



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**COMPARACIÓN DE LAS SEÑALES DE VIBRACIÓN EN ENGRANES  
PLÁSTICOS Y METÁLICOS DE DIENTE HELICOIDAL CON FALLO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
título de Ingeniero Mecánico

AUTOR: ABEL FABRICIO CABRERA ROMERO

TUTOR: ING. DIEGO ROMAN CABRERA MENDIETA, PhD

Cuenca – Ecuador

2023

# CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Abel Fabricio Cabrera Romero, con documento de identificación N° 0350188868 manifiesto que:

Soy autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 15 de septiembre 2023

Atentamente,



---

Abel Fabricio Cabrera Romero  
0350188868

# **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Abel Fabricio Cabrera Romero con documento de identificación N° 0350188868, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: "Comparación de las señales de vibración en engranes plásticos y metálicos de diente helicoidal con fallo", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 15 de septiembre 2023

Atentamente,



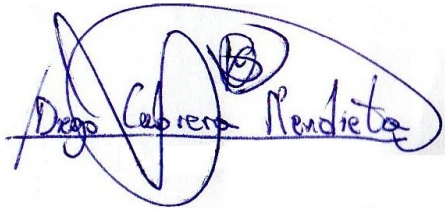
Abel Fabricio Cabrera Romero  
0350188868

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Diego Roman Cabrera Mendieta con documento de identificación N° 0104028303, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: COMPARACIÓN DE LAS SEÑALES DE VIBRACIÓN EN ENGRANES PLÁSTICOS Y METÁLICOS DE DIENTE HELICOIDAL CON FALLO, realizado por Abel Fabricio Cabrera Romero con documento de identificación N° 0350188868, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 15 de septiembre 2023

Atentamente,



---

Ing. Diego Roman Cabrera Mendieta, PhD

0104028303

## **Dedicatoria**

### ***Abel Cabrera***

El presente proyecto de titulación lo dedico a:

A Dios, quien ha sido mi guía para llevar a cabo este proceso y lograr las metas propuestas en mi vida.

A mis padres Abel y Patricia, quienes con su cariño, esfuerzo y apoyo incondicional me han permitido lograr este reto donde me han acompañado durante todo este proceso. Gracias por confiar en mi y permitirme cumplir esta oportunidad para mi vida.

A mi hermana Bárbara, quien ha sido un apoyo emocional para lograr este reto en mi vida gracias a su paciencia y cariño.

Finalmente, dedico a las personas que formaron parte del proceso y me brindaron su apoyo.

## **Agradecimientos**

### ***Abel Cabrera***

Agradezco a Dios por permitirme llegar a cumplir esta meta y por brindarme salud, fuerza y sabiduría en el proceso.

Agradezco a mis padres, por apoyarme en este proceso de formación y por siempre confiar en mí, dándome la confianza para nunca rendirme, gracias a mi madre por apoyarme en las situaciones difíciles, en las que su compañía, consejos y abrazos eran para mí como una ayuda para continuar hacia adelante; a mi padre por siempre escucharme y ser una guía y referente en mi vida.

Me gustaría además agradecer a mi tutor de proyecto de titulación Ing. Diego Cabrera, a quien respeto; por su esfuerzo y apoyo brindados a lo largo del trabajo de titulación. Sus conocimientos y su paciencia han sido esenciales para lograr este trabajo.

También quiero agradecer al Ing. Vinicio Sánchez, quien han estado prestos para resolver cualquier duda extra presentada y brindar sugerencias para el trabajo de titulación.

Este documento fue realizado enteramente en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

## Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación . . . . .	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana . . . . .	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación . . . . .	III
Dedicatoria . . . . .	IV
Agradecimientos . . . . .	V
Resumen . . . . .	XII
Abstract . . . . .	XIII
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Problema</b>	<b>2</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	2
2.2. Descripción del problema . . . . .	5
2.3. Importancia y alcances . . . . .	6
2.4. Delimitación . . . . .	6
2.4.1. Espacial o geográfica . . . . .	6
2.4.2. Temporal . . . . .	7
2.4.3. Sectorial o institucional . . . . .	7
2.5. Problema General . . . . .	7
2.6. Problemas Específicos . . . . .	7
<b>3. Objetivo</b>	<b>8</b>
3.1. Objetivo General . . . . .	8
3.2. Objetivos Específicos . . . . .	8
<b>4. Hipótesis</b>	<b>9</b>
4.1. Hipótesis General . . . . .	9
4.2. Hipótesis Específicas . . . . .	9
<b>5. Marco Teórico</b>	<b>10</b>
5.1. Mantenimiento basado en la condición . . . . .	10
5.2. Análisis de vibraciones . . . . .	11
5.3. Transformada rápida de fourier . . . . .	11



5.4.	Protocolo . . . . .	11
5.5.	Engranajes helicoidales . . . . .	11
5.6.	Caja de engranajes . . . . .	12
5.7.	Fallos de engranajes . . . . .	13
5.8.	Revisión bibliográfica de la construcción del fallo en engranajes . . . . .	13
5.9.	Cartas de Charlotte . . . . .	16
5.9.1.	Engranaje condición normal . . . . .	16
5.9.2.	Engranaje con diente roto . . . . .	16
<b>6.</b>	<b>Marco metodológico</b>	<b>18</b>
6.1.	Metodología de la Investigación . . . . .	18
6.2.	Metodología del proceso . . . . .	18
6.3.	Metodología para la adquisición de señales de vibración . . . . .	19
6.3.1.	Especificaciones del banco de vibraciones . . . . .	19
6.3.2.	Posición de los acelerómetros en el banco de vibraciones . . . . .	20
6.4.	Plan experimental . . . . .	22
6.4.1.	Proceso experimental . . . . .	22
6.4.2.	Procedimiento experimental . . . . .	23
6.4.2.1.	Acondicionamiento del banco de vibraciones . . . . .	23
6.4.2.2.	Utilización de sensores . . . . .	23
6.4.2.3.	Acondicionamiento del software de adquisición de datos Lab-VIEW . . . . .	24
6.4.2.4.	Adquisición de señales de vibración . . . . .	26
6.4.2.5.	Exportación de las señales de vibración a Matlab . . . . .	27
6.4.2.6.	Acondicionamiento del software de procesamiento de datos Matlab . . . . .	29
6.4.2.7.	Levantamiento de la línea base en condición normal . . . . .	32
6.4.2.7.1.	Proceso para levantamiento de la línea base . . . . .	32
6.4.2.8.	Bases de datos de la señal de vibración en condición normal y con fallo . . . . .	34
6.4.3.	Metodologías para el análisis de datos . . . . .	35
6.4.3.1.	Kurtosis . . . . .	35
6.4.3.2.	Trasformada de Fourier . . . . .	36
6.4.3.3.	Prueba t de dos muestras . . . . .	36
<b>7.</b>	<b>Resultados</b>	<b>38</b>
7.1.	Parámetros establecidos para el protocolo de montaje de la caja de engranajes helicoidal . . . . .	38
7.1.1.	Protocolo de desmontaje . . . . .	38
7.1.2.	Protocolo de montaje . . . . .	38

7.1.3. Validación del protocolo de montaje . . . . .	39
7.2. Señales de vibración obtenidas en la caja de engranajes helicoidal de los engranajes plásticos y metálicos . . . . .	39
7.3. Resultados del análisis comparativo de las señales de vibración obtenidas en la caja de engranajes helicoidal en el dominio del tiempo y frecuencia . . . . .	41
<b>8. Conclusiones</b>	<b>47</b>
<b>9. Recomendaciones</b>	<b>49</b>
<b>Referencias</b> . . . . .	<b>51</b>
<b>ANEXOS</b> . . . . .	<b>52</b>

## Lista de Tablas

2.1. Trabajos realizados en el grupo GIDTEC . . . . .	4
5.1. Tabla de caracterización . . . . .	14
6.1. Especificaciones de los elementos del banco . . . . .	20
6.2. Características motor Siemens . . . . .	21
6.3. Parámetros de operación . . . . .	23
6.4. Acelerómetro ICP 603C01 . . . . .	24
6.5. Partes de la interfaz gráfica . . . . .	25
6.6. Niveles de severidad . . . . .	26
6.7. Base de datos del engranaje metálico . . . . .	34
6.8. Base de datos del engranaje plástico . . . . .	35
7.1. Señales de vibración en el dominio del tiempo sin fallo . . . . .	42
7.2. Señales de vibración en el dominio del tiempo con fallo . . . . .	42
7.3. Señales de vibración engranes metálicos en el dominio del tiempo sin fallo y con fallo . . . . .	43
7.4. Señales de vibración engranes plásticos en el dominio del tiempo con fallo y sin fallo . . . . .	43
7.5. Señales de vibración en el dominio de la frecuencia sin fallo . . . . .	44
7.6. Señales de vibración en el dominio de la frecuencia con fallo . . . . .	45
7.7. Señales de vibración engranes metálicos en el dominio de la frecuencia sin fallo y con fallo . . . . .	45
7.8. Señales de vibración engranes plásticos en el dominio de la frecuencia con fallo y sin fallo . . . . .	46
9.1. Matriz de consistencia . . . . .	53
9.2. Variable dependiente . . . . .	54
9.3. Variable independiente . . . . .	55

## Lista de Figuras

2.1. Banco de pruebas GIDTEC . . . . .	3
2.2. Ubicación con Google Maps . . . . .	7
5.1. Proceso del MBC . . . . .	10
5.2. Engranaje helicoidal . . . . .	12
5.3. Caja de engranajes . . . . .	13
5.4. Espectro en condición normal . . . . .	16
5.5. Espectro en condición con fallo . . . . .	17
6.1. Metodología . . . . .	18
6.2. Esquema del banco de vibraciones . . . . .	19
6.3. Posición de los acelerómetros . . . . .	20
6.4. Proceso experimental para la adquisición de señales de vibraciones . . . . .	22
6.5. Secuencia de conexión para la adquisición de datos. . . . .	24
6.6. Secuencia de conexión para la adquisición de datos. . . . .	25
6.7. Engranaje helicoidal. . . . .	26
6.8. Secuencia para exportar los datos a Matlab. . . . .	27
6.9. Inicio programa Matlab. . . . .	27
6.10. Carga del programa en Matlab. . . . .	28
6.11. Visualización del programa. . . . .	28
6.12. Carga de bases de datos. . . . .	29
6.13. Exportación del archivo. . . . .	29
6.14. Proceso para el análisis de la señal. . . . .	30
6.15. Análisis del espectro. . . . .	30
6.16. Selección del archivo. . . . .	31
6.17. Ventana de gráficas. . . . .	31
6.18. Frecuencias características. . . . .	33
7.1. Espectro en condición normal. . . . .	39
7.2. Espectro en condición normal del engrane metálico. . . . .	40
7.3. Espectro en condición normal del engrane plástico. . . . .	41

## Resumen

Los engranajes son un componente clave en las máquinas rotativas utilizadas por el sector industrial. La detección anticipada de algún fallo en este componente es crucial para evitar paradas de planta inesperadas. Sin embargo, el monitoreo de la condición resulta difícil debido a que se necesita bases de datos dependientes del material en diferentes condiciones de operación y modos de fallo. Esto requiere de una gran cantidad de tiempo y dinero de la industria. Por lo tanto, en este trabajo se realizó la adquisición y comparación de bases de datos de señales de vibración en engranajes plásticos y metálicos con fallo.

Para este trabajo se utilizó el banco de vibraciones del grupo de investigación GIDTEC para la simulación de fallos. Primero se diseñó un protocolo para el armado y desarmado de este banco garantizando la repetibilidad de la experimentación. Para las bases de datos se adquirió señales en engranajes helicoidales de material plástico y metálico en modo normal y con diente roto, esto se realizó en tres posiciones (P1, P5, P10), a tres velocidades (360, 540, 720 rpm) y con tres cargas (0V, 5V, 10V). Para la adquisición de datos se utilizó seis acelerómetros colocados en posiciones estratégicas del banco, cuyas señales fueron adquiridas por un programa desarrollado en LabView y procesadas en Matlab. Las principales técnicas utilizadas fueron la FFT para el dominio de la frecuencia y el cálculo de la kurtosis para el dominio del tiempo.

Para el análisis comparativo de las señales de vibración en el dominio de tiempo y frecuencia se decidió trabajar en la posición P5 al ser un nivel medio de fallo del diente del engrane, a una carga de 0V y a tres velocidades (360, 540, 720 rpm) esto con el fin de realizar la comparación del comportamiento entre las señales del engranaje plástico y metálico. Los resultados mostraron que el método de la kurtosis para el análisis de las señales en el dominio del tiempo puede ser considerado como un indicador de fallos. Este método consiguió la aceptación de la hipótesis alternativa en todas sus pruebas, excepto una. Esto podría deberse a que al aumentar las rpm el tiempo de contacto entre dientes se reduce, por lo que al adquirir los datos podría no detectarse la diferencia del material del engranaje. El método de la FFT para el análisis de las señales en el dominio de la frecuencia demostró no ser un método tan adecuado. Esto se debe a que cuando se trabaja con frecuencias, la velocidad de análisis afectara al comportamiento que presenten las señales de vibración. Otro problema es que al trabajar a bajas rpm no permiten detectar fácilmente un fallo, aunque esto dependerá del material a trabajar.

**Palabras clave:** Acelerómetro, Engranajes plásticos, Engranajes metálicos, Monitoreo de la condición, Vibraciones.

## Abstract

**G**ears are a key component in the rotary machines used by the industrial sector. Early detection of a failure in this component is crucial to avoid unexpected plant stops. However, condition monitoring is difficult because material-dependent databases are needed under different operating conditions and failure modes. This requires a lot of time and money from the industry. Therefore, in this work the acquisition and comparison of databases of vibration signals in plastic and metallic gears with failure was performed.

For this work, the vibration bank of the GIDTEC research group was used for fault simulation. First a protocol was designed for the armed and disarmed of this bank ensuring the repeatability of the experiment. For the databases signals were acquired in helical gears of plastic and metal material in normal mode and with broken tooth, this was done in three positions (P1, P5, P10), three speeds (360, 540, 720 rpm) and three loads (0V, 5V, 10V). Six accelerometers placed in strategic positions of the bank were used for data acquisition, whose signals were acquired by program developed in LabView and processed in Matlab. The main techniques used were FFT for frequency domain and kurtosis calculation for time domain.

