.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Aplicar técnicas espectrales como herramienta de estudio para el análisis de fallas asociadas al defecto en la pista externas de rodamientos.
- Simular mediante el software matlab el comportamiento del rodamiento al momento de presentar un defecto en la pista externa (BFPO) empleando las señales de la base de datos *12k drive end bearing fault data*.
- Interpretar los resultados obtenidos de la señal simulada del análisis espectral con el fin de evaluar el grado de severidad de la falla.

#### 1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES

Osorio Santander (2014) indica que en Lima, Perú, el monitoreo de vibraciones es una herramienta esencial para la manutenzione predictiva. A través del estudio de fallas en cojinetes de rodamientos en máquinas rotativas y sus efectos de vibración y de las técnicas de estudio de señales utilizadas para el tratamiento de datos y diagnóstico de defectos, fue posible desenvolver el sistema aplicativo propuesto teniendo por base la plataforma LabVIEW. Actualmente, las empresas están utilizando cada vez más instrumentación virtual en sus departamentos de Ingeniería de Mantenimiento.

Punina, Rodrigo, Guerrero, & Enoc (2013) indican que, en Riobamba se ha desarrollado un sistema para el diagnóstico de equipos industriales rotativos basado en el análisis espectral de vibraciones, utilizando el lenguaje de programación LabVIEW aplicado a cuatro equipos del laboratorio de análisis vibracional y alineamiento láser de la escuela de Ingeniería de mantenimiento de la ESPOCH. Todos los motores emiten una cierta vibración natural independientemente de su antigüedad o no, se encuentren en buen o mal estado. Estas vibraciones van modificándose conforme una o varias fallas van ocurriendo en el tiempo, siendo el uso o desuso de estos el origen que genera un desgaste en sus piezas internas que se desencadenan en problemas. Se diseñó y construyó las plataformas para la adquisición, análisis y presentación de datos en LabVIEW y verificó el buen funcionamiento de estos mediante la realización pruebas en el laboratorio. Se realizaron las mediciones con la debida explicación desde la colocación de los sensores hasta la determinación de los problemas más comunes en equipos industriales, lo que servirá como una guía de prácticas para el usuario del sistema.

Quiroga, Trujillo, & Quintero (2012) establecen que en Bucaramanga las técnicas de FFT, envolvente y cepstrums implementadas en ambiente Matlab son aplicadas a las señales de vibración en cada caso de estudio. Estas muestran un desempeño satisfactorio en análisis de fallas iniciales, ubicándolas como técnicas apropiadas para ser parte de un sistema de monitoreo en máquina rotativa. Las conclusiones de este estudio pueden hacerse extensivas a los demás tipos de rodamiento, en cuyo caso los valores de BPFO y BPF1 serán los calculados de acuerdo a la configuración geométrica del rodamiento estudiado. De acuerdo a los resultados obtenidos de las técnicas, fueron satisfactorios para el monitoreo de falla de rodamientos, en pista externa e interna, cuando se requiere una detección temprana y más aún para evaluar el grado de severidad debido a que se encontró que la magnitud de la frecuencia fundamental se eleva con la severidad del problema.

Fernando J. (2017) señala que a nivel nacional se han desarrollado diferentes proyectos, cuyos ejes principales de estudio de la Tesis Doctoral consisten primero, en el estudio de la función que describe la degradación del material de las pistas interna y externas del rodamiento, se establece la pertinencia de la ecuación de Paris-Erdogan, con la inclusión de ruido gaussiano en su solución para describir la aleatoriedad del proceso. La formulación del problema de pronóstico de fallas como un espacio de estados, y las observaciones son las características en frecuencia y el tiempo calculadas de la señal de vibración del experimento real. Se soluciona dicho sistema mediante métodos probabilísticos, filtros de partículas y procesos gaussianos. De la revisión del estado del arte se concluye que existen numerosos enfoques para el pronóstico de fallas en máquinas rotativas, la mayoría basado en datos, los cuales con el desarrollo de mejores herramientas de cómputo permiten obtener una predicción cada vez más acertada. Los modelos matemáticos que simulan con mayor exactitud las interacciones internas entre los elementos, las fuerzas y excitaciones externas de los sistemas mecánicos.

Morales O.C. (2011) realiza en Manizales, una tesis que pretende desarrollar un conjunto de metodologías que permitan caracterizar señales de vibraciones mecánicas empleando la variabilidad estocástica para la identificación y tipificación de distintos tipos de fallos en rodamientos, cajas reductoras y ejes (desbalanceo, desalineación, soltura mecánica y lubricación). Los resultados de clasificación muestran que las metodologías aplicadas son bastantes significativas, debido a que, en general, las tasas de rendimiento se encuentran por encima de un 90 % de eficiencia. Finalmente, las diversas técnicas de caracterización y clasificación empleadas, así como el análisis de transitorios, permiten diferenciar de manera clara distintos tipos de fallos y mostrar que es necesario un análisis tiempo-frecuencia si se quieren obtener los mejores resultados. Por medio de este trabajo, se logran obtener, comprobar y generar propuestas metodológicas que contribuyen al análisis de vibraciones en máquinas rotativas, con la finalidad de ofrecer un diagnóstico confiable al jefe de mantenimiento de la máquina y dar una interpretación más amplia bajo diferentes perspectivas o puntos de vista que permitan enriquecer el conocimiento y la discusión académica.

Amaya, Monica, & Veronica (2012) en Cali, mencionan que investigaciones demuestran que los rodamientos operan aproximadamente el 80% de su vida útil libres de defectos. Las fallas más comunes en rodamientos son: fatiga superficial, descarga, desgaste abrasivo, desgaste adhesivo, corrosión, fractura y ludimiento. Esto incrementa la probabilidad de falla en los motores, por lo cual es necesario trabajar en sistemas capaces de detectar problemas tempranos, con el fin de tener un historial del comportamiento del motor y poder realizar la corrección de los errores de manera oportuna y así reducir el daño de los equipos los costos de reparación y el impacto sobre la producción. Con las herramientas de Labview y Matlab se logró diseñar con éxito un sistema de adquisición y análisis de datos

análogos de vibración. Por medio del Software se diseñó y se implementó la obtención de los datos que permitió almacenar; dada su facilidad de manejo. A través de Matlab se logró analizar la información, es decir, contrastar las técnicas espectrales, transformada rápida de Fourier y el análisis envolvente de Hilbert.

Fenandez J. (2017), indica en Pereira que el trabajo presenta una metodología para el diagnóstico de fallas en rodamientos, e identificación de condiciones operacionales de máquinas eléctricas rotativas, basado en el análisis de señales de vibraciones mecánicas. El método desarrollado consta de cuatro fases, en la primera se realiza una extracción de características a partir de intervalos de cuasi-estacionalidad, cuyo fin es disminuir las fallas y posibilitar el moldeamiento probabilístico de las señales. El principal interés en este análisis es programar la reparación de la maquina en una etapa temprana del fallo y en un lapso en el que la maquina no tenga que detener su producción súbitamente. Por lo tanto, es una optimización de un proceso en el área del mantenimiento preventivo, con un seguimiento de los síntomas de falla a partir de las señales de vibración obtenidas de un transductor, en este caso un acelerómetro, que corresponde a una metodología de carácter no invasivo y no destructivo. Se busca implementar una metodología para realizar la clasificación de señales de acuerdo a su dinámica, tal que, cuando ingrese una nueva señal al sistema, este se encuentre en capacidad de asociarla a una dinámica conocida. Para esto se utiliza una herramienta de modelado probabilístico robusta, llamada Modelos ocultos de Markov, la cual es utilizada en gran medida en campos de reconocimiento de voz, generación automática de escritos y de clasificación en general.

Otero, Pardo, & Quiroga (2011) señalan que en Bucaramanga la detección temprana, rápida y precisa es crítica en la prevención de daños mayores en el sistema y permite acciones de contingencia para proteger el mismo. Dentro de las

herramientas para el monitoreo de métodos rotativos está el análisis de las vibraciones mecánicas. Esta técnica se basa en el estudio de la información contenida por las señales de vibración en amplitud y frecuencia. En presencia de falla las señales contienen algunos armónicos los cuales se manifiestan en el aspecto y pueden ser usados como indicadores de falla. El proceso de clasificación se inicia obteniendo el espectro normalizado del registro para el rodamiento de prueba, con el cual se establecen tres umbrales de amplitud denominados alta, media y baja. Para cada uno de los umbrales se selecciona el valor máximo en un rango calculado para cada una de las frecuencias de fallas. Debido a factores como deslizamiento o ligeros cambios de velocidad del equipo, cambian, en teoría, los valores de los cálculos ligeramente.

## 2. MARCOS REFERENCIALES

### 2.1. MARCO TEÓRICO

Cada rodamiento tiene unas características geométricas propias a partir de las cuales podemos determinar sus frecuencias de deterioro. Estas frecuencias aparecerán en las firmas espectrales cuando el rodamiento está deteriorado, y las fórmulas para su cálculo se muestran a continuación.

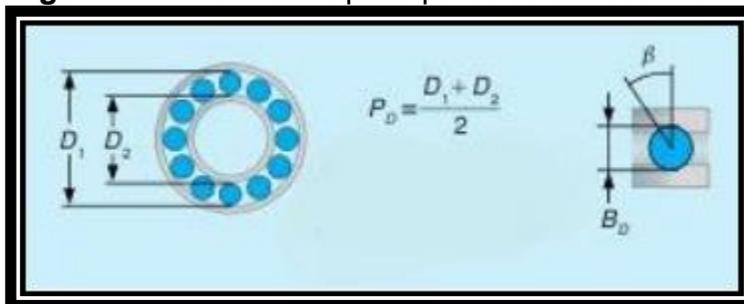
$$BPFO = RPM \frac{N_b}{2} \left( 1 - \frac{B_D}{P_D} \cos(\beta) \right)$$

$$BPFI = RPM \frac{N_b}{2} \left( 1 + \frac{B_D}{P_D} \cos(\beta) \right)$$

$$BSF = RPM \frac{P_D}{2B_D} \left[ 1 - \left( \frac{B_D}{P_D} \cos(\beta) \right)^2 \right]$$

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

**Figura 1.** Dimensiones principales de un rodamiento



**Fuente:** Carmona, M. (2016). *Diagnosticos De Fallos En Rodamientos*. Sevilla, España: Recuperado de Dep. Ingeniería Mecánica y Fabricación Escuela Técnica Superior De Ingeniería Universidad De Sevilla.

Carmona M. N. (2016) menciona que para la mayoría de los rodamientos estas frecuencias de deterioro no serán números enteros, por lo que la vibración

dominante, cuando exista un defecto de alguno de los componentes del rodamiento, será no síncrona (no coincidente con armónicos de la frecuencia de giro).

Segun Carmona M. N. (2016) cuando alguno de los componentes del rodamiento está dañado distinguiremos en el espectro de frecuencias la frecuencia fundamental correspondiente al elemento dañado, acompañada siempre de armónicos

Carmona (2016) establece que en aquellos casos en que se olviden los parámetros físicos del rodamiento, hay unas fórmulas empíricas bastante aproximadas que nos permitirán establecer las frecuencias de deterioro de las pistas y de la jaula de un rodamiento en función del número de elementos rodantes y la velocidad de rotación.

$$FTF = 0,4 * RPM$$

$$BPFO = 0,4 * N_b * RPM$$

$$BPF1 = 0,6 * N_b * RPM$$

Quiroga, Trujillo, & Quintero (2012) sugieren que FT-1 y FT son la Transformada Inversa de Fourier y la Transformada de Fourier de la señal de entrada C(t) respectivamente. Debido a la operación logarítmica aplicada a la magnitud del espectro de la señal, componentes pequeños asociados al fenómeno de fuga de frecuencias "Leakage" son amplificados y afectan el ceptrums resultante. se propone una versión modificada denominada Ceptrums Lineal (LCEPS), en la cual la operación logarítmica no es aplicada al ceptrums real resultando.

$$LCEPS(q) = \text{real}(FT^{-1}(FT(C(t))))$$

La teoría de Fourier se basa en la idea de que cualquier señal periódica puede descomponerse en una suma de senos. Esta suma de senos se denomina serie de Fourier, la descomposición en serie de Fourier de una señal cualquiera facilita en gran medida su análisis y es una técnica muy utilizada en el tratamiento de señales.

Cuando la señal es una función no periódica entra en escena la transformada de Fourier.

Carmona M. N. (2016), establece que es evidente que cualquier función no periódica puede tratarse como una función periódica de periodo infinito, es en esta idea donde se sustenta la teoría de la transformada de Fourier, que nos permitirá descomponer nuestra señal en una suma de senos con diferentes frecuencias. Con la transformada de Fourier podemos pasar del dominio temporal al dominio en frecuencia y viceversa, mediante las siguientes ecuaciones.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

Donde  $F$  es la señal ( $t$ ) en el dominio de la frecuencia,  $f$  la señal en el dominio del tiempo,  $\omega$  la frecuencia y  $t$  el tiempo.

### Profundidad de falla

En el estudio del crecimiento de la fractura o falla en los materiales, desde la década del 60 se han desarrollado numerosos modelos que se ajustan a los datos experimentales, los cuales se obtienen de experimentos de fatiga sobre probetas en múltiples materiales.

Fernando J. (2017) indica que después del trabajo de Weibull, Freudenthal, etc. las funciones de distribución de probabilidad y la estadística han sido utilizadas en el análisis del crecimiento de falla por fatiga, debido a la dispersión de los datos, incluso bajo las mismas condiciones iniciales. Con el tiempo se ha comprendido que el crecimiento de falla por fatiga es un problema que puede ser modelado mediante

procesos estocásticos y formulaciones parcial o totalmente estadísticas. Entre los modelos más comunes en la descripción del incremento de la profundidad de falla se encuentran los siguientes:

### Ecuación de Paris Erdogan

Fernando J. (2017) señala una de las expresiones más usadas para modelar el crecimiento de una falla por fatiga en un material rígido, es la ecuación 2.1, que corresponde a la ecuación que propusieron Paris y Erdogan en 1960, y relaciona el crecimiento de la profundidad de la falla con el número de ciclos o tensiones alternadas constantes que sufre el material.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n$$

Ecuación 2.1. Paris y Erdogan

donde  $a$  indica la profundidad de falla,  $N$  el número de ciclos,  $4K = 4K(a)$  es la intensidad del esfuerzo, y  $C$  y  $n$  son constantes del proceso. La ecuación diferencial se puede resolver de diferentes maneras para obtener una solución exacta, aproximada o una solución que contenga un componente aleatorio y pueda ser un proceso estocástico.

