



**TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO**  
ESTUDIO DE VIBRACIONES EN MAQUINAS ROTATIVAS POR MEDIO DE  
ANALISIS DE ORDENES

**AUTORES**

JORGE ALBERTO GALVIS PUELLO  
JHON ALEXANDER MONTOYA PEÑALOZA  
LUIS FERNANDO PADILLA AMAYA

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

2018  
26/10/2018



**TÍTULO DEL TRABAJO DE GRADO**  
ESTUDIO DE VIBRACIONES EN MAQUINAS ROTATIVAS POR MEDIO DE  
ANALISIS DE ORDENES

**AUTORES**

JORGE ALBERTO GALVIS PUELLO  
JHON ALEXANDER MONTOYA PEÑALOZA  
LUIS FERNANDO PADILLA AMAYA

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

**DIRECTOR**

LUIS OMAR SARMIENTO

GRUPO DE INVESTIGACION DIANOIA

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERIA  
TECNOLOGIA EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECHANICO  
BARRANCABERMEJA  
2018

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del Jurado

## DEDICATORIA

A Dios y mi familia por su apoyo incondicional en este y todos los aspectos de mi vida, a mi madre, Celmira Peñaloza Castro que ha dado todo por mi desarrollo personal y profesional, a mis hermanos, Hangie Cristina y Oscar Dario por su cariño y confianza, a mi amigo y compañero en esta etapa, Luis Fernando Padilla Amaya por las palabras de aliento en los momentos difíciles y las felicidades compartidas.

### **JHON ALEXANDER MONTOYA PEÑALOZA**

Dedico primeramente a Dios, porque si él no haríamos nada. A mi madre; Leonor Puello Rojas por apoyo incondicional en toda mi carrera y finalmente al profesor Luis Omar por su apoyo en el desarrollo del proyecto.

### **JORGE ALBERTO GALVIS PUELLO**

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional. A toda mi familia por estar a mi lado en los momentos de felicidad, tristeza y por ayudarme a construir mis sueños, en especial a mi madre, Rosa Olinda Amaya que siempre ha estado presente en cada tropezón de mi vida universitaria que con sus palabras me supo guiar y gracias a ella, hoy estoy culminando una etapa más de mi vida.

### **LUIS FERNANDO PADILLA AMAYA**

## AGRADECIMIENTOS

Desarrollar este trabajo de grado ha tenido un gran impacto en nosotros, y es por eso que hoy llega a nuestras memorias el apoyo de grandes personas sin las cuales no hubiese sido posible este logro.

En primer lugar, queremos expresar nuestra gratitud a Dios por darnos la salud, la paciencia, la disposición y el entendimiento para plasmar en este proyecto los conocimientos adquiridos durante nuestra carrera. También agradecemos a nuestros padres por sus sabios consejos, su comprensión y apoyo tanto económico como moral; y porque siempre estuvieron ahí para nosotros en el momento en que los necesitamos.

De una manera muy especial agradecer a nuestro tutor Luis Omar Sarmiento Álvarez por darnos las pautas y las herramientas necesarias para la ejecución de nuestro trabajo de grado; además, un profundo agradecimiento a los docentes por sus enseñanzas que han dejado una huella en nosotros que siempre nos acompañará en la vida y por la que siempre les estaremos agradecidos.

Finalmente damos nuestros sinceros agradecimientos, a los compañeros de lucha en esta carrera, por el compromiso y el empeño; así como todo el apoyo brindado cuando por una u otra razón no podíamos asistir a las clases.

A todos ellos MUCHAS GRACIAS.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>8</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>11</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.2 JUSTIFICACIÓN .....	12
1.2. OBJETIVOS .....	13
1.2.1. OBJETIVO GENERAL .....	13
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
1.3. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES .....	14
1.4. MARCO REFERENCIAL .....	17
1.4.1. MARCO TEÓRICO.....	17
1.4.2. MARCO CONCEPTUAL .....	24
1.1.1. MARCO HISTÓRICO .....	45
1.1.2. MARCO LEGAL .....	48
<b>2. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO.....</b>	<b>51</b>
2.1. ANALISIS COMPARATIVO.....	77
<b>3. RESULTADOS.....</b>	<b>80</b>
<b>4. CONCLUSIONES.....</b>	<b>81</b>
<b>5. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>82</b>
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:Parámetros básicos de un procesador de señal digital	20
Figura 2:Muestreo de Señal	21
Figura 3: Onda Armónica Simple	25
Figura 4:Armonico de desplazamiento, velocidad y aceleración de una onda	26
Figura 5: Velocidad del motor y datos del acelerómetro en función del tiempo	53
Figura 6:Mapa de frecuencia con resolución de 15.625 Hz	54
Figura 7:Mapa de frecuencia con resolución de 10 Hz	54
Figura 8: Mapa de órdenes con muestreo síncrono.	55
Figura 9: Amplitud RMS media de cada orden.	56
Figura 10: Mapa de seguimiento de órdenes, Order Tracking	57
Figura 11: Velocidad del motor y datos del acelerómetro en función del tiempo	59
Figura 12 :Mapa de color con resolución en frecuencia 3.906 Hz	60
Figura 13:Mapa de color con resolución en frecuencia 1 Hz	60
Figura 14: Diagrama de cascada con resolución de frecuencia 5Hz	61
Figura 15: Mapa de ordenas con remuestreo sincrónico	61
Figura 16: Velocidad del motor y datos del acelerómetro en función del tiempo	64
Figura 17: Mapa de frecuencia con resolucion 15,625Hz	64
Figura 18: Mapa de frecuencia con resolución 10 Hz	65
Figura 19: Mapa de órdenes con muestreo síncrono.	65
Figura 20: Amplitud RMS media de cada orden.	66
Figura 21: Mapa de seguimiento de órdenes, Order Tracking	66
Figura 22: Velocidad del motor y datos del acelerómetro en función del tiempo	67
Figura 23: Mapa de frecuencia con resolucion 15,625Hz	68
Figura 24: Mapa de frecuencia con resolución 10Hz	68
Figura 25: Mapa de órdenes con muestreo síncrono.	69
Figura 26: Amplitud RMS media de cada orden.	69
Figura 27: Mapa de seguimiento de órdenes, Order Tracking	70
Figura 28: Velocidad del motor y datos del acelerómetro en función del tiempo	71
Figura 29: Mapa de frecuencia con resolución 15,625 Hz	71
Figura 30: Mapa de frecuencia con resolucion 10Hz	72
Figura 31: Mapa de órdenes con muestreo síncrono.	72
Figura 32: Amplitud RMS media de cada orden.	73
Figura 33: Mapa de seguimiento de órdenes, Order Tracking	73
Figura 34: Velocidad del motor y datos del acelerómetro en función del tiempo	74
Figura 35: mapa de frecuencia con resolucion de 15.625 Hz	75
Figura 36: Mapa de frecuencia con resolución 10Hz	75
Figura 37: Mapa de órdenes con muestreo síncrono.	76
Figura 38: Amplitud RMS media de cada orden.	76
Figura 39: Mapa de seguimiento de órdenes, Order Tracking	77

## RESUMEN EJECUTIVO

El siguiente trabajo tiene como objetivo la realización de un estudio de vibraciones para máquinas rotativas durante periodos de arranque, parada o ambos por medio de análisis de órdenes, el cual permita a los estudiantes de la UTS sede Barrancabermeja tener una herramienta de diagnóstico para el análisis de vibraciones en máquinas rotativas, enriqueciendo sus conocimientos los cuales aplicaran en su vida profesional.

Se inicia con reunir información detallada de análisis de vibraciones y análisis de órdenes en máquinas rotativas, dicha información es fundamental ya que permite tener un punto de partida y así llevar a cabo el estudio de vibraciones, la cual permita diagnosticar la integridad de estos equipos y poder realizar una intervención a tiempo, ya que el análisis de vibración indica que tan cerca se encuentra de su frecuencia natural, la cual es el mejor parámetro de su estado. Un nivel alto de vibraciones indica que la maquina está cerca de su frecuencia natural propensa a sufrir algún daño, en cambio un nivel bajo de vibraciones indica que la maquina está en perfecto funcionamiento.

La elaboración de este estudio de vibraciones por medio de análisis de órdenes en maquinarias rotativas, se fundamenta en el desarrollo de una herramienta de análisis que permita anticiparse a posibles fallas y así prolongar la vida útil de los equipos aumentando su disponibilidad.

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 vibraciones en

máquinas rotativas para poder encontrar una solución por medio de análisis de órdenes.

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 vibraciones, Maquinaria rotativa, seguimiento de órdenes

## 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 significativas que ninguna entidad quisiera tener. 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 vibraciones en máquinas rotativas por medio de análisis de órdenes, diagnosticando la integridad de las maquinas, 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 vibraciones y análisis de órdenes, los últimos proyectos realizados que implementan el estudio de vibraciones por medio de análisis de órdenes, se desarrollan cinco ejemplos de análisis de ordenes en máquinas rotativas que permitieron poner a prueba dicha metodología 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

Las Unidades Tecnológicas de Santander sede Barrancabermeja por el momento no cuenta con un proyecto de investigación en el cual se evidencie por medio de análisis de órdenes un estudio de vibraciones en máquinas rotativas, que puedan favorecer tanto al estudiante como alguna entidad industrial que requiera de este tipo de análisis. Con este proyecto de investigación se desea vincular a los estudiantes de las Unidades Tecnológicas de Santander a temas relacionados con el análisis de vibraciones, y en esa medida proporcionarles herramientas de diagnóstico de integridad de equipos y así desarrollar en ellos la capacidad de analizar objetivamente las fallas generadas en máquinas rotativas, como es el caso de un proyecto que actualmente realizara la UTS sede Barrancabermeja sobre generación de energía eléctrica por medio de una turbina de vórtice gravitacional.

Respecto a lo anterior surge el siguiente interrogante, ¿Cómo realizar un estudio de vibraciones en máquinas rotativas por medio de análisis de órdenes, que permita establecer un análisis de integridad?

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad el sector industrial tiene como prioridad ser cada vez más competitivo, teniendo en cuenta que necesitan que su maquinaria se encuentre en óptimo estado para que su producción no tenga que detenerse. Por tal motivo se ha incluido el plan de mantenimiento predictivo en las empresas los cuales en algunos usan el análisis de vibraciones con el objetivo de saber el estado de su maquinaria y así prevenir futuros fallos.

Toda máquina vibra ya sea nueva o antigua, este en buen o mal estado, pero cuando se está desarrollando algún fallo este proporciona variaciones en las vibraciones con componentes específicos que las caracteriza, por tan motivo este proyecto pretende estudiar las vibraciones en máquinas rotativas por medio de análisis de ordenes con el fin de aplicarlo a un proyecto que actualmente la UTS sede Barrancabermeja está realizando sobre generación de energía eléctrica por medio de una turbina de vórtice gravitacional.

En las máquinas rotativas los desperfectos en sus componentes generan vibraciones, estas vibraciones son establecidas por las propiedades estructurales de los componentes fijos o móviles de toda máquina. El análisis de órdenes determina una conexión entre las mediciones y las revoluciones de un elemento giratorio, y mejora el conocimiento sobre cada elemento, ya que la vibración se representa por un número de ondas sinusoidales que depende de la velocidad del motor con amplitud y fases variables, con una frecuencia que es un factor constante de RPM del motor, siendo esta técnica muy útil a la hora de realizar un análisis de vibraciones.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar el estudio de vibraciones para máquinas rotativas durante periodos de arranque, parada o ambos por medio de análisis de órdenes.

### 1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un documento que contenga la sustentación de los conceptos teóricos requeridos en el análisis de vibraciones y análisis de órdenes.
- Documentar la información relacionada con la generación de energía eléctrica por medio de una turbina de vórtice gravitacional.
- Desarrollar cinco ejemplos de análisis de órdenes en máquinas rotativas que permitan poner a prueba la metodología.

### 1.3. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES

Los siguientes antecedentes son un registro de proyectos desarrollados en los cuales realizaron estudios de vibraciones por medio de análisis de ordenes, este estudio de vibraciones es un procedimiento para diagnosticar fallos en maquinas rotativas, siendo de gran utilidad en la industria, ya que tiene la capacidad de detectar posibles fallos en las maquinas, evitando futuros inconvenientes en los sistemas, ese estudio de vibraciones se representa por medio de analisis de ordenes el cual por medio de ondas sinusoidales, muestra las variaciones en las vibraciones. Estos proyectos permiten tener un punto de partida en la ejecución de este proyecto de investigación sobre un estudio de vibraciones en maquinas rotativas por medio de analisis de ordenes.

Rubiano (2017) realizó un proyecto dirigido en una necesidad en el área de Mantenimiento de la empresa Casa Luker S.A. La solución que género y desarrollo fue la implementación de los resultados del análisis de vibración en áreas de trabajo, las cuales están compuestas por máquinas rotativas. Se basó en la Norma ISO 10816, donde realizó la evaluación de los niveles permitidos y críticos de vibración. Luego de esto efectuó un análisis de criticidad en cada parte de trabajo teniendo en cuenta los niveles de vibración, lo cual le permitió obtener un plano más completo de toda la planta en respecto a su funcionalidad. Dando prioridad a las máquinas que registraron niveles muy altos de vibración, generando una serio de órdenes de trabajo de una forma predictiva, lo cual permitió intervenirlos de una vez. Luego de esto, ejecuto una serie de actividades programadas pretendiendo mejorar y amplificar la gestión de mantenimiento

Castañeda (2014) realizó en su proyecto de grado la ejecución de una técnica de inteligencia artificial conocida como Máquina de Soporte Vectorial, capaz de diagnosticar fallas en máquinas rotativas. La máquina de aprendizaje fue diseñada con un conjunto de señales de vibración mecánica obtenidas por medio de un banco de pruebas, elaborado para la evaluación experimental de este proyecto de investigación, el banco de pruebas fue apto de reproducir respuestas dinámicas correspondientes a desbalanceo y desalineamiento. Los parámetros utilizados como características para la clasificación fueron amplitud del espectro en velocidad y la frecuencia de giro del rotor medida en Hz, con esta información básica recolectada, construyeron los datos de entrenamiento, para después entrenar y generar el modelo para predicción de fallas, después de obtenido el modelo, procedieron a evaluarlo con datos de prueba alcanzando resultados satisfactorios para la clasificación y predicción del tipo de falla y su severidad.

Cardona (2011) desarrolló una serie de metodologías que permitieron caracterizar señales de vibraciones mecánicas empleando la variabilidad estocástica para la identificación de varios tipos de fallos en rodamientos, cajas reductoras y ejes (desbalanceo, desalineación, soldadura mecánica y lubricación). Los estados transitorios y regímenes variables de carga y velocidad como el arranque, parada y distintas velocidades constantes, los analizaron a profundidad permitiéndoles asociar la calidad de las señales y la identificación de fallos a varios puntos de medición estudiados. Los resultados de clasificación mostraron que las metodologías utilizadas fueron bastante significativas, puesto que, en general, el promedio de rendimiento se encuentra por encima de un 90 % de eficiencia. Por último, estas diversas técnicas de caracterización empleadas, así como el análisis de transitorios, permitieron diferenciar de una manera más clara los distintos tipos de fallos mostrando que es necesario un análisis tiempo-frecuencia si se quieren lograr tener los mejores resultados.

Bojórquez (2006) presentó en un artículo el desarrollo de un sistema para monitoreo y detección de fallas en motores de rotación, por medio del análisis de las secuencias sonoras que éstos generan, utilizando algoritmos como la FFT. Los algoritmos fueron implementados en una librería de acceso dinámico (DLL), bajo la interfaz gráfica de un software desarrollado en el lenguaje de programación de propósito general Delphi. En los resultados demuestra el desarrollo de un sistema económico para el análisis de vibraciones, por los sensores que utiliza y las bases necesarias para el desarrollo a futuro de otros sistemas.

Acosta (2011) mostró en su proyecto la condición en que se encuentran las máquinas rotativas por medio del análisis de las vibraciones, que éstas producen cuando están en pleno funcionamiento. Realizó un programa de adquisición de datos mediante un software especializado en instrumentación virtual llamado LabVIEW 8.6 para que recepten las vibraciones del banco de pruebas, por medio de los acelerómetros piezoeléctricos colocados en puntos estratégicos. Una vez adquirida la señal de aceleración, la integra para dar como resultado la velocidad, lo cual mediante un espectro de frecuencias le indica las posibles fallas mecánicas o electrónicas que pueda presentar la maquinaria. Según sea el nivel de las vibraciones se verá la conveniencia o no de realizar alguna acción correctora. Como por ejemplo un mantenimiento predictivo que solucionaría el problema de manera rápida ya que se conocería donde se origina la falla y con esto se disminuiría el riesgo de algún problema en el futuro como dejar al motor fuera de servicio y ocasionar pérdidas en la producción.

## 1.4. MARCO REFERENCIAL

### 1.4.1. Marco Teórico

#### Componente sinusoidal

Un componente sinusoidal típico tiene una amplitud  $A$ , fase inicial  $\emptyset$ , y una frecuencia  $f$  (Prieto, 2017).

#### Series de Fourier

Si se tiene una función periódica  $g(t)$  ya que  $g(t) = g(t + nT)$ , donde  $T$  es el periodo y  $n$  cualquier número entero, por lo tanto esta función se puede plasmar como una suma de elementos sinusoidales a frecuencias equiespaciadas.  $kf_1$ , donde  $f_1$  es lo contrario del periodo y  $k$  es cualquier número entero. La  $k$ -ésima componente se obtiene de la integral: (Restrepo, 2012)

$$G(f_k) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} g(t) e^{-j2\pi f_k t} dt$$

Siendo  $f_k = kf_1$ , el  $k$ -ésimo armónico de  $f_1$ .

Cabe resaltar en detalle lo que esta integral hace, si la señal  $g(t)$  contiene un elemento que gira a una frecuencia de  $f_k$ , entonces multiplicado por el vector unitario  $e^{-j2\pi f_k t}$  el cual rota a frecuencia  $-f_k$  anulas la rotación del componente de la señal el cual se integra con el tiempo hasta un valor finito.

En este caso, efecto de multiplicar la señal por  $e^{-j2\pi f k^t dt}$ , no es más que mover el origen de la frecuencia a  $f_k$ , y así todos los armónicos originales seguirán siendo armónicos de la señal de tiempo modificada.

### Transformada de Fourier

Es posible extender la ecuación de  $G(f_k)$  a casos más generales haciendo que  $T \rightarrow \infty$ , en cuyo caso el espacio  $1/T$  entre los armónicos tiende a cero y  $G(f)$  se convierte en una función continua en  $f$ .

$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-j2\pi f t} dt$$

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f)e^{-j2\pi f t} dt$$

La ecuación  $G(f)$  es conocida como transformada directa, mientras que la ecuación  $g(t)$  es conocida como transformada inversa, justas forman el par transformador de Fourier (Prieto, 2017).

### Funciones muestreadas en el tiempo

Otra manera del par transformador de Fourier se aplica a funciones muestreadas en el tiempo, un ejemplo es las funciones las cuales son representadas por series de tiempo, una secuencia de valores discretos en puntos equiespaciados de

tiempo. Pero esto sería para un caso en el que se realice procesamiento digital de datos (Prieto, 2017).

Es notorio que se trata de una situación que es lo contrario del caso de la serie Fourier, debido a la simetría del par transformador de Fourier. Por consiguiente el espectro se vuelve periódico, con un periodo igual al de la frecuencia de muestreo,  $f_s$  (inversa del intervalo de tiempo entre muestras  $\Delta t$ ).

Una forma particular de transformada de Fourier de funciones muestreadas en el tiempo es:

$$G(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} g(t_n)e^{-j2\pi f t_n}$$

$$g(t_n) = \frac{1}{f_s} \int_{-f_s/2}^{f_s/2} G(f)e^{-j2\pi f t_n} dt$$

Donde  $t_n = n\Delta t$ , tiempo correspondiente a la n-ésima muestra.

### **Relaciones fundamentales de los procesadores digitales de señales para maquinas rotativas**

Un procesador digital de señales o DSP, es un componente digital utilizado para procesar y representar señales analógicas en tiempo real. Este componente recibe muestras de un convertidor analógico/digital, luego realiza un procesamiento digital en el módulo DSP, para después volverse a convertir en analógico y dar paso a la salida. De esta forma se pasa de una señal en el dominio del tiempo a una señal en el dominio de la frecuencia (Prieto, 2017).