For the comparative analysis of the vibration signals in the time and frequency domain it was decided to work at the P5 position as it was a mean level of gear tooth failure, at a load of 0V and at three speeds (360, 540, 720 rpm) this in order to perform the behavior comparison between the signals of the plastic and metal gear. The results showed that the kurtosis method for the analysis of signals in the time domain can be considered as an indicator of failures. This method achieved acceptance of the alternative hypothesis in all but one of its tests. This could be because by increasing rpm the contact time between teeth is reduced, so when acquiring the data the difference in gear material may not be detected. The FFT method for the analysis of signals in the frequency domain proved not to be such a suitable method. This is because when working with frequencies, the analysis speed will affect the behavior of vibration signals. Another problem is that working at low rpm does not allow easy detection of a fault, although this will depend on the material to work.

**Keywords:** Accelerometer, Condition Monitoring, Metal Gears, Plastic Gears, Vibrations.

## 1. Introduccion

**E**l análisis de vibraciones ha logrado obtener un lugar en el mantenimiento como herramienta para detectar los fallos en máquinas rotativas al ofrecernos una gran capacidad para detectar los fallos en etapas tempranas, aunque estas sean muy pequeñas. Existen varias técnicas para la caracterización de fallos, normalmente en caja reductoras y en rodamientos. Así, la identificación de fallos se vuelve crucial para reducir las paradas inesperadas en una empresa y así alargar la vida útil de un equipo (Cardona Morales, 2011).

El mantenimiento predictivo aplica técnicas no destructivas para conocer cuando un equipo requiere mantenimiento, el análisis de vibraciones sirve para determinar el estado de los componentes de la máquina para saber cuál necesita mantenimiento y así poder programarlo para no afectar el trabajo normal de la planta. Con el desarrollo tecnológico se han conseguido equipos que analizan la señal de vibración y entregan al usuario las graficas en el dominio del tiempo o frecuencia para que puedan ser analizadas rápidamente y así emitir un diagnóstico. Conocer información sobre la máquina analizada es clave porque aquí nos encontramos con sus características de operación, datos técnicos, mantenimientos realizados y sus espectros de referencia (Olarte, Botero, y Cañon, 2010).

Cada vez más industrias alrededor del mundo usan el mantenimiento predictivo aplicando el análisis de vibraciones para prevenir fallas graves. Para entender de mejor manera las causas de las vibraciones se requiere de simples modelos matemáticos y dinámicos que la describen, donde las vibraciones dependen de la construcción del equipo y de sus características de trabajo. Así, la tarea de los especialistas es análisis e identificar los fenómenos vibratorios a través del procesamiento de datos emitido por el equipo durante su funcionamiento (Vassileva, 2008). En el análisis de señales de vibración se lo realiza en el dominio del tiempo mediante la amplitud, o en el dominio de frecuencia usando la Transformada de Fourier. Cada análisis muestra buenos resultados en la caracterización de los eventos de una señal, cuando la señal muestra un comportamiento estacionario, pero presentan deficiencias cuando, en el intervalo de tiempo, tienen un comportamiento no estacionario (Flórez, Cardona, y Jordi, 2009).

## **2. Problema**

### **2.1. Antecedentes**

La medición de vibración y su análisis son las bases del Mantenimiento Predictivo, que contrasta con la práctica "funcionar hasta fallar". El primero analizador de vibración fue el cerebro humano, combinado con los sentidos tacto y oído. Pero estos no son completamente efectivos porque se necesita a un sujeto bien entrenado para realizarlo y este método no nos entrega datos con los cuales trabajar. Así, para incrementar la consistencia y llevar un registro en el tiempo, se desarrollaron métodos y equipos especializados para la toma de dato, su posterior análisis y almacenamiento de datos (White, 2010).

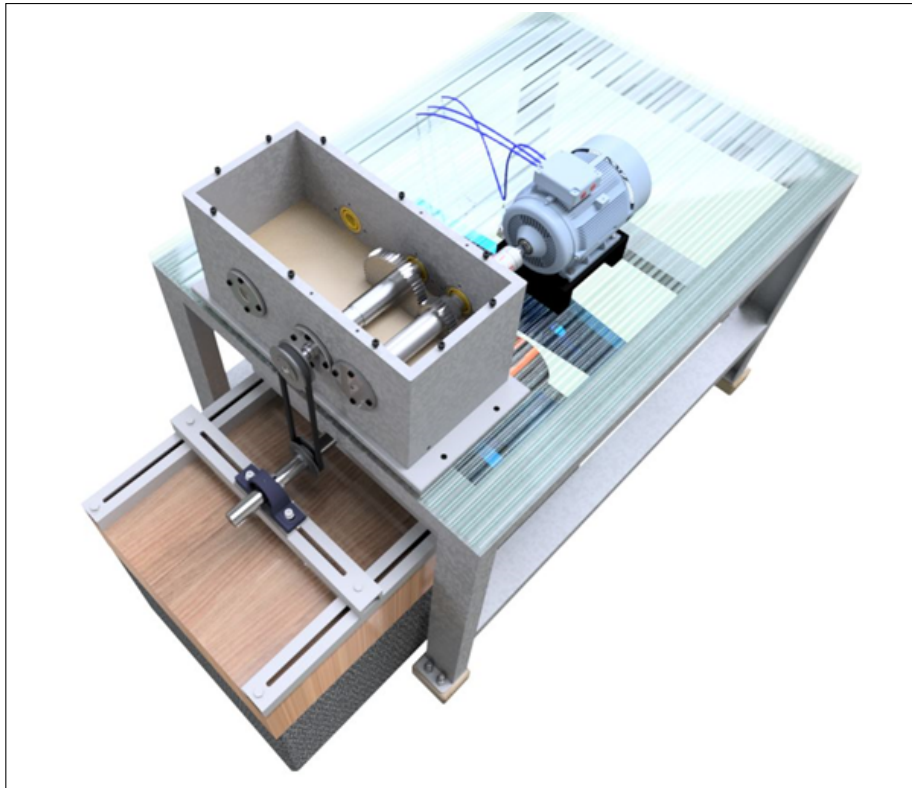
El mantenimiento basado en la condición (MBC) es de gran importancia para aumentar la confiabilidad de los sistemas de mantenimiento en cualquier tipo de industria y nos ayuda para saber el momento en que se debe realizar el mantenimiento gracias a toda la información recolectada con el monitoreo de los procesos. Aplicar esta metodología ayuda a reducir los costos, reducir el número de actividades de mantenimiento y a reducir los riesgos en paradas imprevistas. Esta metodología logra que podamos resolver los problemas que se estén generando antes de que ocurra una falla, la cual puede ser catastrófica (Alaswad y Xiang, 2017; Jardine, Lin, y Banjevic, 2006).

La importancia del MBC ha ocasionado que en el Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC), de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, se realicen proyectos de titulación de Ingeniería Mecánica enfocados en el levantamiento de datos de las señales de vibración en los rodamientos y engranajes. Toda esta información ha sido utilizada en los diferentes trabajos realizados en el grupo como material investigativo para el diagnóstico y pronóstico de fallos en engranajes y rodamientos. Como se observa en la Figura 2.1.



**Figura 2.1**

*Banco de pruebas GIDTEC.*



**Nota:** La imagen presenta el equipo de pruebas del laboratorio de vibraciones en este caso una banco de chumaceras.

En la Tabla 2.1 se presentan algunos de los trabajos de titulación culminados y relacionados con el tema realizados en GIDTEC.

**Tabla 2.1***Trabajos realizados en el grupo GIDTEC.*

<b>Autores (Año)</b>	<b>Título</b>	<b>Descripción</b>	<b>Señales adquiridas</b>	<b>Mecanismos estudiados</b>
<b>Carangui (2014)</b>	Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas de una caja reductora combinando fallos de rodamientos y engranajes rectos para fines investigativos en la Universidad Politécnica Salesiana”	Se levantó bases de datos con un total de 60 combinaciones diferentes comparando fallos en engranajes rectos, rodamientos rígidos de bolas y combinando fallos en ambos elementos	Vibración mecánica	Engranajes. Rodamientos.
<b>Nivelo Romero (2014)</b>	Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas para sistemas mecánicos con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en rodamientos”	Se adquirió señales de vibración de un sistema mecánico rotativo completo, simulando fallos en rodamientos y engranajes con perturbaciones en los ejes de transmisión.	Vibración mecánica	Engranajes.
<b>Muñoz y Vera (2015)</b>	Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas y acústicas de un sistema mecánico rotativo con la combinación de fallos de rodamientos y engranajes helicoidales y elaboración de guía de práctica para desbalanceo estático”	Se adquirió señales de vibración mecánica y emisión acústica en un sistema mecánico rotativo, simulando fallos en rodamientos y engranes helicoidales en una caja de engranajes.	Vibración mecánica Emisión Acústica	Engranajes. Rodamientos.
<b>Pérez Ortiz (2016)</b>	Adquisición de señales, vibraciones y emisiones acústicas combinando fallos en maquinaria rotativa y elaboración de guías de práctica sobre detección de fallos en engranajes por medio de emisiones acústicas”	Se comparó de las señales de emisiones acústicas y de vibración adquiridas en un sistema mecánico rotativo con diferentes configuraciones de fallos en rodamientos y engranes.	Vibración mecánica Emisión Acústica	Engranajes. Rodamientos.

Continuación de la Tabla 2.1

<b>Autores (Año)</b>	<b>Título</b>	<b>Descripcion</b>	<b>Señales adquiridas</b>	<b>Mecanismos estudiados</b>
<b>Pacheco (2018)</b>	Adquisición de señales de corriente del motor de inducción combinando fallos en la maquinaria rotativa y elaboración de una guía de práctica sobre detección de fallos por medio del AFCM”	Se adquirió señales de corriente en el motor de inducción, para la detección de fallos en engranajes por medio del análisis de firma de corriente del motor.	Vibración mecánica Emisión Acústica	Engranajes. Rodamientos.
<b>Cajas y Torres (2018)</b>	Adquisición de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor recíprocante de doble etapa”	Se estableció una base de datos de señales acústicas y vibración de fallos del sistema mecánico del compresor.	Vibración mecánica Emisión Acústica	Compresor recíprocante.
<b>Lojano (2019)</b>	Señales acústicas y de vibración: estudio comparativo para la detección de severidad de fallos en engranes rectos”	Se lleva a cabo un estudio comparativo de señales acústicas y de vibración para la detección de severidad de fallos en engranes.	Vibración mecánica Emisión Acústica	Engranajes rectos.
<b>Livicura (2019)</b>	Señales de vibración: Evaluación de indicadores de condición del dominio de frecuencia, para el diagnóstico de fallos en cajas de engranajes rectos”	Se realiza una evaluación de indicadores de condición extraídos del dominio de la frecuencia para diagnosticar fallos en engranajes rectos.	Vibración mecánica	Engranajes rectos.

**Nota:** Se indica los trabajos que se han realizado dentro del grupo GIDTEC a lo largo de este tiempo.

## 2.2. Descripción del problema

En la industria las máquinas rotativas siempre fallan y pueden ser por varias razones. La mayor complejidad de las máquinas provoca que cada que los equipos fallan la producción se ve obligada a parar, lo que ocasiona perdida de ingresos y gastos en reparaciones, afectando a la competitividad de las industrias y la calidad de los productos. Por esto, las empresas buscan formas de reducir las fallas y mantener los costos de mantenimiento lo más bajos posible, evitando equivocarse cuando se tome alguna decisión de mejora. Para esto se aplica el monitoreo de la condición que analiza el estado de una máquina durante su operación normal,

así logrando identificar los problemas que puede estar sufriendo un equipo antes de que se produzca una falla, consiguiendo una alta disponibilidad de la maquinaria al mismo tiempo que se optimizan (Moubray, 2004). Actualmente, los materiales que pueden encontrar en las distintas piezas de una maquinaria son diversos. Considerando el caso de estudio, fácilmente se puede disponer tanto de engranajes metálicos como también de engranajes plásticos, por ejemplo grilon. Sin embargo, las dinámicas que gobiernan el comportamiento vibracional de estos ritmos son en principio desconocidos. En efecto, no existen estudios que identifiquen claramente la dinámica de las vibraciones en engranajes helicoidales.

Por esto, realizar investigaciones sobre monitoreo de la condición de diferentes fallos que las máquinas rotativas puedan sufrir con materiales distintos cobra gran importancia para que estas sirvan de bases de datos para futuros trabajos y problemas en la industria.

### **2.3. Importancia y alcances**

La presente propuesta de trabajo es muy importante dentro del área de la investigación porque este estudio ampliará los conocimientos sobre el monitoreo de la condición, específicamente el análisis de señales de vibraciones entre engranajes plásticos y metálicos y en el sector industrial en donde conocer el comportamiento normal de las señales de vibración y con fallos de estos materiales es crucial para saber como proceder a solucionarlo.

Este proyecto beneficiará al grupo de investigación GIDTEC, cuya información será utilizada para futuros proyectos de investigación con miras hacia industrias que deseen implementar un mantenimiento basado en la condición en caja de engranajes de diente helicoidal, metálicos y plásticos. Con el empleo de un banco de pruebas y un protocolo planteado se buscará en este proyecto comparar las señales de vibración para fallos en engranajes plásticos y metálicos de diente helicoidal, así estableciendo bases de datos para proporcionar información eficaz, confiable y estructurada que sirva en el campo de la investigación y en el sector industrial.

### **2.4. Delimitación**

El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

#### **2.4.1. Espacial o geográfica**

El trabajo de titulación se desarrollará en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay en la Universidad Politécnica Salesiana, ubicado entre Avenida Elia Liut y Calle vieja (Google Maps, 2023). Como se observa en la Figura 2.2.

## Figura 2.2

Ubicación en Google Maps.



**Nota:** La Figura presenta la ubicación de los laboratorios de vibraciones en la Universidad Politécnica Salesiana.

### 2.4.2. Temporal

El trabajo de titulación se desarrollará en el periodo académico 62, comprendido entre los meses de marzo-junio. Tienen un alcance en el tiempo de 240 horas efectivas, por lo que el tiempo se define entre los meses de marzo a junio del 2023.