### Solución exacta

Reorganizando la ecuación, se obtiene

$$\frac{da}{(\Delta K)^n} = CdN \Rightarrow \frac{da}{(\beta\sqrt{a})^n} = CdN \Rightarrow \frac{1}{\beta^n} \frac{da}{a^{n/2}} = CdN$$

evaluando la integral definida entre  $a_1$   $a_2$  se obtiene

$$\frac{1}{\beta^n} \frac{1}{\left(1 - \frac{n}{2}\right)} \left\{ a_2^{-\frac{n}{2}+1} - a_1^{-\frac{n}{2}+1} \right\} = C \Delta N + C_{int}$$

se despeja  $a_2$  para obtener la expresión de la profundidad de la falla en el instante  $\mathcal{K}$  conociendo

$$a_k = \left\{ a_{k-1}^{1-\frac{n}{2}} + \left(1 - \frac{n}{2}\right) C \Delta N \beta^n + C_{int} \right\}$$

donde  $C_{int}$  es una constante de integración que depende de las condiciones iniciales del sistema.

Solución aproximada

En esta solución, aunque la variable  $\Delta \mathcal{K}$  depende de  $a$ , se toma como un valor constante y se integra la ecuación diferencial

$$\int da = \int C(\Delta K)^n dN$$

$$a_2 - a_1 = C(\Delta K)^n \Delta N$$

$$a_k = a_{k-1} + C(\Delta K)^n \Delta N$$

Solución aleatoria aplicando el logaritmo a ambos lados de la ecuación 2.1 se obtiene

$$\ln \frac{da}{dN} = \ln C + n \ln \Delta K$$

y para aleatorizar el modelo, se incluye una variable aleatoria gaussiana

$$\ln \frac{da}{dN} = \ln C + n \Delta K + \lambda$$

tomando la exponencial a ambos lados,

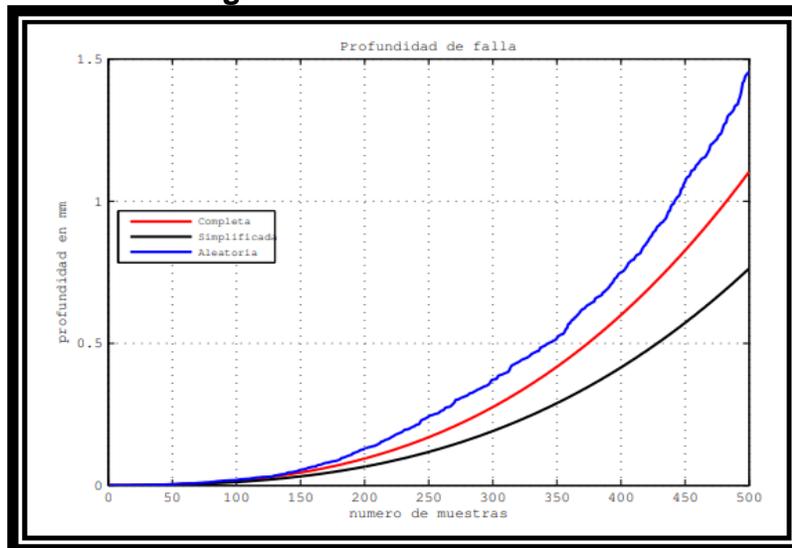
$$\frac{da}{dN} = e^{\lambda} C (\Delta K)^n$$

de acuerdo con la ecuación anterior la profundidad de la fractura en el tiempo k es

$$a_k = a_{k-1} + e^{\lambda k} C (\Delta K)^n \Delta N$$

La ecuación anterior representa un proceso de Markov no lineal con incrementos de degradación no estacionarios que sirve para representar el crecimiento de la falla por fatiga del material.

**Figura 2.** Profundidad de falla



**Fuente:** Fernando, J. (2017). Pronostico De Fallas En Maquinas Rotativas Con base En Modelos Matematicos. Caso De Estudio: Recuperado de Rodamientos Radiales En Bolas. Pereira: Universidad Tecnologica De Colombia .

## Fallas en rodamiento.

Hernandez H. I. (2011) menciona que un rodamiento es un cojinete con elementos rodantes (bolas o rodillos) interpuestos entre pistas de rodadura de dos anillos, de manera que se puede presentar un movimiento relativo por rotación de estos elementos. La vida de un rodamiento se puede reducir por efecto de desalineamiento, vibraciones, carga de choque, lubricación ineficaz o insuficiente, temperaturas extremas de operación y contaminación.

### 2.2. MARCO HISTÓRICO.

Kirner J. (2011) menciona que todo empezó en el año 3500 a.c. cuando se inventa la rueda en Mesopotamia, la cual es descrita como un eje de madera rotando en un bloque redondo de madera; desde este mismo instante empezó la carrera del hombre por descubrir y mejorar la forma de reducir la fricción en los componentes mecánicos, por eso en el año 3000 a.c. la grasa animal y la pasta de la babosa se usaron como lubricantes para el sistema de la rueda con el eje.

Kirner J. (2011) sugiere que en el año 700 a.c. los asirios y babilonios, entendieron pronto que el esfuerzo se reducía usando troncos entre las superficies de contacto: fricción de rodadura; en el año 40 d.c. se tienen registros del primer rodamiento axial de bolas, hecho de madera. En el año 1.500, Leonardo Da Vinci presenta el diseño del primer rodamiento axial de bolas moderno, aunque este diseño no pasó del papel. Los materiales de fabricación eran la madera y el bronce. El primero uso de los rodamientos fue en los carruajes “Mondrán” que ofrecían ruedas soportadas en rodamientos de bolas.

Kirner J. (2011) indica que, en 1734, la primera patente de un rodamiento fue otorgada a J. Rowe (inglés). En 1760, E. Coulomb construyó el primer prototipo del moderno rodamiento de bolas. En 1791, se otorga la primera patente de rodamiento de bolas a nombre P. Vaughn (inglés) para uso en ejes de carruajes. En 1802, M. Cardinet (francés), patentó el rodamiento de rodillos cónicos. En 1868, A.C. Cowper, hizo una bicicleta equipada con rodamientos de bolas iniciando la industria de los rodamientos. Las carreras de bicicletas eran ganadas por bicicletas de este tipo. En 1881, Heinrich Hertz, publica sus estudios sobre esfuerzos de contacto; el principio fundamental de todo rodamiento

### **Historia de SKF en rodamientos.**

Kirner J. (2011) establece que en Gotenburgo, Suecia en 1907, el ingeniero Sven Wingquist, se desempeñaba como ingeniero de una fábrica de textiles la cual en algunas de sus máquinas presentaba fallas prematuras de los rodamientos; la aplicación eran de ejes largos soportados en sus extremos con rodamientos rígidos. El ingeniero Sven se dio cuenta de cuál era el problema e inmediatamente pensó en la solución, así nació SKF y su rodamiento autoalineable de bolas.

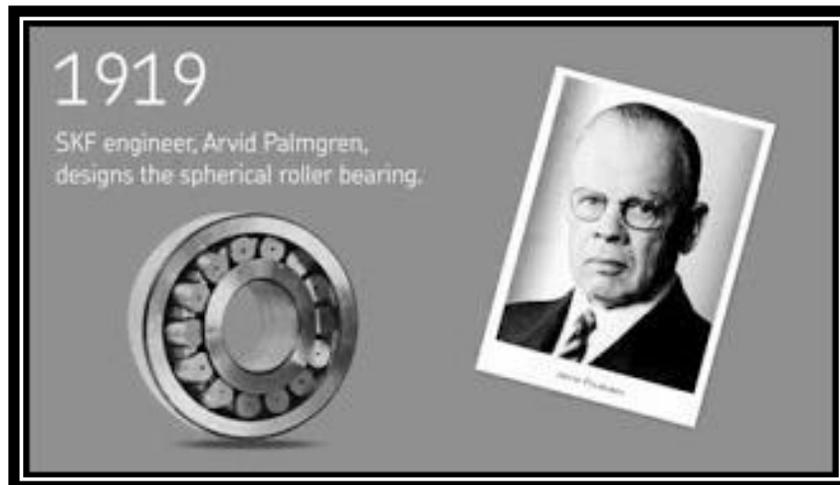
**Figura 3.** Swen Wingquist, inventa el rodamiento de bolas de doble hilera autoajustable.



**Fuente:** KIRNER, Josef. Transmisiones y rodamientos. España: Recuperado de S.D.2011.p.3

Kirner J. (2011) indica que en 1919 SKF realiza una variación el diseño de rodamiento autoalineable de bolas e inventa el rodamiento autoalineable de rodillos, en 1920 SKF fabrica 120.000 rodamientos después de la primera guerra mundial en diferentes fabricas del mundo.

**Figura 4.** El ingeniero de SKF, Arvid Palmgren, diseña el rodamiento de rodillos esféricos.



**Fuente:** KIRNER, Josef. Transmisiones y rodamientos. España: Recuperado de S.D.2011.p.3

**Figura 5.** pirit of St Louis equipado con rodamientos SKF en el primer vuelo sin escalas desde Nueva York a París.



**Fuente:** KIRNER, Josef. Transmisiones y rodamientos. España: Recuperado de S.D.2011.p.3

### Los desarrollos más recientes de SKF son:

- 1995: SKF inventa el rodamiento CARB. Rodamiento de rodillos toroidales, que tiene propiedades de desalineación angular y Axial.
- 2000: Kirner J. (2011) señala que el nuevo estándar mundial de duración y resistencia: SKF EXPLORER; rodamientos con los altos estándares de calidad en producción, acabados de pistas y elementos rodantes, materiales más limpios para la fabricación.

**Figura 6.** SKF celebra 60 años de asociación técnica con Ferrari



**Fuente:** KIRNER, Josef. Transmisiones y rodamientos. España: Recuperado de S.D.2011.p.4

Hoy en día SKF se ha convertido en una empresa que no solo maneja rodamientos; en estos momentos SKF cuenta con cinco plataformas que son:

- Rodamientos
- Sellos
- Mecatrónica
- Soluciones de Lubricación
- Servicios

### 2.3. MARCO CONCEPTUAL

Fontaine A. C. (2013) menciona los siguientes componentes principales de los rodamientos. Del anillo interior se dice que tiene normalmente un ajuste firme en la flecha o eje. Es difícil prevenir el desgaste prematuro. El anillo interior normalmente gira con la flecha.

Fontaine A. C. (2013) establece que el anillo exterior normalmente se encuentra dentro del alojamiento de la máquina y es fijo, las tolerancias de montaje son muy cerradas, normalmente en micros ( $\mu\text{m}$ ). Por último, la jaula mantiene los elementos rotativos en su lugar.

Segun Fontaine (2013) los elementos de rotativos son rodillos, bolas o algún otro dispositivo rodante que los define como permite la acción rodante entre los anillos interior y exterior. Los elementos rodantes reducen la fricción al deslizarse directamente en las pistas de rodadura y permiten movimiento relativo de los dos anillos.

Fontaine A. C. (2013) menciona que tales componentes tienen su vida útil y al llegarle cada uno se busca reemplazo inmediato. La principal pregunta asociada a la falla en rodamientos es: ¿Cuándo deberían ser reemplazados? Esto sólo puede ser determinado por la planta. A partir de esto surgen otra serie de preguntas tales como: ¿Las fallas afectan la calidad de producto? ¿Afecta a la operación de la planta? ¿Cuál es la disponibilidad de la maquinaria para el remplazo de los rodamientos? Para evaluar con mayor exactitud el estado de los rodamientos y cuándo es el tiempo óptimo para reemplazarlos, es substancial conocer las etapas de falla de los rodamientos.

Fontaine A. C. (2013) establece los conceptos para tener en cuenta entre el impacto y vibración forzada. Primeramente, la vibración forzada se produce cuando se aplica por primera vez una fuerza en una dirección y luego inmediatamente en la dirección opuesta. El ciclo se repite consecutivamente. La respuesta del sistema a una vibración forzada es un movimiento que se produce en la misma frecuencia igual a la fuerza aplicada. Mediante la identificación de la frecuencia de la fuerza aplicada de la fuente puede ser identificada esta. Por ejemplo, si una máquina está vibrando a la misma velocidad que la flecha, entonces es fácil determinar que la fuente de la fuerza de vibración es de la flecha.

Fontaine A. C. (2013) señala que, por otro lado, el impacto de vibraciones se produce cuando se aplica una fuerza, cuando un impacto es aplicado, entonces se

produce un intervalo de tiempo antes del siguiente impacto. La respuesta de la vibración a una fuerza de impacto causa que la masa vibre a una frecuencia natural.

Fontaine A. C. (2013) indica que, en las fuerzas de impacto vibratorio, la frecuencia del movimiento no identifica la fuente, ya que está vibrando en su frecuencia natural. Para identificar la fuente de los impactos es necesario identificar la frecuencia de los impactos. Los espectros de frecuencia nos mostrarán la frecuencia de respuesta, no así la frecuencia de los impactos. Se puede decir entonces que la vibración es diferente a los impulsos de choque generados por los elementos rodantes.

Segun Baeza J. A. (2010) existen diferentes maneras de cuidar los componentes antes de que esta se averíe. El muestreo consiste en tomar muestras periódicas de la amplitud de onda. La velocidad con que se toma esta muestra, es decir, el número de muestras por segundos, es lo que se conoce como Frecuencia de muestreo;  $F$ . El teorema de Nyquist dice que la frecuencia de muestreo;  $F$  tiene que ser al menos el doble de la componente de máxima frecuencia que se quiere analizar, para que no se produzca Aliasing.

Baeza J. A. (2010) menciona que a la hora de hacer las muestra se desarrolla por el método de retención Las muestras tomadas han de ser retenidas por un circuito de retención, el tiempo suficiente para permitir evaluar su nivel de cuantificación.

Baeza J. A. (2010) establece que la función de la cuantificación es medir el nivel de voltaje de cada una de las muestras. Consiste en asignar un margen de valor de una señal analizada a un único nivel de salida. La Codificación consiste en transformar los valores obtenidos durante la cuantificación al código binario.