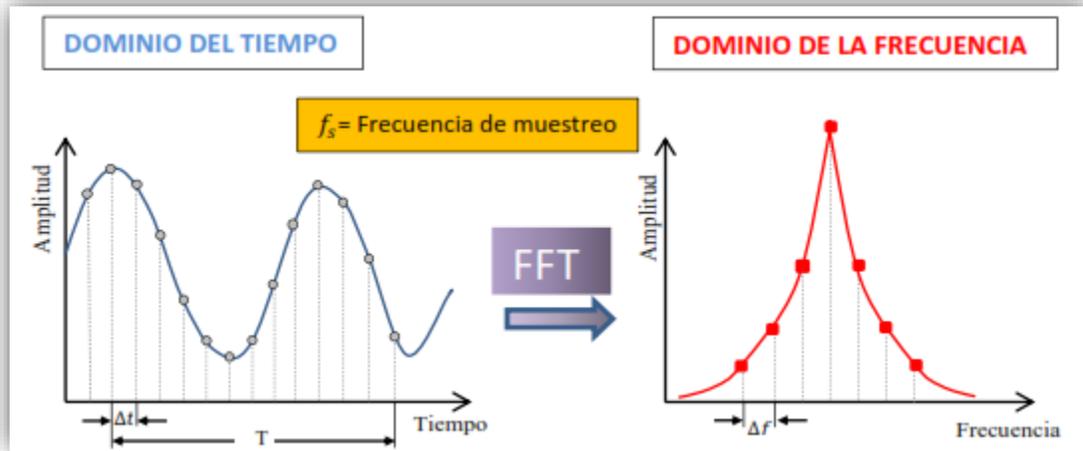


Figura 1:Parámetros básicos de un procesador de señal digital

FUENTE: PRIETO. M. Vibraciones de máquinas rotativas. Sevilla: Universidad de Sevilla, 2017, p.53

En la figura anterior se muestran los parámetros básicos de un procesador digital. En la figura Dominio del Tiempo se encuentra el intervalo de muestreo (seg/muestra)  $\Delta t = \frac{1}{f_s}$ , tiempo de observación (seg)  $T = N\Delta t$  y tamaño de bloque como  $N$ , en la figura dominio de la frecuencia tenemos resolución en frecuencia (Hz)  $\Delta f = \frac{1}{T}$ , número de líneas espectrales  $= \frac{N}{2}$  y se calcula la magnitud y fase de cada línea espectral (Prieto, 2017).

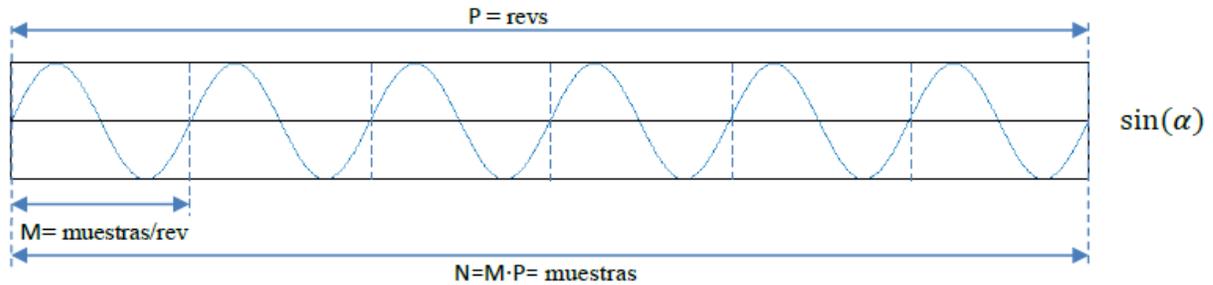


Figura 2: Muestreo de Señal

**FUENTE: PRIETO. M. Vibraciones de máquinas rotativas. Sevilla: Universidad de Sevilla, 2017, p.54**

Un aspecto fundamental en el análisis de vibraciones es el muestreo de una señal como se muestra en la figura xx la cual está representada por una señal senoidal en la cual se identifican parámetros como muestras/revolución, Al número de muestras tomadas por cada bloque la cual está identificada con la letra N, que a su vez se considera como el tamaño de la adquisición de datos.

$$N = M * P$$

M = número de muestras adquiridas por revolución

$$M = \frac{f_s \cdot 60}{RPM} = 2O_{max}$$

Cabe resaltar que el número de muestras M depende del número de ordenes máximo

P = número de revoluciones por bloques

$$P = T \frac{RPM}{60} = \frac{RPM}{\Delta f \cdot 60} = \frac{1}{\Delta O}$$

## Análisis de órdenes mediante muestreo fijo

El método más sencillo empleado en el análisis de órdenes es emplear una frecuencia fija  $f_s$ , para determinar la señal de vibración. La frecuencia de muestreo es independiente de las revoluciones y viene determinada por la frecuencia max.

$$f_s = 2 \times F_{max}$$

Con base en la relación que existe entre la frecuencia de muestreo y el orden máximo obtenemos la siguiente expresión:

$$f = O \frac{RPM}{60} (revs/min)$$

$$\Delta f = \Delta O \frac{RPM}{60} = \frac{1}{P}$$

$\Delta O$ =resolución en ordenes

$\Delta f$ =resolución de frecuencia

$$f_{max} = O_{max} \frac{RPM}{60} = \frac{f_s}{2}$$

$$O_{max} = \frac{f_s * 60}{2 * RPM_{max}} = \frac{M}{2}$$

Con base en la ecuación anterior se puede deducir que el orden máximo global viene determinado por la RPM máxima o que el orden máximo depende del número de muestras por revolución.

## Análisis de órdenes mediante muestreo síncrono

Para evitar un efecto de manchado y mejorar la resolución de frecuencia, se puede utilizar el muestreo síncrono en lugar de muestrear datos con frecuencia de muestreo fija. El muestreo síncrono se trata de muestrear la señal de vibración en ángulos iguales en cada revolución, en lugar de equidistante e n el tiempo. El eje

de frecuencia se escala físicamente en ordenes (esto es, múltiplos de las rpm). El orden  $n$  es un evento que tiene lugar  $n$  veces por revolución o ciclo (Prieto, 2017). También conocido como muestreo adaptativo, por lo que  $f_s$  se va adaptando a las RPM.

$$f_s = 2 \cdot f_{max} = \frac{2 \cdot 0_{max} \cdot RPM}{60}$$

Con este método de muestreo síncrono se consigue el mismo número de muestras en cada revolución. Las muestras después del muestreo se dice que están en el dominio del orden.

### Señales de velocidad de rotación. Señal de tacómetro

En la mayoría de los casos de análisis de maquinaria rotativa, un transductor de velocidad de rotación, un tacómetro, está conectado a la máquina giratoria para medir las RPM. (Prieto, 2017). Dicho transductor es usualmente óptico o inductivo, en cualquier caso, produce alguna forma de señal de impulso en la que el tiempo entre los impulsos está relacionado con la velocidad de rotación  $Vr(t)$ , expresada en (RPM) como:

$$Vr(t) = \frac{60}{N_p (t_2 - t_1)}$$

Donde  $N_p$  es el número de pulsos por revolución y  $t_2$  y  $t_1$  son las instancias de tiempo de dos pulsos

### **1.4.2. Marco conceptual**

#### **Vibraciones mecánicas**

El estudio de las vibraciones mecánicas es una rama de la mecánica, y por lo tanto de la ciencia que estudia los movimientos oscilatorios de los cuerpos, sistemas y de las fuerzas asociadas. El interés de las vibraciones mecánicas llega al mantenimiento industrial de la mano del mantenimiento preventivo, con el interés de alerta que significa un elemento vibrante en una máquina, y la necesaria prevención de las fallas que traen las vibraciones a medio plazo. El interés principal para el mantenimiento deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de las vibraciones detectadas en el elemento o máquina, la determinación de las causas de la vibración, y la corrección del problema que ellas representan. Las consecuencias de las vibraciones mecánicas son el aumento de los esfuerzos y las tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales, y las más temidas: daños por fatiga de los materiales, además de ruidos molestos en el ambiente laboral, Algunas de las razones más habituales por las que una máquina o elemento de la misma pueden llegar a vibrar podrían ser las siguientes (Bojórquez, 2006):

- Vibración debida a la falta de alineamiento (maquinaria rotativa)
- Vibración debida a la excentricidad (maquinaria rotativa).
- Vibración debida a la falla de rodamientos y cojinetes.
- Vibración debida a problemas de engranajes y correas de transmisión.

### NATURALEZA DE LA VIBRACION

El movimiento de una masa desde una posición neutral, hacia la cima de un viaje, vuelve la posición neutral, hacia el límite inferior y después retorna a la posición neutral, representa uno de los ciclos de movimiento. Este es uno de los ciclos de movimientos que contiene toda la información necesaria para medir la vibración de este sistema. El movimiento continuo de la masa simplemente repite el ciclo.

Este movimiento es llamado periódico y armónico, y la relación entre el desplazamiento de la masa y el tiempo está expresado en la forma de una ecuación senoidal:

$$X = X_0 \sin \omega t$$

$X$  = desplazamiento en cualquier instante  $t$

$X_0$  = desplazamiento máximo

$$\omega = 2\pi f$$

$f$  = frecuencia (cycles/s – hertz - Hz)

$t$  = tiempo (segundos)

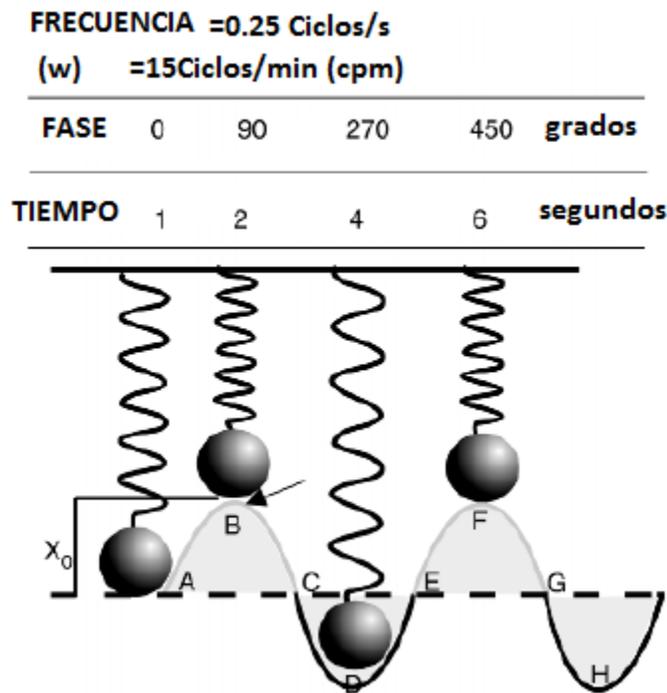


Figura 3: Onda Armónica Simple

Como la masa viaja hacia arriba y abajo, la velocidad de la cambios de viaje cambien de cero a un máximo. La velocidad puede ser obtenida por la diferenciación del tiempo en la ecuación de desplazamiento:

$$Velocidad = \frac{dX}{dt} = X_0 \omega \cos \omega t$$

Similarmente la aceleración de la masa también puede ser obtenida por la diferenciación de la ecuación de velocidad:

$$aceleracion = \frac{d(velocidad)}{dt} = -X_o \omega^2 \sin \omega t$$

En la figura inferior el desplazamiento es mostrado como una curva; velocidad, como una curva de coseno; la aceleración también es mostrada como una curva seno.

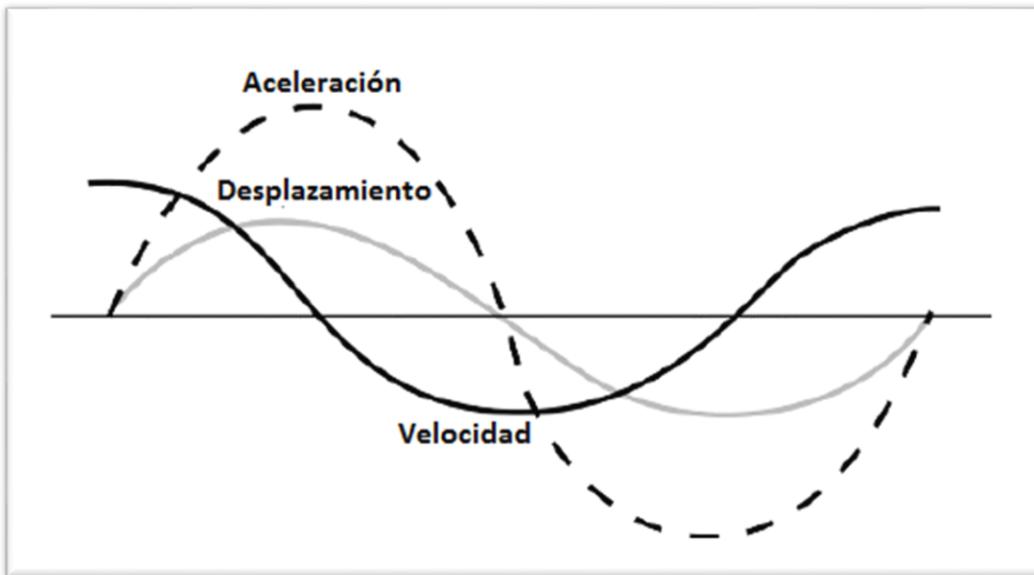


Figura 4: Armonico de desplazamiento, velocidad y aceleración de una onda

### Severidad de vibración

La severidad de vibración indica la gravedad que puede tener un defecto. La amplitud de la vibración expresa la gravedad del problema, pero es difícil establecer valores límites de la vibración que detecten un fallo. La finalidad del análisis de vibraciones es encontrar un aviso con suficiente tiempo para poder analizar causas y forma de resolver el problema ocasionando el paro mínimo posible en la máquina. Una vez obtenido un histórico de datos para cada elemento de las máquinas que se estudian, el valor medio refleja la normalidad en su funcionamiento. Desviaciones continuas o excesivas indicarán un posible fallo que

será identificado después, teniendo en cuenta la frecuencia a la que se producen las mayores vibraciones (Torres, 2016).

## **Análisis de vibraciones**

Los principales intereses en estudiar cualquier estructura o sistema, es cuantificar sus desplazamientos y sus fuerzas internas. Para determinar desplazamientos se deben establecer marcos de referencia para poder medirlos. Sin embargo, antes de iniciar el análisis, es necesario crear un modelo matemático del sistema que pueda ser muy simple y fácil de analizar, pero que proporcione información precisa. Inversamente, este puede ser un modelo complejo que requiere de herramientas informáticas, sin embargo que también proporcionara información precisa (Castañeda, 2014).

## **Caracterización de las vibraciones en maquinarias**

El estudio de las vibraciones esta relacionado con el comportamiento oscilatorio de los cuerpos, teniendo en cuenta que la mayoría de las maquinarias y estructuras experimentan vibraciones en mayor o menor grado, por lo cual estas se deberán tener en cuenta al abordar los cálculos de diseño y comprobación así como en los controles periódicos del estado técnico de las mismas (Palomino, 1997).

El movimiento físico de una maquina rotatoria se interpreta como una vibración cuyas frecuencias y amplitudes tienen que ser cuantificadas a través de un dispositivo que convierta éstas en un producto que pueda ser medido y analizado posteriormente. Así, la frecuencia describirá ¿qué esta mal? En la máquina y la

amplitud ¿cuán severo? Es el problema. Las vibraciones pueden ser de naturaleza armónica, periódica o aleatoria.

### **Vibración armónica**

Constituye la forma más simple de oscilación. Caracterizada por una senoide, puede ser generada en sistemas lineales debido a la presencia de algún problema potencial, un desbalance por ejemplo. Este movimiento puede ser estudiado a través de un vector rotatorio con velocidad angular constante a partir de la cual se define la frecuencia de oscilación expresada en Hz, a diferencia de la frecuencia angular que se expresa en l/s (Palomino, 1997).

### **Vibración periódica**

Es un movimiento que se repite periódicamente. Por ejemplo, un problema en una transmisión dentada puede producir una vibración que aunque no es armónica es periódica (Palomino, 1997).

### **Vibración aleatoria**

Ocurre en forma errática y tiene contenidos de frecuencias en toda la banda de frecuencias analizada. Esto quiere decir que las vibraciones aleatorias producirán un espectro continuo o lo que es lo mismo, el espectro estará constituido por infinitas vibraciones armónicas, cada una caracterizada por amplitud, frecuencia y fase respectivamente (Palomino, 1997).

### **Máquinas rotativas**

Las máquinas rotativas son un grupo de mecanismos diseñados para cumplir una función específica (ej. reductores, bombas, agitadores, etc.). Así, todas las máquinas se componen de una parte generadora de movimiento (motor, biela), y otra parte que se encarga de llevar la energía a todos los mecanismos que la conforman (eje). Principalmente este último, es quien rige el funcionamiento y es la pieza principal, ya que este componente determina la velocidad de giro de la máquina y es el encargado de transmitir las vibraciones a todos los mecanismos presentes como elementos rodantes o rodamientos, ruedas dentadas, acoples y soportes. La velocidad del eje de giro de la máquina, en términos de frecuencia, significa la frecuencia fundamental del sistema y cada mecanismo que forma parte de ella contribuye con una onda sinusoidal cuya frecuencia resulta ser un armónico de la frecuencia fundamental (Prieto, 2017).

### **Fallo de máquinas rotativas**

Para detectar un tipo de fallo en específico se evalúa cada uno de los armónicos presentes en el espectro y estima su relación con la condición general de la máquina. Los armónicos que se encuentran en el espectro de vibración son múltiplos de la frecuencia de giro de la máquina y de acuerdo a la amplitud de uno o varios armónicos de esta, se clasifican varios tipos de fallos (Prieto, 2017).

### **Desequilibrio**

El desequilibrio existe en toda máquina rotativa. Se dice que una pieza se encuentra desequilibrada cuando su centro de masa (centro de gravedad) no coincide con su centro geométrico, es decir cuando no coincide el eje de rotación y el eje longitudinal principal de inercia del rotor. Este eje, une todos los centros de

gravidad de cada una de las infinitas secciones transversales que componen al rotor, que al no coincidir con el eje de rotación podrán inducir varios tipos de desbalances (Prieto, 2017).

## **Desalineamiento**

El desalineamiento constituye la razón de aproximadamente el 50% de los problemas de vibraciones que se presentan en la industria. La desalineación se genera cuando dos ejes conectados mediante un acoplamiento no se encuentran perfectamente colineales uno con respecto al otro. El desalineamiento también puede existir entre los cojinetes de un eje sólido o entre cualquier otro par de puntos de la máquina. Las máquinas industriales antiguas no tenían problemas excesivos de desalineamiento ya que operaban a velocidades y potencias bajas. Sin embargo, debido a mayores exigencias en las máquinas con el paso del tiempo, hoy en día se tiene un requerimiento mayor para mejorar el alineamiento (Prieto, 2017).

Existen tres tipos de desalineamiento:

- Paralelo, se define como el caso en que los dos ejes están separados paralelamente.
- Angular, ocurre cuando los dos ejes forman un ángulo entre sí a partir del centro de giro.
- Combinado, cuando los dos ejes están separados entre sí y adicionalmente forman un ángulo.

## **Eje doblado**

El doblamiento del rotor o del eje representa otro de los principales problemas de vibración. En un ensamble del rotor horizontal, el eje presenta un cierto grado de flexión, debido a la influencia del propio peso, o debido a efectos térmicos. Los problemas de un eje doblado causan una alta vibración en la dirección axial.

El problema de torcedura del eje se asimila a un problema de desbalanceo, debido al predominio de la frecuencia. Por lo tanto, es importante estar seguros que el problema que se genera es torcedura por lo que se requiere realizar pruebas complementarias (Prieto, 2017).

## **Resonancia**

La resonancia ocurre cuando coinciden dos frecuencias, como puede ser la frecuencia de giro de la máquina, o una frecuencia forzada, con la frecuencia natural del sistema dando origen a amplitudes de la vibración grandes. Normalmente la frecuencia de resonancia la genera la velocidad de giro de la máquina, cuando coincide con la frecuencia natural de la base, o de la cimentación, recibe el nombre de resonancia estructural. La mayoría de los problemas de resonancia en máquinas correctamente diseñadas son el resultado de la resonancia de elementos no rotatorios como pedestales, estructuras portantes, pisos, tuberías, vigas, columnas, cubiertas protectoras, etc.