### 2.4.3. Sectorial o institucional

El trabajo de titulación tiene un desenvolvimiento investigativo, la cual se desarrollará en el laboratorio de vibraciones en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.

## 2.5. Problema General

- ¿Es posible comparar las señales de vibración en engranajes plásticos y metálicos de diente helicoidal con fallo de diente roto?

## 2.6. Problemas Específicos

- ¿Es posible establecer un protocolo de montaje para una caja de engranajes helicoidal que garantice la repetibilidad del experimento?
- ¿Será factible obtener una línea base de señales de vibración en la caja de engranajes de diente helicoidal de los engranajes plásticos y metálicos?
- ¿Se podrá realizar un análisis comparativo de las señales de vibración obtenidas en la caja de engranajes helicoidal en el dominio del tiempo y frecuencia para las líneas base de estudio?

### **3. Objetivo**

A continuación se presentan el objetivo general de la investigación como los objetivos específicos planteados para poder solventar el problema identificado en el trabajo de titulación y así poder concluirlo de una forma satisfactoria.

#### **3.1. Objetivo General**

- Conocer las diferencias entre las señales de vibración en engranajes plásticos y metálicos de diente helicoidal con fallo de diente roto.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

- Establecer un protocolo de montaje para una caja de engranajes helicoidal que garantice la repetibilidad del experimento.
- Obtener una línea base de señales de vibración en la caja de engranajes helicoidal de los engranajes plásticos y metálicos.
- Realizar un análisis comparativo de las señales de vibración obtenidas en la caja de engranajes helicoidal en el dominio del tiempo y frecuencia para las líneas base de estudio.

## **4. Hipótesis**

A continuación se presentan las hipótesis planteadas, tanto la general como las específicas.

### **4.1. Hipótesis General**

- Existirán diferencias en las señales de vibración en engranajes plásticos y metálicos de diente helicoidal con fallo de diente roto.

### **4.2. Hipótesis Específicas**

- Se establecerá un protocolo de montaje para una caja de engranajes helicoidal que garantice la repetibilidad del experimento.
- Se obtendrá una línea base de señales de vibración en la caja de engranajes helicoidal.
- Se realizará un análisis comparativo de las señales de vibración obtenidas en la caja de engranajes helicoidal en el dominio del tiempo y frecuencia para las líneas base de estudio.

## 5. Marco Teórico

### 5.1. Mantenimiento basado en la condición

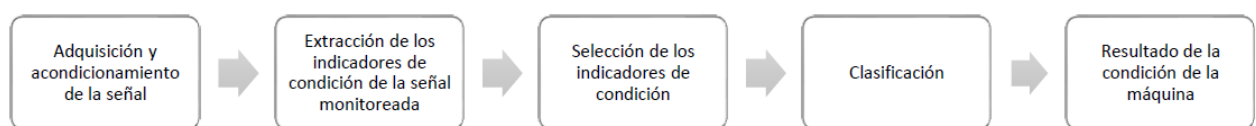
El MBC es una de más maneras más confiables para poder diagnosticar los fallos en una máquina. Este programa está diseñado para mostrar el rendimiento de un equipo, monitorear e identificar fallos basándose en los cambios de una propiedad física del sistema, donde se incluye tareas como detección, aislamiento e identificación de los fallos (Vachtsevanos, Lewis, Roemer, Hess, y Wu, 2006).

El MBC se soporta en la utilización de métodos de reconocimiento de patrones para conocer características en condiciones normales de los engranajes y en condiciones con fallos en los engranajes. El MBC para diagnóstico de cajas de engranajes se lo realiza aplicando el análisis de señales de monitoreo de la condición, este es el método no destructivo más utilizado para detectar fallos en inicios del fallo (Vachtsevanos y cols., 2006).

Las etapas del proceso de diagnóstico basado en datos se muestra en la Figura 5.1:

**Figura 5.1**

*Proceso del MBC.*



**Nota:** La imagen presenta las etapas del proceso de diagnóstico basado en datos para determinar el estado de una pieza.

El primer paso del proceso es la adquisición de datos y acondicionamiento de señal. Se usan variables físicas como temperatura, corriente, vibración, sonido, voltaje. El segundo paso es la representación de la señal monitoreada en el dominio adecuado como tiempo-frecuencia y se procede a la extracción de los indicadores de condición. Posteriormente en la selección de indicadores de condición se eliminan los indicadores no relevantes, para en la clasificación se mapea la información para determinar el estado de la pieza con la ayuda de expertos con conocimientos en ese tipo de sistemas (Llivicura Orellana, 2019).



## **5.2. Análisis de vibraciones**

Todas las máquinas generan vibración al realizar su actividad cotidiana, pero cuando tienen un componente que empieza a presentar fallas esa señal de vibración cambia. Esto permite identificar mediante un estudio, el lugar donde ocurre dichas fallas y de qué tipo, pudiendo así conseguir repararla antes de que ocasione fallos mayores. Por lo que realizar un análisis de vibraciones nos ayuda a actuar antes de que la producción se tenga que parar por una falla (Olarte, Botero, y Cañon, 2010).

## **5.3. Transformada rápida de fourier**

La FFT es un método de análisis de frecuencias utilizado para el diagnóstico de fallos en equipos rotativos debido a que este método nos permite analizar señales transitorias y lograr obtener información en el dominio de la frecuencia, por lo general las señales son vibraciones o emisiones acústicas las cuales representan las fallas de los equipos (Pazos, Hernández-Alcantara, y Morales-Menendez, s.f.). Se la puede entender también como un método de procesamiento de señales, que nos da la posibilidad de conocer componentes de frecuencia presentes en la señal estacionaria. Cuando se trabaja con señales que son discretas en el tiempo se denomina Transformada discreta de Fourier (DFT), así la FFT es una versión más eficiente de la DFT (Pacheco Córdova y cols., 2022).

## **5.4. Protocolo**

Es un reglamento que consta de pasos a seguir que se establecen por convenio. Según el contexto se lo puede entender como una normativa que nos indica que se debe realizar en ciertos procedimientos; así recopila acciones y técnicas que se deben realizar ante ciertas circunstancias para evitar problemas. En el ámbito de la toma de datos, este se entiende como un proceso para que la adquisición de datos sea igual para cada prueba y así evitar errores por un montaje no adecuado o diferente al propuesto (Malla Buestán y Samaniego Marca, 2017).

## **5.5. Engranajes helicoidales**

El engranaje es un cilindro dentado que transmite movimiento giratorio en una máquina formada por dos ruedas dentadas, la mayor llamada corona y el menor piñón, a un conjunto de dos o más engranes se le denomina tren de engranajes. Las aplicaciones de este sistema pueden ser en industrias, transporte, producción y herramientas (Vaca, Martínez, y Leguísamo, 2020).

## Figura 5.2

*Piñón y Corona (Vaca y cols., 2020)*



**Nota:** La imagen presenta dos engranajes, el pequeño siendo el piñón y el grande la corona.

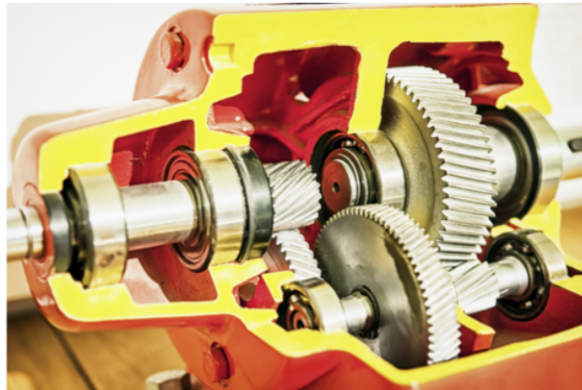
Los engranajes helicoidales se diferencian de los demás al sus dientes estar construidos en ángulo con relación a su eje ocasionando que su función mecánica cambie, se utiliza para la transmisión en ejes paralelos ocasionando mayor eficiencia, el ángulo más común con el que se trabaja es de  $90^\circ$  (Borja, 1980).

### 5.6. Caja de engranajes

Es un equipo que contienen trenes de engranajes integrados y sincronizados como se observa en la Figura 5.3. Llevado al ámbito operacional, es un componente de una máquina que tienen la capacidad de variar la velocidad y el par fuerza entre dispositivos. Esta también es usada para cambiar el sentido de rotación y dirección de los ejes de transmisión. En relación con otros sistemas de transmisión de potencia, la caja de engranajes nos ofrece un mejor control de velocidad, eficiencia de transmisión, más potencia, elevado torque y gran rango de velocidades. Las cajas de engranajes se clasifican en reductoras y multiplicadoras dependiendo de cuál sea la necesidad, aumentar o reducir la velocidad. Existen diversos tipos de engranajes como rectos, helicoidales, cónicos y tornillos sin fin (Trocel, 2020).

### Figura 5.3

*Corte de una caja de engranajes (Trocel, 2020).*



**Nota:** La imagen presenta el interior de una caja de engranajes, donde se observa las partes que lo componen.

### 5.7. Fallos de engranajes

Los fallos de los engranajes son muy comunes y se pueden ocasionar por varias razones, como el desgaste por las horas de funcionamiento, funcionamiento defectuoso de la máquina, mal montaje, lubricación, etc. Para un engranaje no solo basta con conocer la potencia, velocidad, cargas, tiempos de funcionamiento, cambios de sentido, temperatura; sino también las fallas que este puede sufrir y así realizar una correcta elección del material y un buen cálculo. Los engranajes se encuentran en la mayoría de las máquinas rotativas, por lo que conocer sus fallas es crucial (Rodríguez y Rodríguez, 2005).

Los fallos más comunes en engranajes son:

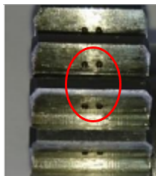
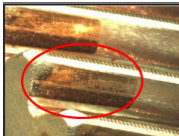

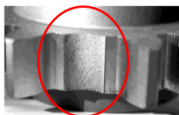
- Agrietamiento.
- Rayadura.
- Picadura.
- Rotura de diente.
- Desgaste.

### 5.8. Revisión bibliográfica de la construcción del fallo en engranajes

En la Tabla 5.1 se presenta una revisión bibliográfica de fallos en engranajes que pueden afectar el normal funcionamiento de un equipo.

**Tabla 5.1**

*Tabla de caracterización.*

REFERENCIAS	DESCRIPCION DEL FALLO	IMAGEN	METODO DE CONSTA	DIMENSIONES	LOCALIZACIÓN
Llivicura Orellana (2019)	El engranaje al funcionar mal origina esfuerzos en el flanco de los dientes ocasionando desprendimiento del material del diente originando agujeros por debajo del dedendum, a medida que el problema continua los agujeros aumentan por todo el diente originando grieta por fatiga.			Dientes con picadura: 6, Agujeros: 2, Diámetro: 1 mm, Profundidad: 1 mm.	Cara del deinte
Abraham (2014)	Cuando inicia el fallo está afectada cada deinte lo que conlleva que se generen reciduos de desgaste. Las marcas se presentan en posición de deslizamiento.		Las pruebas de gripado consistieron en 17 etapas de velocidad, iniciando con una velocidad de 1000 rpm a 9000 rpm en incrementos de 500 rpm. Cada etapa de velocidad se ejecutó durante un periodo de 10 minutos, lo que equivale a una duración de prueba completa de 170 minutos.	Leve: $L < 2$ mm, Moderado: $2\text{mm} < L < 4\text{mm}$ , Severo: $L \geq 4$ mm	Línea de paso, Raíz del diente, Altura de la cabeza del diente.
Iturbide Feliciano y Ramírez Valdés (2012), Errichello y Muller (2002)	El aceite que está contaminado desgasta los dientes formando marcas, las cuales se hacen aún más notorias a medida que sigue trabajando.			Fallo en cada frontal de diente en un 15% de los dientes, 6 dientes, 20% del diente marcas, Profundidad 0.1 mm	Superficie activa del deinte.
Magalhães y Seabra (2003)	Esta comienza con una grieta en la raíz y avanza hasta que el diente se rompe por completo o solo parte de este. Las causas de esto es la concentración de tensión como escalones o entalladuras en la raíz del diente, grietas provocados por el tratamiento térmico, huellas dejadas por la herramienta de corte.				Raíz del deinte

REFERENCIAS	DESCRIPCION DEL FALLO	IMAGEN	METODO DE CONSTA	DIMENSIONES	LOCALIZACIÓN
Hernández (1985)	Al romperse deintes consecutivos ocurre que uno o dos dientes se rompen por fatiga (apariencia lisa) y como el engranaje sigue girando con un torque, el golpe de rueda que se ocasiona por el espacio dejado por el diente roto afecta dientes adicionales los cuales fallarán por sobrecarga ( apariencia fibrosa).				Raiz del diente
Ortiz Farfán y Pérez Rivera (2016)	Empieza con pequeñas muescas en la raíz del diente del engranaje, debido a que allí es el punto de mayor esfuerzo de flexión en el diente; cuando avanzan los ciclos de trabajo se expande a lo largo del diente que pueden llegar a romper el diente.			Crack en la raíz del diente, centrado respecto a la cara, Profundidad: 1mm, Ancho: 1mm, Longitud 4mm	Raiz del deinte
Hernández (1985), Suárez Michelena (2017)	Se produce a cojinetes flojos o averiados. Los cojinetes flojos causaran deflexión del eje y fracturas en el deinte debido a las cargas en los extremos.				Extremo del diente
América (2023)	Ocurre cuan la tensión cíclica es menor que el límite elástico del material y el numero de ciclos es mayor a 10.000. En este caso se requiere poco tiempo para que la grieta se propague y deinte se rompa.				Raiz del diente

**Nota:** La Tabla de caracterización nos presenta los fallos que pueden sufrir los engranes, como construirlos, diemnsiones y localización.