Elementos importantes como acelerómetro tienen gran importancia, por eso, se hace necesario tener conocimiento de como trabajará, a continuación, se describe su uso y funcionamiento:

Baeza J. A. (2010) señala que el sensor de aceleración o acelerómetro más usados es del tipo piezoeléctrico. Estos transductores utilizan las propiedades piezoeléctricas de ciertos materiales cerámicos como el cuarzo. Dichos materiales tienen una distribución asimétrica de carga interna, de manera que al aplicarles una fuerza externa y deformar su reticulado generan una carga eléctrica.

Baeza J. A. (2010), (como Menciona Saavedra, 1993), afirma que el sensor de aceleración o acelerómetro más usados es del tipo piezoeléctrico. Estos transductores utilizan las propiedades piezoeléctricas de ciertos materiales cerámicos como el cuarzo. Dichos materiales tienen una distribución asimétrica de carga interna, de manera que al aplicarles una fuerza externa y deformar su reticulado generan una carga eléctrica.

El acelerómetro está compuesto por un cierto número de discos de cuarzo, sobre las cuales se apoya por un lado la masa  $M$  y por el otro lado están rígidamente unidas a la base, la cual a la vez se fija a la superficie cuyo movimiento se desea medir.

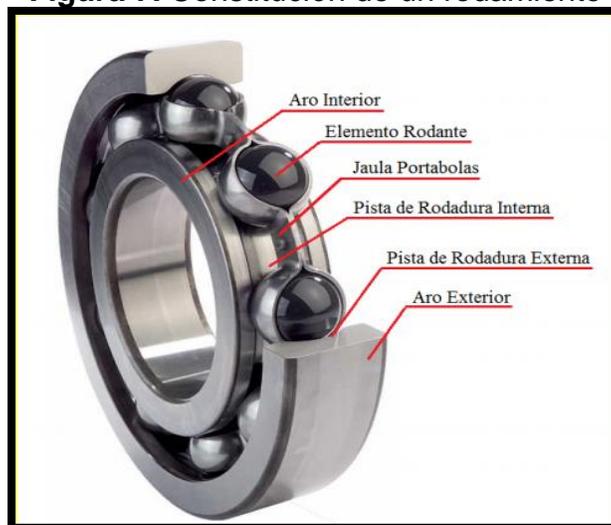
Cuando el acelerómetro está sometido a vibraciones, la masa  $M$  ejerce fuerzas de inercia  $M \cdot a$  sobre el material piezoeléctrico, el que genera cargas eléctricas proporcionales a la aceleración y la masa  $M$ . De aquí se concluye, que la sensibilidad es inversamente proporcional al tamaño del transductor y a su frecuencia de resonancia.

Existen diferentes tipos de rodamientos, de los cuales se mencionarán los más destacados a continuación:

### Rodamientos de bolas

Hernandez H. I. (2011) establece que estos rodamientos trabajan o son adecuados para altas velocidades, son precisos, tienen un bajo par torsional y baja vibración. Existen rodamientos de bolas de dos hileras, los cuales poseen una mayor capacidad de carga, rodamientos de bolas de contacto angular, los cuales se utilizan para aumentar la carga radial, rodamientos de bolas autoalineantes, etc.

**Figura 7.** Constitución de un rodamiento



**Fuente:** Hernandez, H. I. (2011). *Análisis De Fallas En Rodamientos Por Medicion De Vibracion* valdivia-Chile: Recuperado de Universidad Austral De Chile Facultad De Ciencias De La Ingenieria Escuela De Ingenieria Naval.

### Rodamientos de rodillos.

Hernandez H. I. (2011) menciona que estos rodamientos se caracterizan por tener una gran capacidad de carga, asegurando una vida y una resistencia a la fatiga prolongada. Existen rodamientos de rodillos cilíndricos, rodamientos de rodillos

cónicos, los cuales permiten soportar cargas axiales, pero solo en una dirección, dado que, generalmente, en la otra se desmontan. También existen rodamientos de agujas, los cuales son los que tienen la mayor capacidad para soportar cargas, y rodamientos de rodillo en forma de tonel o tambor, los cuales permiten oscilaciones angulares de los ejes que soportan.

Cuando los rodamientos entran a trabajar se puede observar cómo trabaja cada uno de estas por cómo se comporta la frecuencia que se ilustra en la máquina. Estas frecuencias pueden ser:

### **Frecuencias generadas**

Hernandez H. I. (2011) indica que son las frecuencias generadas por la máquina, como, por ejemplo: el desbalanceamiento, frecuencias generadas por rodamientos, frecuencias de engrane, etc. Estas frecuencias son fáciles de identificar ya que se pueden calcular si se conoce la geometría interna y la velocidad de la máquina.

### **Frecuencias excitadas**

Hernandez H. I. (2011) sugiere que las frecuencias que son excitadas por algún origen, provocando la resonancia de la máquina. En teoría, si alguna frecuencia está dentro del ancho de banda de la frecuencia natural y esta tiene la bastante energía para excitar la frecuencia natural, ésta se hará presente. La expresión velocidad crítica es cuando la velocidad de rotación de la máquina es igual a la frecuencia natural.

Segun Hernandez H. I. (2011) otras pueden ser frecuencias causadas por fenómenos electrónicos Se caracterizan por presentar señales falsas, cuando el

contenido armónico de una vibración es distorsionado. El número de armónicos en el dominio de la frecuencia puede exceder el número observado de armónicos en el dominio del tiempo.

Hernandez H. I. (2011) establece que en la industrial, normalmente, se usa un VibraCHECK en el sistema de control a la hora de realizar mantenimientos preventivos. Un VibraCHECK utiliza un acelerómetro para medir las vibraciones mecánicas. Mide simultáneamente aceleración, velocidad, desplazamiento y envolvente dando la mayor velocidad de operación. Simplemente, el operador tiene que ubicar el sensor en el punto de medición, registrar las lecturas y pasar al punto siguiente hasta completar la máquina. Las mediciones se descargan en el ordenador, donde el software busca los síntomas de falla e informa al operador cuales son las máquinas que presentan problemas o anomalías.

Carmona M. N. (2016) indica que los rodamientos están formados por varios componentes claramente diferenciados: pista interior, bolas o rodillos, jaula y pista exterior. El deterioro de cada uno de estos elementos generará una o varias frecuencias características en los espectros de frecuencia que nos permitirán una rápida y fácil identificación. Las cuatro posibles frecuencias de deterioro de un rodamiento son:

- **BPFO** (Ball pass frequency of the outer race), es la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista externa. Físicamente es el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista exterior cada vez que el eje realiza un giro completo.
- **BPFI** (Ball pass frequency of the inner race), es la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista interna. Físicamente, es el número

de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista interior cada vez que el eje realiza un giro completo.

- **BSF** (Ball spin frequency), es la frecuencia de deterioro de los elementos rodantes. Físicamente es el número de giros que realiza una bola del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo.

- **FTF** (Fundamental train frequency), es la frecuencia de rotación de la jaula que contiene los elementos rodantes. Físicamente es el número de giros que realiza la jaula del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo.

Quiroga, Trujillo, & Quintero (2012) indican que las señales que produce el sistema de VibraCHECK las recoge el Cepstrum, el cual se encarga de arrojar los datos finales. El procesamiento de señales usando cepstrum es una técnica no lineal con una amplia variedad de aplicaciones en áreas tales como; el procesamiento de voz, imágenes y monitoreo de equipos. El análisis empleando cepstrum es usado para determinar periodicidades en el análisis espectral de una señal y para separar el efecto de funciones de transferencia variables en el tiempo en una convolución de señales.

Los picos en el cepstrum, llamados armónicos, son un indicador de la presencia de armónicos en el espectro y su ubicación en el eje llamado quefrequency del cepstrum corresponde al periodo de la señal en el dominio del tiempo.

## 2.4. MARCO LEGAL.

SKF Latín American Ltda. cuenta con una organización local de ingeniería, ventas y mercadeo, logística y servicios, certificada bajo los lineamientos de la normas ISO 9001:2008, OSHAS 18001:2007, Formato único 2011 del Consejo Colombiano de Seguridad RUC e ISO 14001:2004, lo que le permite ofrecer a sus clientes, empleados y contratistas condiciones laborales adecuadas y seguras, actos de acuerdo con las leyes, las costumbres y las necesidades de los diferentes países en los que tiene presencia y actividades medioambientales positivas al tiempo que reduce los impactos negativos.

ISO 9001 (Sistema de Gestión de Calidad) especifica los requisitos que le permiten de manera estratégica a la organización ayudar a mejorar su desempeño global, proporcionando una base sólida para las iniciativas de desarrollo sostenible.

Gonzales J. P. (2011) menciona la certificación en ISO 9001 como la evidencia de la capacidad que tiene la organización para proporcionar regularmente productos y servicios que satisfagan los requisitos del cliente, legales y reglamentarios.

### **3. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO**

A menudo se requieren experimentos para validar nuevas tecnologías, teorías y técnicas. Los experimentos con cojinetes de motor se iniciaron con el fin de caracterizar el rendimiento de IQ PreAlert, un sistema de evaluación de estado de carga de uno de los motores desarrollado en Rockwell.

Desde el momento de este ímpetu original, el programa experimental se ha expandido para proporcionar una base de datos de rendimiento del motor que se puede utilizar para validar y/o mejorar una serie de técnicas de evaluación de la condición del motor. Algunos proyectos que recientemente o que están haciendo uso de esta base de datos incluyen: tecnología de evaluación de condiciones de Winsnode, técnicas de diagnóstico basadas en modelos y algoritmos de determinación de la velocidad del motor.

#### **3.1.APLICACIÓN DE TÉCNICAS ESPECTRALES COMO HERRAMIENTA DE ESTUDIO PARA CUMPLIR CON EL OBJETIVO DE ANALIZAR LAS FALLAS ASOCIADAS AL DEFECTO EN LA PISTA EXTERNA DE RODAMIENTOS.**

El fin de analizar las fallas asociadas al defecto en la pista externa (BPFO), usando las técnicas espectrales que se definieron y caracterizaron dentro del uso del software Matlab, es proceder con la aplicación como herramienta de estudio para el análisis de fallas asociadas al caso específico modelado en el software.

Al realizar el análisis espectral permitió la aplicación de técnicas de dominio de frecuencia que convirtieron las señales de vibración del dominio del tiempo en componentes de frecuencia discretos, a través de series de Fourier en su revisión trigonométrica, en el caso específico de la objetividad de esa investigación, se realizó usando el software Matlab utilizando una transformada rápida de Fourier (FFT).

### Aplicación de la transformada rápida de Fourier “FFT”

Lopez J. F. (2017) menciona que la transformada rápida de Fourier FFT es un algoritmo que reduce el tiempo de cálculo de  $n^2$  pasos a  $n \cdot \log_2(n)$ . El único requisito es que el número de puntos en la serie tiene que ser una potencia de 2 ( $2^n$  puntos), por ejemplo 32, 1024, 4096, etc.

Las fórmulas con la que MATLAB calcula la transformada rápida de Fourier  $Y = \text{fft}(x)$  y la transformada inversa  $y = \text{ifft}(X)$  son, respectivamente:

$$\left\{ \begin{array}{l} X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)} \\ x(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)} \end{array} \right\} \omega_N = \exp\left(\frac{2\pi i}{N}\right)$$

Supongamos que tenemos una señal descrita por un conjunto de  $n$  (potencia de dos) pares de datos  $(t_j, x_j)$  igualmente espaciados en el tiempo, por un intervalo  $\Delta t$ , desde  $t=0$  hasta  $t_{\text{final}}=(n-1)\Delta t$ . La inversa del intervalo  $\Delta t$ , se denomina frecuencia de muestreo  $f_s$ . De modo que el vector de tiempos es  $t = (0:n-1)/f_s$

El intervalo de frecuencias es  $\Delta\omega = 2\pi/(n \cdot \Delta t) = 2\pi f_s/n$  de modo que la mínima frecuencia es 0 y la máxima  $\omega_{\text{Max}}=2\pi f_s(n-1)/n$ . La resolución espectral  $\Delta\omega$  es

inversamente proporcional al tiempo total  $n \cdot \Delta t$  de recogida de datos en la serie temporal. Lopez J. F (2017).

Lopez J. F. (2017) indica que conocido el intervalo de tiempo  $\Delta t$  o la frecuencia de muestreo  $\Delta t = 1/f_s$  y el número de pares de datos  $n$  (potencia de 2), creamos el vector de tiempos  $t$  y el vector de frecuencias angulares  $\omega$  del siguiente modo:

$$\gg n = \text{length}(x)$$

$$\gg t = (0:n-1) * dt$$

$$\gg dw = 2 * \frac{\pi}{(n * dt)}$$

$$\gg w = (0:n-1) * dw$$

Podemos obviar la fase y concentrarnos en la amplitud, si calculamos y representamos el cuadrado de los elementos del vector  $g$ . A  $P$  se le denomina espectro de potencia (Power spectrum)

$$P = |g(\omega)|^2$$

Para ilustrar la aplicación de la función `fft` de MATLAB, vamos a analizar la señal formada por la suma de cuatro armónicos de frecuencias angulares  $\omega=1, 3, 3.5, 4$  y  $6$  rad/s

$$x(t) = \cos(t) + 0.5 \cdot \cos(3t) + 0.4 \cdot \cos(3.5t) + 0.7 \cdot \cos(4t) + 0.2 \cdot \cos(6t)$$

Recuérdese que la transformada de Fourier de  $f(t)=\cos(\omega_0 t)$  es  $F(\omega)=\pi[\delta(\omega-\omega_0)+\delta(\omega+\omega_0)]$ . Dos funciones delta de Dirac situados en  $+\omega_0$  y en  $-\omega_0$ .

