



### **TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO**

Análisis de fallas asociadas al efecto en la pista interna de un rodamiento (BPFI) usando técnicas espectrales

### **AUTORES**

Jesús tomas Orozco Moreno 1096238438  
Juan Fernando Ayala Gonzales 13568759  
Pedro Julio Merchán Sánchez 13566723

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIAS  
TECNOLOGIA EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTRMECANIO  
BARRANCABERMEJA  
21/03/2019



**TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO**

Análisis de fallas asociadas al efecto en la pista interna de un rodamiento (BPFI) usando técnicas espectrales

**AUTORES**

Jesús tomas Orozco Moreno 1096238438  
Juan Fernando Ayala Gonzales 13568759  
Pedro Julio Merchán Sánchez 13566723

**Trabajo de Grado para optar al título de  
TECNOLOGO EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTRMECANIO**

**DIRECTOR**

**Luis Omar sarmiento Alvares**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN – DIANOIA**

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER**  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIAS  
TECNOLOGIA EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTRMECANIO  
BARRANCABERMEJA  
21/03/2019

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del Jurado

**DEDICATORIA**

Agradezco primeramente a Dios por darnos la oportunidad y fortaleza suficiente para superar cada obstáculo surgido en el desarrollo de este proceso de aprendizaje, a cada uno de mis familiares, en especial a mis padres y hermanos por el apoyo y constante motivación brindada a lo largo del proceso, y a todas aquellas personas que con sus aportes hicieron posible la culminación de esta etapa tan importante en mi vida

**JESÚS TOMAS OROZCO MORENO**

Ante la culminación de este proyecto investigativo es para mí un gran honor dedicar este logro a Dios, quien fue el principal proveedor de sabiduría, paciencia y conocimientos necesarios para cumplir cada uno de los objetivos propuestos. Asimismo, agradezco a cada uno de mis familiares, primos, hermanos y demás conocidos quienes constantemente estuvieron al tanto del proceso, con la finalidad de brindar su apoyo y motivación para no desfallecer ante el surgimiento de cualquier obstáculo

**JUAN FERNANDO AYALA GONZALES**

Dedico el desarrollo de esta investigación a Dios por su inmensa sabiduría, por las bendiciones y por darme la fuerza suficiente, aun en los momentos más difíciles, a mis docentes por su paciencia, constancia y empeño en el momento en que necesite de sus conocimientos, a mis padres agradecer por la confianza, motivación y esfuerzo de salir adelante, a mis amigos, compañeros y conocidos que han estado cada momento de mi vida brindando de su apoyo y sus consejos

**PEDRO JULIO MERCHÁN SÁNCHEZ**

## AGRADECIMIENTOS

Es de gran honor para nosotros, agradecer inicialmente a Dios por acompañarnos en todo momento, por darnos las fuerzas suficientes para culminar cada proceso surgido. Asimismo, por sus infinitas bendiciones y ánimos de continuar nuestro crecimiento personal y profesional.

Agradecemos a nuestras familias, en especial a nuestros padres quienes fueron la fuente principal de motivación y apoyo constante, indispensables para la culminación con éxitos el largo camino que comprende los estudios realizados para alcanzar esta meta. Con su ayuda y consejos, nos permitieron seguir adelante a pesar de los retos que se presentaron en el proceso de nuestro estudio universitario.

Finalmente, agradecemos a las Unidades Tecnológicas de Santander regional Barrancabermeja, por brindarnos la oportunidad y herramientas necesarias para formarnos como profesionales y enfrentar las exigencias del campo laboral. Por último, al ingeniero Luis Omar Sarmiento por sus aportes, acompañamiento constante y sabiduría para aconsejarnos en la elaboración de cada una de las actividades requeridas en el proyecto, al guiarnos en el proceso investigativo.

**TABLA DE CONTENIDO**

<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>13</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>14</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	16
1.3. OBJETIVOS .....	17
1.3.1. OBJETIVO GENERAL .....	17
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES .....	18
<b>2. MARCOS REFERENCIALES.....</b>	<b>21</b>
<b>3. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO.....</b>	<b>32</b>
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>42</b>
<b>6. RECOMENDACIONES .....</b>	<b>43</b>
<b>7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>44</b>
<b>8. ANEXOS.....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rodamiento de una hilera de bolas .....	24
Figura 2: Señal Discreta .....	25
Figura 3: Acelerómetro .....	27
Figura 4: diámetros de rodamientos .....	33
Figura 5: Medidas estándar de rodamientos .....	34
Figura 6: información del cojinete .....	34
Figura 7: Espectros de vibración falla baja y media .....	35
Figura 8: Espectro de vibración falla media y alta .....	36
Figura 9: señal envolvente de falla baja .....	37
Figura 10: señal envolvente de falla media .....	37
Figura 11: señal envolvente de falla Alta .....	38
Figura 12: Espectros de vibración falla baja y media .....	39
Figura 13: Espectros de vibración falla media y alta .....	39
Figura 14: señal envolvente de falla baja .....	40
Figura 15: señal envolvente de falla media .....	40
Figura 16: señal envolvente de falla alta. ....	41

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Fase 1..... **¡Error! Marcador no definido.**

## RESUMEN EJECUTIVO

En el presente trabajo se tiene como principal objetivo mostrar la aplicación de dos técnicas de análisis espectral, y de esa manera diagnosticar fallas insipientes en los rodamientos de una maquina rotativa, exactamente en la banda interna de estos elementos.

Para el desarrollo de esta investigación se utilizó el método de la transformada de Fourier y la técnica cepstrum, las cuales se consideran como las técnicas de procesamiento de señal más comúnmente utilizadas por científicos e ingenieros dedicados a analizar fallas de máquinas rotativas.

Se establecieron señales de prueba con diferentes niveles de falla, simulando por medio del software Octave, vibraciones y defectos en la banda interna, para así poder identificar el espectro o la señal que emiten los rodamientos cuando presentan errores. Posteriormente se aplicarán las dos técnicas de análisis espectral, para verificar, obtener, y comparar los resultados dados por cada uno de estos procedimientos, y así de esta forma poder identificar cuál de las dos técnicas es más confiable a la hora de dar un dictamen específico y confiable del estado de los rodamientos.

Una de las metodologías propuesta en este proyecto de investigación es una metodología descriptiva, porque detalla poco a poco el problema a resolver, en el momento de desarrollar el proyecto propuesto sobre el estudio de fallas en máquinas rotativas para poder encontrar una solución por medio de los métodos propuestos previamente.

Se llevara a cabo una serie de pasos como una revisión bibliográfica, una recolección de datos, el desarrollo de un estudio de vibraciones en máquinas rotativas, y unos cuantos pasos más que llevaran a cabo los objetivos. Esto con el fin de obtener un proyecto de análisis para el mejoramiento del funcionamiento de las máquinas rotativas, para prevenir

futuros fallos en la maquinaria alargando su vida útil, consiguiendo datos precisos y específicos de las máquinas.

**PALABRAS CLAVE.** . Análisis de fallas, Maquinaria rotativa, transformada rápida de Fourier, técnica cepstrum.

## INTRODUCCIÓN

Actualmente el sector industrial ha mejorado su capacidad competitiva y productiva, teniendo como prioridad el óptimo estado de su maquinaria, permitiéndoles tener excelentes producciones y evitándoles tener paradas de producción innecesarias que ocasionan pérdidas financieras. Para obtener un alto nivel de producción las empresas se han enfocado en mantener procesos activos, por medio de mantenimientos preventivos, los cuales reducen gastos y garantizan una óptima producción. Dentro del mantenimiento preventivo se ha venido implementando el estudio de fallas incipientes en máquinas rotativas por medio de técnicas como la transformada rápida de Fourier y cepstrum, para de esa manera diagnosticar la integridad de las máquinas, permitiendo ejecutar una intervención correctora a tiempo, ya que dicho análisis permite saber el estado actual de la máquina, anticipándose a futuros fallos, extendiendo la vida útil de los mismos.