## 5.9. Cartas de Charlotte

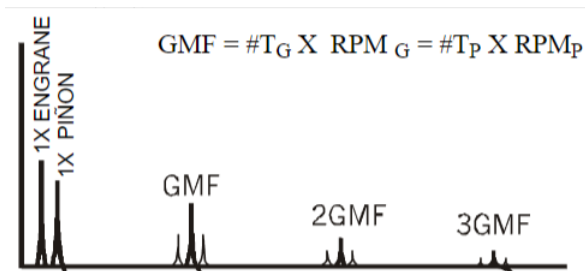
Esta carta es empleada para el diagnóstico de señales de vibración donde se da de forma clara la fuente del problema y el espectro típico. Así, detallando las frecuencias fundamentales y los componentes espectrales que deben estar presentes en las señales adquiridas; de igual manera, brinda los parámetros necesarios para proceder a realizar el análisis de las señales de vibración.

### 5.9.1. Engranaje condición normal

El espectro en condición normal muestra las velocidades del engrane y del piñón junto con la frecuencia de engranaje de engranes (GMF) y armónicas de GMF muy pequeñas. Las armónicas GMF cuentan por lo general con bandas laterales de velocidad de giro a su alrededor. Todos los picos que se observan en la Figura 5.4 son de amplitud baja, y no se alteran las frecuencias naturales de los engranes Charlotte (1986).

**Figura 5.4**

*Condición normal.*



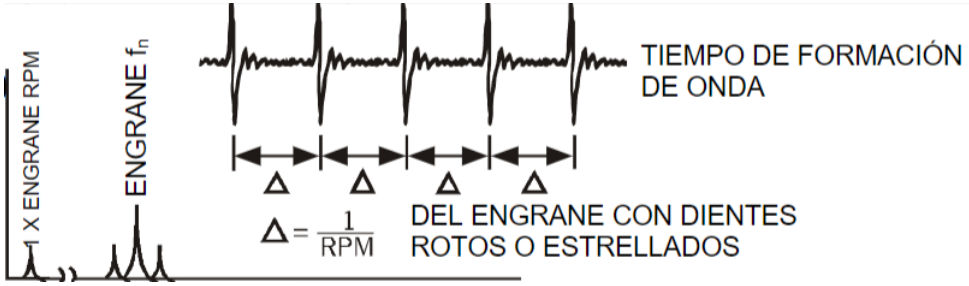
**Nota:** Espectro que se produce cuando el diente del engrane no tiene fallo.

### 5.9.2. Engranaje con diente roto

En la Figura 5.5 se observa lo que un diente roto o agrietado generará, provocando una alta amplitud en 1X RPM en este engrane únicamente en la forma de onda, además de que excitará la frecuencia natural del engrane mostrando bandas laterales de 1X. Se detecta mejor en la forma de onda que mostrará un pico pronunciado cada vez que el diente con el problema haga contacto con los dientes en el engrane complementario Charlotte (1986).

**Figura 5.5**

*Condición con fallo.*



**Nota:** Espectro que se produce cuando el diente del engrane tiene fallo.

## 6. Marco metodológico

### 6.1. Metodología de la Investigación

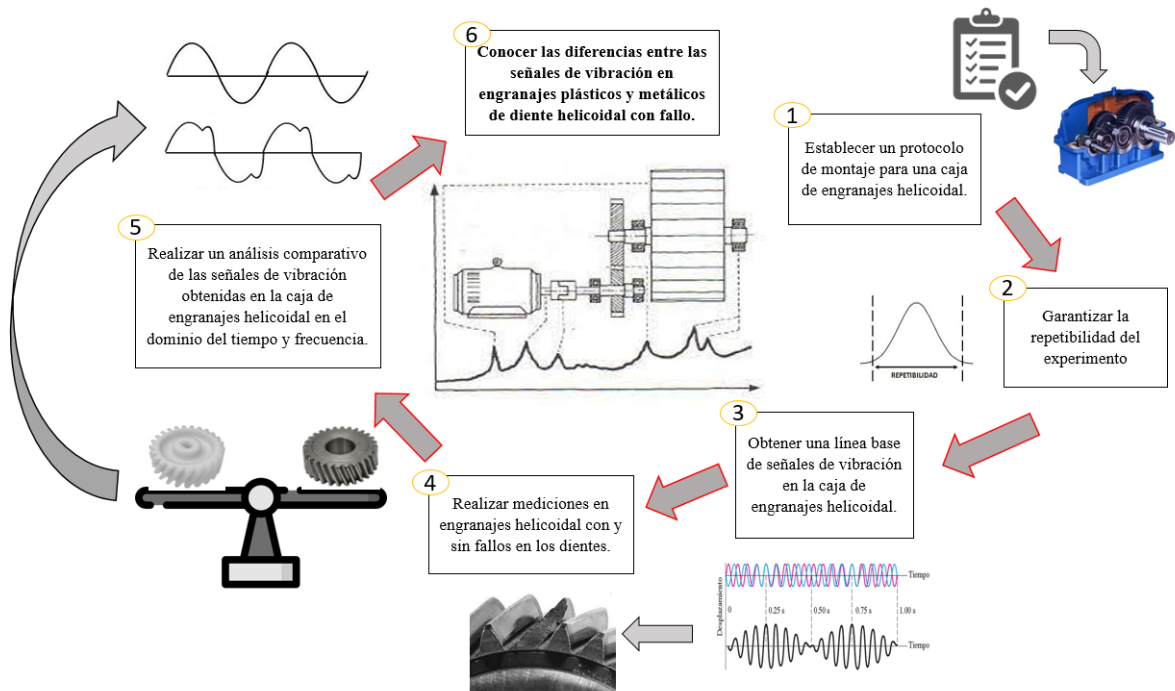
El trabajo tendrá un enfoque cuantitativo porque partirá de datos numéricos, además es de tipo investigativo aplicado a la realidad de la industria, y finalmente tiene un alcance descriptivo donde se aplicarán teorías y conceptos ya demostrados a una realidad en la investigación.

### 6.2. Metodología del proceso

A continuación, se presentará la metodología del proceso en forma gráfica en la Figura 6.1. Esta metodología consta de un proceso de seis pasos.

Figura 6.1

*Metodología del proceso.*



**Nota:** Metodología a seguir para lograr los objetivos de este trabajo.



La metodología empezará por establecer un protocolo de montaje para una caja de engranajes de diente helicoidal para garantizar la repetibilidad del experimento. Posteriormente, se procederá a obtener una línea base de señales de vibración en la caja de engranajes helicoidales con y sin fallo en los dientes. Así, con toda la información recolectada se procederá a realizar un análisis comparativo de las señales de vibración obtenidas en el dominio del tiempo y frecuencia de los engranajes con y sin falla y así lograr conocer las diferencias entre las señales de vibración en engranajes plásticos y metálicos de diente helicoidal.

### 6.3. Metodología para la adquisición de señales de vibración

El trabajo se desarrolló en el laboratorio del grupo de investigación y desarrollo en tecnologías industriales (GIDTEC) ubicado en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, que dispone de equipos para el monitoreo de la condición en maquinaria rotativa.

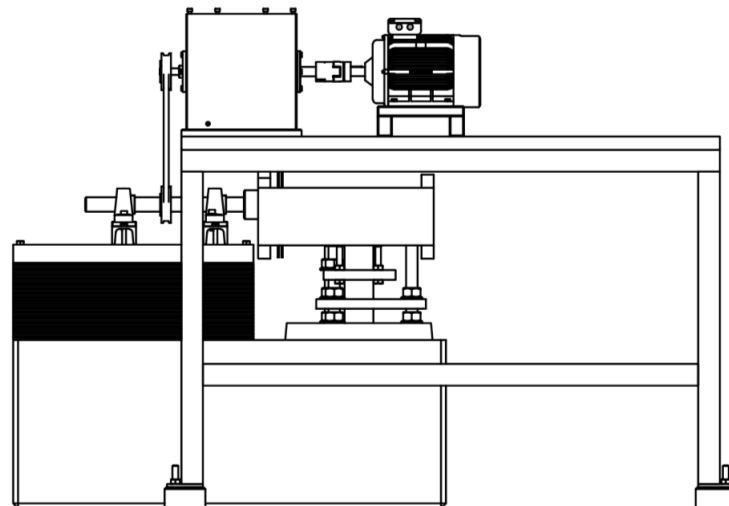
El objeto de estudio es el banco de vibraciones en donde se utilizarán acelerómetros para la adquisición de datos de señales de vibración.

#### 6.3.1. Especificaciones del banco de vibraciones

En la Figura 6.2 se presentan el banco con sus diferentes elementos. En la Tabla 6.1 se presenta las especificaciones de los elementos del banco de vibraciones.

#### Figura 6.2

*Esquema del banco de vibraciones.*



**Nota:** Esquema del banco de vibraciones del grupo GIDTEC.

**Tabla 6.1**

*Especificaciones de los elementos del banco*

<b><i>Especificaciones de los elementos del banco de vibraciones</i></b>	
Motor	1LA7 096-6YA60
Acoplamiento	Lovejoy D24
Rodamiento	UC204D1 / Yar 205 – 2f
Alojamiento de rodamientos	SKF P204 / SKF SY505M
Tipo de transmisión	Electromagnético mediante transmisión
Tipo de carga	Polea-correa
Relación de reducción	1 : 1.8
Tipo de lubricación	Lubricación manual
Tipo de grasa	KLUBER KLUBERLUB BE 71-501

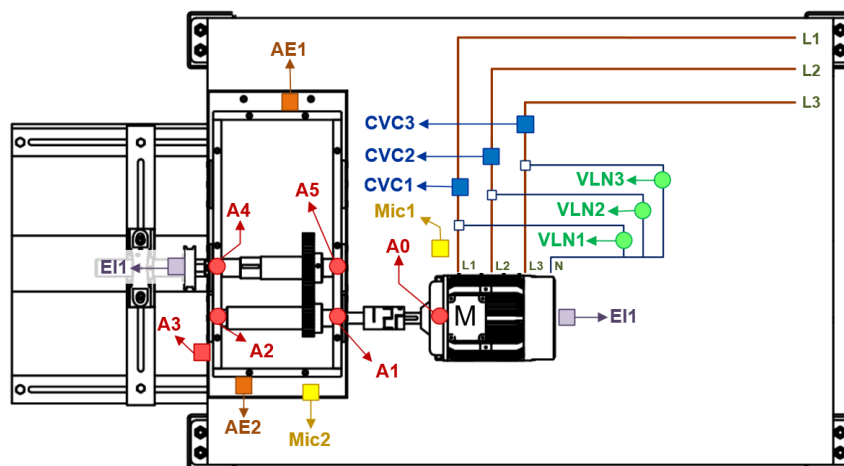
**Nota:** Se indica los elementos que conforman el banco de vibraciones del grupo GIDTEC.

### 6.3.2. Posición de los acelerómetros en el banco de vibraciones

En la Figura 6.3, se presenta el lugar de colocación de los acelerómetros en el banco de vibraciones. En esta Figura, los acelerómetros han sido denotados con A. Además, se tienen sensores de emisión acústica denotados con las letras AE, micrófonos con las letras Mic, los encoders incrementales con las letras EI, las pinzas de corriente con las letras CVC y los medidores de voltaje de línea con las letras VLN.

**Figura 6.3**

*Posición de los acelerómetros.*



**Nota:** Posición de los acelerómetros IPC en el banco de vibraciones del grupo GIDTEC.

A continuación se presenta la Tabla 6.2 donde se presenta las características del motor de inducción Siemens 1LA7 096-6YA60.

**Tabla 6.2**

*Características motor Siemens*

<b><i>Características Motor Siemens</i></b>		
<b><i>Parámetro</i></b>	<b><i>Unidad</i></b>	<b><i>Valor</i></b>
Frecuencia de suministro	Hz	60
Velocidad	rpm	1200
Alimentación	V	220
Potencia	HP	2

**Nota:** Se presenta las características de operación del motor de inducción montado en el banco de vibraciones.

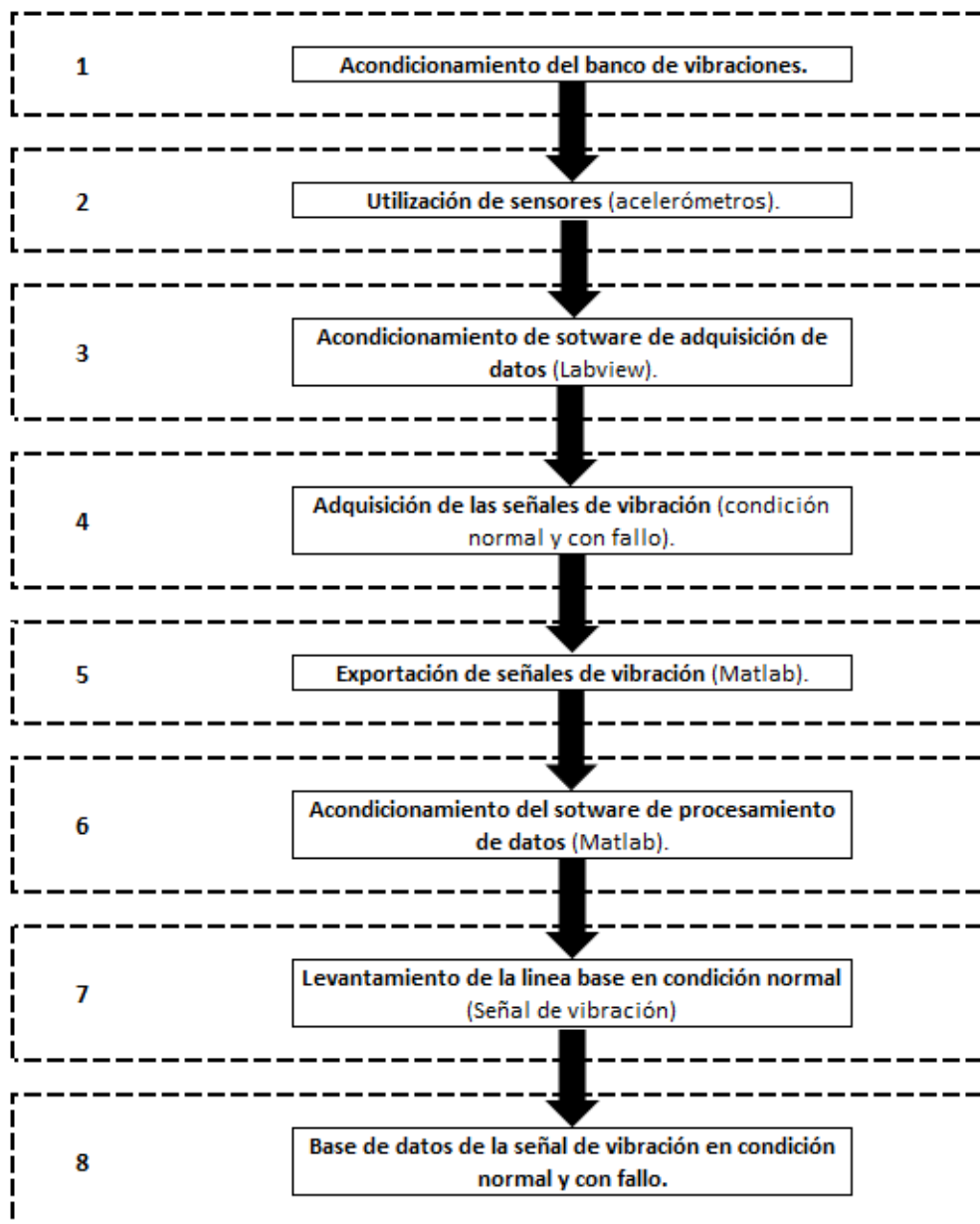
## 6.4. Plan experimental

### 6.4.1. Proceso experimental

El proceso se plantea acorde a un proceso establecido en el grupo GIDTEC, el cual consta de ocho etapas para garantizar la repetibilidad del experimento en la adquisición de datos para obtener las señales de vibraciones. En la Figura 6.4, se presenta el proceso.