Creemos un script para realizar las siguientes tareas:

- Construir una serie temporal  $(x,t)$  formada por  $n=214=16384$  pares de datos, tomando un intervalo de tiempo  $\Delta t=0.4$  s, o bien una frecuencia de muestreo de  $f_s=2.5$  Hz. El tiempo final es  $t_{\text{final}}=16383 \cdot 0.4=6553.2$  s
- Calcular la transformada rápida de Fourier  $fft$  y la guardamos en el vector  $g$
- Crear el array de frecuencias  $\omega$  como en el cuadro anterior
- Calculamos la potencia  $power$ : el cuadrado del valor absoluto de cada elemento de  $g$ .
- Representar gráficamente  $power$  en términos de la frecuencia angular  $\omega$

La transformada de Fourier permite dentro de la integración de otros elementos la reducción del tiempo de cálculo de  $n^2$  pasos a  $n \cdot \log_2(n)$ . EL inico requisito es que el número de puntos en la serie tiene que ser una potencia de 2 ( $2^n$  puntos), por ejemplo 32, 1024, 4096, etc.

Aplicando el método FFT, el análisis de la señal de vibración en el dominio de frecuencia resulta siendo un procedimiento matemático analítico de rápida evaluación, el cual arroja los datos de manera rápida. Constituye entonces una forma más fácil y eficiente de obtener espectros de banda estrecha.

### Transformada de Hilbert

Comúnmente las funciones o señales se definen completamente en el dominio del tiempo o en el de la frecuencia, y la transformada de Fourier realiza un cambio de la función o señal de un dominio a otro. La transformada de Hilbert conforma la

señal con la mitad de la información en el dominio del tiempo y la otra mitad en el dominio de la frecuencia Ledesma D. D. (2015).

La transformada de Hilbert está definida como.

$$S^*(t) = \frac{1}{\pi} \int \frac{s(T)}{t - T} dT,$$

Ledesma D. D. (2015) indica que es equivalente a una rotación de 90° en la fase de cada componente armónica de la señal. Esencialmente esta ecuación define la transformada de Hilbert como la convolución de la función  $s(t)$  con  $1/t$ , por consecuencia enfatiza las propiedades locales de  $s(t)$ .

La transformada de Hilbert puede ser calculada de varias formas, entre ellas:

- En el caso de tener una función (p.e.: funciones armónicas) se puede aplicar directamente la transformada de Hilbert.
- Determinación a partir de  $s(t)$  aplicando el operador lineal de convolucion (operador normalizado de Hilbert).

$$h(t) = \frac{2 \sin^2(\pi t/2)}{\pi t}, t \neq 0 \text{ y } h(t) = 0, n = 0.$$

- De la formas  $s(t) * h(t)$ , lo que es equivalente a aplicar un filtro.

Utilizando la transformada discreta.

$$\mathfrak{N}\{s(t)\} = \frac{2}{\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(t - n\Delta t) \frac{\sin^2(\pi t/2)}{n}, n \neq 0,$$

- Reduciendo a una representación de fasor si  $s(t)$  es un senoide, esto es, si  $s(t) = A\cos(\omega t + \phi)$  entonces  $s^*(t) = A\sin(\omega t + \phi)$  para valores reales de  $A$  y  $\phi$  con  $\omega > 0$
- A partir de una transformada de Fourier, pasando al dominio de frecuencias la señal analítica,  $\mathcal{F}^+\{\hat{s}(t)\}$  con  $\hat{s}(t)$  de la forma  $\hat{s}(t) = s(t) + i0$ , luego multiplicando por una función escalón unitario (eliminando la parte negativa de  $\omega$  en el dominio de las frecuencias) y finalmente haciendo una transformación inversa de Fourier
- ( $\mathcal{F}^-\{\hat{s}(\omega)\}$ ), con lo cual se obtiene  $\hat{s}(t) = s(t) + is^*(t)$ , que es equivalente a  $(\delta_t + i\hat{s}(t)).s(t)$  (Ledezma, 2015).

### Información del rodamiento del lado del acople y del lado opuesto al acople.

Rodamiento del lado del acople: 6205-2RS JEM SKF, rodamiento rígido de bolas  
Tamaño: (pulgadas). Dentro de las características principales de este rodamiento encontramos que es idóneo para usar en la industria farmacéutica, química, médica, imprentas, motores/bombas, plataformas en alta mar e industria náutica, e industria alimentaria y de bebidas, entre otras. Es resistente a la corrosión en lugares húmedos y es versátil. Además, admite cargas radiales y axiales en las dos direcciones, cuentan con una capacidad de transporte de carga inferior a los rodamientos del mismo tamaño y están fabricados en acero con un alto índice de cromo.

**Tabla 1. Medidas del diámetro**

DIÁMETRO INTERNO	DIÁMETRO EXTERIOR	ESPEJOR	DIÁMETRO DE LA BOLA	DIÁMETRO DE PASO
0.9843	2.0472	0.5906	0.3126	1.537

**Fuente:** DEGARMO, Paul; TEMBLE, J.; HOHSER, Ronald. (2002). Recuperado de Materiales y procesos de fabricación, Buenos Aires: Reverté S.A.

**Tabla 2. Medidas del anillo**

ANILLO INTERIOR	ANILLO EXTERIOR	TREN DE JAULA	ELEMENTO RODANTE
5.4152	3.5848	0.39828	4.7135

**Fuente:** DEGARMO, Paul; TEMBLE, J.; HOHSER, Ronald. (2002). Recuperado de Materiales y procesos de fabricación, Buenos Aires: Reverté S.A.

Rodamiento del lado opuesto al acople: 6203-2RS JEM SKF, rodamiento rígido de bolas Tamaño: (pulgadas)

**Tabla 3. Medidas del diámetro**

DIÁMETRO INTERNO	DIÁMETRO EXTERIOR	ESPEJOR	DIÁMETRO DE LA BOLA	DIÁMETRO DE PASO
0.6693	1.5748	0.4724	0.2656	1.122

**Fuente:** DEGARMO, Paul; TEMBLE, J.; HOHSER, Ronald. (2002). Recuperado de Materiales y procesos de fabricación, Buenos Aires: Reverté S.A.

**Tabla 4. medidas del anillo.**

ANILLO INTERIOR	ANILLO EXTERIOR	TREN DE JAULA	ELEMENTO RODANTE
4.9469	3.0530	0.3817	3.9874

**Fuente:** DEGARMO, Paul; TEMBLE, J.; HOHSER, Ronald. (2002). Recuperado de Materiales y procesos de fabricación, Buenos Aires: Reverté S.A.

**Figura 8.** Rodamiento rígido a bolas 6205.



**Fuente:** RODRIGUEZ, Julián; SANCHEZ, Juan; RENATA, Jesús; Cledera, María. (2015). Recuperado de Teoría de máquinas. Madrid: Visión Net.

$$BPFO = \frac{RPM}{60} \left( \frac{N_b}{2} \right) \left( 1 - \frac{B_d \cos \Phi}{P_d} \right)$$

RPM = velocidad del eje

N<sub>b</sub> = número de elementos rodantes

B<sub>p</sub> = Diámetro del elemento rodante

Φ = Angulo de contacto

P<sub>d</sub> = diámetro efectivo del rodamiento.

**Tabla 5.** %Ploteo de los datos descargados

<b>Fs = 12000;</b>	<b>%Frecuencia de muestreo, dato dado por la pagina</b>
<b>dt = 1/Fs;</b>	<b>%Periodo de muestreo</b>
<b>L = length(Dato);</b>	<b>%Longitud del vector Datos</b>
<b>tiempo = (0:L-1)*dt;</b>	<b>%Vector tiempo</b>
<b>plot(tiempo,Datos);</b>	<b>%Vector datos</b>

Fuente: Autor

**Figura 9.** Tabla número de rodamiento.

Bearing Number	NB	BD	PD	PHI	BPFO	BPFI	FTF	BSF
6080	13	2.5	19.685	0	5.67	7.33	0.44	3.87
6084	14	2.5	20.472	0	6.15	7.85	0.44	4.03
6200	8	0.187	0.807	0	3.07	4.93	0.38	2.04
6201	7	0.218	0.866	0	2.62	4.38	0.37	1.86
6202	7	0.25	0.984	0	2.61	4.39	0.37	1.84
6203	7	0.281	1.133	0	2.63	4.37	0.38	1.89
6204	8	0.312	1.358	0	3.08	4.92	0.39	2.06
62/22	8	0.312	1.417	0	3.12	4.88	0.39	2.16
6205	9	0.312	1.535	0	3.59	5.41	0.40	2.36

Fuente: SANCHEZ, Francisco; PEREZ, Antonio; SANCHO, Joaquin, RODRIGUEZ, Pablo. (2007). Recuperado de Mantenimiento de maquinas. Valencia: Universidad Jaume I.

El rodamiento modelo 6205 que se utilizo tiene Nb = 9. Rodamiento del extremo del ventilador: 6203-2RS JEM SKF, rodamiento rígido de bolas

**Figura 10. Medidas de rodamiento.**

Tamaño: (pulgadas).

DIÁMETRO INTERNO	DIÁMETRO EXTERIOR	ESPESOR	DIÁMETRO DE LA BOLA	DIÁMETRO DE PASO
0.9843	2.0472	0.5906	0.3126	1.537

Frecuencia de defecto (Velocidad de carrera múltiple en Hz)

ANILLO INTERIOR	ANILLO EXTERIOR	TREN DE JAULA	ELEMENTO RODANTE
5.4152	3.5848	0.39828	4.7135

**Fuente:** DEGARMO, Paul; TEMBLE, J.; HOHSER, Ronald. (2002). Recuperado de Materiales y procesos de fabricación, Buenos Aires: Reverté S.A.

RPM = 1730 (dato tomado del archivo 237.mat)

Nb = 9

Bp = 0.3126 " = 0.00794 m

$\Phi = 0^\circ$  (de acuerdo a la tabla de modelos de rodamientos)

Pd = 1.537" = 0.03934 m

$$BPFO = \frac{1730}{60} * \frac{9}{2} * \left(1 - \frac{0.00794 * \cos 0}{0.03934}\right)$$

BPFO = 104.5560Hz

**%Calculo de la frecuencia BPFO**

Nb = 9;                   % Números de rodamientos.

Bd = 0.00794004; % Diámetro de elementos rodantes

Pd = 0.0390398; % Diámetro de alineación de rodamiento

theta = 0;               % Ángulo de contacto en grados

RPM = 1730;

$$BPFO = \left(\frac{RPM}{60}\right) * \left(\frac{Nb}{2}\right) * \left(1 - Bd * \cos\frac{theta}{Pd}\right)$$

BPFO = 104.5560

### **3.2. SIMULACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE MATLAB DEL COMPORTAMIENTO DEL RODAMIENTO AL MOMENTO DE PRESENTAR UN DEFECTO EN LA PISTA EXTERNA (BPFO) EMPLEANDO LAS SEÑALES DE LA BASE DE DATOS 12K DRIVE END BEARING FAULT DATA.**

Para el desarrollo del objetivo se tiene en cuenta el sitio web que proporciona acceso a los datos de prueba de rodamientos de bolas para rodamientos normales y defectuosos. Los experimentos se realizaron utilizando un motor Reliance Electric de 3 hp, y los datos de aceleración se midieron en ubicaciones cercanas y alejadas de los cojinetes del motor, en el sentido de que las condiciones reales de prueba del motor, así como el estado de falla del rodamiento.

Los cojinetes del motor fueron sembrados con fallas utilizando el mecanizado de electrodescarga (EDM). Las fallas que varían de 0.007 pulgadas de diámetro a 0.028 pulgadas de diámetro se introdujeron por separado en el canal de rodadura interior, elemento rodante (es decir, bola) y canal de rodadura exterior. Los rodamientos defectuosos se reinstalaron en el motor de prueba y los datos de vibración se registraron para cargas de motor de 0 a 3 caballos de fuerza (velocidades del motor de 1797 a 1730 RPM).

El proyecto que se tiene como referencia consiste en un motor de 2 HP y un transductor / codificador de torque (centro), un dinamómetro y electrónica de control (no se muestra). Los rodamientos de prueba soportan el eje del motor. Las fallas de un solo punto se introdujeron en los rodamientos de prueba utilizando un mecanizado de electrodescarga con diámetros de fallas de 7 mils, 14 mils, 21 mils, 28 mils y 40 mils (1 mil = 0.001 pulgadas) para profundidades de falla.

Los rodamientos SKF se usaron para las fallas de 7, 14 y 21 mils de diámetro, y se usaron rodamientos NTN equivalentes para las fallas de 28 mil y 40 mil. Las

especificaciones de los rodamientos y del extremo del ventilador, incluida la geometría del rodamiento y las frecuencias de defecto, se enumeran en las especificaciones del rodamiento.

Los datos de vibración se obtuvieron utilizando acelerómetros, que se unieron a la carcasa con bases magnéticas. Los acelerómetros se colocaron en la posición de las 12 en punto tanto en el extremo del accionamiento como en el extremo del ventilador de la carcasa del motor. Durante algunos experimentos, también se unió un acelerómetro a la placa base de soporte del motor. Las señales de vibración se recogieron usando un registrador DAT de 16 canales, y se procesaron posteriormente en un entorno Matlab.

Todos los archivos de datos están en formato Matlab (\* .mat). Los datos digitales se recolectaron a 12,000 muestras por segundo.

**Tabla 6. Datos sin fallas**

Motor Load (HP)	Approx. Motor Speed (rpm)	Normal Baseline Data
0	1797	Normal_0
1	1772	Normal_1
2	1750	Normal_2
3	1730	Normal_3

**Fuente:** CSE Groups, (2002). 48k Drive End Bearing Fault Data. [Datos de falla 48k del lado del acople]. Bearing Data Center. Recuperado de: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/48k-drive-end-bearing-fault-data>

Se evidencia en la figura 11, los datos obtenidos de la pagina web de los datos sin fallas <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/normal-baseline-data> la cual arroja la tabla en las cuales se recolecta la informacion necesaria de caballos de fuerzas del motor y revoluciones por minuto.

**Tabla 7. Datos fallas leves**

Diámetro de falla	Carga del motor (HP)	Aprox. Velocidad del motor (rpm)	Pista interior	Bola	Posición de la carrera externa relativa a la zona de carga (Zona de carga centrada a las 6:00)		
					Centrado a las 6:00	Ortogonal a las 3:00	Opuesto a las 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

**Fuente:** CSE Groups, (2002). 48k Drive End Bearing Fault Data. [Datos de falla 48k del lado del acople]. Bering Data Center. Recuperado de: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/48k-drive-end-bearing-fault-data>

Como se puede identificar en la Figura 12, los datos de fallas leves de 0.007” de profundidad con unos datos de carga del motor de 0 HP (caballos de fuerza) con una velocidad del eje del motro de 1797 RPM (revoluciones por minuto) como tambien se encuentra con 1 HP con una velocidad del RPM y por ultimo de un motor de 3 HP con una velocidad aproximada de 1730 RPM que fueron tomadas a 12.000 muestras, de las cuales se tomaron de la pista inferior y bola. Los datos del estudio original fueron recolectados a las 06:00, 03:00 y 12:00, para observar sus fallas.