En el proyecto se realiza un documento el cual contiene los conceptos teóricos requeridos en el análisis de fallas asociado al defecto en pistas de rodamientos, posteriormente se desarrolla un ejemplo de análisis espectral para determinar la frecuencia que corresponde a los valores BPF1 y se documenta la información necesaria con la generación de energía eléctrica por medio de una turbina de vórtice gravitacional, todo esto de vital importancia para la Uts sede Barrancabermeja ya que pretende implementar todo esto en un proyecto que realiza actualmente.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Entre los métodos utilizados para identificar fallas en los rodamientos, se encuentran el análisis de vibración, que es la información transmitida por vibraciones en el dominio de la frecuencia que nos permite identificar situaciones defectuosas en el funcionamiento del equipo.

El análisis espectral es una señal digital que es utilizada para realizar procesamiento de datos con el fin de encontrar o determinar fallas en los rodamientos internos de una maquinaria rotativa aplicada a la industria. A nivel mundial las fallas en los rodamientos de las maquinas rotativas son muy constantes ya sea por un inadecuado mantenimiento o por desgaste de la pieza que engranan en el rodamiento.

En países como Brasil, Estados Unidos, que en cuanto a la instauración de procedimientos de mantenimiento presentan problemáticas por falta de un método de mantenimiento eficaz que pueda indicar errores en los rodamientos ya sea por ruido, vibración, o desgaste.

En Colombia las empresas optan por el uso de tomas de señales de vibración en máquinas rotativas, debido a que existe maquinaria que llevan mucho tiempo operando sin un control adecuado, específicamente en los rodamientos.

En Barrancabermeja en la industria del petróleo hay empresas que dentro de sus programas de mantenimiento están implementando la toma de señales vibratorias, para analizar el estado de los rodamientos en los equipos rotativos a los cuales se les hará un adecuado análisis de mantenimiento.

Esta investigación está enfocada para el estudio de un proyecto que se realiza actualmente en la U.T.S (unidades tecnológicas de Santander) sede en Barrancabermeja, sobre la generación de energía eléctrica por medio de una turbina vórtice gravitacional, que utiliza rodamientos para su funcionamiento; por tal motivo es necesario tener un control sobre cada uno de los rodamientos que están inmersos en esta aplicación o este sistema de generación de energía eléctrica.

Debido esta problemática que se viene presentando surge la siguiente interrogación.

¿Cómo podemos analizar las fallas insipientes en los rodamientos exactamente en su banda interna, estando incorporados estos elementos en una máquina, utilizando técnicas espectrales?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación se enfoca en analizar por medio de captación de señales analógicas, las fallas insipientes que presentan los rodamientos en su banda interna, esto debido al alto nivel de fallas que vienen presentado los rodamientos en las maquinas rotativas.

De esta manera el presente trabajo permitirá a las empresas, fábricas y al grupo de investigación de las UTS, el cual lleva a cabo el proyecto de generación de energía eléctrica por medio de una turbina de vórtice gravitacional, tener un sistema de detección de fallas en los rodamientos que están implícitos en su mecanismo, por causas principales tales como la vibración, el ruido, falta de lubricación etc. y así mismo garantizar el funcionamiento y la vida útil de la máquina.

Por esta razón es necesario implementar un sistema o proceso que permitan al personal encargado del mantenimiento de los equipos, poder tener un diagnostico en tiempo real del elemento.

Por tal motivo en este trabajo de investigación, tendrá el objetivo de simular por medio del software octave una serie de fallas y después se analizara la simulación, por medio de las técnicas espectrales FFT y CEPSTRUM.

En la base de datos “48k Drive End Bearing Faul Data”, se obtendrá el tipo y el nivel de la intensidad de la falla, y así de esta manera comparar los espectros de las dos técnicas, aplicados en rodamientos con fallas y sin fallas.

### 1.3. OBJETIVOS

La investigación que se realizará en el presente trabajo, constara de simular y comparar una serie de fallas presentadas en un rodamiento asociadas al efecto presentado en su pista interna. Por medio de la base de datos “48k drive End Bearing Fault Data” se obtendrá la severidad de la falla en el elemento rodante.

Para el desarrollo de este trabajo se emplearan dos técnicas de análisis espectral, la FFT (transformada directa de Fourier) y la técnica de análisis espectral cepstrum, por medio del software octave se realizara la simulación con un nivel de falla determinada, después de obtener los dos espectros relacionados con cada una de las técnicas de estudio de análisis de vibraciones, se hará una comparación de la efectividad de los dos métodos respecto a la capacidad de identificar cada una de las fallas.

De esta manera el presente trabajo permitirá a las empresas, fábricas y al grupo de investigación de las UTS, el cual lleva a cabo el proyecto de generación de energía eléctrica por medio de una turbina de vórtice gravitacional, tener un sistema de detección de fallas en los rodamientos que están implícitos en su mecanismo, por causas principales tales como la vibración, el ruido, falta de lubricación etc. y así mismo garantizar el funcionamiento y la vida útil de la máquina.

#### 1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar fallas asociadas al defecto en la pista interna de un rodamiento (BPFI), por medio de técnicas espectrales, en la base de datos “48k drive End Bearing Fault Data”.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Analizar la base de datos “48k Drive End Bearing Fault Data” por medio de técnicas espectrales con el fin de caracterizar el tipo y la intensidad de la falla, comparando el espectro de rodamientos con falla con respecto al espectro del rodamiento sin falla.
2. Desarrollar un ejercicio de análisis espectral a través del método de la transformada rápida de Fourier y Cepstrum para determinar la frecuencia que corresponde a los valores BPF1.
3. Determinar cuál es técnica que permite dar un diagnóstico más preciso en el análisis de fallas BPF1 comparando los resultados obtenidos en el análisis espectral.

### **1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES**

(Hernandez Montero , 2010) Presentaron un artículo científico sobre la detección de fallas en los cojinetes de rodamientos y engranajes, donde implementaron la técnica basada en la transformada de Hilbert. En este trabajo implementaron un modelo matemático donde justificaron la posibilidad de detectar fallas en estos elementos, y se pudo comprobar que esta técnica arroja una mayor efectividad a la hora de hacer un análisis espectral.

De acuerdo al artículo presentado por (Quiroga, 2012) . Realizaron un estudio comparativo donde utilizaron tres técnicas de monitoreo de fallas que fueron (la FFT, a técnica de la envolvente y cepstrum) que las aplicaron en la pista interna y externa en un rodamiento de bolas, donde concluyeron que la técnica de la envolvente y cepstrum pueden ser implementadas satisfactoriamente, cuando se

requiere una detección temprana y poder diagnosticar el grado de severidad en que se encuentra la falla, también concluyeron que la FFT (transformada de Fourier) solo detecta fallas severas. Por otro lado encontraron que la técnica envolvente al momento de analizar los gráficos de fallas severas esta técnica reduce el resultado del monitoreo, minimizando la frecuencia en la banda externa de los rodamientos, a diferencia de la técnica cepstrum que arrojo ser más efectiva al momento de verificar la falla con alto nivel de severidad.