**Figura 6.4**

*Proceso experimental para la adquisición de señales de vibraciones.*



**Nota:** Pasos para la adquisición de señales de vibraciones.

## 6.4.2. Procedimiento experimental

A continuación se describe las etapas necesarias para la adquisición de datos por medio de un acelerómetro.

### 6.4.2.1. Acondicionamiento del banco de vibraciones

Se empieza comprobando las conexiones eléctricas para evitar cortocircuitos que puedan afectar al motor. Posteriormente, se revisa que los elementos del banco de vibraciones estén bien montados como rodamientos, engranes, acelerómetros y elementos de transmisión. Además, se verifica que el banco de vibraciones opere de acuerdo a los parámetros del motor Siemens 1LA7 096-6YA60 establecidos en la Tabla 6.2. Por último, se verifica que los elementos del banco se encuentren con sujeción adecuada para poder evitar un juego excesivo, lo cual es una señal de desalineación o desbalance.

Para garantizar una adquisición de datos se debe de asegurar que las condiciones sean iguales para cada experimento. Así, en la Tabla 6.3 se presenta los parámetros de operación del banco de vibraciones.

**Tabla 6.3**

*Parámetros de operación*

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
Frecuencia de suministro	12/9/6 Hz
Velocidad de giro	720/540/360 rpm
Temperatura	19 °C

**Nota:** Se presenta los datos técnicos del banco de vibraciones.

### 6.4.2.2. Utilización de sensores

El acelerómetro empleado para este trabajo es el ICP 603C01 cuyas características se presentan en la Tabla 6.4.

**Tabla 6.4**

*Acelerómetro ICP 603C01*

<b>Características del acelerómetro ICP 603C01</b>	
Sensibilidad	10,2 mV/(m/s <sup>2</sup> )
Rango de frecuencia	0,5 a 10.000 Hz
Rango de medición	± 490 m/s <sup>2</sup>
Frecuencia de resonancia	25.000 Hz
Sensibilidad transversal	7%
Rango de Temperatura	-54 a 121 °C
Protección	IP68
Voltaje de excitación	18 a 28 VCC

**Nota:** En la Tabla se presenta las especificaciones técnicas del acelerómetro ICP 603C01.

Para adquirir los datos del acelerómetro se conectan directamente al módulo de adquisición con un cable de dos pines MIL-C-5015 con una salida del tipo BCN. Así, el módulo NI-9234 recibe la señal del acelerómetro para cada canal, este se encuentra conectado al chasis de módulo Ni-cDAQ-9188 el cual controla la adquisición de datos mediante el programa desarrollado en labVIEW. Posteriormente, se envía esos datos al computador mediante un cable de Ethernet para posteriormente realizar el análisis de las señales, como se observa en la Figura 6.5.

**Figura 6.5**

*Secuencia de conexión para la adquisición de datos.*



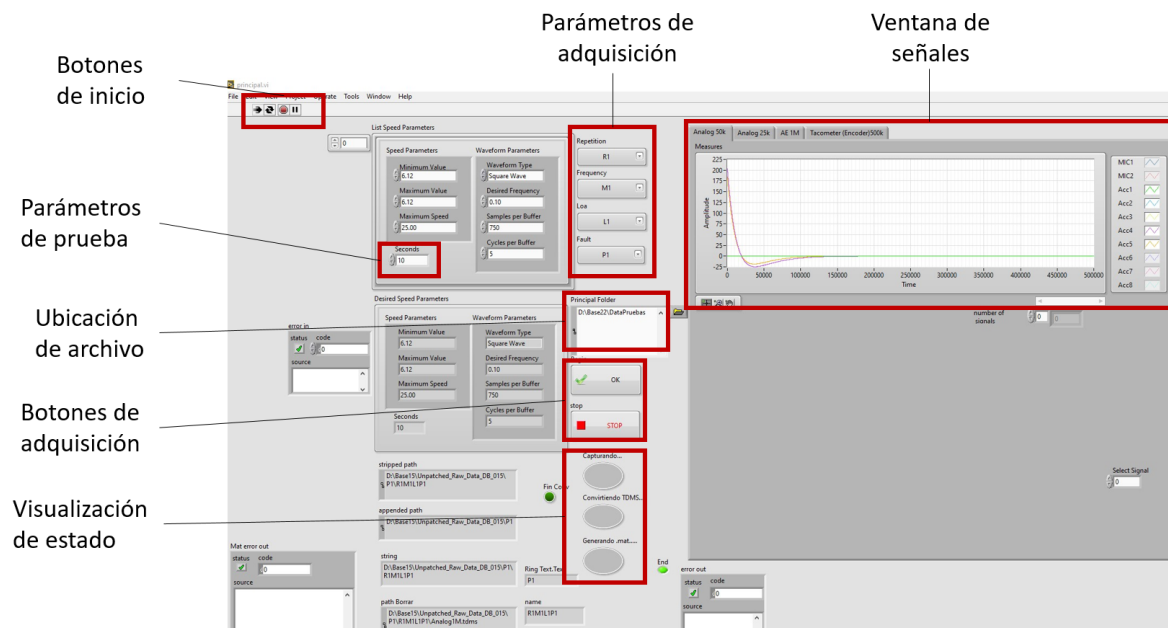
**Nota:** La figura nos presenta el proceso de conexión del acelerómetro IPC 603C01.

### 6.4.2.3. Acondicionamiento del software de adquisición de datos LabVIEW

En el grupo de investigación GIDTEC se ha desarrollado un programa en el software LabVIEW que permite la adquisición de señales de vibración, cuya interfaz podemos observar en la Figura 6.6.

**Figura 6.6**

*Secuencia de conexión para la adquisición de datos.*



**Nota:** La Figura presenta el software para la adquisición de datos en LabView.

En la siguiente Tabla 6.5 se puede observar la descripción de la función que cumple cada botón del programa en LabView.

**Tabla 6.5**

*Partes de la interfaz gráfica*

<b>Interfaz gráfica</b>	
Botones de inicio	Permite, iniciar, actualizar, pausar y detener el programa.
Parámetros de prueba	Se configura el tiempo en que el programa adquiere los datos.
Parámetros de adquisición	Se configura la prueba y la repetición que se esta adquiriendo.
Ubicación del archivo	Nos muestra la ubicación donde se almacena la señales adquiridas.
Botones de adquisición	Permite iniciar la adquisición de datos y detenerla en cualquier momento.
Visualización de estado	Permite visualizar el moento de la captura de la señal, la conversión de la señal y cuando se genera el archivo (.mat).
Ventana de señales	Permite ver de manera visual las señales adquiridas.

**Nota:** Partes de la interfaz gráfica para la recolección de datos.

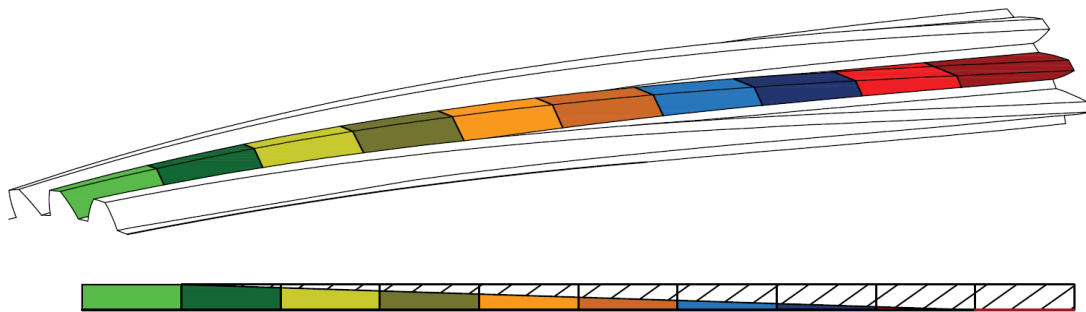
#### 6.4.2.4. Adquisición de señales de vibración

- Engranajes helicoidales, plásticos y metálicos

El elemento de estudio para este trabajo serán los engranajes helicoidales en material plástico fabricados de grilon y en metálicos fabricado de acero. Posteriormente, se realizará la recolección de datos de su frecuencia espectral, tanto en su modo normal y su modo con fallo a diferentes niveles de severidad, se presenta a continuación en la Figura 6.7.

**Figura 6.7**

*Engranaje helicoidal.*



**Nota:** La Figura presenta el diente helicoidal con los niveles de severidad marcados.

- Descripción del fallo en el engranaje helicoidal

Para el diseño del fallo se optó por realizar diente roto en forma inclinada. Así, dejando solo el primer nivel de severidad del diente sin fallo y acabando el último nivel de severidad con un 0% del diente.

Para este estudio se trabajó con 3 niveles de severidad, siendo el nivel P1, P5 y P10 lo que correspondería a un nivel de severidad de fallo normal, medio y crítico, esto lo podemos observar en la Tabla 6.6.

**Tabla 6.6**

*Niveles de severidad*

Posición	Tipo de fallo	% de fallo	Nivel de fallo	Descripción del fallo
P1	Diente Roto	0.00%	Nivel 1	Area rota: 0 mm <sup>2</sup>
P5	Diente Roto	43.75%	Nivel 5	Area rota: 35.57 mm <sup>2</sup>
P10	Diente Roto	100.00%	Nivel 10	Area rota: 81.3 mm <sup>2</sup>

**Nota:** Se presenta los tres niveles de severidad a trabajar en el experimento.

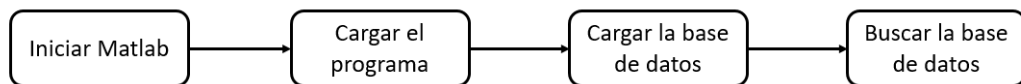


### 6.4.2.5. Exportación de las señales de vibración a Matlab

El grupo GIDTEC desarrollo un programa matemático en Matlab cuyo algoritmo es la Transformada de Fourier que puede analizar formas de onda en el dominio del tiempo convirtiéndolo en espectros de vibración en el dominio de la frecuencia, el proceso para la exportación de señales al software Matlab, se presenta a continuación en la Figura 6.8.

**Figura 6.8**

*Secuencia para exportar los datos a Matlab.*



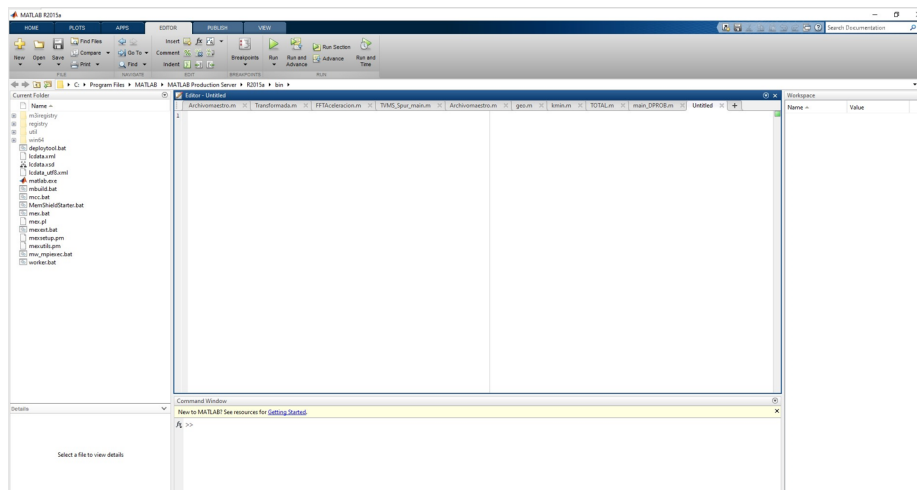
**Nota:** La Figura presenta la secuencia para exportar las señales de vibración.

A continuación se explican los pasos para exportar las señales de vibración a Matlab.

1. Comenzamos dando clic en el icono de Matlab para iniciar el programa visualizando la ventana principal del software como se observa en la Figura 6.9.