Una forma simple de evitar una condición de resonancia es cambiando la velocidad de operación de la máquina, o cambiando la frecuencia natural del sistema o componente. El aumento de la rigidez eleva la frecuencia natural, y el aumento de masa disminuye la frecuencia natural (Prieto, 2017).

### **Falta de apriete en elementos de unión**

Las diferentes formas de manifestarse la falta de apriete en elementos de unión tiene lugar como resultado del deterioro de la condición de ensamblaje de los elementos mecánicos que han excedido las tolerancias de holgura o sencillamente se han aflojado debido a la dinámica de la operación de la máquina. La vibración que caracteriza, en general, a la falta de apriete en elementos de unión, la produce las fuerzas de excitación generadas por otros problemas tales como el desbalance, desalineamiento, excentricidad, problemas en los rodamientos, entre otros (Prieto, 2017).

### **Roce del rotor**

Cuando las partes que giran de una máquina entran en contacto con las partes estacionarias se produce un efecto de fricción. Este tipo de fallo produce un espectro similar al de la soltura mecánica, sin embargo cuando se produce el roce de un elemento rotativo de la máquina, predominará la frecuencia ya que el mismo roce produce un desbalanceo (Prieto, 2017).

### **Procesamiento digital de señales de vibración**

El procesamiento digital de la señal de vibración, para diagnóstico de fallos, puede ser abordado a partir de dos contextos: tradicional y académico e investigativo. La diferencia entre ambos depende no solo de la posición geográfica sino también de los equipos e instrumentación disponible. Por ejemplo, en países desarrollados, con alto nivel de tecnología, se encuentran sistemas de monitoreo de condición complejos, que contienen un alto grado de eficiencia y tienden a realizar un diagnóstico automático. Contrario sucede en países en vía de desarrollo, como Colombia, donde se emplea un análisis con base en sistemas simples, que tienen

una capacidad de diagnóstico muy limitada porque solamente proveen una gráfica (ya sea en el dominio del tiempo o la frecuencia), de donde un especialista infiere el estado de la máquina. Por cuanto, el diagnóstico es netamente subjetivo a la experiencia de esta persona (Cardona, 2011).

### **Análisis tradicional**

Este tipo de análisis se caracteriza principalmente porque depende de los conocimientos de un especialista y, por ende, el diagnóstico es subjetivo porque el acierto está supeditado en un alto porcentaje, a la capacidad del especialista para interpretar las señales de vibración obtenidas y la agudeza de los sentidos (oído, tacto, visión) que este posea, cuando se encuentra en contacto con la máquina, dado que la maquina manifiesta síntomas de su estado, desde toda perspectiva. De esta forma, es posible decir que la identificación de una falla puede estar asociada a un sonido, calentamiento y movimiento particulares de la máquina, incluyendo su modo de vibración correspondiente. Desde el punto de vista de señales de vibración, el análisis tradicional se basa en el análisis de la señal en el dominio del tiempo y la frecuencia, siendo este último el más relevante, debido a la naturaleza de la señal misma, es decir, por ser la señal de vibración una suma de sinusoides con distintas frecuencias y amplitudes (Cardona, 2011).

### **Análisis académico e investigativo**

Este análisis comprende todo el proceso de reconocimiento y clasificación de patrones en las señales de vibración, y es dividido en varias etapas de acuerdo a la teoría de aprendizaje de máquina: espacio de representación, estimación de características, extracción de características relevantes y clasificación. El resultado final del sistema de diagnóstico automático depende del funcionamiento secuencial y coordinado de todas las etapas, en otras palabras, si el conjunto de

características no representa las propiedades intrínsecas de la señal ni genera buena separabilidad, los resultados de la clasificación no serán correctos (Cardona, 2011).

## Tiempo-Frecuencia

Una representación TF consiste en una superficie tridimensional cuyos ejes son el tiempo y la frecuencia, y en la que cada par t-f se dispone de un valor de amplitud al que se le puede llamar energía del punto, pero sin que ello implique que su significado sea el clásico, ya que en muchos casos los valores de amplitud obtenidos no se corresponden con la definición teórica de energía, pero sirve para conocer la forma de la señal en el plano TF y obtener el valor de la concentración de intensidad en cada punto de la distribución global para apreciar la evolución de dicha amplitud tanto en el tiempo como en la frecuencia. Así se pueden aprovechar las características producidas por la concentración de la energía en dos dimensiones (tiempo y frecuencia) en vez de solo una (tiempo o frecuencia). Las transformaciones TF se distribuyen en paramétricas y no paramétricas. Paramétricas son las que utilizan la información de la señal junto con modelos de regresión para obtener el mapa 2D. No paramétricas son aquellas que realizan una transformación de la señal por tramos, mediante ventanas de selección (Cardona, 2011).

## Transformada de Fourier

Las vibraciones en el dominio del tiempo, son señales directas de la máquina, en estas señales se encuentra plasmada toda la información acerca del comportamiento de cada componente de la máquina. Pero hay un problema a la hora de realizar un diagnóstico: estas señales están cargadas de mucha

información en forma muy compleja, la cual comprende las señales características de cada componente de la máquina, por lo cual prácticamente queda imposible distinguir a simple vista sus comportamientos característicos. Existen otras formas para realizar un estudio de vibraciones, entre las cuales se encuentra mirar esta señal en el dominio de la frecuencia. Esta es la gráfica de Amplitud vs. Frecuencia y es conocida con el nombre de espectro.

Entonces lo que hace un analizador de espectros que trabaja con la transformada rápida de Fourier es capturar una señal desde una máquina, luego calcula todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y por último las muestra en forma individual en el eje X de la frecuencia (S.A, 2005).

### **Seguimiento de órdenes**

El seguimiento de orden order tracking - OT es una técnica de procesamiento de señales que permite obtener las características de los componentes espectrales que son armónicos de la velocidad del eje de referencia (llamado orden básico), y capturar las dinámicas de las señales de vibración medidas. Además, OT muestra un rendimiento adecuado en el análisis de señales de vibración no estacionarias, monitoreo de condición y diagnóstico de fallas. Esta técnica permite identificar la velocidad de giro de la máquina y los componentes de orden/espectrales, los cuales son fundamentales para determinar el estado de la máquina y los mecanismos que la conforman, durante regímenes de carga y velocidad variables (arranque y parada de la maquina). Las metodologías OT más usadas están basadas sobre enfoques convencionales como son la transformada de Gabor y estimación de la frecuencia instantánea basada en representaciones tiempo-frecuencia, donde la velocidad de referencia del eje no es requerida, permitiendo

analizar máquinas rotativas empleando una pequeña cantidad de sensores, o donde no es posible hacer la medición (Cardona, 2011).

## Mapas RPM

El procedimiento de análisis típico en el análisis de maquinaria giratoria consiste en realizar un arranque o parada de la máquina o del motor, durante el cual se registran las señales temporales o se analizan en tiempo real. Una carrera es cuando la velocidad de rotación de la máquina o el motor se incrementa de un RPM bajo a un RPM alto, por ejemplo de 800 a 5500 RPM de un motor de automóvil. En algunas máquinas, como por ejemplo los generadores eléctricos, no se pueden barrer con facilidad las RPM, debiéndose en la mayoría de los casos a que esas máquinas están diseñadas para operar a una RPM constante (relacionada con la frecuencia de la línea eléctrica). En tales casos, es común apagar el accionamiento de la máquina y medir las vibraciones durante la parada de la máquina. Otro ejemplo en el que a menudo se miden las RPM durante la parada, es en el análisis de la caja de cambios (Prieto, 2017).

## Generación de Energía Eléctrica

La producción de la energía eléctrica trata de la transformación de algún tipo de energía como mecánica o hidráulica, por medio del movimiento relativo entre los conductores y el campo de un generador, siguiendo el principio de Faraday (Sanaguano, 2016).

Existe gran variedad de fuentes para la producción de energía eléctrica siendo estas convencionales o no convencionales.

## **Fuentes de energía eléctrica**

### **Fuentes de energías convencionales**

Son las fuentes de energía comúnmente utilizadas principalmente la energía hidráulica y térmica. Nuestro país posee un importante recurso hídrico el cual es aprovechado y siendo esta la más utilizada para la producción de la energía eléctrica (Sanaguano, 2016).

### **Fuentes de energías no convencionales**

Son las fuentes de energía que por su alto costo de instalación no son comúnmente utilizadas a pesar que son energías limpias para el medio ambiente, dentro de este tipo de fuentes de energías existen:

- Energía Eólica
- Energía Solar
- Energía Geotérmica
- Energía Mareomotriz
- Biomasa

### **Centrales de generación eléctrica**

Son instalaciones previamente diseñadas para la producción de energía eléctrica, la disposición del área de una instalación depende del tipo de central y la capacidad de generación, existen centrales de generación eléctrica en el mundo con energías convencionales y no convencionales (Sanaguano, 2016).

### **Central de generación hidroeléctrica**

El recurso renovable utilizado para este tipo de centrales es el agua de los ríos, aprovechando su energía potencial y cinética para transformarlas en energía eléctrica. Comúnmente se construye una presa la cual se encarga de contener y almacenar el agua proveniente de los ríos en un embalse y posteriormente dirigirla a la sala de máquinas donde se encuentran las turbinas de los generadores (Sanaguano, 2016).

**En la central hidroeléctrica se pueden distinguir tres unidades:**

- **Unidad de generación**

La unidad de generación esta generalmente compuesta de una tubería que transporta el agua hacia la turbina, en la cual se produce la primera transformación de la energía potencial del agua en energía mecánica. El elemento básico de la turbina es el rotor, que cuenta con palas, hélices, o cuchillas colocados alrededor de su circunferencia, de tal forma que el fluido en movimiento provoca una fuerza tangencial que impulsa la rueda y la hace girar. La energía mecánica se transfiere a través de un eje para proporcionar el movimiento del rotor del generador que gira dentro de un estator fijo. El eje de la turbina en su parte superior, tiene instalado el rotor que gira en el interior del estator fijo, girando el rotor con los electroimanes se inducen corrientes en los circuitos del estator y con ello se efectúa una segunda transformación, de energía mecánica a energía eléctrica (Ramón, 2015).

- **Unidad de transformación**

La unidad de transformación son máquinas eléctricas estáticas, cuya función es la de cambiar los parámetros de la energía eléctrica. Es decir, permite transmitir energía eléctrica desde un sistema con una tensión dada a otro sistema con una determinada tensión deseada (Ramón, 2015).

**Arrollamiento primario:** Es al que se le aplicará la tensión que va a ser reducida o ampliada, dicho arrollamiento generará un campo magnético que inducirá una corriente eléctrica en el secundario.

**Arrollamiento secundario:** Hace referencia al bobinado que se verá inducido por el campo magnético producido por el arrollamiento primario, pudiendo adoptar de esta forma una corriente eléctrica cuando se cierra el circuito a través de sus extremos.

**Núcleo:** Es un armazón hecho de un metal ferroso y es por donde circulan las líneas de flujo magnético que produce el bobinado primario.

- **Unidad de salida de línea**

## **Turbinas hidrocinéticas**

Este tipo de máquinas hidráulicas extraen energía cinética de corrientes de agua en los océanos o ríos; trabajan con principios de operación similares a las turbinas de viento; la energía cinética de la corriente de agua se convierte en energía mecánica que produce la rotación de un generador, el cual a su vez produce la

electricidad (Sánchez, 2016). Su capacidad de capturar energía cinética del flujo de agua las hace útiles para ser aplicadas como alternativa a las turbinas convencionales, dado que se utilizan en lugares con cabeza ultra baja. Los sistemas de turbinas cinéticas, utilizan la vía natural de las corrientes de agua, evitando la intervención en aspectos como en el desvío de agua a través de canales en los lechos de los ríos o la necesidad de tuberías.

### **Clasificación de turbinas hidrocinéticas**

Para realizar la clasificación de las turbinas cinéticas, se analiza primordialmente la estructura de la misma y la técnica que usa para aprovechar la corriente hídrica. Al comparar el eje del rotor con respecto al flujo del agua, se clasifican en Turbinas de Eje Horizontal, Turbinas de Eje Vertical y Turbinas de flujo cruzado (Sánchez, 2016).

### **Eje horizontal**

La aplicación de este tipo de turbina se presenta con mayor frecuencia en convertidores que utilizan las corrientes oceánicas para la generación. Desde el punto de vista conceptual y de diseño, son similares a las turbinas de generación eólica.

El eje del rotor en este caso es paralelo a la corriente de agua las cuales a su vez se clasifican dependiendo de la velocidad que genera el mayor o menor número de álabes (rápidas de máximo 3 álabes o lentas de máximo 24 álabes). La estructura puede estar abierta o canalizada. Para este tipo de turbina, los

conductos tienen generalmente forma cónica condicionando el montaje para operación bajo flujo unidireccional (Sánchez, 2016).

### **Flujo cruzado**

Son turbinas con el eje perpendicular a la corriente de agua y paralelo a la superficie (Sánchez, 2016). Está constituida por un rotor que se asemeja a un tambor, con una sección rectangular de boquilla alongada que es usada para dar dirección a la corriente del agua contra las paletas, las cuales se curvan de forma cilíndrica.

Este tipo de turbinas tiene mejor aplicación en flujos largos de agua y cabezas bajas, por cuanto permiten que el agua fluya en una primera etapa, hacia el interior de las cuchillas y en una segunda cruzando de adentro hacia afuera. La variación del flujo entre las dos etapas, genera pérdidas significativas de choque, razón por la cual este tipo de turbina es menos eficiente que las convencionales.

### **Eje vertical**

Su eje de rotación es perpendicular a la dirección del agua, disposición que facilita la colocación de los demás mecanismos requeridos para la generación de energía (el generador, la caja de engranajes, cojinetes) sobre el nivel del agua. Tiene una mejor aplicación cuando la cabeza es baja en comparación con las de eje horizontal, por lo tanto, pueden ser económica para una amplia gama aplicaciones (Sánchez, 2016).

## **Vórtice Gravitacional**

En dinámica de fluidos, se define a un vórtice como el movimiento de un fluido a lo largo de un camino encorvado, caracterizado por el patrón de flujo curvo. Cuando el fluido fluye entre las líneas de flujo encorvadas, la fuerza centrífuga es aplicada, y es contra-balanceada por la fuerza de presión que actúa sobre la dirección radial (Loaiza, 2015).

## **Clasificación de los vórtices**

### **Vórtices forzados o libres**

Un vórtice forzado se define como aquel en el que un torque externo es requerido para rotar el fluido. En este tipo de vórtice, las partículas del fluido rotan con una velocidad angular constante. El ejemplo más común de vórtice forzado, es un cilindro vertical que contiene un líquido rotando sobre su eje central, con cierta velocidad angular (Loaiza, 2015).

Un vórtice libre es aquel en el que el fluido rota sin necesidad de una fuerza externa. El movimiento se puede deber a una rotación previamente impartida a las partículas del fluido, o, a alguna acción interna. Algunos ejemplos de vórtices libres son el flujo de un líquido alrededor de un quiebre encorvado, el remolino en un río, y el flujo de un líquido a través del fondo de un contenedor

### **Vórtices cilíndricos o espirales**

Un vórtice cilíndrico el fluido rota en círculos concéntricos, mientras que en un vórtice espiral el fluido se mueve en espiral hacia adentro o hacia afuera. El

movimiento de los vórtices espirales se obtiene combinando un vórtice cilíndrico con un movimiento radial (Loaiza, 2015).

### **Microcentrales basadas en vórtices gravitacionales**

El vórtice gravitacional hidráulico presenta las características de un compuesto o vórtice de Rankine, en el que el flujo próximo al núcleo se comporta como un sólido rígido, mientras el resto del flujo se comporta como un vórtice libre, generado por el flujo tangencial de la garganta del inductor de vórtice en contacto con la cámara cilíndrica estacionaria de vórtice (Loaiza, 2015).

### **Sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional**

El sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional aprovecha la energía cinética inherente a un vórtice inducido artificialmente.

El sistema de hidrogenación basado en vórtice gravitacional recuerda un poco a un caracol al revés. A través de una entrada grande, el agua ingresa tangencialmente a un recipiente redondo formando un poderoso vórtice, que encuentra su salida en la parte inferior central de la cuenca poco profunda (Rojas, 2013).

## Central hidroeléctrica gravitacional de vórtice

Es una innovadora solución para la generación de energía eléctrica diseñada por el ingeniero austriaco, Franz Zotlötere conocida como planta hidroeléctrica de gravedad con vórtice; su energía es proveniente del remolino del agua causado artificialmente, este tipo de centrales son convenientes a partir de un flujo de agua con pequeñas diferencias de altura y lugares con alta sensibilidad ecológica (Sanaguano, 2016).

Su funcionamiento se basa en un estanque redondo con un desagüe central, el flujo del agua que es transportado forma un vórtice estable con lo que mueve la turbina y genera energía eléctrica, a pesar de que esta central posee un rendimiento más bajo que las micro centrales hidroeléctricas convencionales su impacto ambiental es mucho más bajo debido a que los peces pueden transportarse libremente (Sanaguano, 2016).

### **1.1.1. Marco histórico**

Peña (2013) es difícil adjudicar a un solo personaje el descubrimiento de las vibraciones mecánicas debido a que estas emplean desde el ramo musical hasta el mecánico, de modo que hay un gran número de personajes los cuales hicieron su aportación hacia este estudio.

**Pitágoras (570-497 a.C)**, Desarrollo la teoría de números y la teoría de la música y de la armonía en donde afirmaba la relación entre estas dos ciencias se puso a experimentar, haciendo vibrar varias agujas del mismo espesor y misma tensión, pero de distinta longitud. De esta manera pudo concluir que las notas dependían de la frecuencia de vibración, esto mismo Pitágoras lo calculo y concluyo que la música era más que una relación matemática de las vibraciones medidas según intervalos.

**Aristóteles (374-355 a.C)**, Trabajo con las leyes de movimiento escribió el primer escrito relacionado con la acústica llamado On Acoustic.

**Galileo Galilei (1564-1642)**, Encontró la relación existente entre la longitud de cuerda de un péndulo y su frecuencia de oscilación, además encontró la relación entre la tensión, longitud y frecuencia de vibración de las cuerdas.

**Isaac Newton (1642-1727)**, En el campo de las vibraciones en el uso de las leyes de Newton forma un papel importante en el análisis de sistemas y de la determinación de frecuencia de oscilación. Público su teoría en principios matemáticos de la filosofía natural (1687), obra que marco un punto de inflexión en la historia de la ciencia, y con la que perdió el temor a publicar teorías.

**Joseph Fourier (1768-1830)**, Una de las sorprendentes aportaciones del trabajo Fourier fue que muchas de las funciones más conocidas podían expandirse en serie de senos y cosenos; de tal modo que esta aportación es una de las más interesantes e importantes en el campo de las vibraciones mecánicas ya que en base al algoritmo de la serie de Fourier trabajan los modernos analizadores de vibración.

En la era moderna, en donde los avances tecnológicos están a la puerta, grandes aportaciones matemáticas y métodos de análisis vinieron a resolver algunos problemas en el campo de las vibraciones mecánicas. Por ejemplo:

En 1909, **Frahm** propuso una forma de reducir las vibraciones mecánicas mediante la implementación de sistema agregado sistema masa-resorte.

**Stodola Aurel (1859-1943)**, Hizo aportaciones importantes relacionadas con las vibraciones de membranas, vigas y placas.

**Timoshenko (1872-1972)**, Realizo aportaciones importantes en la teoría de vibración en vigas.

Por otro lado, importantes aportaciones matemáticas ampliaron considerablemente el área de investigación del campo de las vibraciones mecánicas, por mencionar algunos, los métodos de Rayleigh que sirven para determinar las frecuencias de resonancia de algunos elementos basándose en ecuaciones de energía para posteriormente modelar y analizar su comportamiento como pudiera ser los modos de vibrar, ecuaciones estadísticas que facilitaron el estudio de vibraciones aleatorias.