(Martinez, 2014) Realizaron una investigación donde aplicaron un método muy poco utilizado al momento de hacer un estudio sobre el análisis espectral. Para el desarrollo de la investigación tomaren señales en tiempo real por medio de un banco de ensayo y también simularon señales. A través de la técnica cepstrum analizaron los resultados arrojados por estos dos métodos de obtención de señales, concluyendo así que esta técnica es aplicable a rodamientos si ninguna restricción. Por otra parte también concluyeron que la técnica cepstrum es una herramienta de gran ayuda al momento de estudiar fallas incipientes en los rodamientos, ya que este proceso permite observar fallas con nivel de severidad bajo y así permitiendo al personal encargado del mantenimiento o estudio, tener un dictamen exacto del estado del elemento.

(Gonzalez , 2016) Realizaron una investigación donde compararon la técnica de ultrasonido pasivo y el análisis de vibraciones en la detección de fallas incipientes en rodamientos, para este proceso se construyó un módulo didáctico. Para la toma de datos de las vibraciones utilizaron un equipo de vibración (vibrachek 200) para poder captar el espectro generado por el nivel de falla. Para el análisis utilizaron el espectro envolvente de aceleración el cual les permitió filtrar señales de vibración de alta frecuencia, tras este análisis lograron concluir que el método de análisis por ultrasonido pasivo es más efectivo que el análisis de vibraciones en la

detección de falla incipientes en rodamientos, debido a que permite visualizar las fallas en los componente del elemento rodante en altas frecuencias.

Con respecto al estudio realizado por (Martinez Amaya, 2017) Donde implementaron un acelerómetro y por medio del software labview diseñaron e implementaron la adquisición de datos gracias a su manejo y atreves de octave simularon y analizaron los datos por medios de las técnicas espectrales transformada de Fourier y el análisis de hilbert. Según los resultados obtenidos para la detección de fallas insipientes en rodamientos la técnica de hilbert supera en un gran porcentaje a la transformada de Fourier, debido a que cuando analizaron los gráficos de los armónicos de la frecuencia de pista interior hilbert detecta fallas mínimas en los rodamientos mientras que la transformada de Fourier carece de sensibilidad para detectar este tipo de fallas. Por otro lado lograron identificar que cuando la falla crece la excitación que se produce pierde su carácter impulsivo, revelando como si el elemento analizado hubiese presentado una mejoría, tanto Fourier como hilbert presentan esta misma característica.

## 2. MARCOS REFERENCIALES

### 2.1 MARCO TEORICO

Los rodamientos, son elementos rotativos que al momento del desgaste crea una gran variedad de datos espectrales, relacionados con los problemas de una máquina.

La banda interna de los rodamientos también conocida como (BPFI) es el centro de la investigación.

**BPFI** en sus siglas en ingles (Ball pass frequency of the inner race)

Esta sigla es utilizada normalmente para darle la denotación o el nombre a la pista interna de un rodamiento

Es la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista interna.

$$BPFI = F_s \frac{N_b}{2} \left( 1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \phi \right) \quad (1)$$

Donde:

$F_s$  = frecuencia de giro del rodamiento

$P_d$  = Diámetro del rodamiento

$B_d$  = Diámetro de las bolas

$N_b$  = Numero de bolas

$\phi$  = Angulo de contacto.

El procesamiento de señales analógicas es el método utilizado por las empresas y el personal encargado del mantenimiento, para poder identificar las fallas que pueden presentar los rodamientos,

Los sistemas de procesamiento de señales analógicas más comúnmente utilizados a la hora de hacer un seguimiento a los rodamientos son:

1. La transformada de Fourier rápida (FFT)
2. CEPSTRUM.

### La transformada de Fourier rápida (FFT)

La transformada de Fourier rápida es una señal analógica  $x(t)$  se expresa como:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)| dt < \infty \quad (2)$$

Esta técnica está basada en la aplicación de los conceptos de la transformada de Fourier y es implementada bajo la forma de algoritmos FFT. Generalmente el análisis espectral consiste en comparar espectros reales con espectros que caracterizan el sistema sin defecto. Pero según varios investigadores (Randall , 2000), afirman que se vuelve difícil detectar fallas incipientes a través del espectro puro, pues las fallas en sistemas mecánicos generalmente ocurren en bajas frecuencias, y por eso pueden ser fácilmente contaminadas por frecuencias de señales de otras máquinas y de ruidos de baja frecuencia que casi siempre estarán presentes en la medición.

La transformada discreta de Fourier es una de las técnicas más populares para convertir señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. La DFT (Transformada discreta de Fourier) puede ser representada mediante.

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn} \quad (3)$$

En donde  $x(k)$  son las muestras de la señal en el dominio del tiempo,  $X(n)$  son las muestras obtenidas en el dominio frecuencia,  $N$  es el número de puntos y  $WN$  son los factores de giro (Pedraza Bonilla, 2000).

## Cepstrum

Es definido como la transformada inversa de Fourier del logaritmo del módulo del espectro de la señal. *Para* (Randall , 2000), el cepstrum es una técnica útil para separar bandas laterales mixtas, pero que tiende a suprimir informaciones sobre el patrón del espectro, que pueden ser importantes en el diagnóstico. También sugiere que el cepstrum sea usado para la interpretación adicional del espectro, en vez de suprimirlo.

(Martinez, 2014) hacen uso de esta técnica como herramienta para el monitoreo y control de calidad de cambios automotores, concluyendo que el análisis cepstral es confiable en la detección de defectos en cambios, principalmente porque esta técnica les permitió la visualización de picos en el dominio de la frecuencia, relacionados con las velocidades de rotación de los ejes de los diferentes cambios defectuosos.

El cepstrum de una señal analógica  $x(n)$  es:

$$cp[n] = \frac{1}{2\pi} \left| \int_{-\pi}^{\pi} \log|x(e^{jw})| |e^{jwn} dw| \right|^2 \quad (4)$$

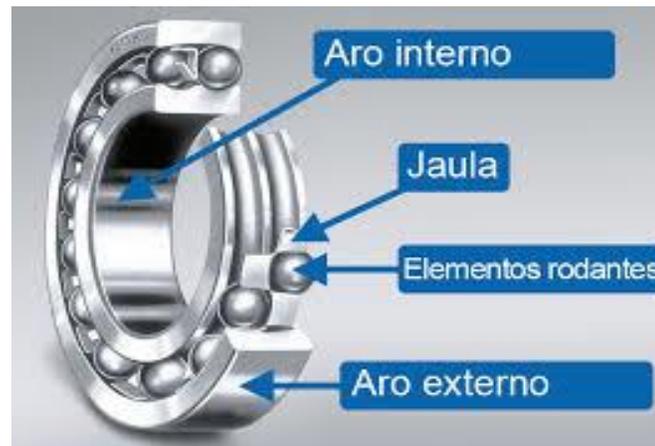
El procesamiento de señales usando cepstrum es una técnica no lineal con una amplia variedad de aplicaciones en áreas tales como; el procesamiento de voz, imágenes y monitoreo de equipos. El análisis empleando cepstrum es usado para determinar periodicidades en el análisis espectral de una señal y para separar el efecto de funciones de transferencia variables en el tiempo en una convolución de señales.

## 2.2 MARCO CONCEPTUAL

### Rodamientos

Son elementos mecánicos, que son muy comunes en las maquinas rotativas los cuales su principal objetivo de los rodamientos es reducir la fuerza entre el eje móvil y su apoyo para permitir que el eje gire con menor esfuerzo y de esta manera disminuir el desgaste de los materiales por fricción entre los elementos.

Figura 1: Rodamiento de una hilera de bolas



Fuente: [www.partesdel.com/rodamiento.html](http://www.partesdel.com/rodamiento.html)

En la figura 1.1 se puede ver los componentes del rodamiento:

- Aro externo
- Elementos rodantes (bolas)
- Jaula
- Aro interno

Los rodamientos son partes elementales en las maquinas rotativas y motores, los cuales deben estar en buen estado para evitar ruidos excesivos y vibraciones. Para conservar estos elementos se debe tener muy en cuenta las condiciones en las cuales operan.