**Figura 6.9**

*Inicio programa Matlab.*

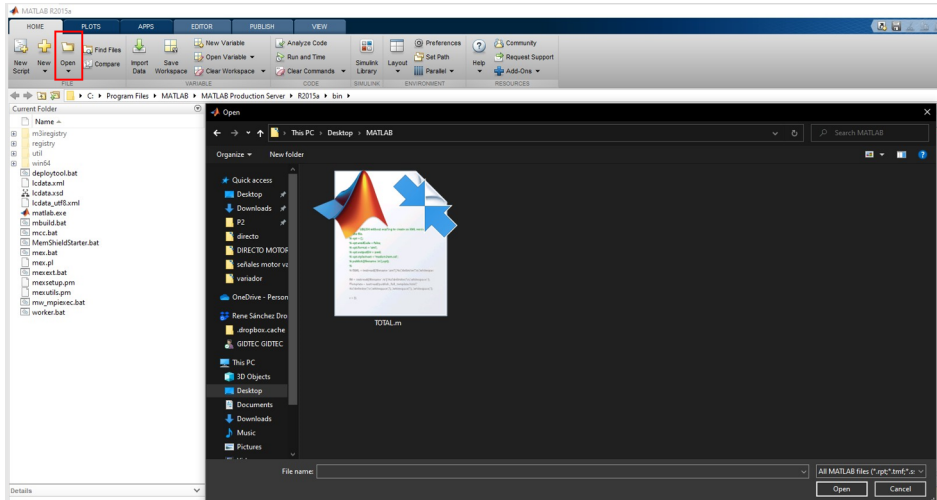


**Nota:** La Figura presenta la ventana de inicio de Matlab.

2. Procedemos a cargar el programa para procesar señales, damos clic en open y buscamos el programa que necesitamos como se observa en la Figura 6.10.

**Figura 6.10**

*Carga del programa en Matlab.*

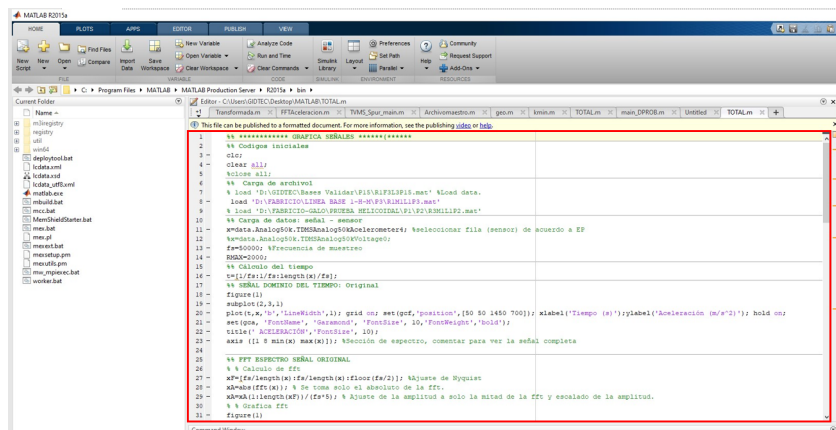


**Nota:** La Figura presenta la forma de cargar el programa de Matlab diseñado por el grupo GIDTEC.

3. Una vez seleccionado el programa lo abrimos y lo visualizamos en la ventana principal del software como se observa en la Figura 6.11.

**Figura 6.11**

*Visualización del programa.*

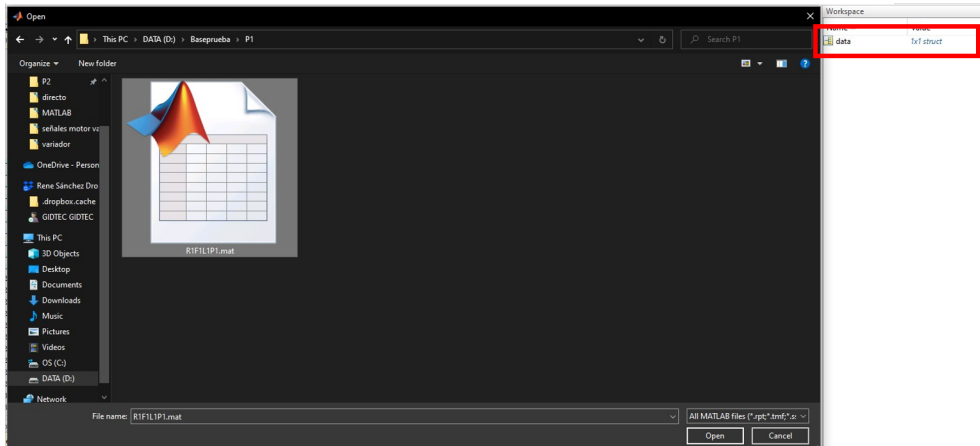


**Nota:** La Figura presenta el programa diseñado por el grupo GIDTEC.

4. Por último procedemos a cargar las bases de datos, para esto nos dirigimos a “Home” y seleccionamos open y buscamos las bases de datos y una vez encontrada la arrastramos a la ventana “Workspace” para ser analizada como se observa en la Figura 6.12.

**Figura 6.12**

*Carga de bases de datos.*



**Nota:** La Figura presenta el proceso para cargar la base de datos en Matlab.

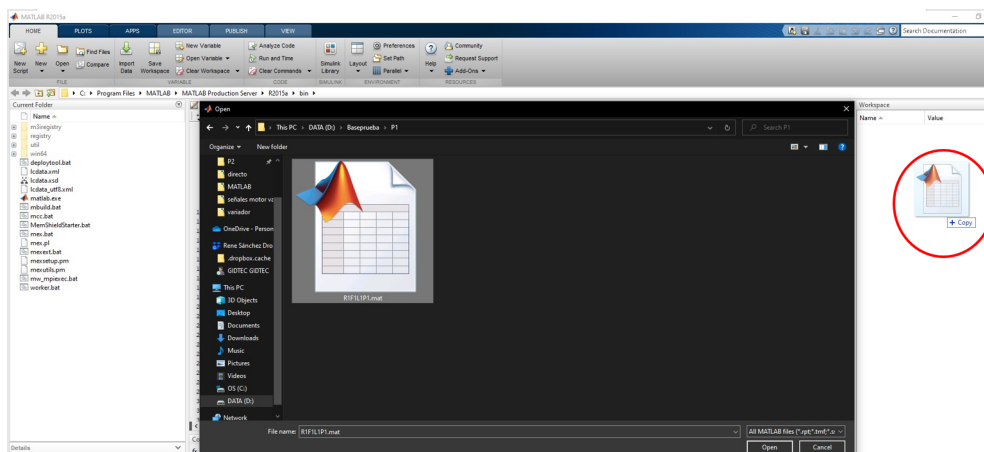
#### 6.4.2.6. Acondicionamiento del software de procesamiento de datos Matlab

A continuación se describirá el proceso para el acondicionamiento del software Matlab.

1. Se exporta el archivo (.mat) seleccionado que corresponde a la señal de vibración adquirida en el software LabView como se observa en la Figura 6.13.

**Figura 6.13**

*Exportación del archivo.*



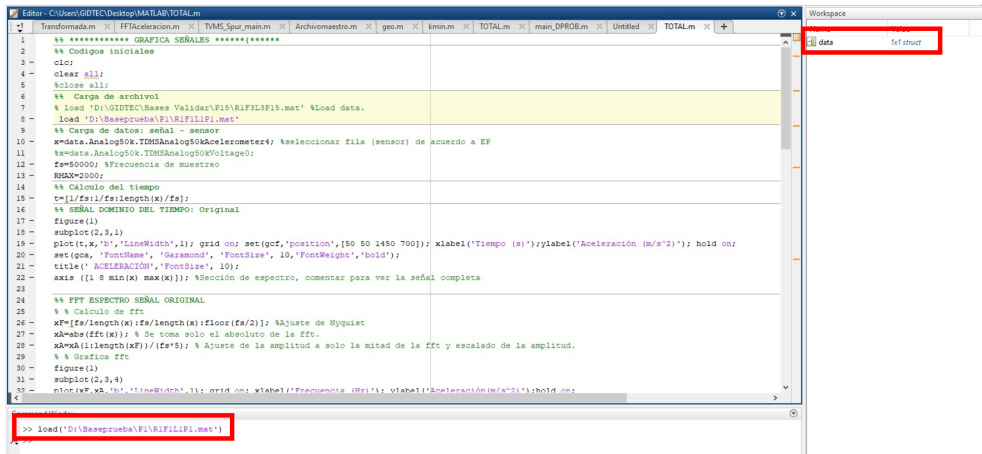
**Nota:** La Figura presenta el proceso para exportar el archivo (.mat)

2. Copiamos el nombre generado en la ventana “Command Window” y lo pegamos en la

sección del programa “Carga de archivo1” para realizar el análisis como se observa en la Figura 6.14.

**Figura 6.14**

*Proceso para el análisis de la señal.*

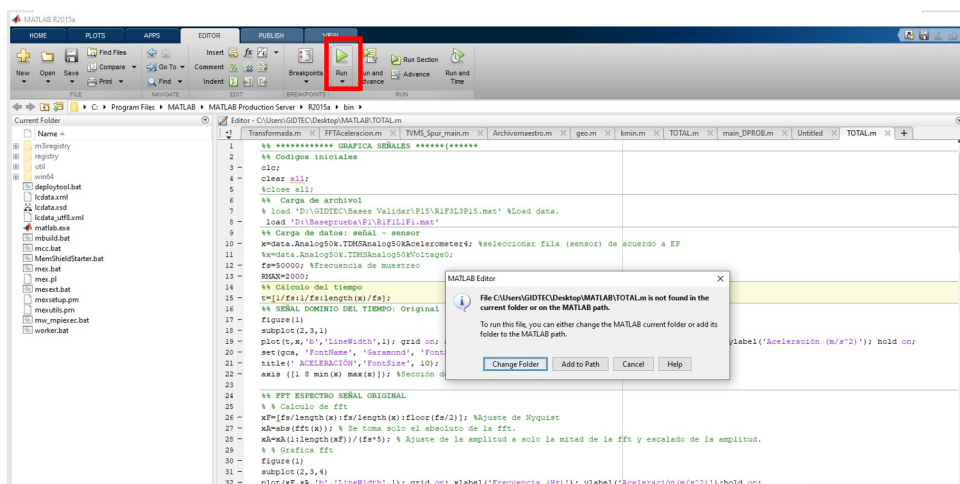


**Nota:** La Figura presenta el proceso para poder realizar el análisis de se señal en Matlab.

3. Se procesa la señal de vibración, nos dirigimos a la sección “Editor” y damos clic en “Run”, el proceso tomará unos segundos hasta que analice el espectro de vibración como se observa en la Figura 6.15.

**Figura 6.15**

*Análisis del espectro.*



**Nota:** La Figura presenta el análisis del espectro de vibración en Matlab.

- En el apartado del programa “Carga de archivo1” se puede modificar el nivel de severidad a visualizar (P1, P2, P3....etc) y la repetición (R1, R2, R3....etc), mientras que en la sección “Carga de datos: señal - sensor” se puede modificar el acelerómetro a visualizar (1,2,3...etc) como se observa en la Figura 6.16.

**Figura 6.16**

*Selección del archivo.*

```

%% Carga de archivo1
load 'D:\GIDTEC\Bases Validar\P15\RIF3L3P15.mat' %Load data.
% load 'D:\Baseprueba\P1\RIF1L1P1.mat'
%% Carga de datos: señal - sensor
x=data.Analog50k.TDMSAnalog50kAccelerometer3; %seleccionar fila (sensor) de acuerdo a EP
%x=data.Analog50K.TDMSAnalog50KVoltage0;
fs=50000; %Frecuencia de muestreo
RMAX=2000;

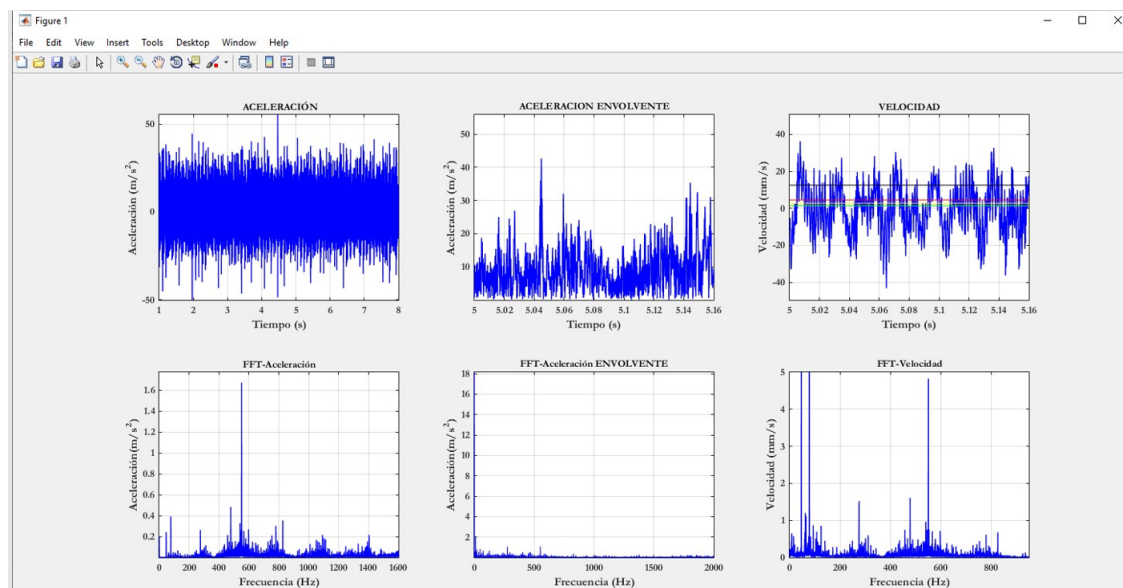
```

**Nota:** La Figura presenta el archivo a procesar donde se puede seleccionar el nivel de severidad, la repetición y el acelerómetro a visualizar.

- Una vez termine el análisis de la señal por parte del software, se puede visualizar la ventana de las gráficas para ser analizadas como se observa en la Figura 6.17.

**Figura 6.17**

*Ventana de gráficas.*



**Nota:** La Figura presenta la ventana de gráficas para el análisis del espectro.

#### **6.4.2.7. Levantamiento de la línea base en condición normal**

La línea base es un punto clave en el análisis de vibraciones, debido a que de aquí se obtiene los espectros de vibraciones del banco, donde se puede observar los valores de indicadores de frecuencia y amplitud en condiciones normales de funcionamiento. Para posteriormente poder compararlos con los espectros de vibración en condición con fallo y así determinar la variación respecto a la línea base.

##### **6.4.2.7.1. Proceso para levantamiento de la línea base**

Obtenida la línea base, el siguiente paso es validar el espectro de vibración obtenido, para lo cual seguimos los siguientes pasos:

1. Verificación visual

Al realizar esta inspección nos permitirá detectar problemas como desalineación en el eje, mala colocación de sensores y cables, polea mal alineada, pernos sin ajustar, entre otros.