**Tabla 8. Datos fallas medianas**

Diámetro de falla	Carga del motor (HP)	Aprox. Velocidad del motor (rpm)	Pista interior	Bola	Posición de la carrera externa relativa a la zona de carga (Zona de carga centrada a las 6:00)		
					Centrado a las 6:00	Ortogonal a las 3:00	Opuesto a las 12:00
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	*	*

**Fuente:** CSE Groups, (2002). 48k Drive End Bearing Fault Data. [Datos de falla 48k del lado del acople]. Bering Data Center. Recuperado de: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/48k-drive-end-bearing-fault-data>

Como se puede identificar en la Figura 13, los datos de fallas medianas de 0.014” de profundidad, con motor a 0 HP con una velocidad aproximada de 1797 RPM como también se observa datos del motor, 1 HP con una velocidad de de 1772 RPM Al igual se encuentra a 2 HP con una velocidad aproximada de 1750 RPM y unos datos de 3 HP con una velocidad aproximada de 1730 RPM, de las cuales nos arroja unos datos de fallas en la pista interior y en bola, donde se hallaron pruebas a las 06:00 con base a 12.000 muestras tomadas.

**Tabla 9. Datos fallas graves**

Diámetro de falla	Carga del motor (HP)	Aprox. Velocidad del motor (rpm)	Pista interior	Bola	Posición de la carrera externa relativa a la zona de carga (Zona de carga centrada a las 6:00)		
					Centrado a las 6:00	Ortogonal a las 3:00	Opuesto a las 12:00
0.021 "	0	1797	IR021_0	B021_0	OR021 @ 6_0	OR021 @ 3_0	OR021 @ 12_0
	1	1772	IR021_1	B021_1	OR021 @ 6_1	OR021 @ 3_1	OR021 @ 12_1
	2	1750	IR021_2	B021_2	OR021 @ 6_2	OR021 @ 3_2	OR021 @ 12_2
	3	1730	IR021_3	B021_3	OR021 @ 6_3	OR021 @ 3_3	OR021 @ 12_3

**Fuente:** CSE Groups, (2002). 48k Drive End Bearing Fault Data. [Datos de falla 48k del lado del acople]. Bering Data Center. Recuperado de: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/48k-drive-end-bearing-fault-data>

Como se puede identificar en la Tabla 9, los datos graves del 0.021” de profundidad con unos datos de motor a 0 HP con 1797 RPM de eje, como también a 1 HP con una velocidad aproximada de 1772 RPM del eje del motor, de la misma forma se observa a 2 HP con velocidad de motor de 1750 RPM, de igual manera a 3 HP con una velocidad de 1730 RPM aproximadamente con 12.000 muestras con datos de posición de la carrera externa relativa a la zona de carga tomadas centrado a las 06:00, ortogonal a las 03:00 y opuesto a las 12:00.

**Tabla 10.** Selección de la falla a simular

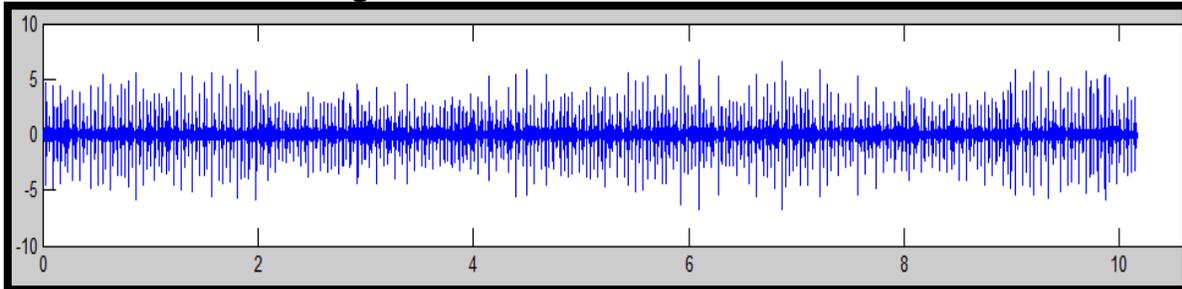
Diámetro de falla	Carga del motor (HP)	Aprox. Velocidad del motor (rpm)	Pista interior	Bola	Posición de la carrera externa relativa a la zona de carga (Zona de carga centrada a las 6:00)		
					Centrado a las 6:00	Ortogonal a las 3:00	Opuesto a las 12:00
0.021 "	0	1797	IR021_0	B021_0	OR021 @ 6_0	OR021 @ 3_0	OR021 @ 12_0
	1	1772	IR021_1	B021_1	OR021 @ 6_1	OR021 @ 3_1	OR021 @ 12_1
	2	1750	IR021_2	B021_2	OR021 @ 6_2	OR021 @ 3_2	OR021 @ 12_2
	3	1730	IR021_3	B021_3	OR021 @ 6_3	OR021 @ 3_3	OR021 @ 12_3

**Fuente:** CSE Groups, (2002). 48k Drive End Bearing Fault Data. [Datos de falla 48k del lado del acople]. Bering Data Center. Recuperado de: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/48k-drive-end-bearing-fault-data>

Como se visualiza en la Tabla 10, la selección de la falla OR021 de la cual %load 237.mat, y se creó un vector llamado Datos que va a contener los %datos descargados de la página <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/12k-drive-end-bearing-fault-data>. las cuales se escogió la falla a 0.021" de profundidad, con el motor a 3 HP (caballos de fuerza), velocidad del eje a 1730 RPM (Revoluciones Por Minuto), falla en la pista externa con el dato tomado a las 06:00.

Datos = X237\_DE\_time;

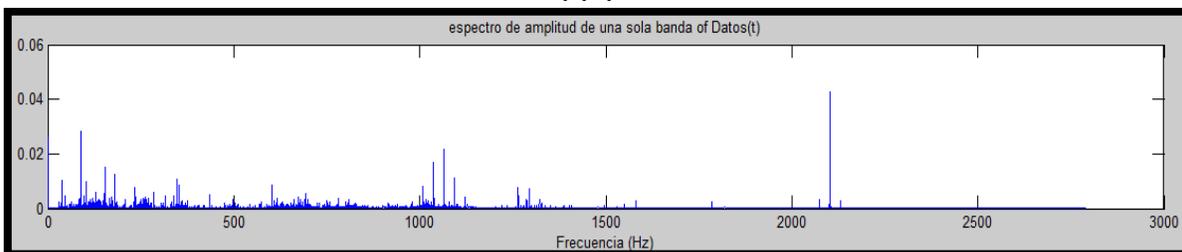
**Figura 11. Grafica de fallas 237 "Mat"**



**Fuente:** CSE Groups, (2002). 48k Drive End Bearing Fault Data. [Datos de falla 48k del lado del acople]. Bering Data Center. Recuperado de: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/48k-drive-end-bearing-fault-data>

Como se evidencia en la Figura 11, la grafica de frecuencias de la falla 237.Mat donde se muestran los espectros para los rodamientos con fallas en pista externa a 12.000 muestras con 0.021" de profundidad de un motor de 3 HP a una velocidad de 1730 RPM el cual arroja que las frecuencias que aparecen mas visible la frecuencia de las fallas, pero con una magnitud grande facilitando la identificacion de los picos que se observan en la grafica.

**Figura 12. Grafica de falla 237. "Mat" frecuencia transformada rápida de Fourier "FFT"**

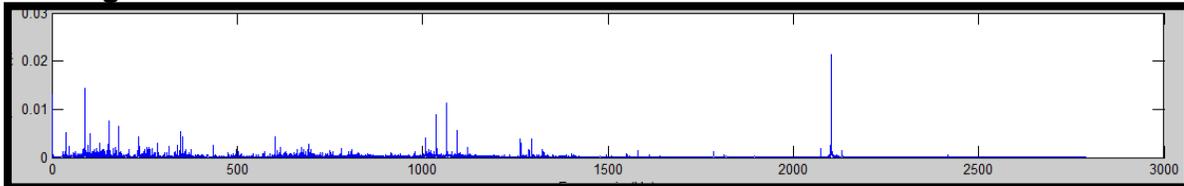


**Fuente:** CSE Groups, (2002). 48k Drive End Bearing Fault Data. [Datos de falla 48k del lado del acople]. Bering Data Center. Recuperado de: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/48k-drive-end-bearing-fault-data>

Como se puede apreciar en la Figura 12, muestra los datos recolectados por medio de la grafica de frecuencias usando el software MATLAB, los datos que arroja el motor de 3 HP el eje gira a 1730 RPM (revoluciones por minuto) con un grado de

0.021”en fallas graves las cuales se identifican en la Figura 21 se logro determinar espectro de amplitud de una sola banda.

**Figura 13.** Grafica de falla 237. “Mat “frecuencia transformada de Hilbert.



**Fuente:** CSE Groups, (2002). 48k Drive End Bearing Fault Data. [Datos de falla 48k del lado del acople]. Bering Data Center. Recuperado de: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/48k-drive-end-bearing-fault-data>

En la Figura 13, se evidencia como se describe bien el orden de aparición y desaparición de los picos en el espectro. Pankaj & Pradhan, 2016, explican que el rango de alta frecuencia del espectro es un método eficaz de predicción de la condición del rodamiento, cuando interactúa el defecto en el rodamiento de elementos rodantes con pulsos de muy corta duración. Estos impulsos excitan las frecuencias naturales de elementos y estructuras del cojinete, lo que resulta en un aumento en la energía de vibración a estas altas frecuencias.

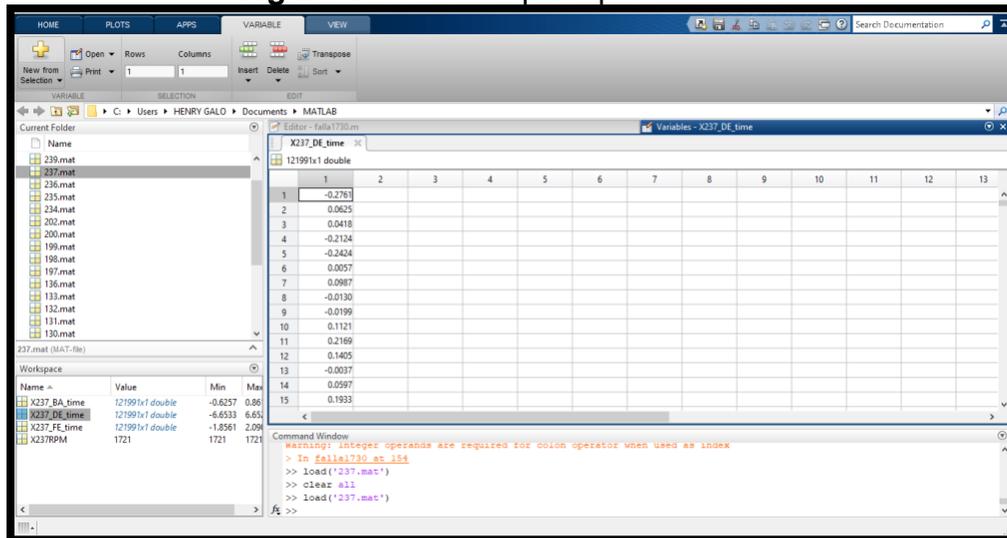
**Figura 14.** script de la extracción envolvente Hilbert

```
%Extraccion de la envolvente
Yenv4 = hilbert(abs(Y4));
Y4 = abs(Yenv4(1:NFFT/2+1));
Y4 = Y4(1:N);
subplot(3,1,3),plot(f,Y4),
title('Envolvente espectro de amplitud de una sola banda of Datos(t)')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('|DATOS(f)|')
```

**Fuente:** CSE Groups, (2002). 48k Drive End Bearing Fault Data. [Datos de falla 48k del lado del acople]. Bering Data Center. Recuperado de: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/48k-drive-end-bearing-fault-data>

Como se evidencia en la figura 14, el cual muestra las ecuaciones, códigos de la extracción envolvente espectro de amplitud de una sola banda en frecuencia ( $(H_z)$ ) la cual permitira la generacion de la grafica de Hilbert con la que se identifican el aumento en la energía de vibración a altas frecuencias.

**Figura 15.** Pantalla principal de Matlab



**Fuente:** CSE Groups, (2002). 48k Drive End Bearing Fault Data. [Datos de falla 48k del lado del acople]. Bering Data Center. Recuperado de: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/48k-drive-end-bearing-fault-data>

### Adaptación de los datos descargados

%load 237.mat, y se creo un vector llamado Datos que va a contener los %datos descargados de la pagina <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/12k-drive-end-bearing-fault-data>.

Datos = X237\_DE\_time;

### **3.3. INTERPRETAR LOS RESULTADOS OBTENIDOS DE LA SEÑAL SIMULADA DEL ANÁLISIS ESPECTRAL CON EL FIN DE EVALUAR EL GRADO DE SEVERIDAD DE LA FALLA.**

Los resultados aplicados mediante el proceso del software MATLAB utilizando los datos obtenidos de la falla 237.Mat, las cuales se evidencian las 12.000 muestras de datos a 0.021" de profundidad, que se visualizan en la Figura 18, la gráfica de frecuencia natural aplicando la técnica de la *envolvente* para fallas en pista exterior mostraron ser consistentes con el escenario de falla estudiado.

Es decir, en presencia de falla se activaron las frecuencias *BPFO* y sus respectivos armónicos. Las magnitudes de estas frecuencias de falla son proporcionales a la severidad de las fallas cuando la técnica es implementada. El único caso infrecuente correspondió a la falla severa para la pista externa, en la cual, aunque se diferencia perfectamente la *BPFO* y sus armónicos, el uso de la técnica atenuó la magnitud de la frecuencia de falla, concluyéndose con ello que la técnica de la *envolvente* tiene un mejor desempeño cuando las fallas son iniciales y moderadas.