Estos métodos modernos unidos a los avances tecnológicos, por ejemplo:

- Las computadoras
- Los PLC's
- Analizadores de vibración
- Software de monitoreo o mantenimiento

Hacen hoy en día de las vibraciones todo un campo de investigación tal que existen asociaciones, revistas, seminarios, cursos especializados, dedicado al estudio de este fenómeno

### **1.1.2. Marco legal**

#### **Norma ISO 10816**

ISO (1998) Establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas. El criterio general de evaluación se basa tanto en la monitorización operacional como en pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con objeto de garantizar un funcionamiento fiable de la máquina a largo plazo. Esta norma reemplaza a las ISO 2372 e ISO 3945, que han sido objeto de revisión técnica. Este estándar consta de cinco partes:

- Parte 1: Indicaciones generales.
- Parte 2: Turbinas de vapor y generadores que superen los 50 MW con velocidades típicas de trabajo de 1500, 1800, 3000 y 3600 RPM.
- Parte 3: Maquinaria industrial con potencia nominal por encima de 15 kW y velocidades entre 120 y 15000 RPM.
- Parte 4: Conjuntos movidos por turbinas de gas excluyendo las empleadas en aeronáutica. • Parte 5: Conjuntos de máquinas en plantas de hidrogenación y bombeo (únicamente disponible en inglés).

Las significativas diferencias en el diseño, tipos de descanso y estructuras soporte de la máquina, requieren una división en grupos (ISO, 1998). Las máquinas de estos grupos pueden tener eje horizontal, vertical o inclinado y además pueden estar montados en soportes rígidos o flexibles. Clasificación por grupos:

- Grupo 1: Máquinas rotatorias grandes con potencia superior 300 kW. Máquinas eléctricas con altura de eje  $H \geq 315$  mm.
- Grupo 2: Máquinas rotatorias medianas con potencia entre 15 y 300 kW. Máquinas eléctricas con altura de eje  $160 \leq H \leq 315$  mm.
- Grupo 3: Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor separado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 kW.
- Grupo 4: Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor integrado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 kW.

**NTC 2596 – Maquinas rotatorias. Vibraciones mecánicas de ciertas máquinas con altura en eje de 56 mm y superiores. Evaluación y límites de intensidad de vibración**

NTC-2596 (2009) La presente norma especifica los procedimientos de ensayo de aceptación de vibración en fabrica y los límites de vibración de algunas máquinas bajo condiciones especificadas, cuando están desacopladas de cualquier carga o motor primario. Se aplica a máquinas de c.c y c.a trifásicas, con alturas de eje de 56 mm y superiores y una potencia nominal hasta de 50 MW, a velocidades nominales desde  $120 \text{ Min}^{-1}$  hasta  $15\ 000 \text{ Min}^{-1}$  inclusive. Esta norma no es aplicable a máquinas montadas en el sitio, motores trifásicos con colectores, máquinas monofásicas, máquinas trifásicas que operan con sistemas monofásicos, generadores hidráulicos verticales, generadores a turbina mayores

de 20 MW y máquinas de rodamientos magnéticos, o máquinas de bobinados de excitación serie.

### **NTC 5436-1. Vibración mecánica y choque. Evaluación de la exposición de los seres humanos a la vibración en todo el cuerpo.**

NTC 5436-1 (2006) Esta norma define los métodos para la medición de la vibración en todo el cuerpo periódica, aleatoria y transitoria. Indica los factores principales que se combinan para determinar el grado en el cual es aceptable una exposición a la vibración. Los anexos informativos presentan la opinión actual y ofrecen información sobre los efectos posibles de la vibración en la salud, el confort y la percepción y el mareo. El intervalo de frecuencia considerado es:

- 0,5 Hz a 80 Hz para salud, confort y percepción, y
- 0,1 Hz a 0,5 Hz para mareo.

Aunque no se cubren los efectos potenciales en el desempeño humano, la mayor parte de la orientación sobre medición de la vibración en todo el cuerpo también se aplica a esta área. Esta norma define además los principios de métodos preferidos para montaje de transductores para determinar la exposición humana. No se aplica a la evaluación de choques únicos de magnitud extrema, como los que ocurren en accidentes en vehículos. Esta norma es aplicable a movimientos transmitidos al cuerpo humano como un todo a través de superficies de apoyo: los pies de una persona que está de pie, las nalgas, la espalda y los pies de una persona que está sentada o el área de apoyo de una persona recostada. Este tipo de vibración se encuentra en los vehículos, en la maquinaria, en los edificios y en las cercanías de maquinaria en funcionamiento.

## 2. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

Para poner en práctica la metodología de análisis de orden en máquinas rotativas, se resuelven 6 ejercicios, cuyo enfoque se base en la identificación de fallas leves, medias y altas y así poder establecer algunos factores diferenciadores con base en la implementación de este método.

### EJERCICIO 1:

El presente ejercicio es tomado del libro *Vibraciones de Máquinas Rotativas; Análisis de Órdenes de María del Rosario prieto*.

Se desea generar una señal simulada del arranque (run-up) de un motor que aumenta su velocidad de rotación de 540 RPM a 5400 RPM en 25 segundos, dicha señal debe tener:

- 1) Un armónico fundamental con los siguientes niveles de RMS de 1
- 2) Los dos primeros armónicos (orden 2 y 3), con niveles constantes de RMS de 0.5 y 0.25
- 3) Una resonancia a la frecuencia de 400 Hz, con un nivel de RMS constante de 0.6

### CÓDIGO DE MATLAB

```

%=====
%***** Ejercicio No: 1 *****
%=====
% Datos tomados del ejercicio planteado.
%=====
fs = 2000; % Frecuencia de muestreo
T = 25; % Duración de tiempo
f0 = 9; % Frecuencia inicial
f1 = 90; % Frecuencia final
fr = 400; % Frecuencia de resonancia
t = (0:1/fs:T); % Eje de tiempo
Sq2= sqrt(2); % Amplitud fundamental
x = Sq2*chirp(t,f0,t(end),f1); % Señal fundamental
tacho = x; % Señal de tacómetro
%=====
%Generación de muestras con base a una señal de barrido.
%=====
%se utiliza la función CHIRP para generar las muestras de cada orden
x = x+ 0.5 *Sq2*chirp(t,2*f0,t(end),2*f1); % Añade el orden 2
x = x+ 0.25*Sq2*chirp(t,3*f0,t(end),3*f1); % Añade el orden 3
x = x+ 0.6 *Sq2*chirp(t,fr,t(end),fr); % Añade la resonancia

```

```

t1 = (0:1/fs:1);
plot(t1,x(1:length(t1))); grid % Representación trozo de x
rpm = tachorpm(tacho,fs);
vib = x - mean(x); % se elimina la componente de continua de la señal
%=====
% Grafica de la velocidad de rotación del motor
%=====
subplot(2,1,1)
plot(t,rpm)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad del Motor (RPM)')
title('Velocidad de Motor')
%=====
%Grafica de la señal de vibración
%=====
subplot(2,1,2)
plot(t,vib) % Plot the vibration signal
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Voltaje (mV)')
title('Datos de Vibración del Acelerómetro')
%=====
%Generación y visualización del mapa RPM
%=====
rpmfreqmap(vib,fs,rpm) % RES=fs/128 Hz
rpmfreqmap(vib,fs,rpm,10) % RES=10 Hz
%=====
%Generación de un mapa de orden-rpm
%=====
rpmordermap(vib,fs,rpm,0.05) % RES=0.05 orden
[map,mapOrder,mapRPM,mapTime] = rpmordermap(vib,fs,rpm,0.05);
%=====
% Cálculo del espectro medio versus orden para una señal de vibración.
%=====
figure
orderspectrum(map,mapOrder)
[spec,specOrder] = orderspectrum(map,mapOrder);
%=====
%se encuentran los picos del vector de datos
%=====
[~,peakOrders] =findpeaks(spec,specOrder,'SortStr','descend','NPeaks',2);
peakOrders = round(peakOrders,3)
%=====
% se encuentra las amplitudes de los órdenes de pico como una
% función del tiempo
%=====
figure
ordertrack(map,mapOrder,mapRPM,mapTime,peakOrders)
  
```

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos una vez se ejecutó el código son los siguientes:

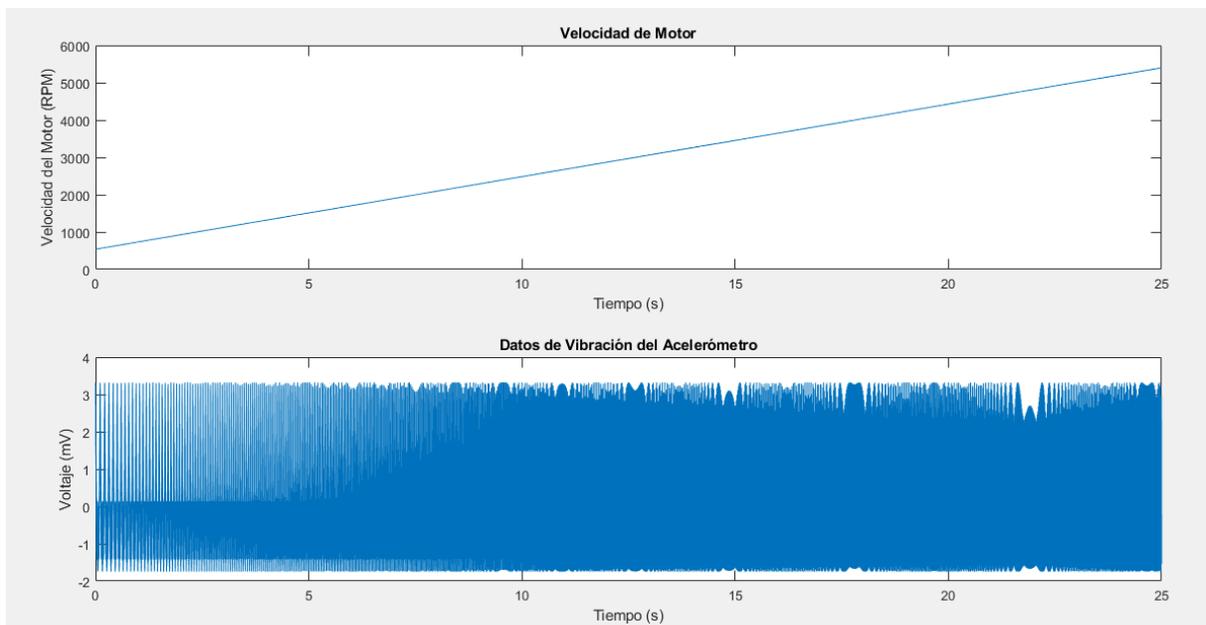


Figura 5: Velocidad del motor y datos del acelerómetro en función del tiempo

En la **figura 5** se logra evidenciar como la velocidad del motor en el arranque varía de forma lineal y como la amplitud del voltaje el cual representa los datos del acelerómetro varían en función del tiempo.

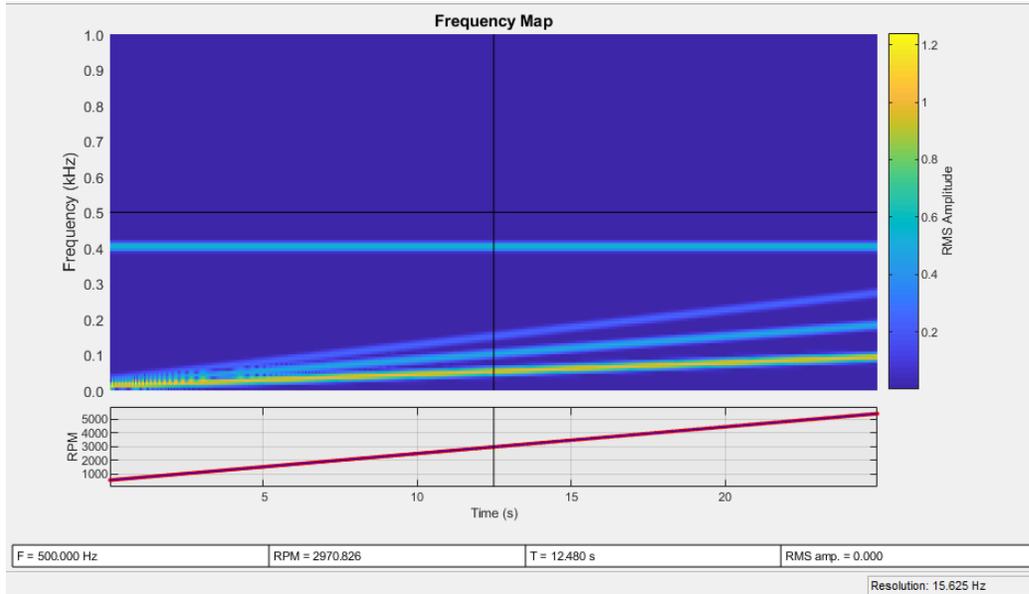


Figura 6: Mapa de frecuencia con resolución de 15.625 Hz

En la **figura 6** se puede evidenciar como las curvas de frecuencia aumentan su valor en función de la velocidad del motor.

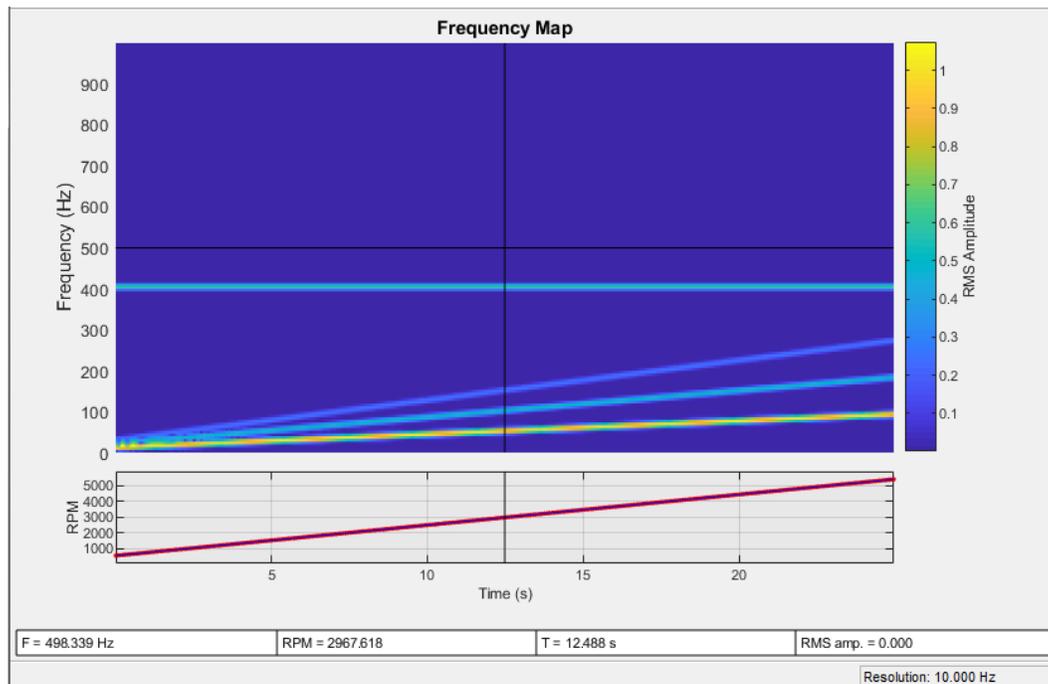


Figura 7: Mapa de frecuencia con resolución de 10 Hz

Como se logra apreciar en la **figura 7** que las curvas son más nítidas, esto se debe al uso de la función **rpmfrepmap** la cual opera a una resolución de 10 Hz, generando con ello eliminar el efecto de manchado que se logra observar en la figura previa.

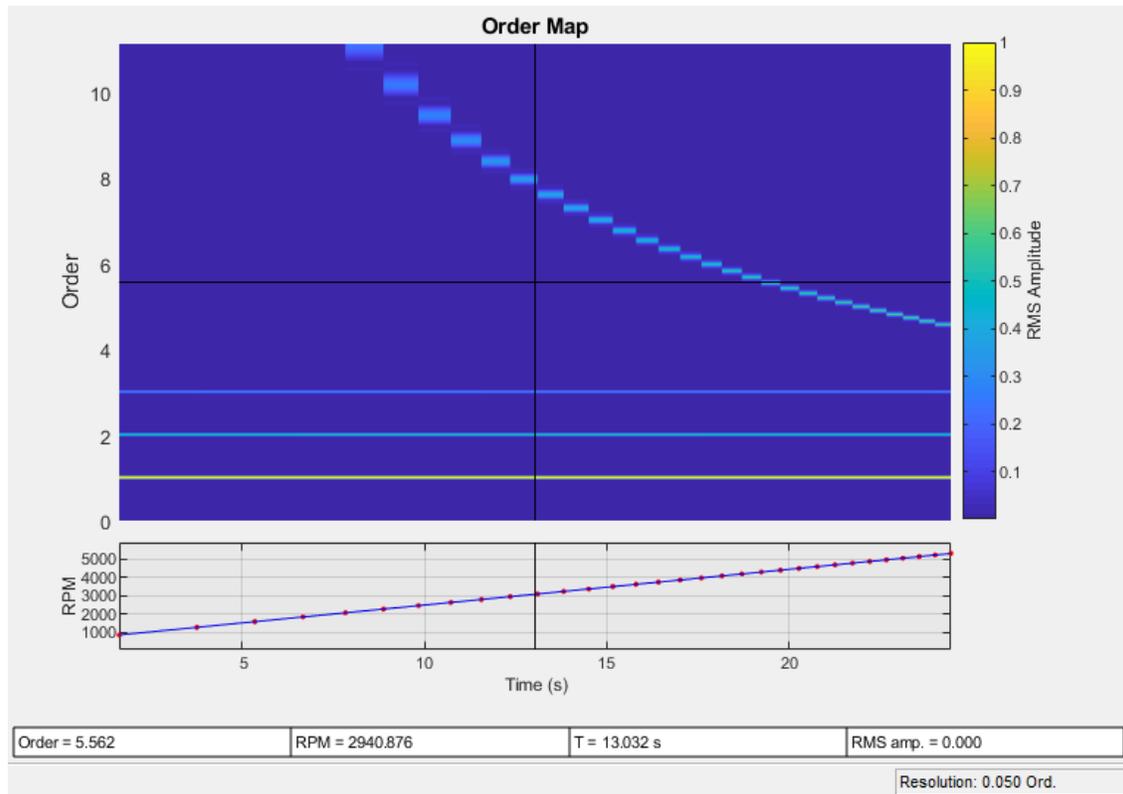


Figura 8: Mapa de órdenes con muestreo síncrono.

En la **figura 8** se puede apreciar como para cada orden se representa una curva recta en el mapa, indicando así que la vibración ocurre a un múltiplo fijo de la velocidad de rotación del motor.

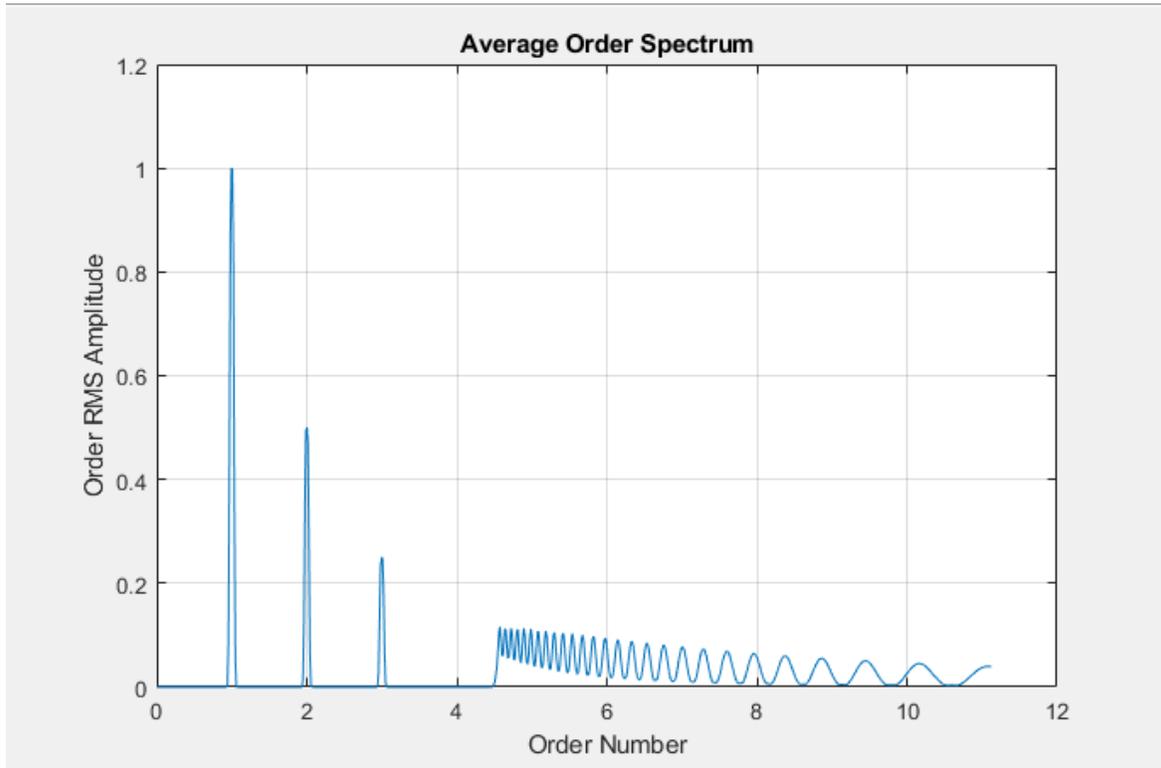


Figura 9: Amplitud RMS media de cada orden.