2. Verificación de ruidos

Si al encender el equipo se detectan ruidos anormales, pueden ser indicadores de desalineación, mal ajuste de pernos o que el piñón y rueda se encuentren demasiado cercanos o alejados de su interlace.

3. Verificación frecuencias características

El banco de pruebas genera frecuencias características determinadas por la velocidad y relación de transmisión de sus componentes. Por esto se calculan las frecuencias características utilizando los datos de operación del banco, las cuales se pueden observar en la Figura 6.18.

**Figura 6.18**

*Frecuencias características.*

Elemento	Datos	Formula	Frecuencia (Hz) a 720 rpm	Frecuencia (Hz) a 540 rpm	Frecuencia (Hz) a 360 rpm
<b>Motor</b>	Vmotor = velocidad nominal	$Frecuencia = \frac{velocidad}{60}$	12	9	6
<b>Acoplamiento</b>	Velocidad nominal	$Frecuencia = \frac{velocidad}{60}$	12	9	12
<b>Paso de alabes (BPF)</b>	Na = numero de alabes = 10	$Frecuencia = \frac{Rpm_{motor} * Na}{60}$	120	90	60
<b>Banda Mitsubishi</b>	RPM polea = rpm de la polea = 393.96/295.47/196.98 Pd_banda= diámetro primitivo(mm) = 100 L = longitud de a banda (mm) = 1041	$Frecuencia = \left( \frac{(3,142) * (Rpm_{polea}) * (Pd_{banda})}{L} \right) / 60$	1.98	1.48	0.99
<b>Engranajes</b>	Ng = Velocidad eje de entrada	Frecuencia de entrada: $f_g$ $f_g = \frac{N_g}{60}$	12	9	6
		Frecuencia de salida: $f_p$ $f_p = \frac{f_g \cdot Z_g}{Z_p}$	6.56	4.92	3.28
	Zg = N° de dientes engranaje de entrada = 29	Frecuencia del engranaje: $f_m$ $f_m = f_g \cdot Z_g$	348	261	174
	Zp = N° de dientes engranaje de salida = 53	Frecuencia de bandas laterales: $f_{1,i} - f_{2,i}$ $f_{1,i} = f_m \pm f_g$ $f_{2,i} = f_m \pm f_p$	$f_{1,1} = 360$ $f_{1,2} = 336$ $f_{2,1} = 354.56$ $f_{2,2} = 341.44$	$f_{1,1} = 270$ $f_{1,2} = 252$ $f_{2,1} = 265.92$ $f_{2,2} = 256.08$	$f_{1,1} = 180$ $f_{1,2} = 168$ $f_{2,1} = 177.28$ $f_{2,2} = 170.72$

**Nota:** Frecuencias características del banco de vibraciones.

#### 6.4.2.8. Bases de datos de la señal de vibración en condición normal y con fallo

La base de datos es la compilación de toda la información recaudada, la cual se encuentra organizada para que pueda ser más fácil de analizar, la estructura de la base de datos de los engranajes metálicos se presenta en la Tabla 6.7.

**Tabla 6.7**

*Base de datos del engranaje metálico*

Nombre	Fallo	Repeticiones	Nivel de severidad	Carga (V)
Engranaje helicoidal metálico	Sin fallo	5		0
			P1	5
				10
			P5	5
				10
			P10	5
Engranaje helicoidal metálico con fallo	Diente roto	5		0
			P1	5
				10
			P5	5
				10
			P10	5
	10			

**Nota:** en la Tabla se presenta el fallo, las repeticiones, la severidad y la carga del experimento.

En la Tabla 6.8 se puede observar la estructura de la base de datos de los engranajes plásticos.



**Tabla 6.8***Base de datos del engranaje plástico*

Nombre	Fallo	Repeticiones	Nivel de severidad	Carga (V)
Engranaje helicoidal plástico	Sin fallo	5	P1	0
				5
				10
			P5	0
				5
				10
			P10	0
				5
				10
Engranaje helicoidal plástico con fallo	Diente roto	5	P1	0
				5
				10
			P5	0
				5
				10
			P10	0
				5
				10

**Nota:** en la Tabla se presenta el fallo, las repeticiones, la severidad y la carga del experimento.

### 6.4.3. Metodologías para el análisis de datos

En esta sección se presentan las ecuaciones y métodos utilizados para el análisis comparativo de las señales de vibración adquiridas para el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia.

#### 6.4.3.1. Kurtosis

La ecuación (6.1) de la Kurtosis, es una medida estadística que indica el grado de concentración de una distribución alrededor de su media.

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{ns^4} - 3 \quad (6.1)$$

Donde:

- $k$  es el coeficiente de la kurtosis.
- $n$  es el número de datos.
- $x_i$  es el dato  $i$ -ésimo de la serie.
- $\bar{x}$  es la media aritmética de la distribución.
- $s$  es la desviación estándar de la distribución.

Este índice indica la cantidad de datos de la distribución cercanos a la media. Así, a mayor grado de curtosis, la distribución será más puntiaguda y las colas serán más ligeras. Y al revés, con curtosis más bajas, habrá menos datos alrededor de la media y las colas serán más pesadas.

Este estadístico será usado para realizar la comparación de la señal de vibración de los engranajes plásticos y metálicos en el dominio del tiempo.

#### 6.4.3.2. Transformada de Fourier

La ecuación (6.2) de la transformada de Fourier, permite conocer las diferentes componentes frecuenciales presentes en una señal estacionaria. En otras palabras, es un cálculo destinado a descomponer una señal en todas sus frecuencias, logrando convertir una señal del dominio de tiempo al dominio de frecuencia.

Sea  $x(t)$  una señal continua; se define la transformada de Fourier de  $x$ , denotada con  $X(\omega)$ .

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (6.2)$$

Donde la frecuencia es representada con:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (6.3)$$

Este método será usado para realizar la comparación de las señales de vibración de los engranajes plásticos y metálicos respecto a la amplitud de su GMF para el dominio de la frecuencia.

#### 6.4.3.3. Prueba t de dos muestras

La prueba t de dos muestras es un método utilizado para probar si las medias de población desconocidas de dos grupos son iguales o no.

Para la aplicación del método se plantean dos hipótesis (6.4), la nula donde se asume que las medias de la población son iguales y la alternativa que asume que las medias de la población son diferentes a un nivel de significancia del 5%.

$$\begin{cases} H_0 : \mu_1 - \mu_2 = 0 \\ H_A : \mu_1 - \mu_2 \neq 0 \end{cases} \quad (6.4)$$

Para la determinación del valor-p que es la probabilidad asignada al valor del estadístico de prueba, el cual requiere del cálculo de dos fórmulas, la ecuación (6.5), del estadístico de prueba.

$$t_{df} = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)}} \quad (6.5)$$

Donde:

- $t_{df}$  es el estadístico de prueba.
- $n$  es el tamaño de la muestra.
- $\mu$  es la media de la población.
- $\bar{x}$  es el promedio de cada grupo.
- $s$  es la desviación estándar de la distribución.

Y el cálculo, de la ecuación (6.6), de los grados de libertad.

$$df = \frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1-1} + \frac{\left(\frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2-1}} \quad (6.6)$$

Donde:

- $df$  son los grados de libertad.
- $n$  es el tamaño de la muestra.
- $s$  es la desviación estándar de la distribución.

La prueba t de dos muestras será usada para conocer si las señales de vibración en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia de los engranajes metálicos y plásticos corresponde con la hipótesis nula, por lo que serán iguales o si corresponde la hipótesis alternativa y su comportamiento será distinto.

## **7. Resultados**

### **7.1. Parámetros establecidos para el protocolo de montaje de la caja de engranajes helicoidal**

El siguiente proceso a describir será un resumen de los pasos a seguir para el montaje y desmontaje de la caja de engranajes de laboratorio de vibraciones, esto con el fin de garantizar la repetibilidad del experimento y así tener la confianza de los datos adquiridos.

#### **7.1.1. Protocolo de desmontaje**

1. El primer paso es apagar el puesto de mando para evitar accidentes, al igual que definir un lugar donde colocar todos los componentes desmontados.
2. Se procede al desmontaje de los acelerómetros del banco junto con el desacople del motor del eje del piñón.
3. A continuación, se retiran las chumaceras junto con el eje de la rueda y los colocamos en la mesa de trabajo, una vez realizado esto extraemos la rueda del eje y procedemos a desmontarla, para esto se utiliza una prensa.
4. Se procede a retirar las chumaceras junto con el piñón y los colocamos en la mesa de trabajo para realizar la extracción de las chumaceras del piñón.
5. Por último, se aflojan los pernos de las bases sobre las cuales se asienta los componentes del banco y las colocamos en el lugar seleccionado.

#### **7.1.2. Protocolo de montaje**

1. El primer paso será la colocación de las bases en su posición adecuada, de acuerdo a la configuración ya planteada y una vez realizado esto fijarlas al banco.
2. Se procede a colocar el motor en su posición y fijarlo para posteriormente colocar tanto el acople como las chumaceras en el piñón y colocarlo en las bases del banco para posteriormente acoplarlo al motor, el cual deberá ser alineado de acuerdo a la posición del motor, esto deberá ser comprobado con un reloj comparador.
3. Se procede al montaje de la rueda y posterior montaje en su eje, para esto se utiliza una prensa, con la rueda montada en el eje se procede a armar el sistema de fijación de

la rueda, se montan las chumaceras y todo este sistema se lo coloca en las bases del banco.

4. Con ayuda de un calibrador se verifica la distancia de interlace entre el eje de la rueda y el piñón para un correcto engranaje de los dientes, una vez verificado esto colocamos la rueda en la posición deseada y la fijamos.
5. El último paso será montar los acelerómetros en las posiciones designadas para posteriormente encender el banco y realizar la adquisición de las señales de vibración.

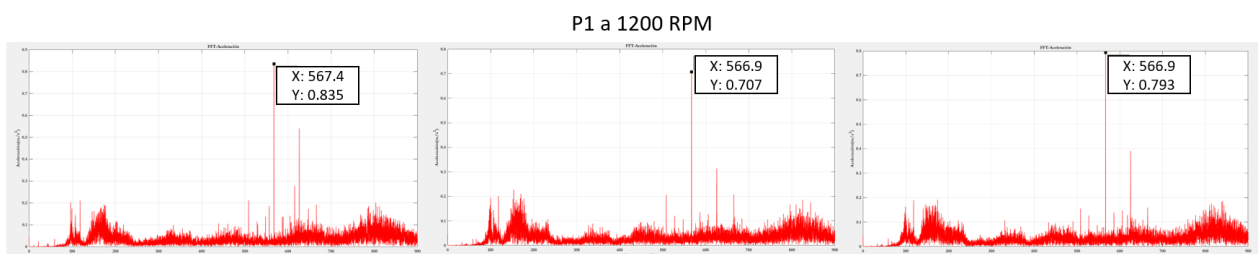
Si requiere información más detallada sobre el banco de vibraciones, ponerse en contacto con el grupo de investigación GIDTEC.

### 7.1.3. Validación del protocolo de montaje

Para la validación del protocolo de montaje y desmontaje del banco de vibraciones se realizó tres pruebas donde se siguió el protocolo paso a paso y al final se realizó la adquisición de señales de vibración, las pruebas se realizaron en el nivel P1 a 1200 rpm y sin carga, dando como resultado los espectros que se observan en la Figura 7.1.

**Figura 7.1**

*Espectro en condición normal.*



**Nota:** Espectros en condiciones normales y sin aplicación de carga de las tres pruebas del protocolo.

Estos resultados demuestran que el protocolo de montaje y desmontaje es correcto, los espectros de vibración muestran comportamientos similares después de realizar las tres pruebas del protocolo, por lo que con esto se garantiza la repetibilidad del experimento.

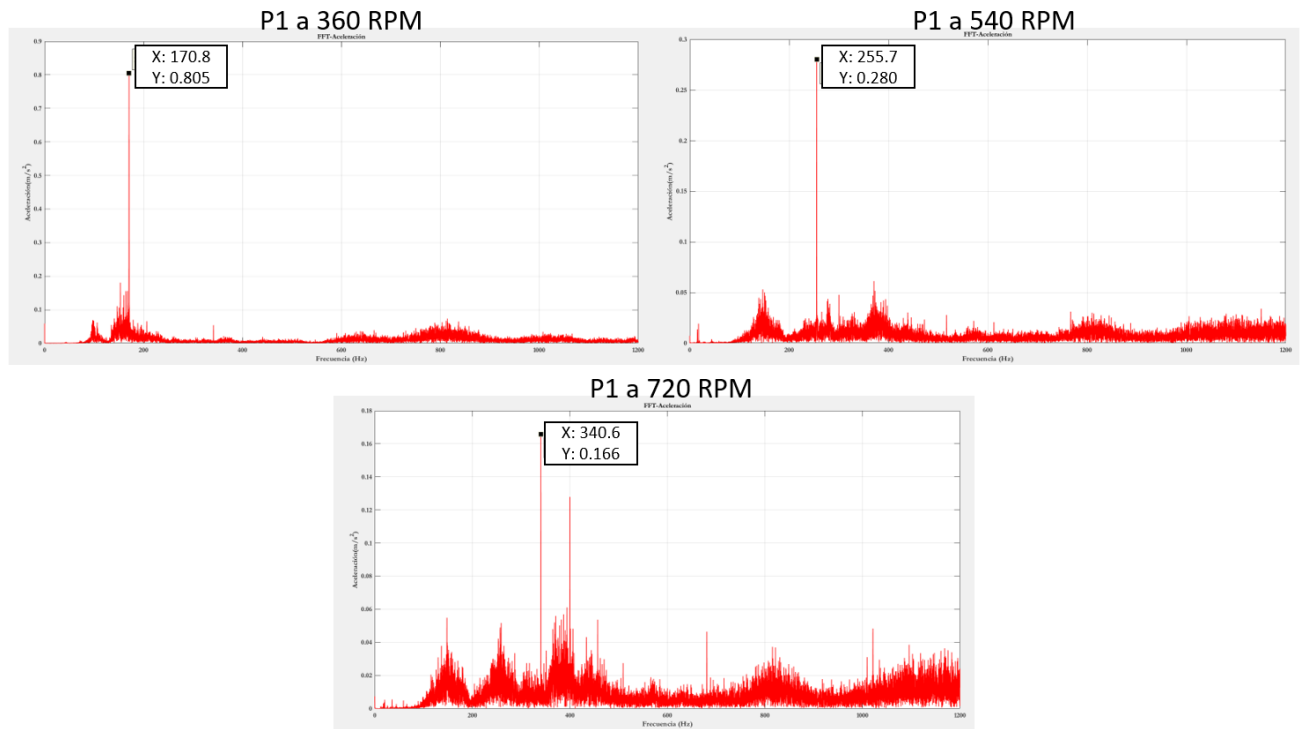
## 7.2. Señales de vibración obtenidas en la caja de engranajes helicoidal de los engranajes plásticos y metálicos

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de la adquisición de la base de datos para engranajes plásticos y metálicos con y sin fallo en sus dientes.