## Señales

Una señal como se define en el libro (.J, 2007) Es cualquier magnitud física que varía con el tiempo, el espacio o cualquier otra variable o variables independientes. Matemáticamente, se describe una señal como una función de una o más variables independientes.

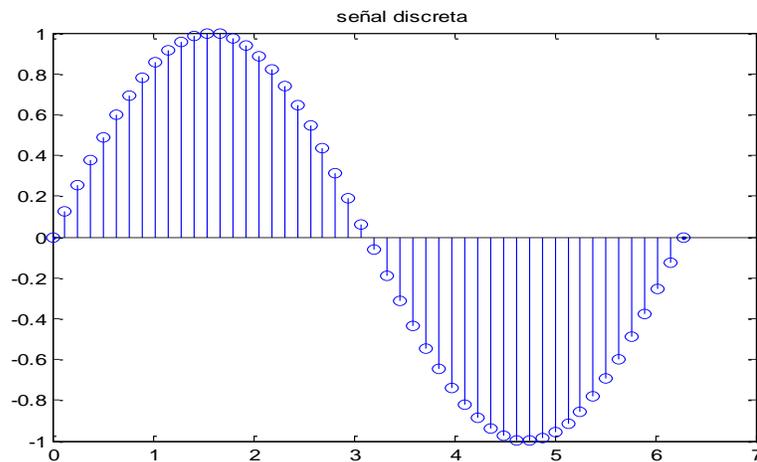
Las señales se pueden dividir en dos grandes ramas las señales continuas o señales analógicas y las señales discretas en el dominio del tiempo.

## Señales continuas

Las señales continuas en el tiempo que son las mismas señales analógicas, se definen para cada instante en el tiempo y sus valores se dan en un intervalo continuo, donde puede ir desde menos infinito hasta más infinito  $(-\infty, +\infty)$

## Señales discretas

Figura 2: Señal Discreta



Fuente: [https://es.wikiversity.org/wiki/Circuitos\\_Digitales](https://es.wikiversity.org/wiki/Circuitos_Digitales)

Las señales discretas en el tiempo solo se muestran en determinados instantes de tiempo. Ciertos instantes de duración no propiamente son paralelos, aunque a la hora

del procesamiento de las señales esto intervalos están igualmente espaciados para permitir una mejor interpretación de la señal obtenida.

### **Procesamiento de señales**

La finalidad del procesamiento de señales analógicas en tiempo real, es obtener información detallada de un mecanismo o elementos a estudiar, principalmente este método de monitoreo es usado en las maquinas rotativas, el cual permite estudiar las vibraciones de un artefacto al cual se le va a ser el seguimiento. El procesamiento de señales analógicas puede ser analizado en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

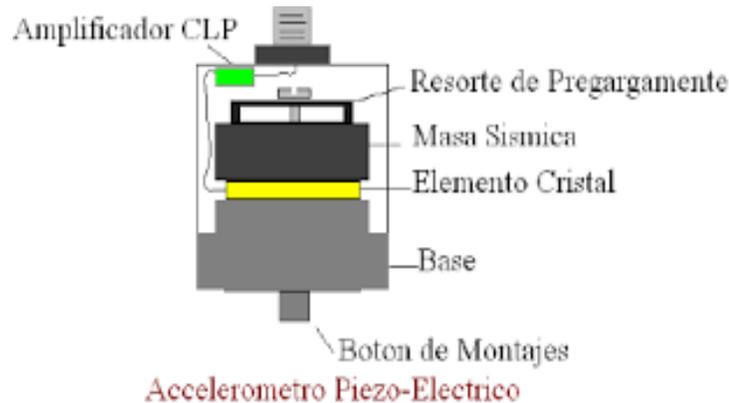
### **Vibración**

(Permia Marquez, 2004) Definen vibración en su artículo, cuando un cuerpo o elemento sufre alteraciones, de tal forma que sus puntos giran sincrónicamente en torno a sus emplazamientos de equilibrio, sin que el campo cambie de lugar. También se puede decir que es un intercambio de energía cinética en cuerpos con rigidez y masa finitas, el cual aparece de una entrada de energía dependiente del tiempo. Este intercambio de energía puede ser producido por:

- Desequilibrio en máquinas rotatorias
- Entrada de Energía Acústica
- Circulación de Fluidos o masas
- Energía Electromagnética.

## Acelerómetro

Figura 3: Acelerómetro



Fuente: <http://azimadli.com/vibman-spanish/elacelermetro.htm>

El acelerómetro es un artefacto o herramienta electrónica de medición, que permite medir las aceleraciones o vibraciones que emiten mecanismo o elementos que hacen parte de una maquina en su mayoría rotativa.

Este instrumento de medición es normalmente utilizado por el personal de mantenimiento en la industria, para poder determinar en qué condiciones de velocidad o de efectividad están operando las máquinas y poder tener un dictamen específico de los elementos en su gran parte rotativos.

## Mantenimiento

Proceso aplicado en la industria para la conservación y restauración de las máquinas, y así garantizar un mejor desempeño y funcionamiento al cual fueron diseñadas. Debido a la gran cantidad de fallas que se pueden encontrar en la industria los mantenimientos se clasifican según la falla o procedimiento a realizar, por lo general en los rodamientos son aplicados el mantenimiento predictivo y el preventivo.

### **Mantenimiento predictivo**

Es una serie de técnicas o procesos que son aplicadas con el objetivo de identificar posibles fallas y defectos de maquinaria en etapas insipientes, para evitar que estos errores a futuro generen una falla de gran escala. La finalidad de este mantenimiento es predecir en que momento puede fallar un elemento para así de esta forma aplicar un mantenimiento preventivo.

### **Mantenimiento preventivo**

El mantenimiento preventivo se realiza en equipos que están en condiciones de funcionamiento, el objetivo de este procedimiento es evitar o mitigar fallas en el equipo y así prevenir incidentes antes de que estas sucedan. Por lo general este mantenimiento es realizado en una secuencia relativa de tal forma que el mantenimiento preventivo en las industrias se realiza después de haber hecho un mantenimiento predictivo.

### 2.3 MARCO HISTORICO

A lo largo de la historia los rodamientos fueron utilizados con el fin de mejorar el funcionamiento de sus mecanismos de transporte y trabajo.

Por ello, a lo largo de la historia se han ideado diversos sistemas para reducir la fricción y facilitar el trabajo humano, constituyendo la ciencia que se conoce como tribología (del griego tribos, frotar o rozar). En la construcción de sus monumentos, los egipcios trasladaban enormes bloques de piedra mediante trineos o troncos situados bajo las piedras, a modo de rodillos de transporte; la misma invención de la rueda; utilización de agua o grasa como película intermedia para reducir el rozamiento, y un largo etcétera. (Taracon, 2011).

En 1907 comienza una nueva etapa en la innovación de los rodamientos, en Suecia un ingeniero de una fábrica de textiles, noto que alguna de sus máquinas presentaba fallas prematuras en sus rodamientos. Dicho ingeniero (sven wingqist) dio con la solución, y así creo el rodamiento autolineable de bolas. De este modo sven funda la compañía skf que se dedicaría en la fabricación de rodamiento para diferentes aplicaciones.

Los rodamientos son parte fundamental para el funcionamiento de máquinas en su gran mayoría rotativas. Por tal motivo en los últimos años se han realizado una serie de investigaciones con el fin de crear técnicas que puedan ayudar con la detección de fallas tempranas y así garantizar la vida útil de las maquinas rotativas.