En la **figura 9** se puede observar los picos correspondientes a la amplitud RMS de las órdenes.

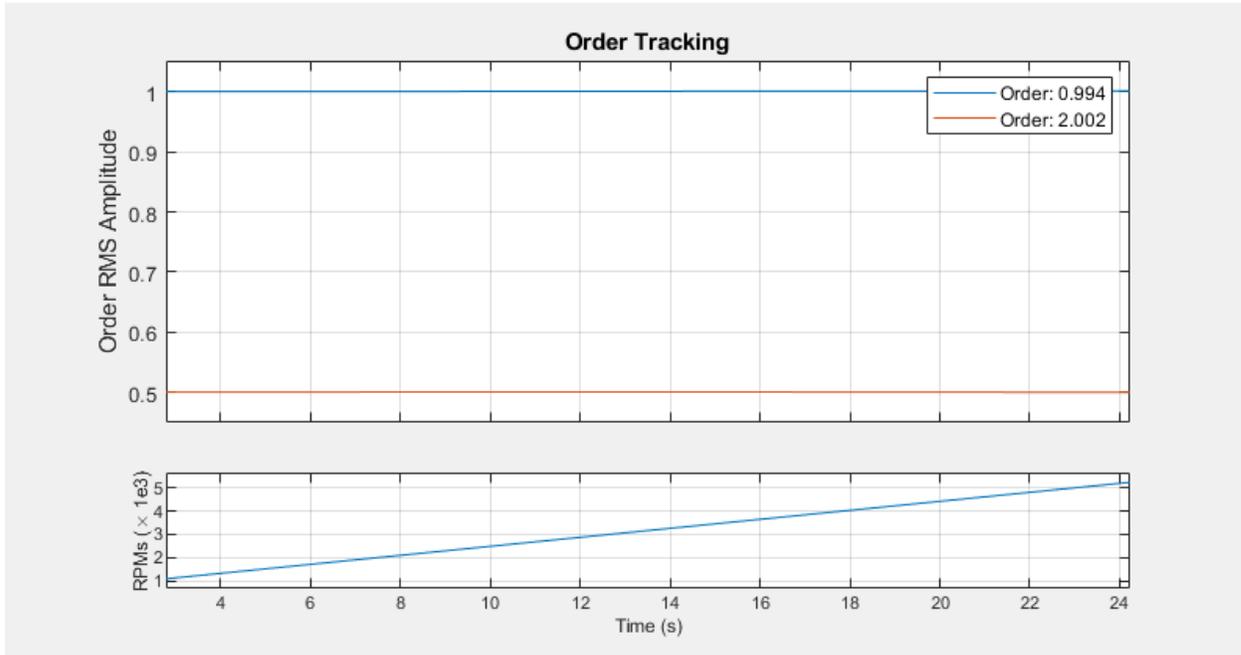


Figura 10: Mapa de seguimiento de órdenes, Order Tracking

## EJERCICIO 2:

El ejercicio que se muestra a continuación es tomado del tema **Order Analysis of a Vibration Signal** que ofrece Matlab para la explicación de dicho tema. En el ejercicio se investiga la procedencia de una fuente de vibración no deseada.

En este ejemplo se analizan los datos de una señal simulada tomados con un acelerómetro desde la cabina de un helicóptero durante en arranque y descenso del motor principal. subida y bajada del motor principal. Un helicóptero tiene varios componentes giratorios, incluyendo el motor, la caja de engranajes y los rotores principales y de cola, ambos con cuatro palas. Cada componente gira a una velocidad fija conocida con respecto al motor principal, y cada uno puede contribuir a la vibración no deseada. La frecuencia de los componentes de vibración dominante se relacionará con la velocidad de rotación del motor para investigar la fuente de vibración de alta amplitud. Los componentes importantes de

la vibración de un rotor de helicóptero se pueden encontrar en múltiplos enteros de la frecuencia de rotación del rotor cuando la vibración es generada por las palas del rotor.

```

%=====
%***** Ejercicio No: 2 *****
%=====
% A través de la función helidata se logra cargar los siguientes datos:
% - rpm: velocidad angular de la turbina del motor
% - vib: señal de vibración, medida en voltios
% - t : vector de instantes de tiempo
% - fs : frecuencia de muestreo 500Hz.
% - mainRotorEngineRatio: relación entre la velocidad del rotor
% - principal y la velocidad del motor, 0.0129
% - tailRotorEngineRatio: relación entre la velocidad del rotor
%   de cola y la velocidad del motor, 0.0658
load helidata % función de carga de datos
% Analisis de ordenes
%=====
vib = vib - mean(vib); % se remueve la componente de la señal
%=====
%Grafica de la velocidad de rotación del motor
%=====
subplot(2,1,1)
plot(t,rpm) % Plot the engine rotational speed
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad del Motor (RPM)')
title('Velocidad del Motor')
%=====
%Grafica de la señal de vibracion
%=====
subplot(2,1,2)
plot(t,vib) % Plot the vibration signal
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Voltaje (mV)')
title('Datos de Vibración del Acelerometro')
%=====
% Generacion y visualizacion del mapa RPM
%=====
rpmfreqmap(vib,fs,rpm) % RES=fs/128 Hz
rpmfreqmap(vib,fs,rpm,1) % RES=1 Hz
rpmfreqmap(vib,fs,rpm,5) % RES=5 Hz
%=====
%Generación de un mapa de orden-rpm
%=====
rpmordermap(vib,fs,rpm,0.005) % RES=0.005 orden
[map,mapOrder,mapRPM,mapTime] = rpmordermap(vib,fs,rpm,0.005);
%=====
% Cálculo del espectro medio versus orden para una señal de vibración.

```

```

=====
figure
orderspectrum(map,mapOrder)
[spec,specOrder] = orderspectrum(map,mapOrder);
=====
%se encuentran los picos del vector de datos
=====
[~,peakOrders]
findpeaks(spec,specOrder,'SortStr','descend','NPeaks',2);
peakOrders = round(peakOrders,3)
% se encuentra las amplitudes de los órdenes de pico como una
% función del tiempo
=====
figure
ordertrack(map,mapOrder,mapRPM,mapTime,peakOrders)

```

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos al ejecutar el código son los siguientes:

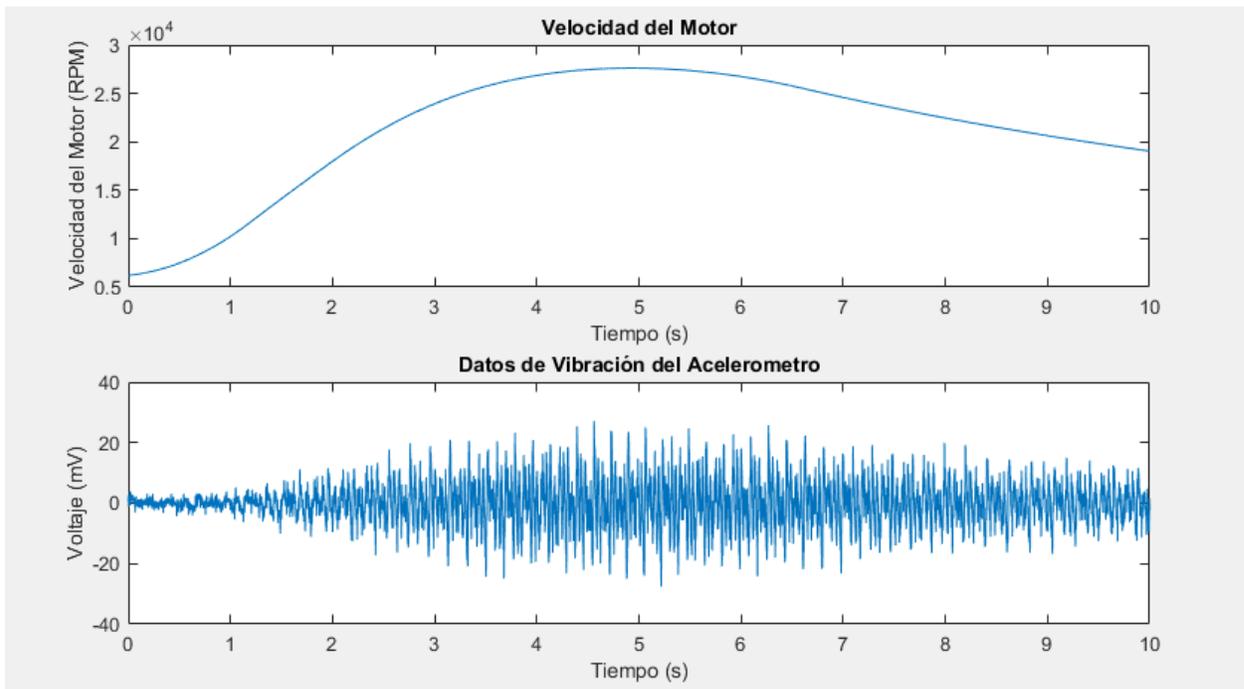


Figura 11: Velocidad del motor y datos del acelerómetro en función del tiempo

En la este caso la velocidad del motor que se muestra en la figura 1 es tomado de la función load\_helidata la cual incluye datos de\_velocidad en RPM y voltaje en funciones del tiempo.

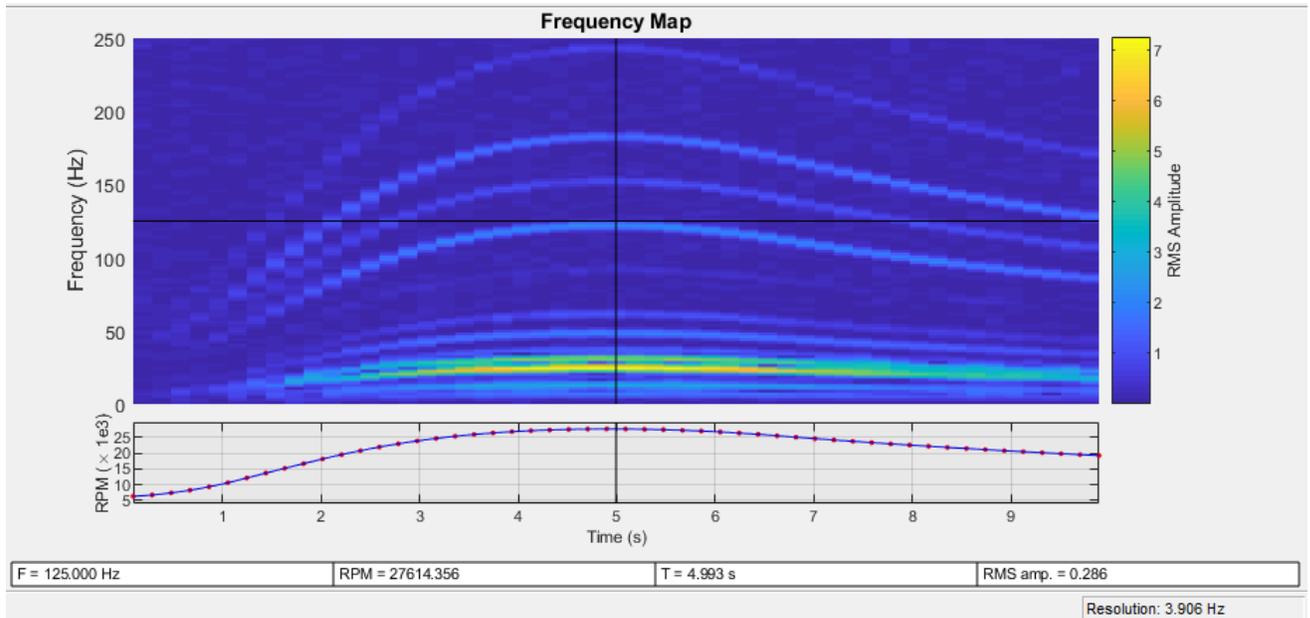


Figura 12 :Mapa de color con resolución en frecuencia 3.906 Hz

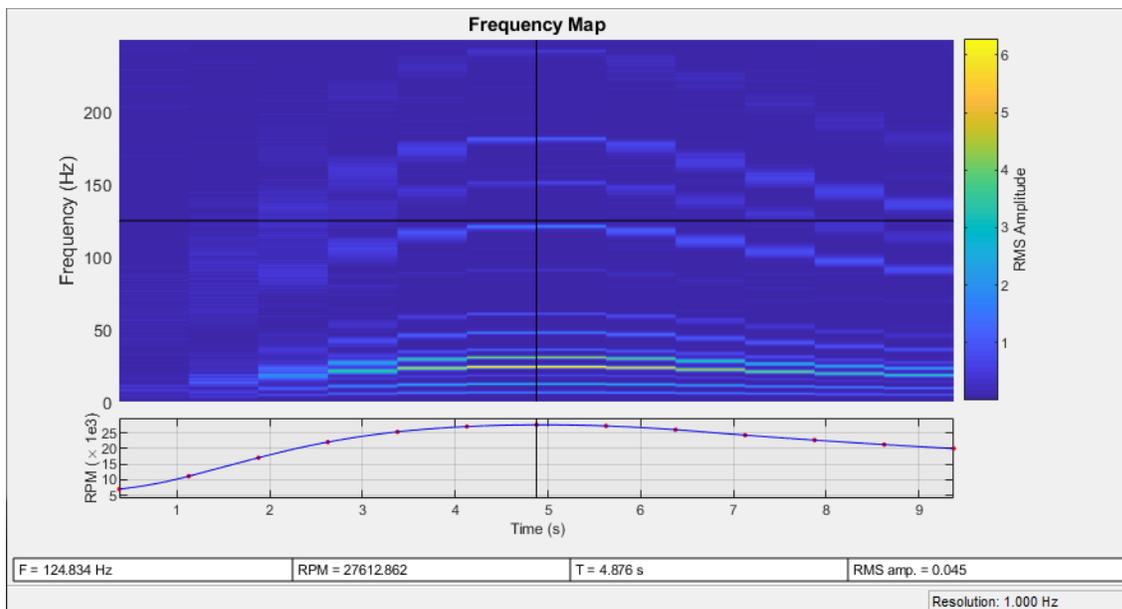


Figura 13:Mapa de color con resolución en frecuencia 1 Hz

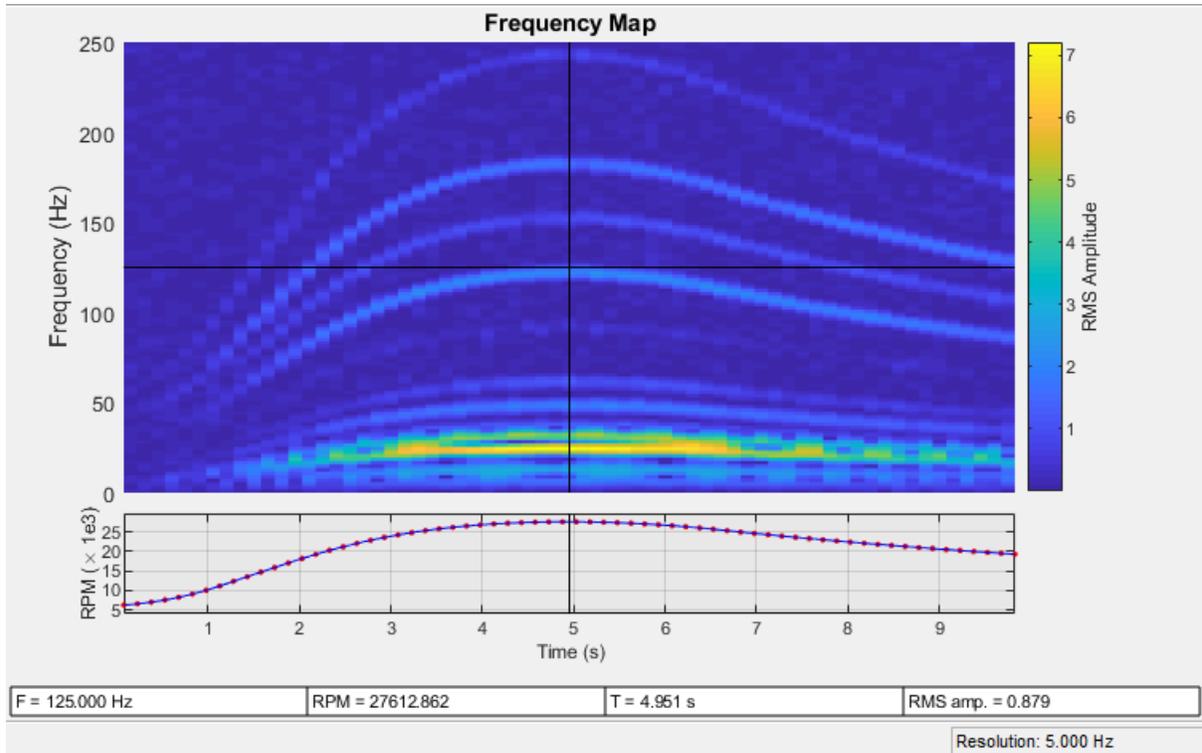


Figura 14: Diagrama de cascada con resolución de frecuencia 5Hz

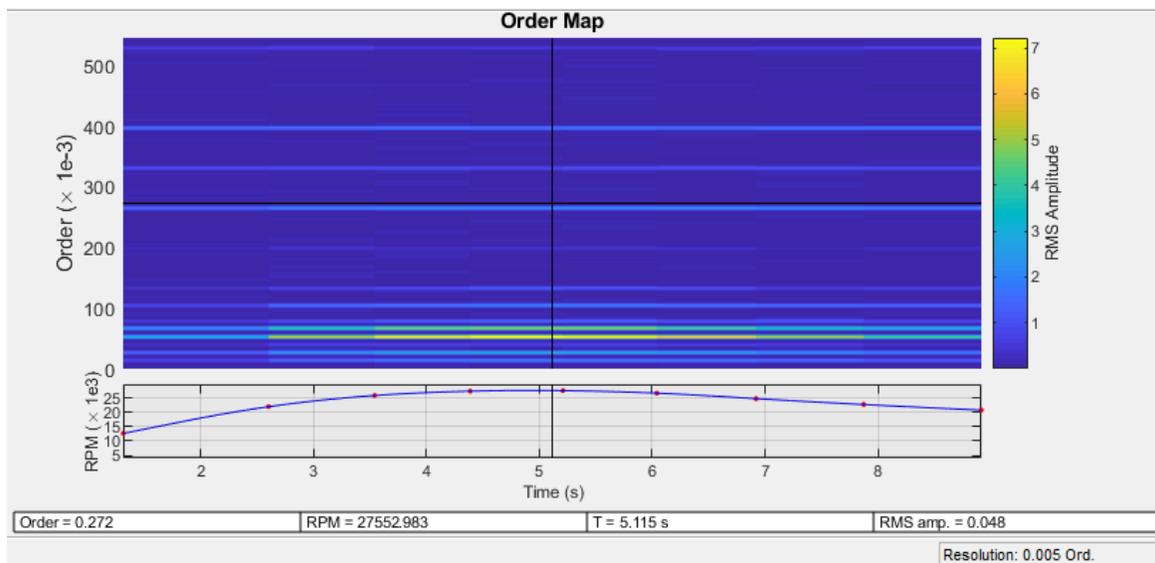


Figura 15: Mapa de ordenas con remuestreo sincrónico

### EJERCICIOS 3, 4, 5 y 6:

Los ejemplos presentados a continuación se basan en la aplicación del método de análisis de órdenes a una serie de señales de vibraciones realizadas a rodamientos, tomados de la **Case Western Reserve University Bearing Data Center** los cuales se basan en analizar un rodamiento que presenta tres tipos de fallas los cuales son leve, media y alta. Para estos ejercicios usaremos una frecuencia de muestreo  $fs=48000\text{Hz}$  y una velocidad de rotación tomada de la función `tacho`.