Así, esta es la restricción del método, a medida que el defecto pierda el carácter de impulsivo, este dejará de estimular las frecuencias naturales del rodamiento y con esto la detección del defecto. La frecuencia natural de la falla, en el espectro se observan el sistema y picos en la frecuencia característica de falla en la pista externa de baja amplitud. Las vibraciones se atribuyen a pequeños desperfectos en el diseño o defectos de fabricación. En el caso del Hilbert se presentó activación de las frecuencias de falla y hubo consistencia entre la magnitud del armónico fundamental (*BPFO*) y la severidad de la falla en todos los escenarios de prueba.

**Tabla 11. Datos del rodamiento seleccionado**

<b>DATOS DEL RODAMIENTO EXTREMO DE TRANSMISIÓN: 6205-2RS JEM SKF</b>		
<b>Nb</b>	9	Numero de bolas rodamientos
<b>Bd</b>	0.00794004	Diámetro de elementos rodantes
<b>Pd</b>	0.0390398	Diámetros de alineación de elementos rodantes
<b>Theta</b>	0	Angulo de contacto de grados
<b>RPM</b>	1730	Revoluciones por minuto

**Fuente Autor:**

Fernandez J. (2017). Menciona que cuando alguno de los componentes del rodamiento está dañado distinguiremos en el espectro de frecuencias la frecuencia fundamental correspondiente al elemento dañado, acompañada siempre de armónicos. En aquellos casos en que se desconozcan los parámetros físicos del rodamiento, hay una fórmula empírica bastante aproximada que nos permitirán determinar la frecuencia de deterioro de las pistas y de la jaula de un rodamiento en función tan solo del número de elementos rodantes y de la velocidad de giro.

Las frecuencias de deterioro de los rodamientos, dependen del ángulo de contacto, de ahí que cualquier pequeña variación de éste se traducirá en una variación de las frecuencias ideales de deterioro del rodamiento, dificultando la identificación de dichas frecuencias en el espectro. Las causas que pueden producir variaciones del ángulo de contacto pueden ser muy diversas: desalineación, dilataciones térmicas, aprietes excesivos, picaduras o desconchamientos en las pistas, etc. Todo esto influirá en que las frecuencias precalculadas de antemano (frecuencias ideales) no

coincidan exactamente con las frecuencias que aparecen en el espectro (frecuencias reales), por lo que en muchos casos hay que permitir cierto margen de error a la hora de identificar las frecuencias de defectos. (Fernandez J. 2017)

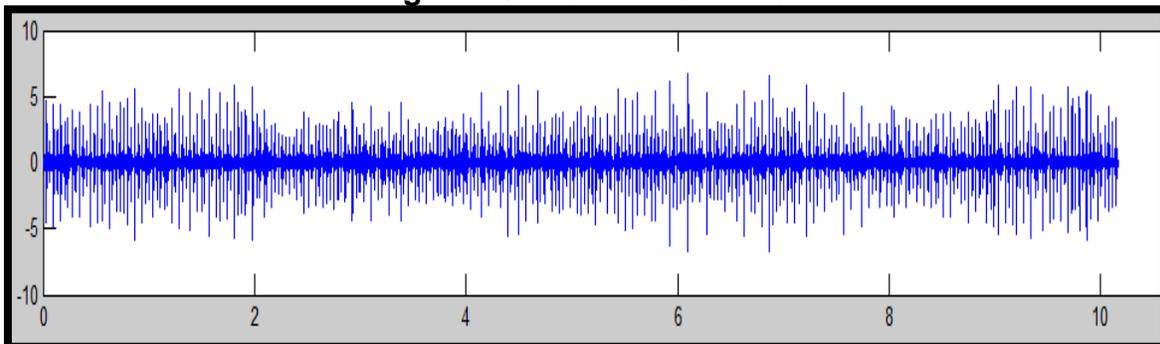
$$BPFO = \left(\frac{RPM}{60}\right) * \left(\frac{Nb}{2}\right) * \left(1 - Bd * \cos\frac{theta}{Pd}\right)$$

$$BPFO = \frac{1730}{60} * \frac{9}{2} * \left(1 - \frac{0.00794 * \cos 0}{0.03934}\right)$$

Resultados de la aplicación de la fomula BPFO

- 1 BPFO = 103.5625
- 2 BPFO = 207.1251
- 3 BPFO = 310.6876
- 4 BPFO = 414.2501

**Figura 16. Frecuencia natural**

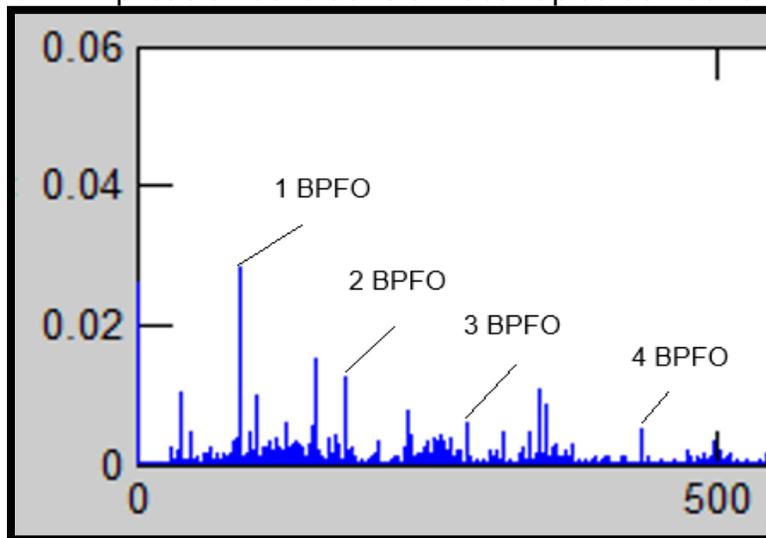


**Fuente:** CSE Groups, (2002). 48k Drive End Bearing Fault Data. [Datos de falla 48k del lado del acople]. Bering Data Center. Recuperado de: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/48k-drive-end-bearing-fault-data>

Como se observa en la gráfica de la Figura 16, los procesos de modulación de la técnica envolvente, la cual busca obtener mediante la vibración natural que reduzca a la señal modulada, debido a que se denomina como señal de la envolvente original

y la señal que se modula. Se designa como espectro de modulación, se recolectaron los resultados de 12.000 datos por segundo del rodamiento del variador de velocidad mediante esta señal natural se puede aplicar las técnicas de Fourier y Hilbert para hallar severidad de las fallas.

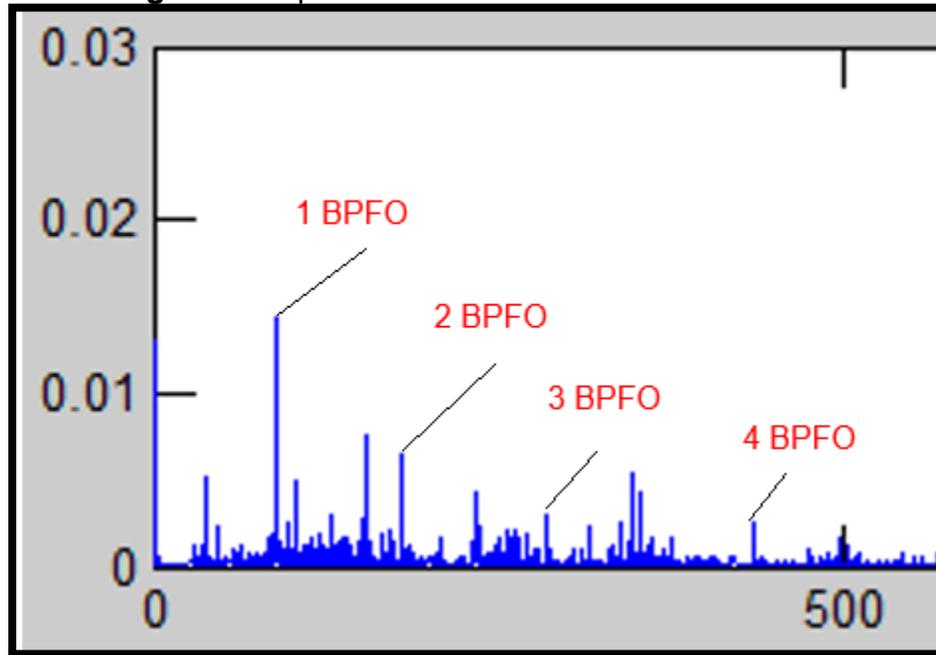
**Figura 17.** Aplicación de la transformada rápida de Fourier “FFT”



**Fuente:** CSE Groups, (2002). 48k Drive End Bearing Fault Data. [Datos de falla 48k del lado del acople]. Bering Data Center. Recuperado de: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/48k-drive-end-bearing-fault-data>

En la Figura 17, Se puede observar a simple vista mediante la aplicación de la técnica Fourier la cual permite la realización de un filtrado a la señal natural con respecto al tiempo vs frecuencia, de esta manera se puede eliminar gran parte de los calculos repetitivos. Se determina que mediante el filtrado de la transformada rapida de Fourier se logro identificar los diferentes picos de fallas denominados BPFO, las cuales los cuales arrojan los datos de, 1 BPFO 103.5625, 2 BPFO 207.1251, 3 BPFO 310.6876, 4 BPFO 414.2501 hallados mediante la simulacion.

**Figura 18.** Aplicación de la transformada de Hilbert



**Fuente:** CSE Groups, (2002). 48k Drive End Bearing Fault Data. [Datos de falla 48k del lado del acople]. Bering Data Center. Recuperado de: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/48k-drive-end-bearing-fault-data>

Como se muestra en la Figura 18, se puede observar la aplicación de la transformada de Hilbert, la cual nos permite un filtrado al igual que la transformada rápida de Fourier e identificar de una manera más sencilla los BPFO en la gráfica, debido a que se visualizan de una forma menos agresiva extendida, la cual disminuyen la severidad de los picos de la falla 237.Mat. con base a la fórmula del BPFO de hallaron los siguientes resultados, 1 BPFO 103.5625, 2 BPFO 207.1251, 3 BPFO 310.6876, 4 BPFO 414.2501.

## 4. RESULTADOS

En esta sección se muestran los resultados de los diferentes esquemas de pronóstico. En los esquemas donde se requiere un modelo matemático para la ejecución del mismo, se utiliza el modelo de rodamiento, el cual permite realizar la simulación de las fallas principales de los rodamientos, además que presenta un costo computacional bajo, esto se hace importante cuando se procesa la base de datos de rodamientos, se modela y se infiere con una técnica probabilista.

Las técnicas espectrales pueden ser implementados exitosamente para el monitoreo de falla de rodamientos, en pista externa e interna, cuando se requiere una localización temprana y más aún para evaluar el grado de insensibilidad de la falla debido a que se encontró que la magnitud de la frecuencia fundamental de BPFI y BPFO se eleva con la severidad de la falla. La FFT mostró ser efectiva para detectar fallas severas. Adicionalmente, se encontró que cuando la falla se torna severa la técnica de la envolvente menoscaba el monitoreo por cuanto atenúa la BPFO y sus armónicos.

En el proyecto de grado se analizó el Tiempo- Frecuencia, se determinó que es sensible a cambios de amplitud en la señal (inducción de fallas), sin embargo, las diferencias impulsivas de estas señales indican la necesidad de aumentar considerablemente la frecuencia de muestreo, para así tener mejor resolución en tiempo como en frecuencia.

## 5. CONCLUSIONES

El transcurso de la ejecución de la técnica espectral, para la detección de fallas en rodamientos, se efectúa mediante una simulación en el software Matlab del procedimiento dinámico del rodamiento cuando este presenta un defecto en su pista externa, para lo cual se simula la señal armónica a la frecuencia natural del conjunto de rodamiento con soporte.

La primordial señal desciende como resultado de disminución asociado al sistema. Se aplica la técnica a datos que se obtienen del Matlab. Los registros de vibraciones recopilados recaen a la señal de vibración de diferentes severidades de falla en la pista.

Se evalúa el estudio de metodologías de monitoreo de fallas en pista externa para rodamientos de bolas y cónicos, los cuales se han establecido como procesos para detección de fallas en rodamientos (técnicas espectrales). Los valores de BPFO y BPFI serán los calculados de acuerdo a la configuración geométrica del rodamiento estudiado. Muchas de las técnicas disponibles son especiales para la detección de estas fallas, pero tienen una capacidad limitada para identificar otros problemas en la maquinaria.

Los resultados habitados para el caso de la práctica espectral Fourier “FFT” para fallas en pista exterior e interior mostraron ser consistentes con el escenario de falla estudiado. Es decir, en apariencia de falla se activaron las continuidades BPFO y BPFI y sus concernientes armónicos. Las dimensiones de estas frecuencias de falla son proporcionales a la severidad de las fallas y se obtienen ganancias sustanciales en magnitud cuando la técnica es implementada.

El único caso extraño correspondió a la falla insensible para la pista externa, en la cual, aunque se discrimina perfectamente la BPFO y sus armónicos, el uso de la

técnica atenuó la dimensión de la frecuencia de falla, concluyéndose con ello que la técnica espectral FOURIER “FFT” tiene un mejor desempeño cuando las fallas son incipientes o Iniciales y moderadas. Así, esta es la restricción del método, a medida que el defecto pierda el carácter de impulsivo, este dejará de estimular las frecuencias originarias del rodamiento y con esto la detección del defecto.

## 6. RECOMENDACIONES

El software MATLAB, corroboró ser una herramienta muy útil en el procesamiento de señales permitiendo adquirir la señal sin necesidad de una tarjeta, utilizando el comando wavrecord además de poder aplicar la FFT (Fast Fourier Transform o Transformada Rápida de Fourier), a las señales de interés; así como también en la elaboración de una interfaz gráfica.

Los daños en los rodamientos implican asuntos que pueden evitarse con anticipación. Es por esto, que se debe considerar las siguientes causas principales y medidas preventivas para manejar adecuadamente los rodamientos. las causas principales de los daños en los rodamientos se caracterizan por la entrada de suciedad, materias extrañas, carga anormal debido al montaje inadecuado, interferencia demasiado grande o pequeña, diseño inapropiado de la sección de montaje del rodamiento o trabajo inadecuado y errores en la sección de los rodamientos (Morales, 2011). De igual forma, las medidas preventivas principales se relacionan con la selección correcta de rodamientos, ajuste y administración correcta de las operaciones.