En la universidad austral de chile se realizó un trabajo de grado por (Martinez, 2014), donde realizaron una tesis sobre el estudio de las fallas más comunes sobre los rodamientos rígidos de una hilera de bolas mediante el análisis en el

dominio del tiempo y frecuencia. Finalmente se realizaron mediciones en un banco de pruebas, en rodamientos con una serie de fallas, y se almacenaron los datos, para luego procesar las señales por medio de un software, comparando y evaluando el comportamiento de las distintas técnicas y su eficacia en poder detectar fallas, además de evaluar sus ventajas y desventajas.

(Castellino, 2007). Se enfoca en el estudio de monitoreo y diagnóstico de las fallas en los rodamientos de los motores asíncronos y de inducción sobre las posibles fallas que pueden ocurrir, que son las siguientes rodamientos dañados por excentricidad y desbalance del motor. Concluyeron que la teoría para la obtención de frecuencias de fallas es muy acertada, ya que arroja valores en la frecuencia de falla que permiten determinar con mucha exactitud la búsqueda del espectro. Por otro lado también dedujeron que la técnica es aplicable a los motores de difícil acceso.

En el año 2011 (Flores , 2011). Realizaron un estudio sobre el diagnóstico de fallas en máquinas eléctricas rotatorias utilizando la técnica de espectros de frecuencia de bandas laterales en el cual se muestra una serie de resultados para un grupo motor de corriente directa-generador síncrono de 5 kVA desalineado y de dos motores de inducción de 5 HP tipo jaula de ardilla, uno con holgura en soporte de baleros y otro con barras rotas. Además compararon los resultados de los espectros empleando un sensor de corriente convencional contra una bobina de Rogowski, obteniendo resultados adecuados para detectar la presencia de falla en las máquinas.

En el 2012 la revista chilena de ingeniería realizó un artículo científico comparativo, del desempeño de los métodos de detección de fallas insipientes en los rodamientos FFT, envolvente y cepstrum usando señales de vibración por medio de un banco de pruebas construido para esta investigación. Los resultados

obtenidos para el desempeño de las fallas del sistema fue satisfactorio y que es apropiado para detectar errores en las maquinas rotativas. (Quiroga, 2012) .

En el 2016 en la universidad autónoma de baja california (Medrano Hurtado , 2016). Presentaron una metodología novedosa para la detección de fallas en rodamientos en un generador síncrono, empleando señales de vibración capturadas a través de transductores de aceleración (acelerómetros piezoeléctricos) y acústicos (micrófonos omnidireccionales), para procesar las señales de vibración se emplea el algoritmo conocido como densidad *espectral de potencia (PSD)*. Se analizan las señales de vibración resultantes de rodamientos, *sin* falla y *con* falla artificial, respectivamente. La falla artificial consistió en una grieta producida en la jaula de un rodamiento *SKF6303-2RSH*. Este método permite la utilización de micrófonos para analizar la vibración de las máquinas lo que representa no tener que montar ningún tipo de transductor en la máquina como sí ocurre con la técnica convencional de detección de fallas a través de la utilización de acelerómetros, además de ser un método que puede detectar una falla en la jaula del rodamiento.

### 3. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

Con el objetivo de poner en práctica las metodologías FFT y cepstrum en máquinas se realiza un ejercicio que determine la frecuencia que corresponde al valor BPF1.

**EJERCICIO:** Análisis de fallas asociadas al defecto en la pista interna de un rodamiento (BPF1) usando técnicas espectrales.

#### Información de cojinetes

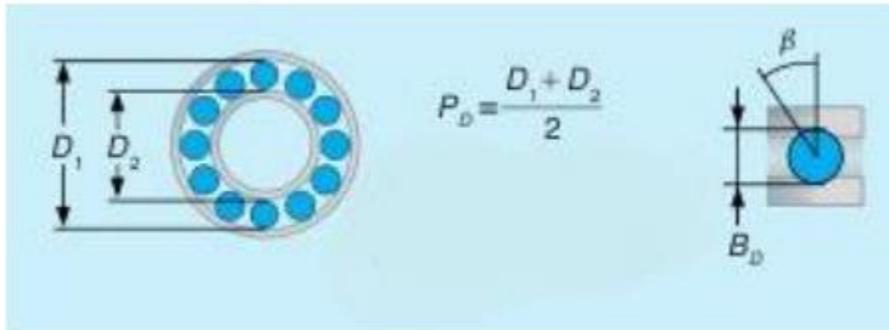
TABLA DE DATOS 1	
<b>Rodamiento Extremo de Transmisión</b>	
TIPO DE RODAMIENTO :	RODAMIENTO DE BOLAS
REFERENCIA:	6205-2RS JEM SKF
<b>DIAMETROS (pulg)</b>	
DIAMETRO INTERIOR :	0.9843
DIAMETRO EXTERIOR :	2.0472
ESPEJOR:	0.5906
DIAMETRO DE BOLA :	0.3126
DIAMETRO DE LA INCLINACION:	1.537
<b>FRECUENCIA DE DEFECTOS (MULTIPLO DE VELOCIDAD DE CARRERA EN Hz)</b>	
ANILLO INTERNO :	5.4152
ANILLO EXTERNO :	3.5848
TREN DE JAULA:	0.39828
ELEMENTO RODANTE:	4.7135

TABLA DE DATOS 2	
<b>Rodamiento Extremo del Ventilador</b>	
TIPO DE RODAMIENTO :	RODAMIENTO DE BOLAS
REFERENCIA:	6203-2RS JEM SKF
<b>DIAMETROS (pulg)</b>	
DIAMETRO INTERIOR :	06693
DIAMETRO EXTERIOR :	1.5748
ESPEJOR:	0.4724
DIAMETRO DE BOLA :	0.2656
DIAMETRO DE LA INCLINACION:	1.122

FRECUENCIA DE DEFECTOS (MULTIPLIO DE VELOCODAD DE CARRERA EN Hz)	
ANILLO INTERNO :	4.9469
ANILLO EXTERNO :	3.0530
TREN DE JAULA:	0.3817
ELEMENTO RODANTE:	3.9874

Datos Tomados de Página: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/bearing-information>

Figura 4: diámetros de rodamientos



Fuente: <https://www.skf.com/co/index.html>

Dónde:

RPM = velocidad del eje

Nb = número de elementos rodantes

Bp = Diámetro del elemento rodante

$\beta$  = Angulo de contacto

Pd = diámetro efectivo del rodamiento

Figura 5: Medidas estándar de rodamientos

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: <https://www.skf.com/co/index.html>

Se utilizó el rodamiento modelo 6205 el cual tiene Nb=9

Figura 6: información del cojinete

**Drive end bearing:** 6205-2RS JEM SKF, deep groove ball bearing

Size: (inches)				
Inside Diameter	Outside Diameter	Thickness	Ball Diameter	Pitch Diameter
0.9843	2.0472	0.5906	0.3126	1.537

Defect frequencies: (multiple of running speed in Hz)			
Inner Ring	Outer Ring	Cage Train	Rolling Element
5.4152	3.5848	0.39828	4.7135

Fuente: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/bearing-information>

Reemplazando todos los valores, tenemos:

RPM = 1719 (dato tomado del archivo 241.mat)

Nb = 9

Bp = 0.3126 " = 0.00794 m

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

Pd = 1.537" = 0.03934 m

$$BPMF = \frac{1719}{60} * \frac{9}{2} * \left( 1 + \frac{0.00794 * \cos 0}{0.03934} \right)$$