#### Ejercicio 3: Sin Falla

Para este ejemplo se toma la señal de la carpeta [Normal\\_0](#) de la carpeta [Normal Baseline Data](#).

Al descargar la carpeta el archivo a cargar se llama **97.mat**

#### Código:

```
clc, clear all
%=====
%***** Ejercicio No: 1 *****
%=====
% Datos tomados del ejercicio planteado.
%=====
load ('97.mat')
data=X097_FE_time;
rpm=X097RPM;
fs=48000; % Frecuencia de muestreo
T = 25; % Duración de tiempo
x = data;
t = 0:length(x)-1;
t1 = (0:1/fs:1);
plot(t1,x(1:length(t1))); grid % Representación trozo de x
rpm = tachorpm(x, fs);
vib = x - mean(x); % se elimina la componente de continua de la señal
%=====
% Grafica de la velocidad de rotación del motor
%=====
subplot(2,1,1)
plot(t, rpm)
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Velocidad del Motor (RPM)')
title('Velocidad de Motor')
%=====
%Grafica de la señal de vibración
%=====
subplot(2,1,2)
plot(t,vib) % Plot the vibration signal
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Voltaje (mV)')
title('Datos de Vibración del Acelerómetro')
```

```
%=====
%Generación y visualización del mapa RPM
%=====
rpmfreqmap(vib,fs,rpm) % RES=fs/128 Hz
rpmfreqmap(vib,fs,rpm,10) % RES=10 Hz
%=====
%Generación de un mapa de orden-rpm
%=====
rpmordermap(vib,fs,rpm,0.05) % RES=0.05 orden
[map,mapOrder,mapRPM,mapTime] = rpmordermap(vib,fs,rpm,0.05);
%=====
% Cálculo del espectro medio versus orden para una señal de vibración.
%=====
figure
orderspectrum(map,mapOrder)
[spec,specOrder] = orderspectrum(map,mapOrder);
%=====
%se encuentran los picos del vector de datos
%=====
[~,peakOrders] =findpeaks(spec,specOrder,'SortStr','descend','NPeaks',2);
peakOrders = round(peakOrders,3)
%=====
% se encuentra las amplitudes de los órdenes de pico como una
% función del tiempo
%=====
figure
ordertrack(map,mapOrder,mapRPM,mapTime,peakOrders)
```

**RESULTADOS**

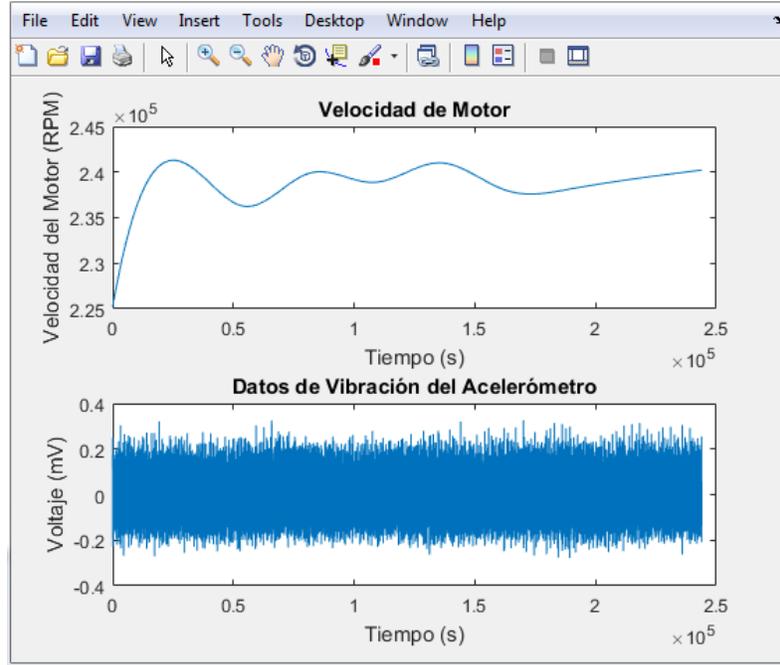


Figura 16: Velocidad del motor y datos del acelerómetro en función del tiempo

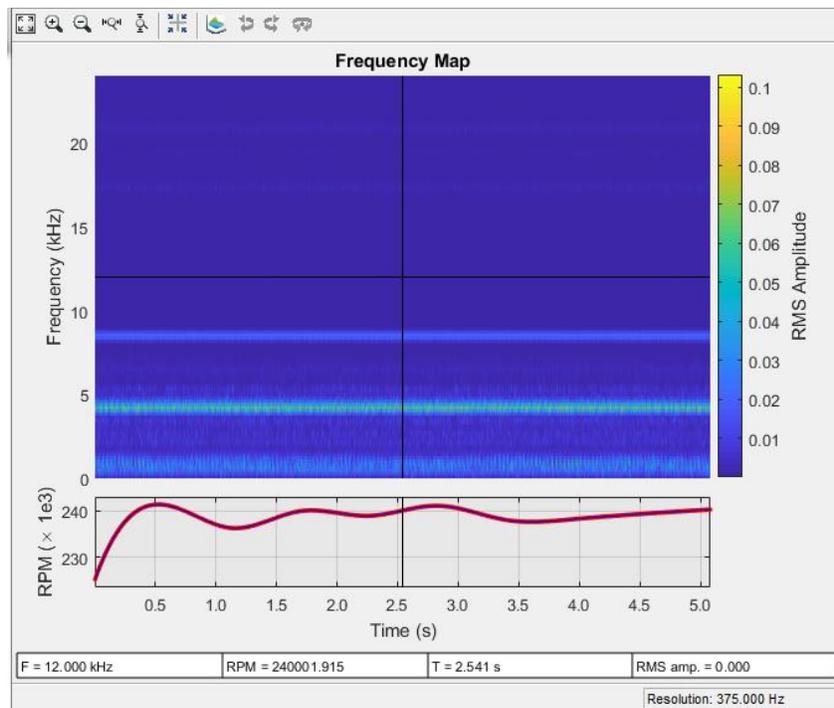


Figura 17: Mapa de frecuencia con resolución 15,625Hz

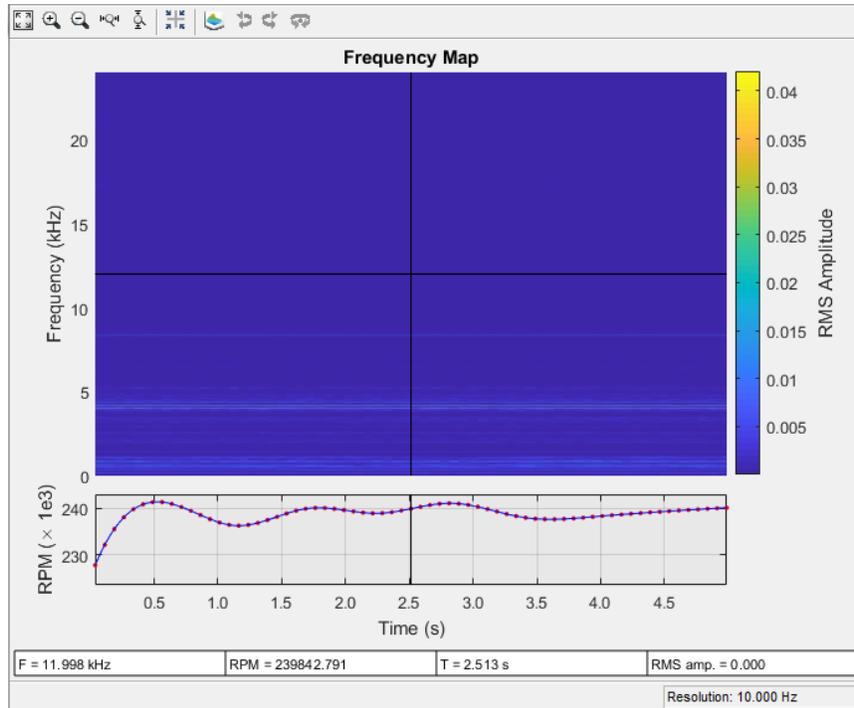


Figura 18: Mapa de frecuencia con resolución 10 Hz

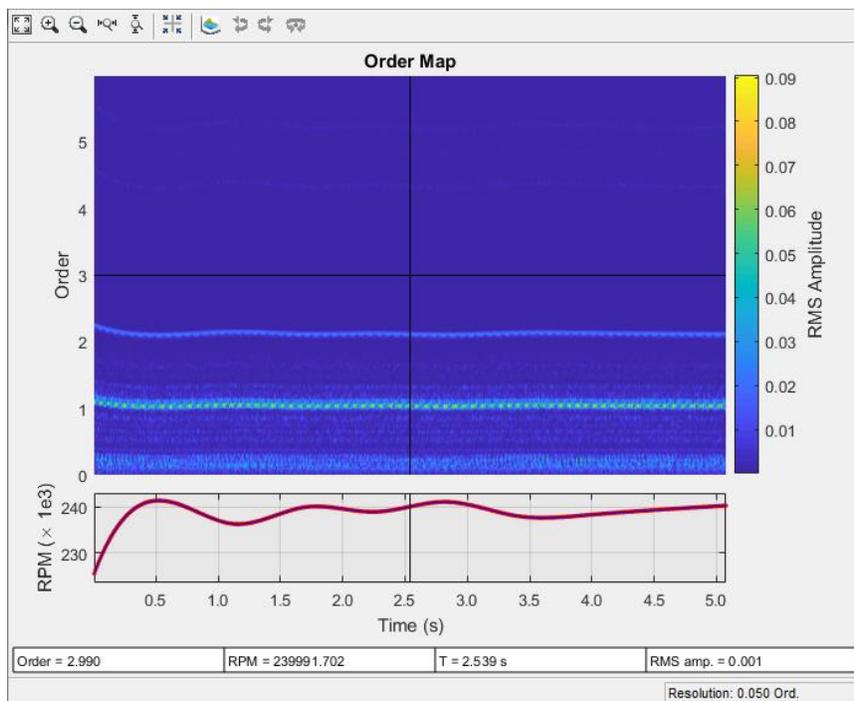


Figura 19: Mapa de órdenes con muestreo síncrono.



Figura 20: Amplitud RMS media de cada orden.

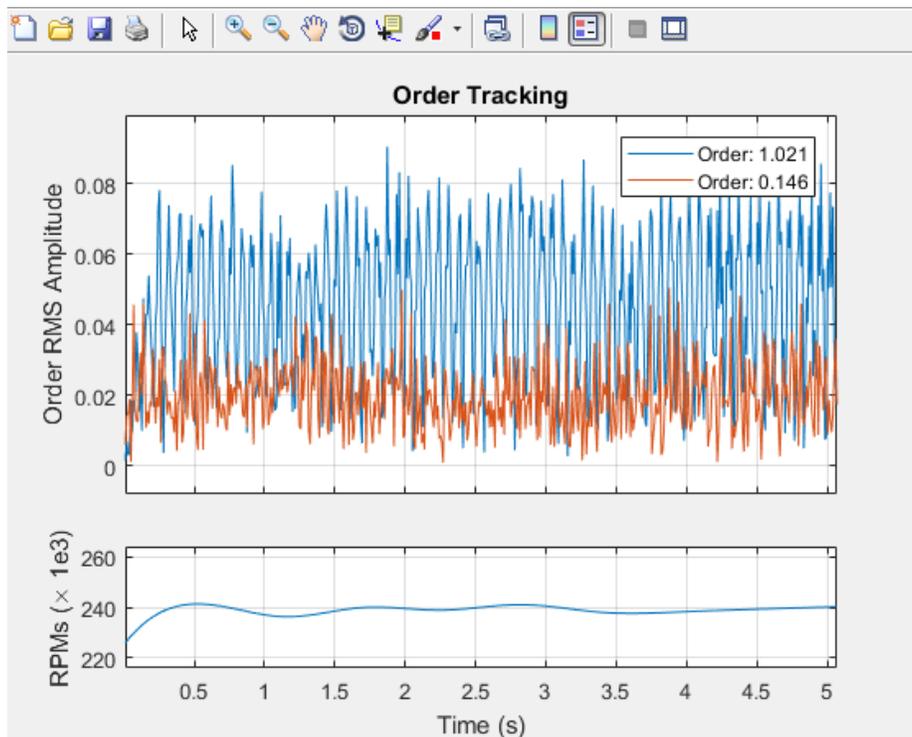


Figura 21: Mapa de seguimiento de órdenes, Order Tracking

#### Ejercicio 4: Falla Leve

Para este ejemplo se toma la señal [IR007\\_0](#) de la carpeta [48k Drive End Bearing Fault Data](#)

Al descargar la carpeta el archivo a cargar se llama **109.mat** se toman los mismos valores de velocidad y frecuencia de muestreo pero se cambian los datos al reemplazar la carpeta.

#### RESULTADOS

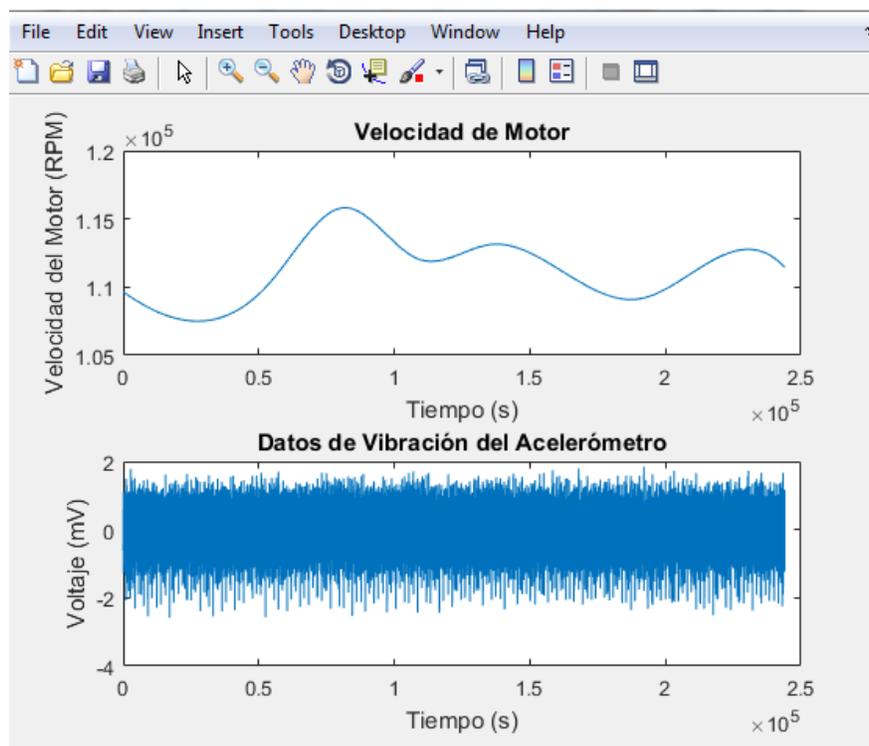


Figura 22: Velocidad del motor y datos del acelerómetro en función del tiempo

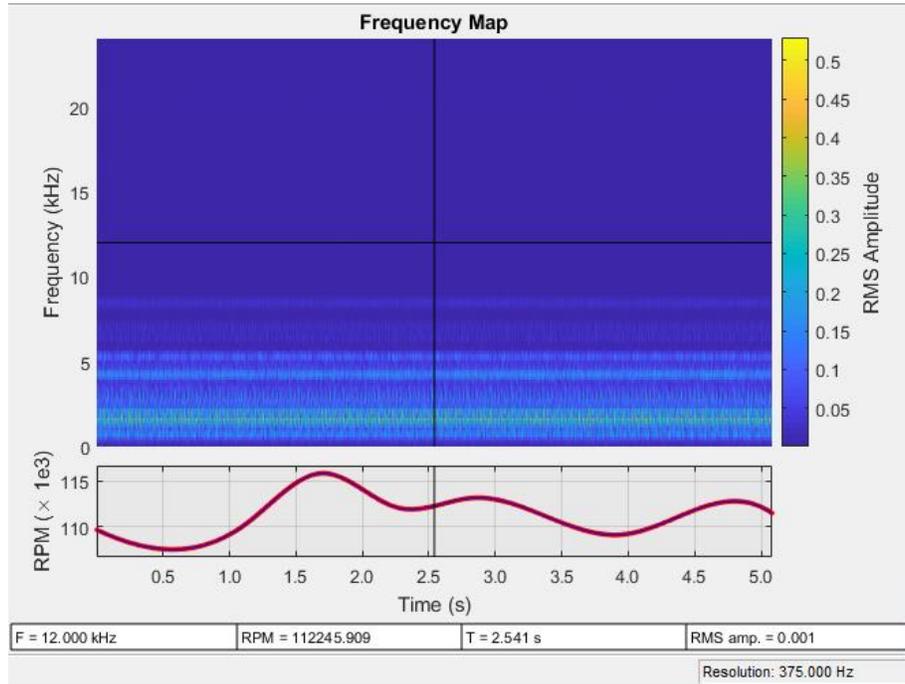


Figura 23: Mapa de frecuencia con resolución 375Hz

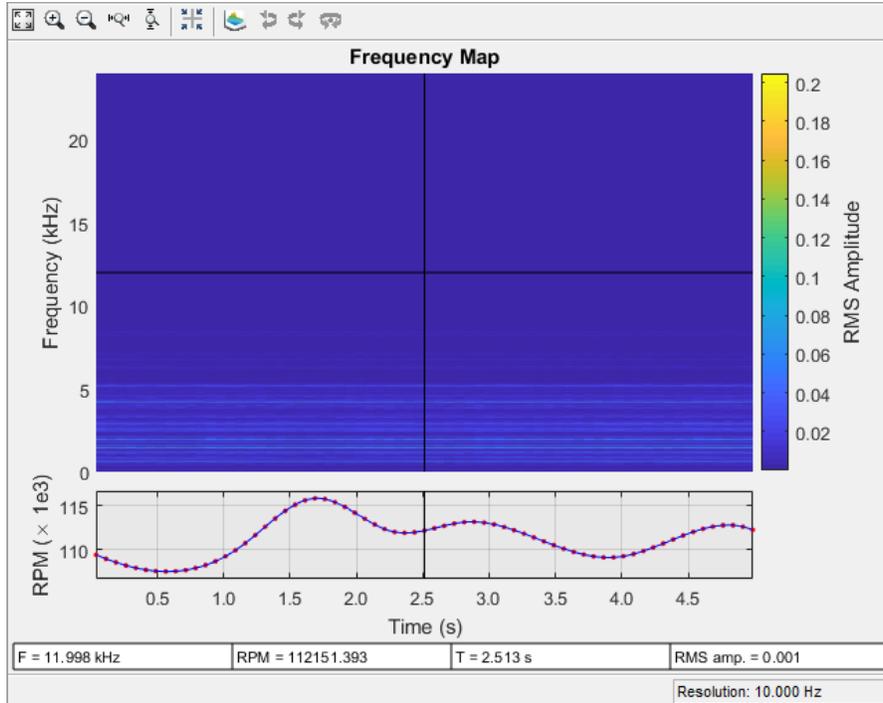


Figura 24: Mapa de frecuencia con resolución 10Hz

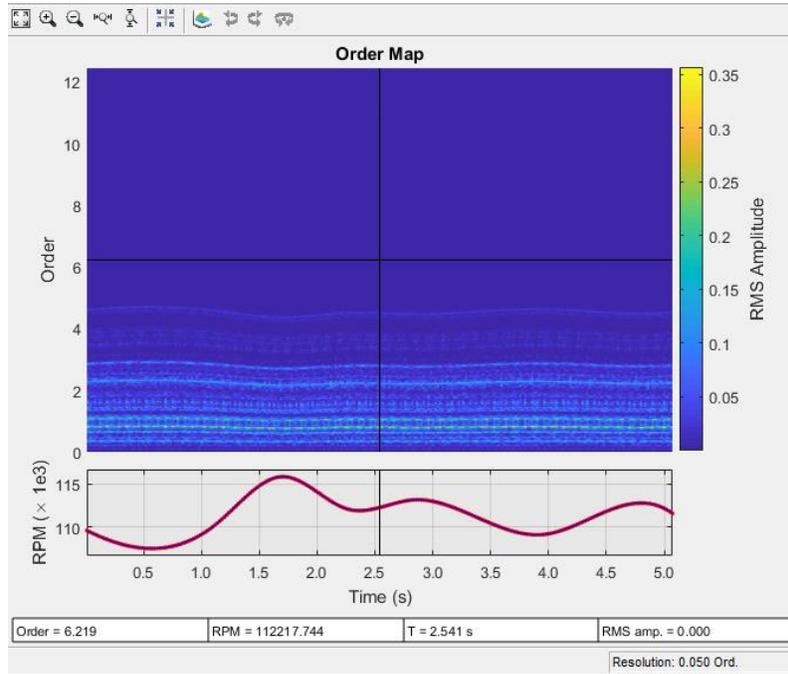


Figura 25: Mapa de órdenes con muestreo síncrono.