Para que un rodamiento funcione de un modo fiable, es indispensable que este adecuadamente lubricado al objeto de evitar el contacto metálico directo entre los elementos rodantes, los caminos de rodadura y las jaulas, evitando también el desgaste y protegiendo las superficies del rodamiento contra la corrosión, por tanto, la elección del lubricante y el método de lubricación adecuados, así como un correcto mantenimiento, son cuestiones de gran importancia. (Quiroga, Trujillo, & Quintero, 2012)

Se recomienda a la institución divulgar la elaboración de proyectos investigativos que aborden otros aspectos relacionados con el pronóstico de fallas en rodamientos, ya que con esto se propone a mejorar todos los aspectos que le

abarcen. Asimismo, el análisis de fatiga en los materiales es un fenómeno indispensable debido a que se carece de una formulación definitiva y esto se hace evidente en la descripción probabilista que se hace de las fallas en los rodamientos.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amaya, M., Monica, M., & Veronica, D. S. (2012). *Deteccion De Fallas De Rodamientos De Un Motor Induccion Trifasico Tipo Jaula De Ardilla Empleando Analisis De Vibraciones*. Cali: Pontificia Universidad Javeriana Cali.

Baeza, J. A. (2010). *Analisis Vibro-Acustico De Cuatro Tipos De Fallas En Rodamientos*. Valdivia Chile : Universidad Austral De Chile Facultad De Ciencia De La Ingenieria Escuela De Ingenieria Civil Acustica.

Carmona, M. N. (2016). *Diagnosticos De Fallos En Rodamientos* . Sevilla: Dep. Ingenieria Mecanica y Fabricacion Escuela Tecnica Superior De Ingenieria Universidad De Sevilla.

Carreño, M., luz, A., Mejia, S., & Duarte, R. (2011). *Seminario de investigacion en metodos de diagnosticos de fallas de sistemas complejos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Fenandez, J. (2017). *Diagnostico automatico de fallas en rodamientos de maquinas rotativas a partir del analisis de señales de vibracion empleando modelos de markov por capaz*. Pereira: Universidad Tecnologica de Pereira.

Fernandez, A. (2017). *Componentes y frecuencias de fallo de un rodamiento*. España: Power-MI.

Fernando, J. (2017). *Pronostico De Fallas En Maquinas Rotativas Con base En Modelos Matematicos. Caso De Estudio: Rodamientos Radiales En Bolas*. Pereira: Universidad Tecnologica De Colombia .

Fontaine, A. C. (2013). *Estudios De Fallas En Los Rodamientos De La Maquina VIBRACOM*.

Gonzales, J. P. (2011). *Reconocimientos En Rodamiento*. Bogota: SKF Latin American Ltda.

Hernandez, H. I. (2011). *Analisis De Fallas En Rodamientos Por Medicion De Vibracion*. valdivia-Chile: Universidad Austral De Chile Facultad De Ciencias De La Ingenieria Escuela De Ingenieria Naval.

Hurtado, H. A., & Mendoza, Y. F. (2013). *Desarrollo de una metodología para la deteccion de fallas apartir del analisis de vibraciones en rodamientos usando características de tiempo y modelos ocultos de Markov (HMM)*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Hurtado, Z. Y., Tello, C. P., Pérez, M. V., & Sarduy, J. G. (2016). *Nueva metodología de diagnóstico de fallas en rodamientos en una máquina síncrona mediante el procesamiento de señales vibroacústicas empleando análisis de densidad de potencia*. Mexico : Ingeniería Investigación y Tecnología.

Jiménez, G., & Salamanca, E. (2014). *Diagnostico de fallas incipientes mediante la variacion angular incipiente*. Santiago de chile: Universidad de chile.

Kirner, J. (2011). *Transmisiones y Rodamientos*. España: S.D.

Ledezma, D. D. (2015). *Diseño De Un Sistema COn Dspic Para El Diagnostico De Fallas En Los Rodamientos Radiales En Una Maquina De Ensayos De Rotores De La Escuela De Ingenieria Mecanica -UNT*. Trujillo- Peru : Universidad Privada Antenor Orrego Falcultad De Ingenieria Escuela Profesional De Ingenieria Electronica .

Lopez, J. F. (2017). *Pronosticos de fallas En Maquinas Rotativas Con Base En Modelos Matematicos. Caso De Estudio: Rodamiento Radiales De Bolas*. Pereira: Universidad Tecnologica De Pereira.

Moncada Marino, C. M. (2002). *Estudio de las fallas comunes en rodamientos rígidos de una hilera de bolas mediante análisis de el dominio del tiempo y de la frecuencia*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.

Morales, O. C. (2011). *Análisis Tiempo-Frecuencia De Señales De Vibraciones Mecánicas Para La Detección De Fallos En Maquinas Rotativas*. Manizales : Universidad Nacional De Colombia Facultad De Ingeniería y Arquitectura .

Olarte, W., Botero, M., & Cañon, B. (2010). *Análisis de Vibraciones*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Osorio Santander, E. J. (2014). *Herramienta Virtual Para La Identificación De Fallas En Rodamientos*. Lima Peru: Universidad Nacional De Ingeniería Facultad De Ingeniería Mecánica.

Otero, F., Pardo, J., & Quiroga, J. (2011). *Clasificador Difuso de Señales de Vibración para Monitoreo de Rodamientos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Pankaj, G., & Pradhan, M. (2016). Análisis de detección de fallas en elementos rodante de los cojinetes. *Science Direct*, 2085-2094.

Punina, Y., Rodrigo, C., Guerrero, S., & Enoc, M. (2013). *Determinación De problemas En Equipo Industriales Mediante Análisis Vibracionales a Traves Del Software labVIEW*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica De Chimborazo.

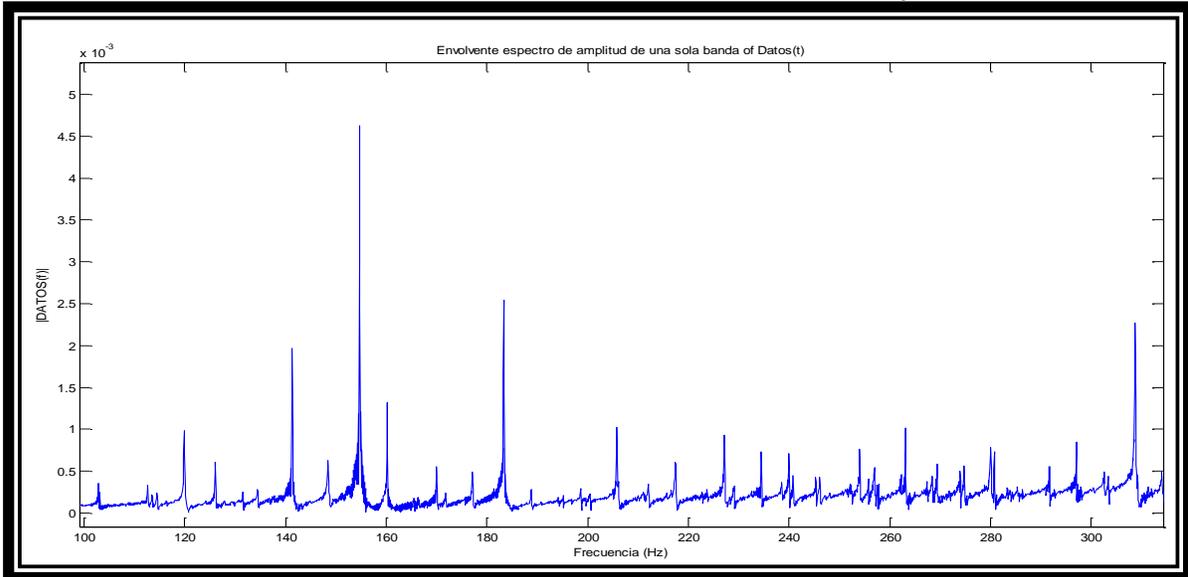
Quiroga, J., Trujillo, G., & Quintero, S. (2012). *Estudio de fallas incipientes en rodamientos usando la técnica de la envolvente y cepstrum*. Bucaramanga: Ingeniare Revista chilena de ingeniería.

Quiroga, J., Trujillo, G., & Quintero, S. (2012). *Estudios De Fallas Incipientes En Rodamientos Usando La Técnica De La Envolvente y Cepstrum*. Bucaramanga: Ingeniare. Revista Chilena De Ingeniería.

Sánchez, P. (2016). *Diseño de un banco de ensayo para detección de efectos en rodamientos*. Sevilla (España): Universidad de Sevilla.