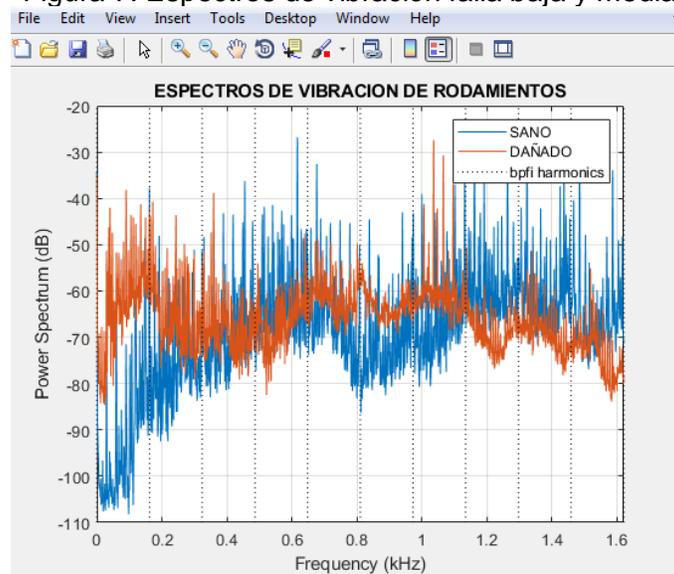
$$BPMF = 155.1462 \text{ Hz}$$

## DESARROLLO DEL CÓDIGO EN OCTAVE

Para el desarrollo del ejercicio en octave se realizara el cargue de las carpetas contenidas en **Case Western Reserve University Bearing Data Center** los cuales se basan en analizar un rodamiento que presenta tres tipos de fallas.

Falla leve, media y alta las cuales corresponden a las carpetas 97.mat, 105.mat y 169.mat respectivamente.

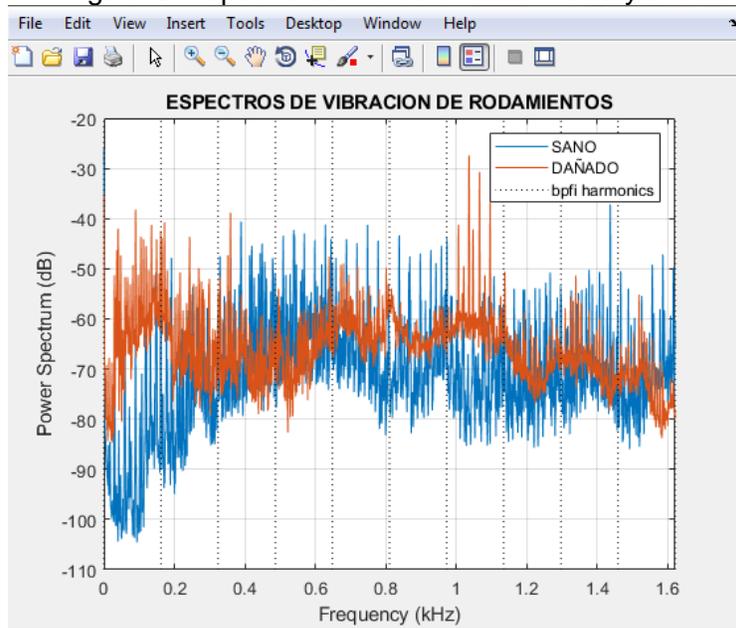
Figura 7: Espectros de vibración falla baja y media



Fuente: Autor

En la figura 7 se logra observar la diferencia existente entre los datos que representan la señal con falla leve y media, evidenciando una deferencia en la magnitud de los picos promedios en un rango de frecuencia de 1 a 1.2 KHz.

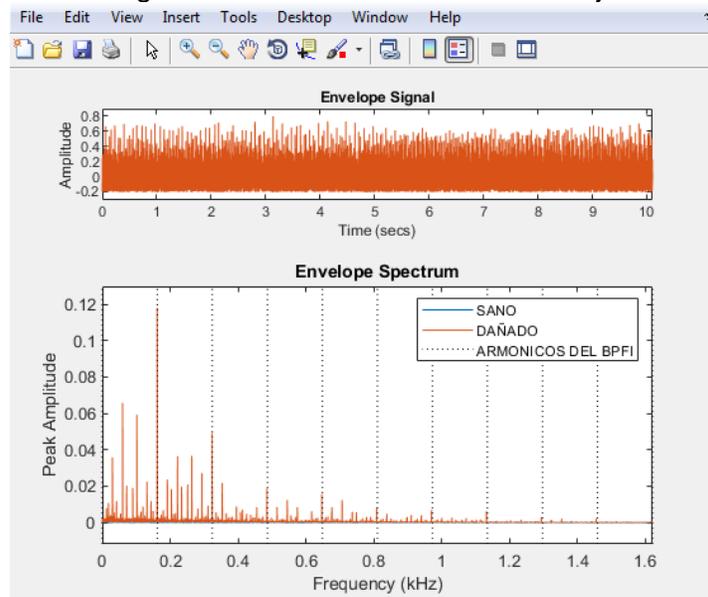
Figura 8: Espectro de vibración falla media y alta



Fuente: Autor

La figura 8 muestra la diferencia que existe entre las señales que representan las fallas medias y altas, en la cual se logra observar al igual que en la figura 7 los promedios de los picos entre las frecuencias 1 y 1,2 son muchos más altos en la falla alta.

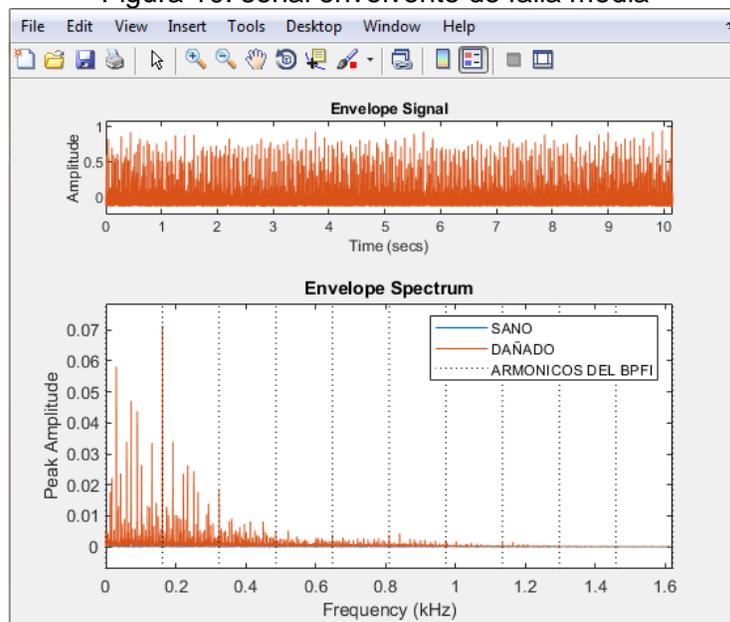
Figura 9: señal envolvente de falla baja



Fuente: Autor

En la figura 9 la cual representa la señal envolvente sin falla y con falla baja, en la cual se puede evidenciar a la diferencia entre la magnitud de los picos en la señal con falla que se encuentra de naranjado y la señal con falla en azul.