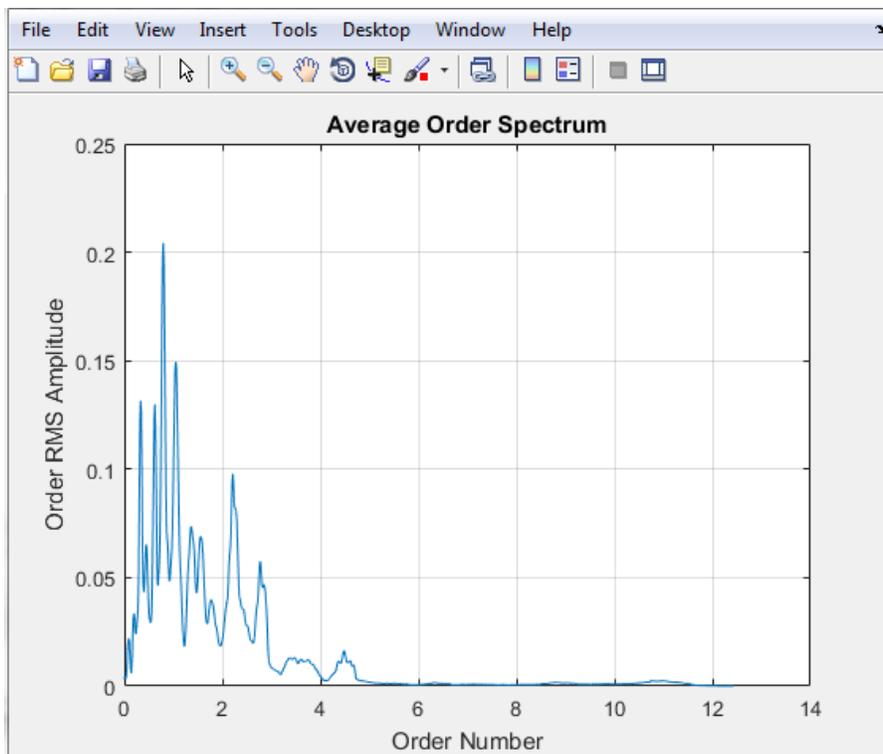


Figura 26: Amplitud RMS media de cada orden.

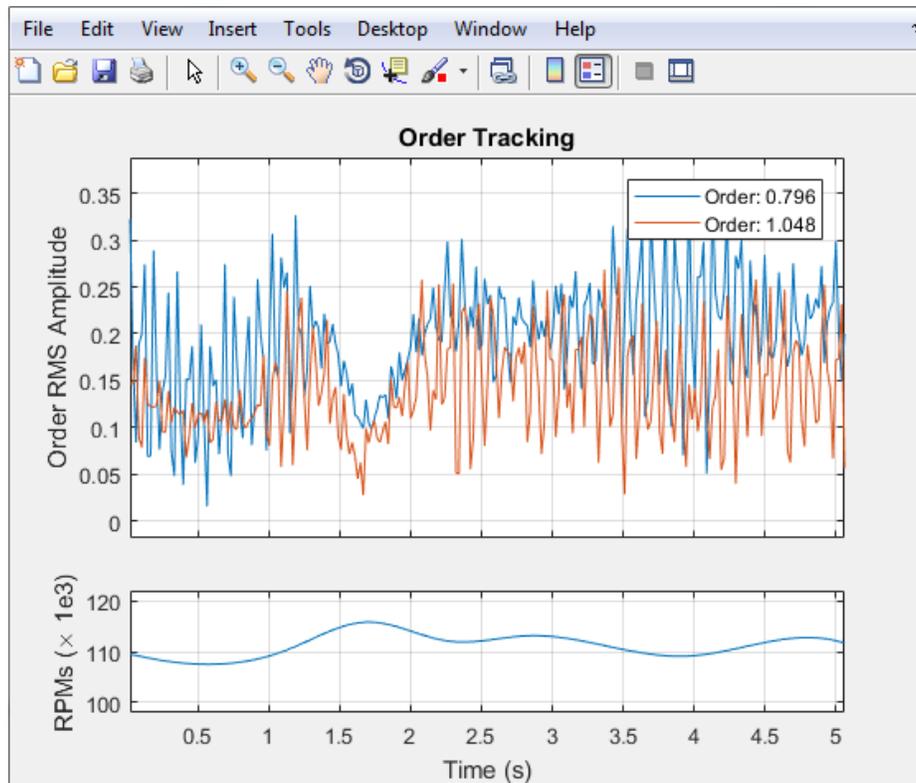


Figura 27: Mapa de seguimiento de órdenes, Order Tracking

### Ejercicio 5: Falla Media

Para este ejemplo se toma la señal IR014\_0 de la carpeta [48k Drive End Bearing Fault Data](#).

Al descargar la carpeta el archivo a cargar se llama 174.mat

## RESULTADOS

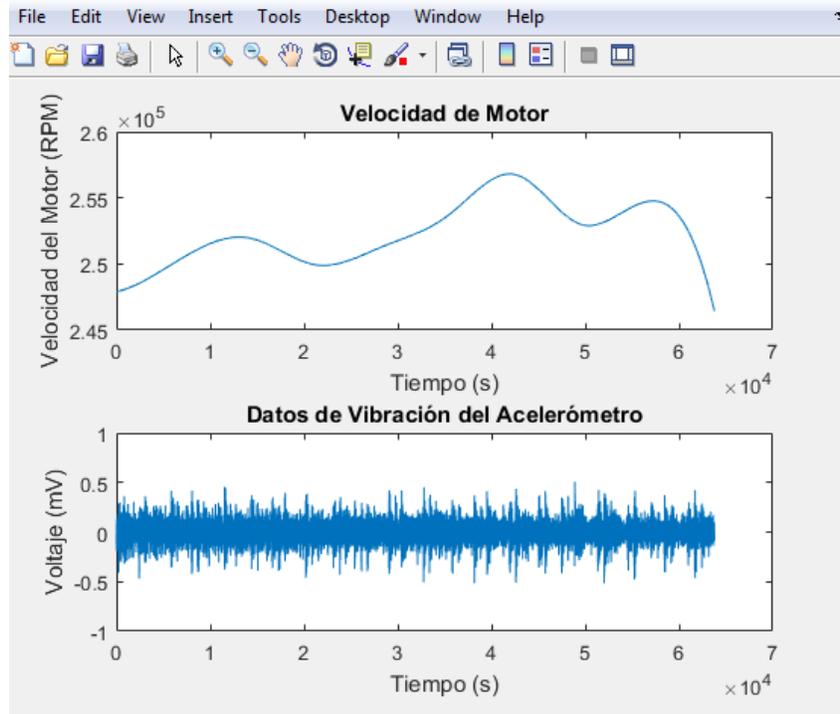


Figura 28: Velocidad del motor y datos del acelerómetro en función del tiempo

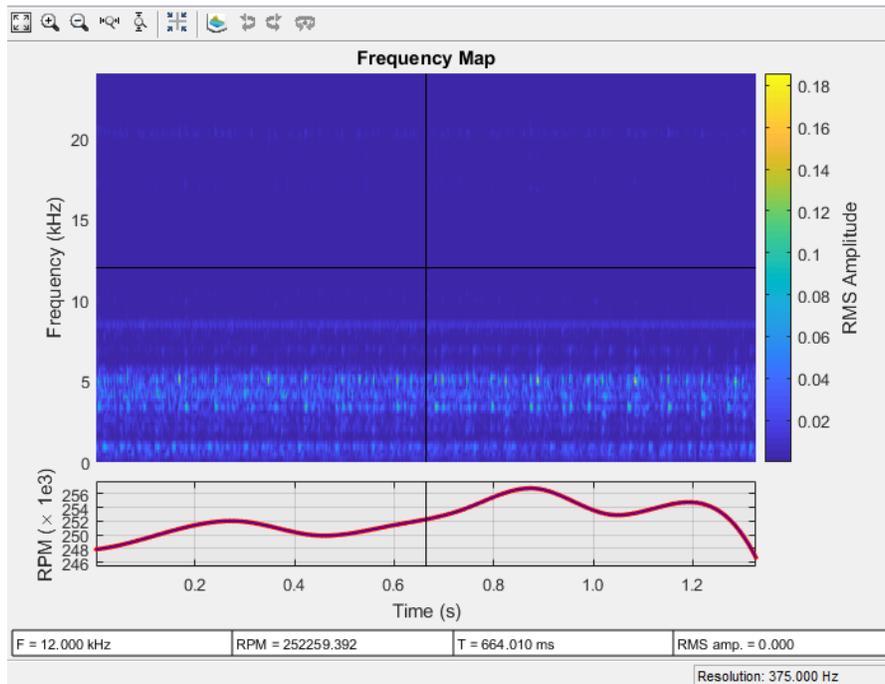


Figura 29: Mapa de frecuencia con resolución 375,000 Hz

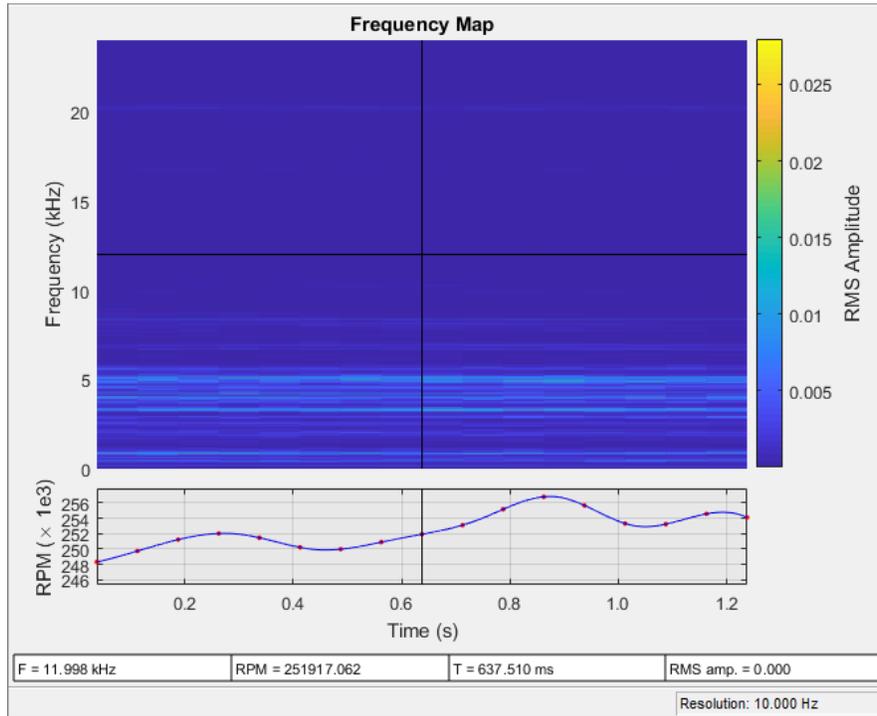


Figura 30: Mapa de frecuencia con resolución 10Hz

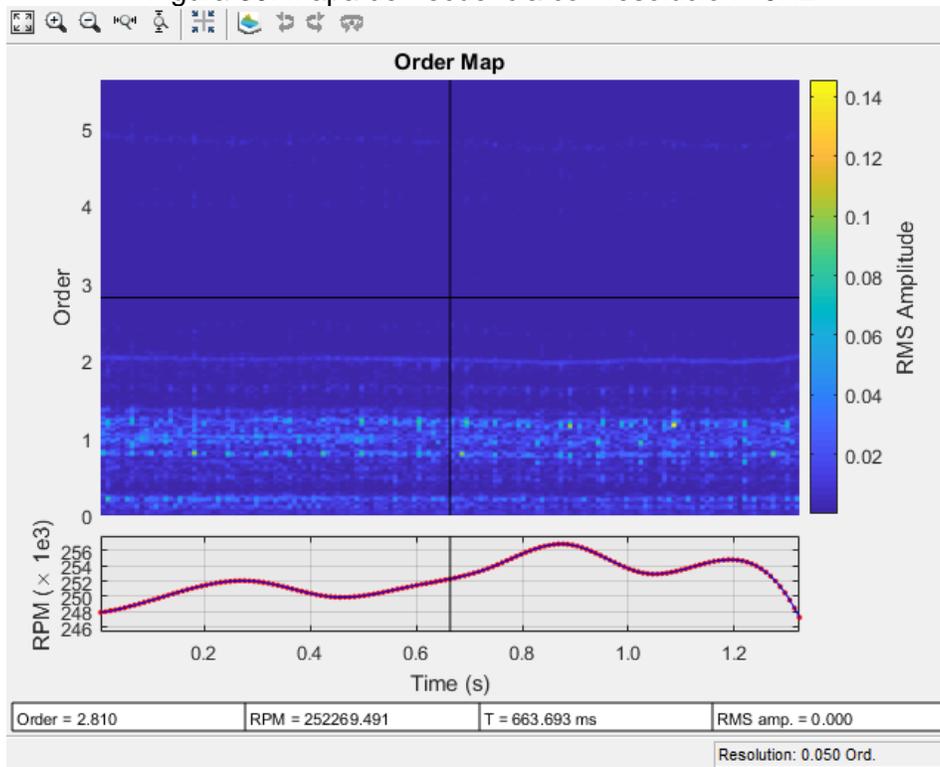


Figura 31: Mapa de órdenes con muestreo sincrónico.

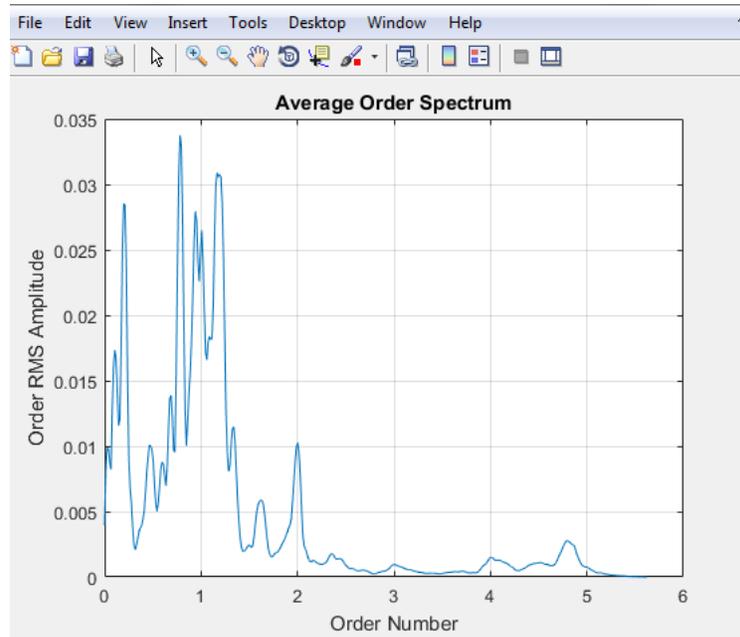


Figura 32: Amplitud RMS media de cada orden.

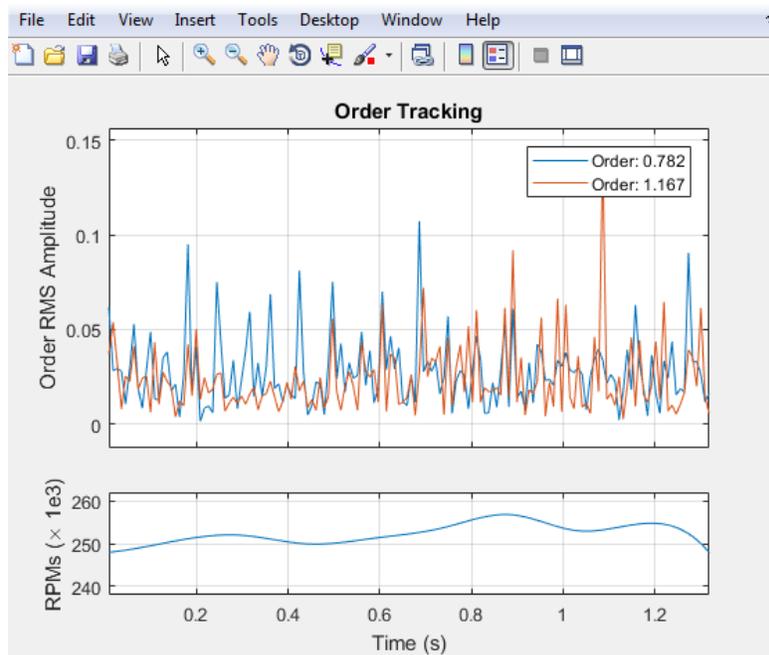


Figura 33: Mapa de seguimiento de órdenes, Order Tracking

### Ejercicio 6 : Falla Alta

Para este ejemplo se toma la señal IR021\_0 de la carpeta [48k Drive End Bearing Fault Data](#).