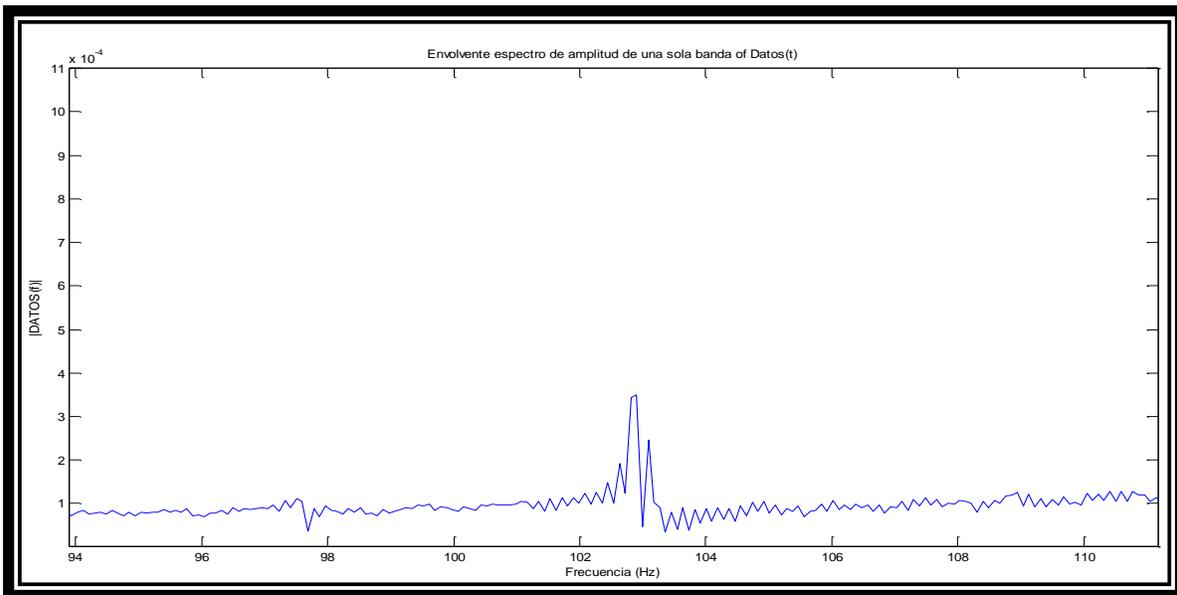
## 8. ANEXOS

### Anexo 1. Acercamiento de frecuencias cerca al valor de BPFO y sus armónicos



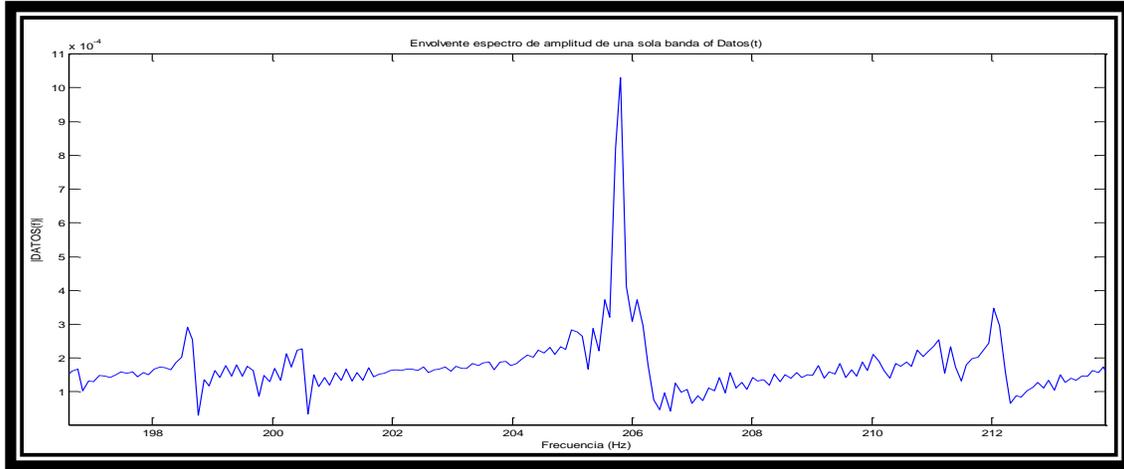
Fuente: Autor

### Anexo 2. 1 BPFO



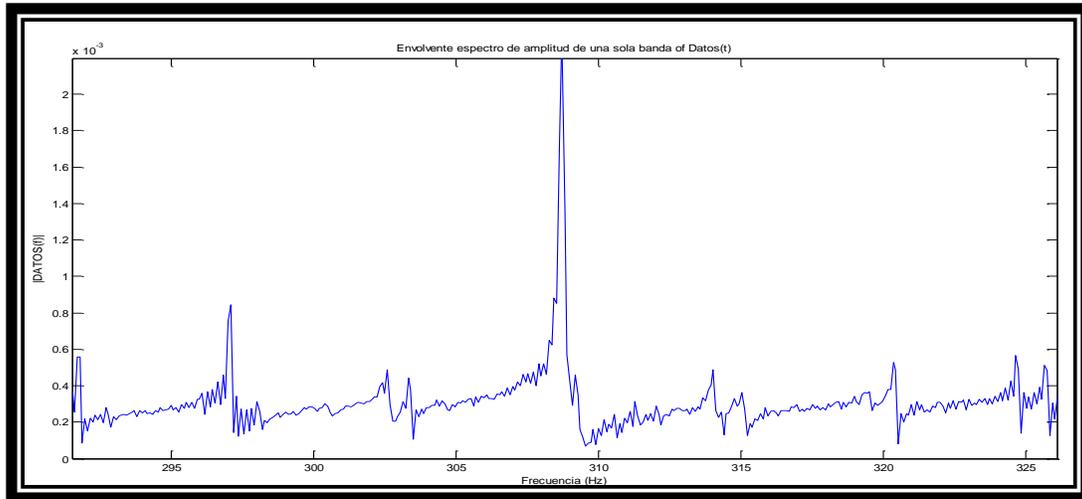
Fuente: Autor

### Anexo 3. 2 BPFO



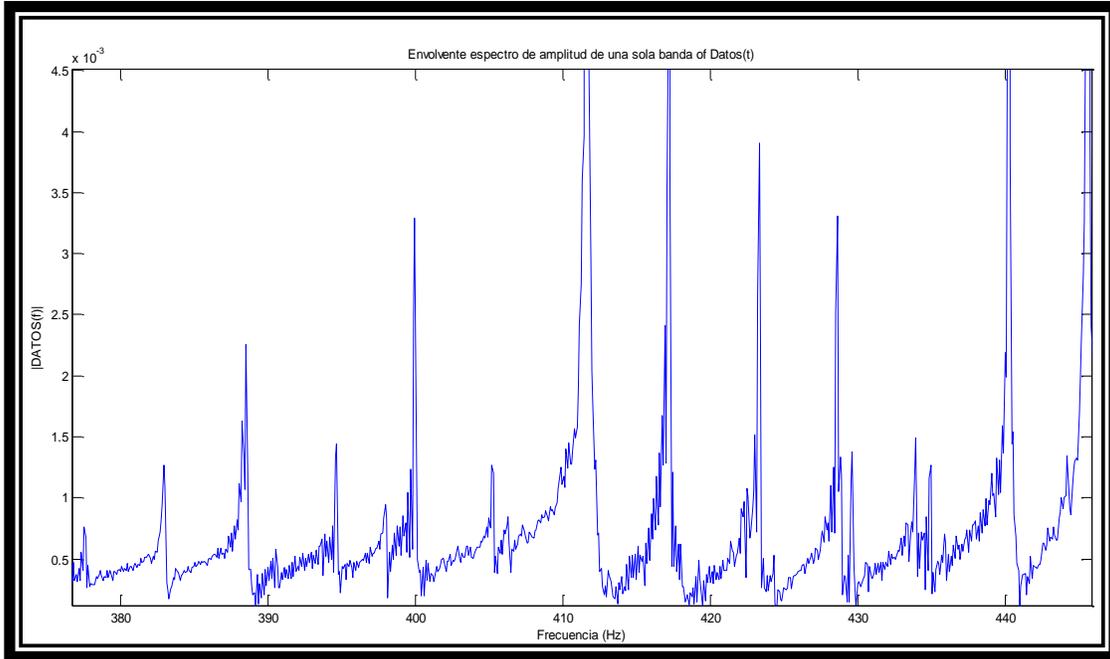
Fuente: Autor

### Anexo 4. 3 BPFO



Fuente: Autor

**Anexo 5. 4 BPFO**



Fuente: Autor

**Anexo 6. Código Matlab**

```

1  %Cálculo de la frecuencia BPFO
2  %
3  %
4  %
5  %
6  %
7  %
8  %
9  %
10 %
11 %
12 %
13 %
14 %
15 %
16 %
17 %
18 %
19 %
20 %
21 %
22 %
23 %
24 %
25 %
26 %
27 %
28 %
29 %
30 %
31 %
32 %
33 %
34 %
35 %
36 %
37 %
38 %
39 %
40 %
41 %
42 %
43 %
44 %
45 %
46 %
47 %
48 %
49 %
50 %
51 %
52 %
53 %
54 %
55 %
56 %
57 %
58 %
59 %
60 %
61 %
62 %
63 %
64 %
65 %
66 %
67 %
68 %
69 %
70 %
71 %
72 %
73 %
74 %
75 %
76 %
77 %
78 %
79 %
80 %
81 %
82 %
83 %
84 %
85 %
86 %
87 %
88 %
89 %
90 %
91 %
92 %
93 %
94 %
95 %
96 %
97 %
98 %
99 %
100 %
101 %
102 %
103 %
104 %
105 %
106 %
107 %
108 %
109 %
110 %
111 %
112 %
113 %
114 %
115 %
116 %
117 %
118 %
119 %
120 %
121 %
122 %
123 %
124 %
125 %
126 %
127 %
128 %
129 %
130 %
131 %
132 %
133 %
134 %
135 %
136 %
137 %
138 %
139 %
140 %
141 %
142 %
143 %
144 %
145 %
146 %
147 %
148 %
149 %
150 %
151 %
152 %
153 %
154 %
155 %
156 %
157 %
158 %
159 %
160 %
161 %
162 %
163 %
164 %
165 %
166 %
167 %
168 %
169 %
170 %
171 %
172 %
173 %
174 %
175 %
176 %
177 %
178 %
179 %
180 %
181 %
182 %
183 %
184 %
185 %
186 %
187 %
188 %
189 %
190 %
191 %
192 %
193 %
194 %
195 %
196 %
197 %
198 %
199 %
200 %
201 %
202 %
203 %
204 %
205 %
206 %
207 %
208 %
209 %
210 %
211 %
212 %
213 %
214 %
215 %
216 %
217 %
218 %
219 %
220 %
221 %
222 %
223 %
224 %
225 %
226 %
227 %
228 %
229 %
230 %
231 %
232 %
233 %
234 %
235 %
236 %
237 %
238 %
239 %
240 %
241 %
242 %
243 %
244 %
245 %
246 %
247 %
248 %
249 %
250 %
251 %
252 %
253 %
254 %
255 %
256 %
257 %
258 %
259 %
260 %
261 %
262 %
263 %
264 %
265 %
266 %
267 %
268 %
269 %
270 %
271 %
272 %
273 %
274 %
275 %
276 %
277 %
278 %
279 %
280 %
281 %
282 %
283 %
284 %
285 %
286 %
287 %
288 %
289 %
290 %
291 %
292 %
293 %
294 %
295 %
296 %
297 %
298 %
299 %
300 %
301 %
302 %
303 %
304 %
305 %
306 %
307 %
308 %
309 %
310 %
311 %
312 %
313 %
314 %
315 %
316 %
317 %
318 %
319 %
320 %
321 %
322 %
323 %
324 %
325 %
326 %
327 %
328 %
329 %
330 %
331 %
332 %
333 %
334 %
335 %
336 %
337 %
338 %
339 %
340 %
341 %
342 %
343 %
344 %
345 %
346 %
347 %
348 %
349 %
350 %
351 %
352 %
353 %
354 %
355 %
356 %
357 %
358 %
359 %
360 %
361 %
362 %
363 %
364 %
365 %
366 %
367 %
368 %
369 %
370 %
371 %
372 %
373 %
374 %
375 %
376 %
377 %
378 %
379 %
380 %
381 %
382 %
383 %
384 %
385 %
386 %
387 %
388 %
389 %
390 %
391 %
392 %
393 %
394 %
395 %
396 %
397 %
398 %
399 %
400 %
401 %
402 %
403 %
404 %
405 %
406 %
407 %
408 %
409 %
410 %
411 %
412 %
413 %
414 %
415 %
416 %
417 %
418 %
419 %
420 %
421 %
422 %
423 %
424 %
425 %
426 %
427 %
428 %
429 %
430 %
431 %
432 %
433 %
434 %
435 %
436 %
437 %
438 %
439 %
440 %
441 %
442 %
443 %
444 %
445 %
446 %
447 %
448 %
449 %
450 %
451 %
452 %
453 %
454 %
455 %
456 %
457 %
458 %
459 %
460 %
461 %
462 %
463 %
464 %
465 %
466 %
467 %
468 %
469 %
470 %
471 %
472 %
473 %
474 %
475 %
476 %
477 %
478 %
479 %
480 %
481 %
482 %
483 %
484 %
485 %
486 %
487 %
488 %
489 %
490 %
491 %
492 %
493 %
494 %
495 %
496 %
497 %
498 %
499 %
500 %
501 %
502 %
503 %
504 %
505 %
506 %
507 %
508 %
509 %
510 %
511 %
512 %
513 %
514 %
515 %
516 %
517 %
518 %
519 %
520 %
521 %
522 %
523 %
524 %
525 %
526 %
527 %
528 %
529 %
530 %
531 %
532 %
533 %
534 %
535 %
536 %
537 %
538 %
539 %
540 %
541 %
542 %
543 %
544 %
545 %
546 %
547 %
548 %
549 %
550 %
551 %
552 %
553 %
554 %
555 %
556 %
557 %
558 %
559 %
560 %
561 %
562 %
563 %
564 %
565 %
566 %
567 %
568 %
569 %
570 %
571 %
572 %
573 %
574 %
575 %
576 %
577 %
578 %
579 %
580 %
581 %
582 %
583 %
584 %
585 %
586 %
587 %
588 %
589 %
590 %
591 %
592 %
593 %
594 %
595 %
596 %
597 %
598 %
599 %
600 %
601 %
602 %
603 %
604 %
605 %
606 %
607 %
608 %
609 %
610 %
611 %
612 %
613 %
614 %
615 %
616 %
617 %
618 %
619 %
620 %
621 %
622 %
623 %
624 %
625 %
626 %
627 %
628 %
629 %
630 %
631 %
632 %
633 %
634 %
635 %
636 %
637 %
638 %
639 %
640 %
641 %
642 %
643 %
644 %
645 %
646 %
647 %
648 %
649 %
650 %
651 %
652 %
653 %
654 %
655 %
656 %
657 %
658 %
659 %
660 %
661 %
662 %
663 %
664 %
665 %
666 %
667 %
668 %
669 %
670 %
671 %
672 %
673 %
674 %
675 %
676 %
677 %
678 %
679 %
680 %
681 %
682 %
683 %
684 %
685 %
686 %
687 %
688 %
689 %
690 %
691 %
692 %
693 %
694 %
695 %
696 %
697 %
698 %
699 %
700 %
701 %
702 %
703 %
704 %
705 %
706 %
707 %
708 %
709 %
710 %
711 %
712 %
713 %
714 %
715 %
716 %
717 %
718 %
719 %
720 %
721 %
722 %
723 %
724 %
725 %
726 %
727 %
728 %
729 %
730 %
731 %
732 %
733 %
734 %
735 %
736 %
737 %
738 %
739 %
740 %
741 %
742 %
743 %
744 %
745 %
746 %
747 %
748 %
749 %
750 %
751 %
752 %
753 %
754 %
755 %
756 %
757 %
758 %
759 %
760 %
761 %
762 %
763 %
764 %
765 %
766 %
767 %
768 %
769 %
770 %
771 %
772 %
773 %
774 %
775 %
776 %
777 %
778 %
779 %
780 %
781 %
782 %
783 %
784 %
785 %
786 %
787 %
788 %
789 %
790 %
791 %
792 %
793 %
794 %
795 %
796 %
797 %
798 %
799 %
800 %
801 %
802 %
803 %
804 %
805 %
806 %
807 %
808 %
809 %
810 %
811 %
812 %
813 %
814 %
815 %
816 %
817 %
818 %
819 %
820 %
821 %
822 %
823 %
824 %
825 %
826 %
827 %
828 %
829 %
830 %
831 %
832 %
833 %
834 %
835 %
836 %
837 %
838 %
839 %
840 %
841 %
842 %
843 %
844 %
845 %
846 %
847 %
848 %
849 %
850 %
851 %
852 %
853 %
854 %
855 %
856 %
857 %
858 %
859 %
860 %
861 %
862 %
863 %
864 %
865 %
866 %
867 %
868 %
869 %
870 %
871 %
872 %
873 %
874 %
875 %
876 %
877 %
878 %
879 %
880 %
881 %
882 %
883 %
884 %
885 %
886 %
887 %
888 %
889 %
890 %
891 %
892 %
893 %
894 %
895 %
896 %
897 %
898 %
899 %
900 %
901 %
902 %
903 %
904 %
905 %
906 %
907 %
908 %
909 %
910 %
911 %
912 %
913 %
914 %
915 %
916 %
917 %
918 %
919 %
920 %
921 %
922 %
923 %
924 %
925 %
926 %
927 %
928 %
929 %
930 %
931 %
932 %
933 %
934 %
935 %
936 %
937 %
938 %
939 %
940 %
941 %
942 %
943 %
944 %
945 %
946 %
947 %
948 %
949 %
950 %
951 %
952 %
953 %
954 %
955 %
956 %
957 %
958 %
959 %
960 %
961 %
962 %
963 %
964 %
965 %
966 %
967 %
968 %
969 %
970 %
971 %
972 %
973 %
974 %
975 %
976 %
977 %
978 %
979 %
980 %
981 %
982 %
983 %
984 %
985 %
986 %
987 %
988 %
989 %
990 %
991 %
992 %
993 %
994 %
995 %
996 %
997 %
998 %
999 %
1000 %

```

Fuente: Autor

```

clc, clear all
%Calculo de la frecuencia BPFO
Nb = 9;           % Number of rolling element bearings
Bd = 0.00794004; % Diameter of rolling elements
Pd = 0.0390398;  % Pitch diameter of bearing
theta = 0; % Contact angle in degrees
RPM = 1719;
BPFO = (RPM/60)*(Nb/2)*(1 - (Bd*cos(theta)/Pd))
BPFO_2 = 2*BPFO
BPFO_3 = 3*BPFO
BPFO_4 = 4*BPFO

%*****
%*****
load('241.mat'); % , y se creo un vector llamado Datos que va a contener
los
%datos descargados de la pagina
http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/48k-drive-end-bearing-
fault-data

Datos = X241_DE_time;

%Ploteo de los datos descargados
Fs = 48000; %Frecuencia de muestreo, dato dado por la pagina
dt = 1/Fs; %Periodo de muestreo
L = length(Datos); %Longitud del vector Datos
tiempo = (0:L-1)*dt; %Vector tiempo
subplot(3,1,1), plot(tiempo,Datos) %Vector datos

%*****
%*****

%Aplicacion de la transformada rapida de Fourier "FFT"
NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
Y = fft(Datos,NFFT)/L;
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

%Plot espectro de amplitud de una sola banda
subplot(3,1,2), plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
title('espectro de amplitud de una sola banda of Datos(t)')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('|DATOS(f)|')
%*****
%*****

%Extraccion de la envolvente
Yenv = hilbert(abs(Y));
subplot(3,1,3), plot(f,abs(Yenv(1:NFFT/2+1))),
title('Envolvente espectro de amplitud de una sola banda of Datos(t)')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('|DATOS(f)|')

```