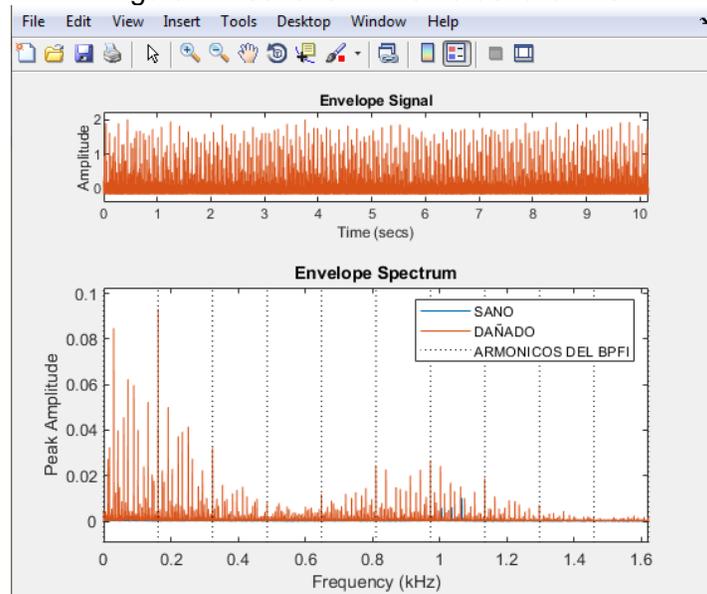
Figura 10: señal envolvente de falla media



Fuente: Autor

La figura 10 la cual representa la falla media, se diferencia de la falla leve en lo denso que son los picos altos que se encuentran en las frecuencias 0 a 0.4 KHz.

Figura 11: señal envolvente de falla Alta

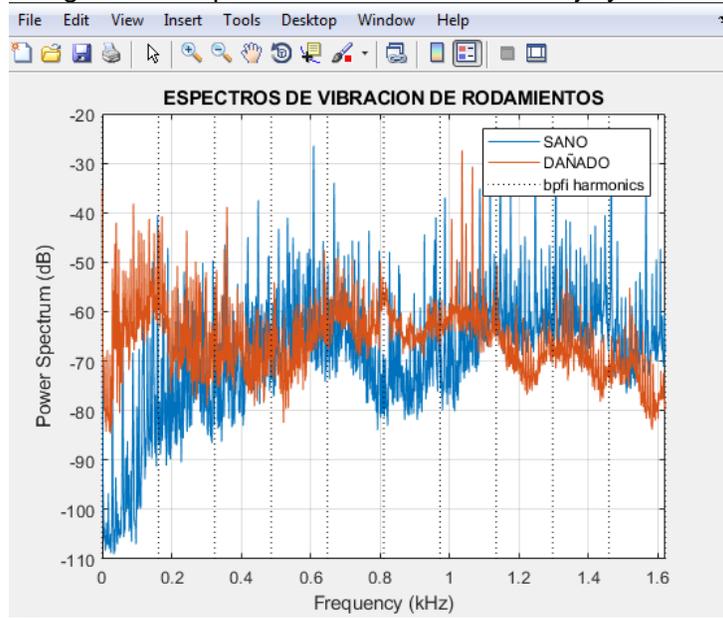


Fuente: Autor

La figura 11 representa la comparación entre la señal sin falla y con falla alta, en la cual se logra observar la gran diferencia que existe en comparación con la falla baja y media. En la figura se logra observar dos zonas en las cuales las magnitudes de los picos tienen un aparente crecimiento, lo cual muestra la severidad de la falla.

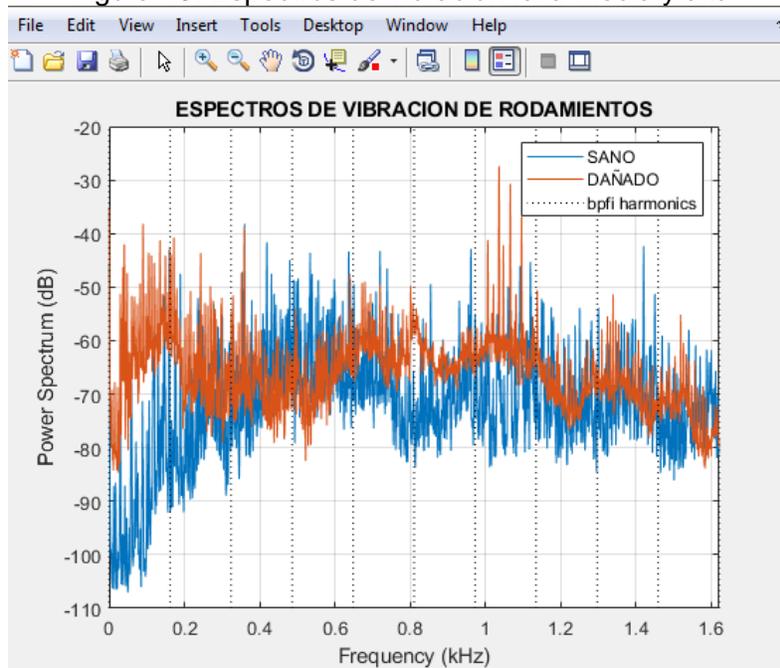
Para corroborar los resultados expuestos previamente se simulan las fallas contenidas en las carpetas 98.mat, 106.mat, 170.mat y 210.mat y muestran los siguientes resultados:

Figura 12: Espectros de vibración falla baja y media



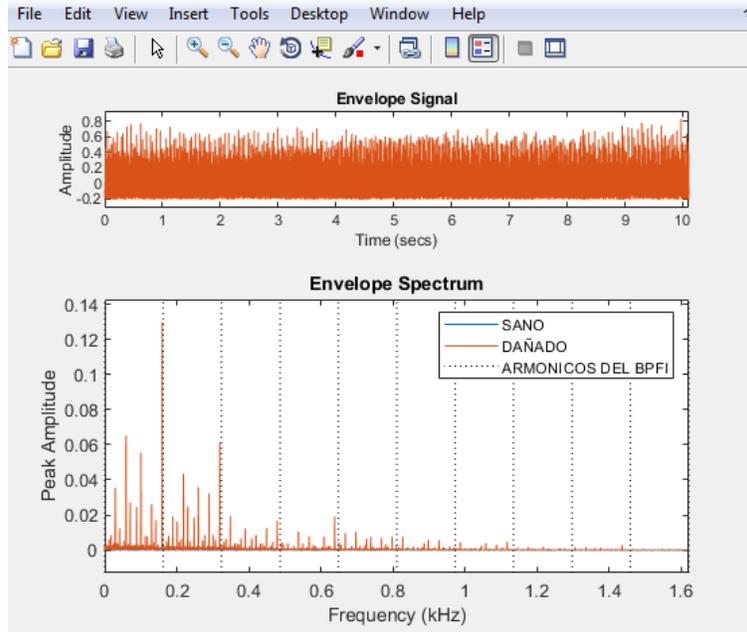
Fuente: Autor

Figura 13: Espectros de vibración falla media y alta



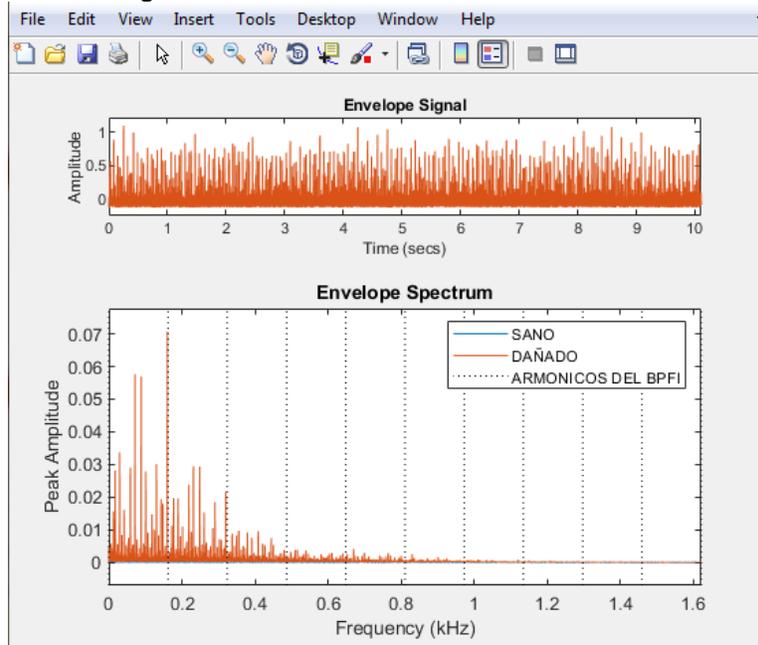
Fuente: Autor

Figura 14: señal envolvente de falla baja



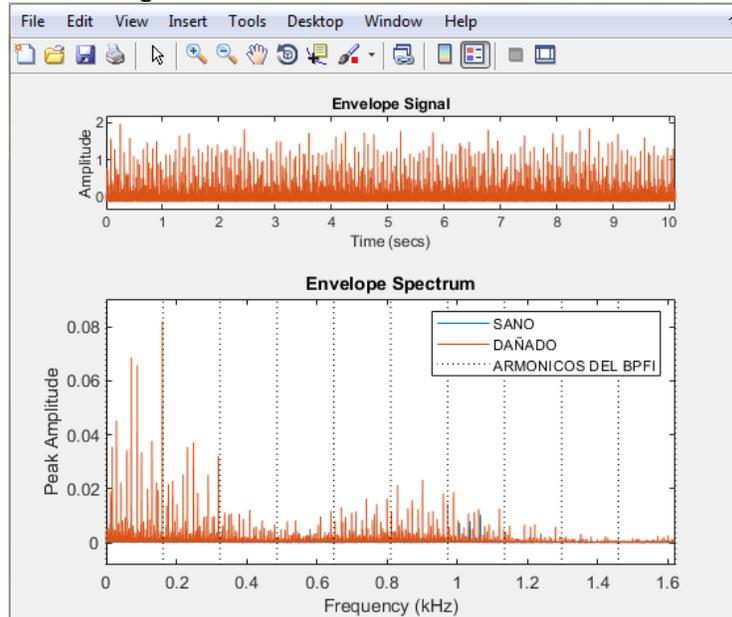
Fuente: Autor

Figura 15: señal envolvente de falla media



Fuente: Autor

Figura 16: señal envolvente de falla alta.



Fuente: Autor

Al observar las gráficas podemos inferir que el comportamiento es idéntico al del primer análisis, por tal razón los resultados presentados son concluyentes.

#### **4. CONCLUSIONES**

1. Con el desarrollo de este trabajo de investigación se logró realizar una presentación completa de los métodos espectrales en el análisis de fallas en rodamientos.
2. Los análisis espectrales en rodamientos son técnicas cada vez más utilizados en investigaciones enfocadas hacia mejorar los diseños de máquinas rotativas.
3. La confiabilidad en sistemas de generación de energía es un tema prioritario, por tanto el desarrollo de este trabajo logra establecer unos parámetros de medición de dicho indicador.

## 5. RECOMENDACIONES

1. Una recomendación que nace del desarrollo de este trabajo de grado es la realización de un banco de datos de fallas en máquinas rotativas, con el fin de tener mayores opciones de análisis.
2. Se recomienda utilizar la metodología de análisis espectrales técnicas de mantenimiento predictivos con el fin de determinar puntos críticos de falla.
3. Se recomienda realizar el estudio para maquinas cuya velocidad de rotación varíe durante la operación.
4. Una recomendación final sería el de aplicar el mismo análisis comparativo de fallas a todos los métodos de espectro existentes y en esa medida determinar cuál de ellos presenta una menor probabilidad de error, y así tener resultados más confiables.

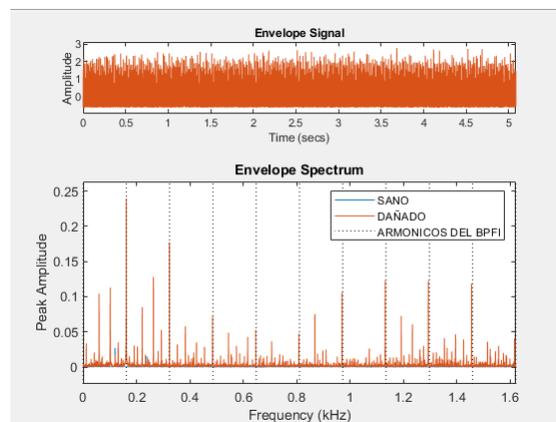
## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- .J, P. (2007). *Tratamiento digital de señales*. Rio Janeiro : Pearson Educacion .
- Castellino, A. (2007). *Diagnostico de fallas en los rodamientos de motores electricos empleando variables electricas*. Mexico : Santillana.
- Flores , R. (2011). *Diagnostico de fallas en maquinas electricas rotatorias utilizando la tecnica rotatorias utilizando la tecnica de espectros de frecuencia de bandas laterales* . Mexico: Scielo.
- Gonzalez , L. (2016). *comparacion de la efectividad de las tecnicas de ultrasonido pasivo y analisis de vibraciones en la deteccion de fallas incipientes en rodamientos*. Quito : Politecnica Chimborazo.
- Hernandez Montero , F. (2010). *Enfoques en el analisis envolvente al procesamiento de vibraciones para el diagnostico de maquinarias*. Bogota: Santafe.
- Martinez Amaya, M. (2017). *Deteccion de fallas en rodamientos de un motor de induccion trifasico tipo jaula de ardilla empleando analisis de vibraciones*. Bogota: Santilla.
- Martinez, L. (2014). *Estudio de vibraciones mediante CEPSTRUM y comparacion con otras tecnicas para diagnosticar fallas en rodamientos y engranajes*. Bogota: Elsevier.
- Medrano Hurtado , Z. (2016). *Nueva metodologia de diagnostico de fallas en rodamientos en una maquina sincrona mediante el procesamiento de señales vibroacusticas empleando analisis de densidad de potencia*. California: Elsevier.
- Pedraza Bonilla, C. (2000). *Implementación de la FFT en hardware aplicada a recepcion en OFDM*. BOGOTA: SANTO TOMAS.
- Permia Marquez, D. (2004). *Introduccion a la medicion de vibracion*. Caracas: Universidad de los Andes.
- Quiroga, J. (2012). *Estudio de fallas insipientes en rodamientos usando la tecnica de la envolvente y cepstrum*. Mexico : Revista de Ingenieria .
- Randall , M. (2000). *Comparación de Representaciones Tiempo-Frecuencia Aplicadas en la Simulación y Análisis de Fallas en Sistemas Engranados*. Brasilia: Bodocongó.
- Taracon, C. (2011). *Modelado y simulacion de mecanismos con MSC*. Bogota: ADAMS.

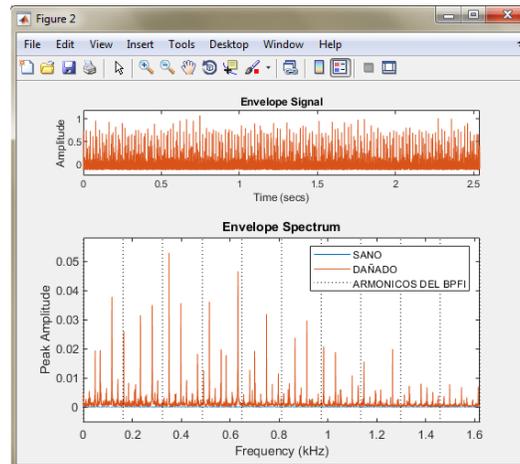
## Anexos

A continuación se tomaran los resultados mostrados en las gráfica de espectros de cada una de las fallas con el fin de identificar algunas diferencias evidentes en cada una de ellas.

### FALLA LEVE



### FALLA MEDIA



### FALLA ALTA