Al descargar la carpeta el archivo a cargar se llama **213.mat**

### RESULTADOS

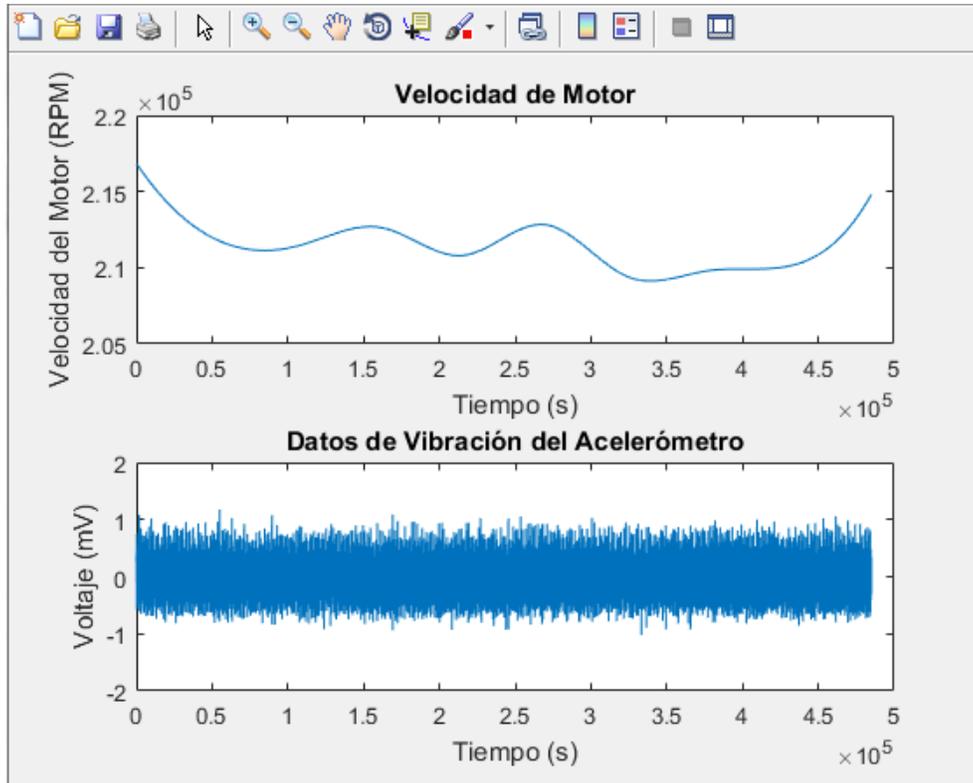


Figura 34: Velocidad del motor y datos del acelerómetro en función del tiempo

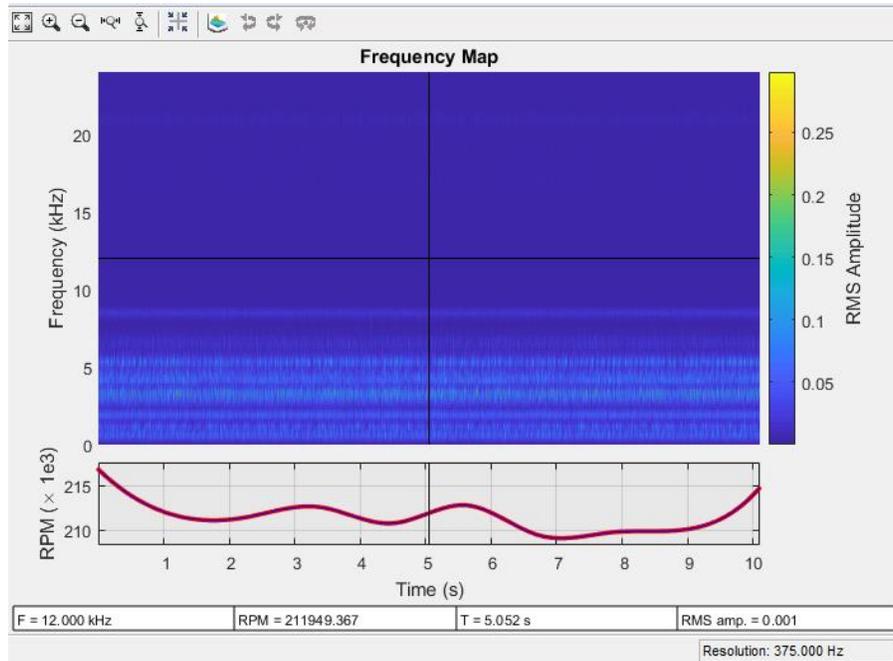


Figura 35: mapa de frecuencia con resolucion de 15.625 Hz

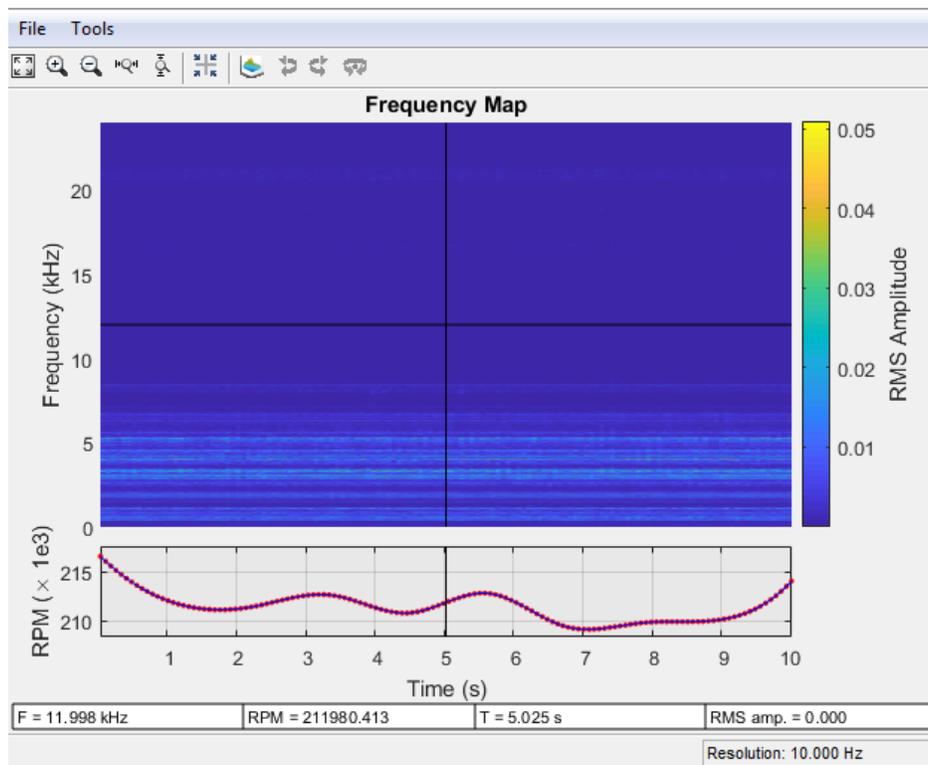


Figura 36: Mapa de frecuencia con resolución 10Hz

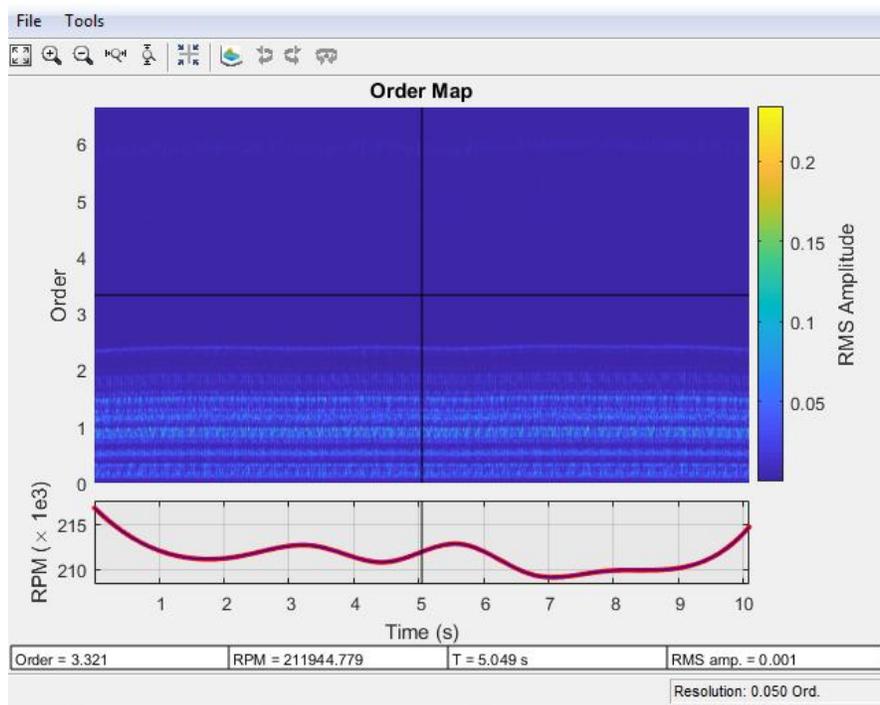


Figura 37: Mapa de órdenes con muestreo síncrono.

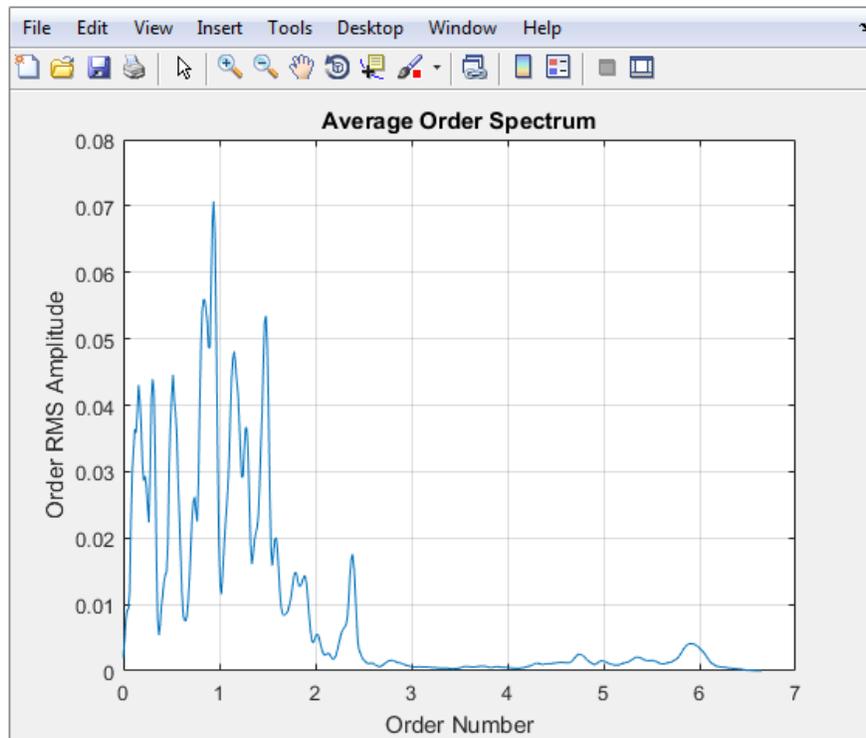


Figura 38: Amplitud RMS media de cada orden.

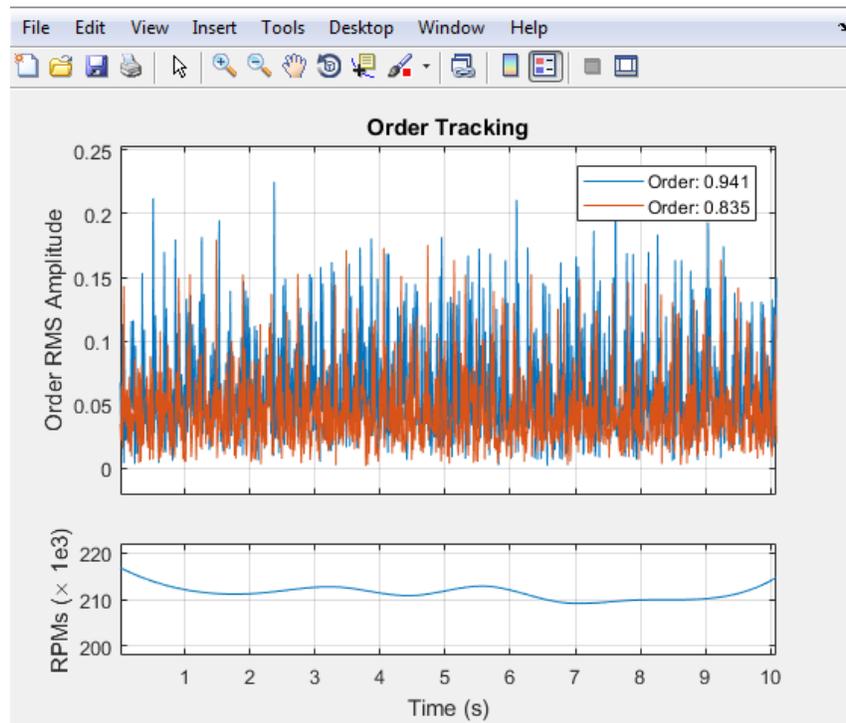
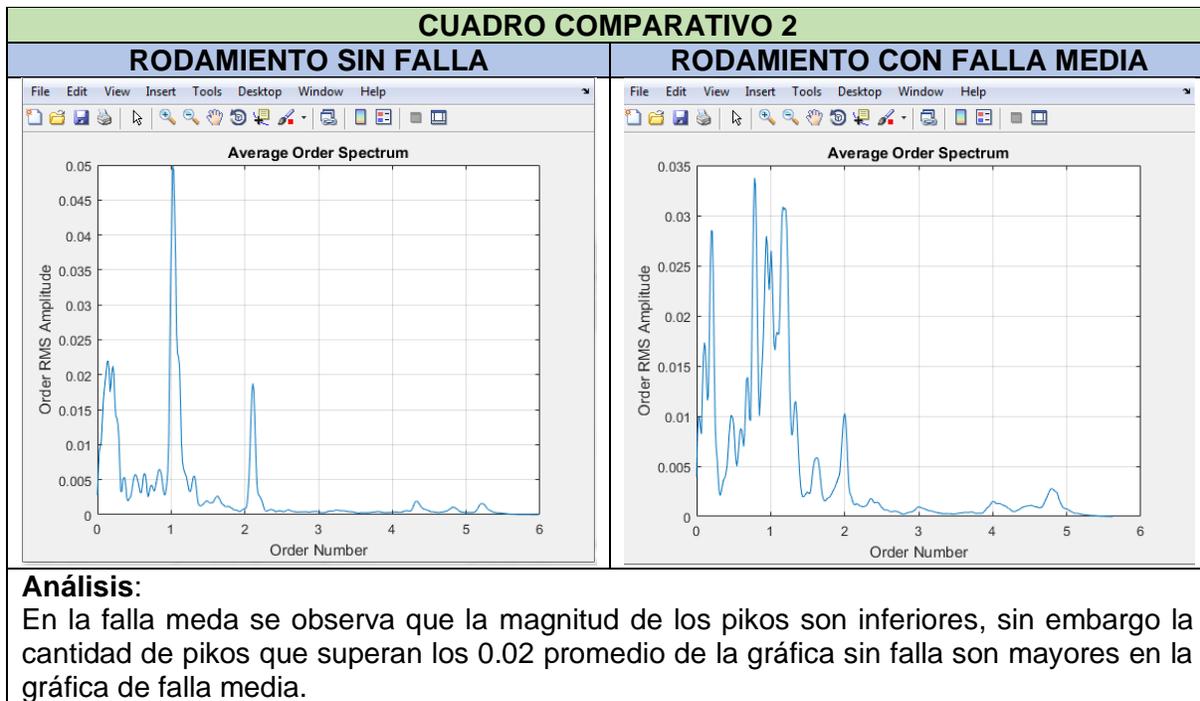
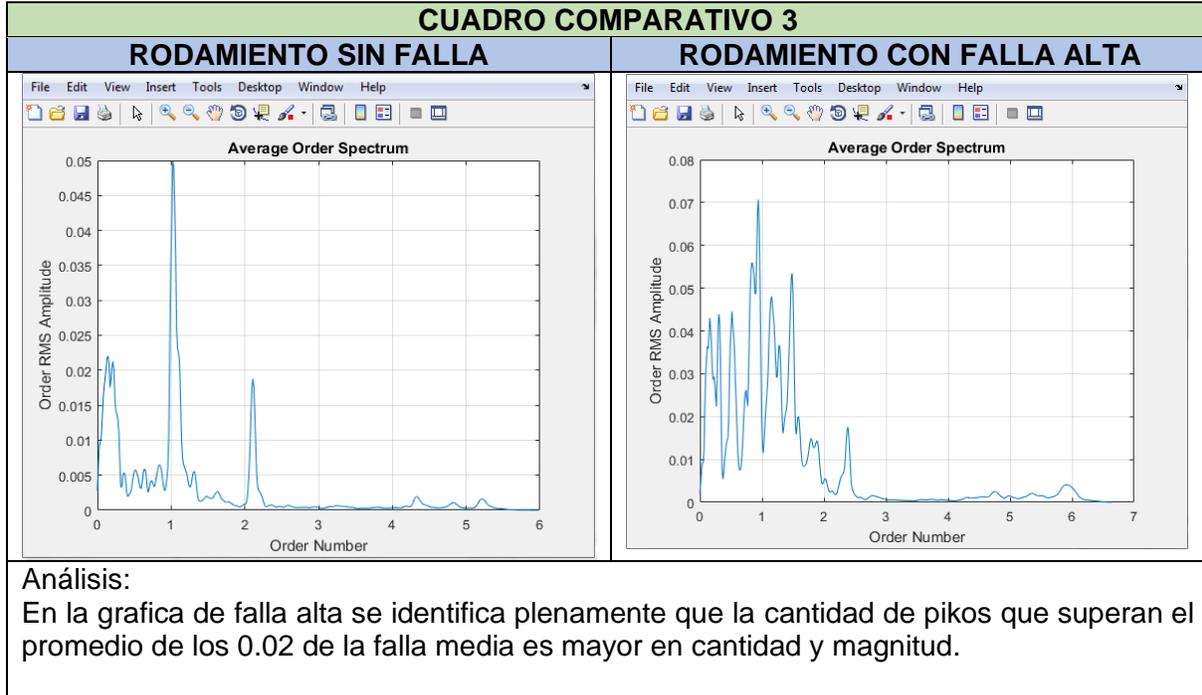


Figura 39: Mapa de seguimiento de órdenes, Order Tracking

## 2.1. ANALISIS COMPARATIVO

Este análisis tiene como objetivo principal comparar las gráficas de Mapa de seguimiento de órdenes de la metodología de análisis de orden en cada uno de los ejercicios desarrollados previamente y así identificar parámetros de diferenciadores en rodamientos con fallas leves medias y altas.





### 3. RESULTADOS

Se realizó un proyecto de investigación basado en el estudio de vibraciones en máquinas rotativas, por medio de análisis de órdenes, para el mejoramiento del funcionamiento de las máquinas rotativas, para prevenir futuros fallos en máquinas y así alargar su vida útil, consiguiendo datos precisos y específicos de las máquinas.

Se pretende con esto contribuir a la comunidad Uteista de la sede Barrancabermeja, con el fin de que conozca más sobre el tema, lo empiecen a implementar, amplíen sus conocimientos, ya que en la Uts no se registra un proyecto referido al tema, se entrega un documento con información detallada de la teoría referida al tema de estudio de vibraciones, maquinas rotativas y análisis de órdenes, con el fin de que comprendan el beneficio que se obtiene empleando este estudio y análisis en su vida laboral.

#### 4. CONCLUSIONES

1. Con la realización de este trabajo de grado se logró hacer una presentación del análisis de órdenes como una herramienta aplicable en el mantenimiento predictivos ya que es capaz de predecir fallos o defectos en equipos rotativos.
2. La técnica de análisis de órdenes para análisis de vibraciones es una técnica novedosa ya que se basa en analizar vibraciones y ruidos en máquinas rotativas a través de un seguimiento de los niveles de RSM variables en el tiempo generados a partir de unas fuerzas periódicas sobre la misma.
3. El trabajo sobre análisis de vibraciones con técnicas como el análisis de orden permite establecer un punto de partida para proyecto enfocados en el análisis de falla en equipos rotativos, como es el caso de plantas generadoras de energía eléctrica.
4. Se realizó un análisis de órdenes a las señales de fallas de rodamientos contenidos en la página de la **Case Western Reserve University Bearing Data Center** buscando con ello establecer unos parámetros de comparación con los cuales se puedan identificar los niveles de fallas.

## 5. RECOMENDACIONES

1. La primera recomendación que surge de la realización de este proyecto es la implementación de un sistema de adquisición de datos para medir voltajes y velocidades de giro durante el arranque y apagado de las máquinas.
2. Se recomienda la implementación del método de análisis de órdenes, como una herramienta en el diseño de estrategias de mantenimiento que se base en la condición del equipo.
3. Se recomienda realizar un estudio de las limitantes que pueda tener el método para la implementación en máquinas reciprocantes.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bojórquez, G. (2006). Diseño de un sistema para análisis de las vibraciones mecánicas como método de mantenimiento predictivo en máquinas rotativas. *Revista de ingeniería eléctrica, electrónica y computación*, 24.

Cardona, O. (2011). *Análisis tiempo-frecuencia de señales de vibraciones mecánicas para la detección de fallos en máquinas rotativas*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.

Castañeda, L. (2014). *Diagnóstico de fallas en maquinaria rotativa por análisis de vibraciones basado en máquinas de soporte vectorial*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander}.

ISO, 1. (1998). *Evaluación de la vibración en partes no rotativas*.

Loaiza, P. (2015). *Generación de eléctrica basada en vórtice gravitacional, una opción para la provisión sustentable de energía eléctrica en la zona rural del cantón Loja*. Universidad Técnica Particular de Loja .

Palomino, E. (1997). *La medición y el análisis de vibraciones en el diagnóstico de máquinas rotatorias*. Centro de estudios Innovación y Mantenimiento.

Prieto, M. (2017). *Vibraciones de máquinas rotativas; análisis de órdenes*. Sevilla : Universidad de Sevilla.

Ramón, A. (2015). *Centrales Hidráulicas*. Universidad de Cantabria .

Restrepo, A. (2012). *Fundamentos de la Teoría de señales y sistemas*. Bogotá.

Rojas, V. (2013). *Ingeniería preliminar de opciones de aprovechamiento de energía de fuentes renovables (no convencionales) para implementación en la ampliación del campus San Cayetano de la UTPL: sistemas de hidrogenación basados en vórtices gravitacionales*. Universidad Técnica de Loja.

S.A, A.-M. (2005). *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*. }

Sanaguano, E. (2016). *Estudio del comportamiento de fluidos de una micro central hidroeléctrica gravitacional de vórtice, mediante la dinámica computacional de fluidos de alto rendimiento, para la generación de energía eléctrica y la*

*implementación de un prototipo.* Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas.

Sánchez, C. (2016). Turbinas hidrocinéticas una alternativa para generación eléctrica. *Desarrollo Tecnológico e Innovación Empresarial* .

Torres, F. (2016). *Análisis de vibraciones e interpretación de datos.* Universidad de Zaragoza .