Se obtuvo espectros de vibración del procesamiento de las señales en MatLab mediante la FFT. En la Figura 7.2, se presenta los espectros en condiciones normales y sin aplicación de carga con engranaje metálico a tres velocidades en la posición P1.

### Figura 7.2

*Espectro en condición normal del engrane metálico.*

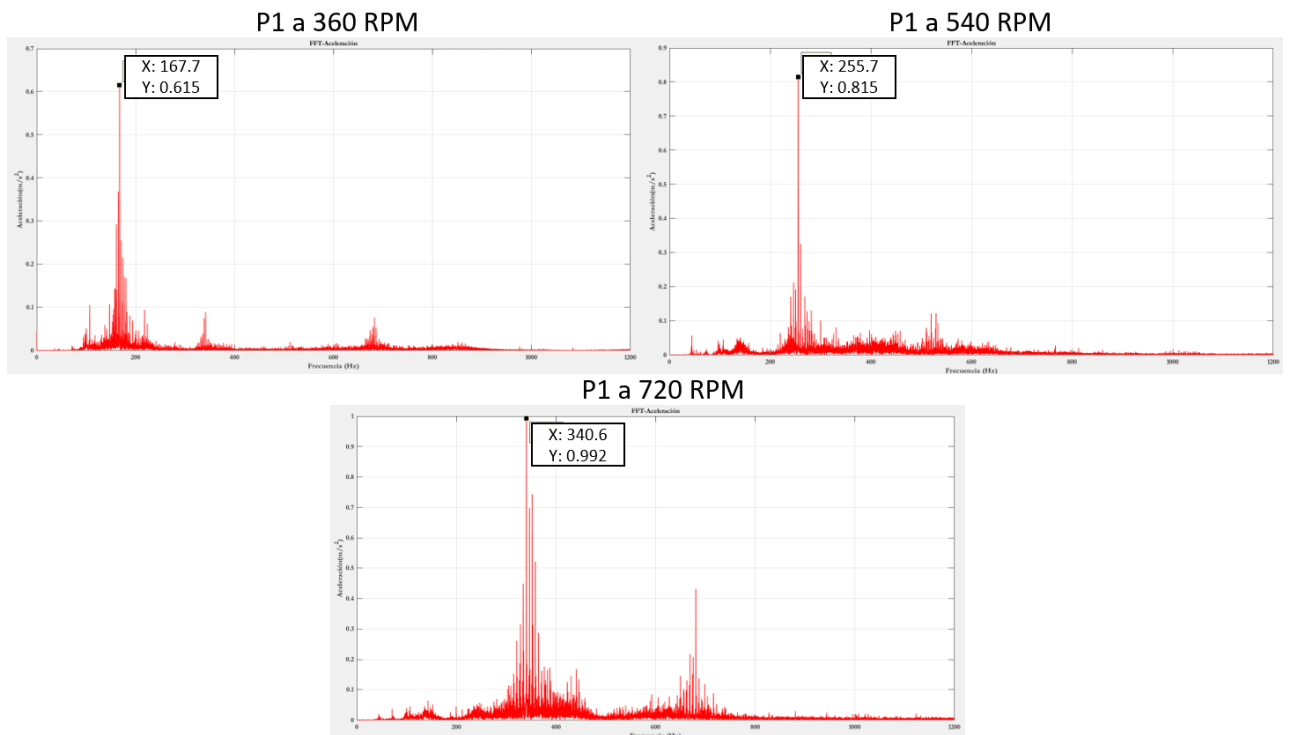


**Nota:** Espectros en condiciones normales y sin aplicación de carga.

En la Figura 7.3, se presenta los espectros en condiciones normales y sin aplicación de carga con engranaje plástico a tres velocidades en la posición P1.

**Figura 7.3**

*Espectro en condición normal del engrane plástico.*



**Nota:** Espectros en condiciones normales y sin aplicación de carga.

La línea base adquirida servirá para realizar el análisis comparativo entre los engranajes plásticos y metálicos en condición normal y cuando sufre un fallo y así determinar si su comportamiento cambia respecto al material.

### **7.3. Resultados del análisis comparativo de las señales de vibración obtenidas en la caja de engranajes helicoidal en el dominio del tiempo y frecuencia**

En esta sección se presenta la comparación de señales de vibración en el dominio del tiempo y de la frecuencia, a fin de determinar si existe diferencia en el comportamiento de las señales al cambiar el material del engrane, pero al aplicar las mismas condiciones para la adquisición en la caja de engranajes, para este análisis se utilizó la prueba T de dos muestras para conocer si la media de los grupos son iguales.

En la Tabla 7.1, se presentan las señales de vibración en el dominio del tiempo para los engranajes helicoidales metálicos y plásticos, sin fallo y sin carga (0V).

**Tabla 7.1***Señales de vibración en el dominio del tiempo sin fallo*

	360 rpm		540 rpm		720 rpm	
	Metálicos	Plásticos	Metálicos	Plásticos	Metálicos	Plásticos
R1	17.7846	2.1466	20.0935	2.8718	21.8185	5.4372
R2	19.7241	2.1272	20.5545	2.9478	21.206	5.7386
R3	18.8652	2.1599	17.6157	3.0999	23.6183	5.5247
R4	17.6953	2.1554	19.453	2.9646	25.3276	5.546
R5	17.7554	2.1474	19.3103	2.9951	22.2123	5.3206
Media $\pm$ std	18.364 $_{+0.90}^{-0.90}$	2.147 $_{+0.012}^{-0.012}$	19.405 $_{+1.119}^{-1.119}$	2.975 $_{+0.082}^{-0.082}$	22.836 $_{+1.650}^{-1.650}$	5.513 $_{+1.154}^{-1.154}$
Valor-p	0.0000022787		0.000004668		0.000017227	
Hipótesis	Diferente		Diferente		Diferente	

**Nota:** Se calculó la media y desviación estándar de las 5 repeticiones adquiridas.

A continuación, en la Tabla 7.2 se presentan las señales de vibración en el dominio del tiempo para los engranajes helicoidales metálicos y plásticos, con fallo y sin carga (0V).

**Tabla 7.2***Señales de vibración en el dominio del tiempo con fallo*

	360 rpm		540 rpm		720 rpm	
	Metálicos	Plásticos	Metálicos	Plásticos	Metálicos	Plásticos
R1	12.1222	3.1160	15.0742	6.5321	13.0843	11.4838
R2	11.5281	3.1043	13.4658	6.6028	14.0382	13.3535
R3	10.7248	3.1334	15.6176	6.9279	12.9108	11.9047
R4	10.855	3.1481	16.1723	5.9095	16.8656	14.0266
R5	11.0425	3.0799	15.4486	6.0214	13.6144	12.8618
Media $\pm$ std	11.254 $_{+0.572}^{-0.572}$	3.116 $_{+0.026}^{-0.026}$	15.155 $_{+1.024}^{-1.024}$	6.398 $_{+0.424}^{-0.424}$	14.102 $_{+1.607}^{-1.607}$	12.726 $_{+1.039}^{-1.039}$
Valor-p	0.0000056489		0.0000061261		0.1528	
Hipótesis	Diferente		Diferente		Igual	

**Nota:** Se calculó la media y desviación estándar de las 5 repeticiones adquiridas.

Las señales de vibración adquiridas en el dominio del tiempo para los engranes plásticos y metálicos sin fallo rechaza la hipótesis nula debido a que en las tres velocidades el comportamiento en la serie del tiempo de los engranajes plásticos es estadísticamente menor al de los metálicos. Pero al aplicar un fallo en los engranajes en este caso diente roto la variable nula



es aceptada para la velocidad de 720 rpm debido a que estadísticamente el comportamiento de la serie del tiempo es similar. Esto podría deberse a que al aumentar las rpm el tiempo de contacto entre dientes se reduce, por lo que al adquirir los datos podría no detectarse la diferencia del material del engranaje.

En la Tabla 7.3, se presentan las señales de vibración en el dominio del tiempo para los engranajes helicoidales metálicos, sin fallo, con fallo y sin carga (0V).

**Tabla 7.3**

*Señales de vibración engranes metálicos en el dominio del tiempo sin fallo y con fallo*

	360 rpm		540 rpm		720 rpm	
	Sin fallo	Con fallo	Sin fallo	Con fallo	Sin fallo	Con fallo
R1	17.7846	12.1222	20.0935	15.0742	21.8185	13.0843
R2	19.7241	11.5281	20.5545	13.4658	21.206	14.0382
R3	18.8652	10.7248	17.6157	15.6176	23.6183	12.9108
R4	17.6953	10.855	19.453	16.1723	25.3276	16.8656
R5	17.7554	11.0425	19.3103	15.4486	22.2123	13.6144
Media $\pm$ std	18.364 $_{+0.902}^{-0.902}$	11.254 $_{+0.572}^{-0.572}$	19.405 $_{+1.119}^{-1.119}$	15.155 $_{+1.024}^{-1.024}$	22.836 $_{+1.650}^{-1.650}$	14.102 $_{+1.607}^{-1.607}$
Valor-p	0.0000020011		0.00024979		0.000028862	
Hipótesis	Diferente		Diferente		Diferente	

**Nota:** Se calculó la media y desviación estándar de las 5 repeticiones adquiridas.

A continuación, en la Tabla 7.4 se presentan las señales de vibración en el dominio del tiempo para los engranajes helicoidales plásticos, con fallo, sin fallo y sin carga (0V).

**Tabla 7.4**

*Señales de vibración engranes plásticos en el dominio del tiempo con fallo y sin fallo*

	360 rpm		540 rpm		720 rpm	
	Sin fallo	Con fallo	Sin fallo	Con fallo	Sin fallo	Con fallo
R1	2.1466	3.1160	2.8718	6.5321	5.4372	11.4838
R2	2.1272	3.1043	2.9478	6.6028	5.7386	13.3535
R3	2.1599	3.1334	3.0999	6.9279	5.5247	11.9047
R4	2.1554	3.1481	2.9646	5.9095	5.546	14.0266
R5	2.1474	3.0799	2.9951	6.0214	5.3206	12.8618
Media $\pm$ std	2.147 $_{+0.012}^{-0.012}$	3.116 $_{+0.026}^{-0.026}$	2.975 $_{+0.082}^{-0.082}$	6.398 $_{+0.424}^{-0.424}$	5.513 $_{+0.154}^{-0.154}$	12.726 $_{+1.039}^{-1.039}$
Valor-p	0.00000000091133		0.000034875		0.000078669	
Hipótesis	Diferente		Diferente		Diferente	

**Nota:** Se calculó la media y desviación estándar de las 5 repeticiones adquiridas.

Las señales de vibración adquiridas, en el dominio del tiempo, para engranajes metálicos con y sin fallo y para los engranajes plásticos con y sin fallo, rechazan la hipótesis nula, esto porque el comportamiento de la serie del tiempo es diferente para el estado con fallo y sin fallo de los dos materiales. Cabe mencionar que el comportamiento en el dominio del tiempo al aplicar un fallo en los engranajes de los dos materiales su comportamiento respecto a la media de sus datos cambia, mientras que en los metálicos este dato disminuye para los plásticos aumenta el valor.

En la Tabla 7.5, se presentan las señales de vibración en el dominio de la frecuencia para los engranajes helicoidales metálicos y plásticos, sin fallo y sin carga (0V).

**Tabla 7.5**

*Señales de vibración en el dominio de la frecuencia sin fallo*

	360 rpm		540 rpm		720 rpm	
	Metálicos	Plásticos	Metálicos	Plásticos	Metálicos	Plásticos
R1	1.249	2.604	1.667	1.895	1.274	0.7027
R2	1.423	2.69	1.743	1.811	1.217	0.7372
R3	1.288	2.663	1.776	1.721	1.062	0.7114
R4	1.109	2.613	1.74	1.525	1.065	0.7187
R5	1.128	2.521	1.71	1.567	1.156	0.7053
Media $\pm$ std	1.239 $_{+0.128}^{-0.128}$	2.618 $_{+0.064}^{-0.064}$	1.727 $_{+0.041}^{-0.041}$	1.703 $_{+0.157}^{-0.157}$	1.154 $_{+0.093}^{-0.093}$	0.715 $_{+0.013}^{-0.013}$
Valor-p	0.00000075557		0.7619		0.00038034	
Hipótesis	Diferente		Igual		Diferente	

**Nota:** Se calculó la media y desviación estándar de las 5 repeticiones adquiridas.

Las señales de vibración adquiridas, en el dominio de la frecuencia, para engranajes metálicos y plásticos sin fallo, acepta la hipótesis alternativa para las velocidades de 360 y 720 rpm, pero la rechaza para la velocidad de 540 rpm debido a que estadísticamente el comportamiento de las amplitudes de la GMF es similar. Esto se debe a que cuando se trabaja con frecuencias, la velocidad de análisis afectara al comportamiento que presenten las señales de vibración.

A continuación, en la Tabla 7.6 se presentan las señales de vibración en el dominio de la frecuencia para los engranajes helicoidales metálicos y plásticos, con fallo y sin carga (0V).

**Tabla 7.6***Señales de vibración en el dominio de la frecuencia con fallo*

	360 rpm		540 rpm		720 rpm	
	Metálicos	Plásticos	Metálicos	Plásticos	Metálicos	Plásticos
R1	1.23	0.849	1.442	0.9368	0.4581	0.8942
R2	1.246	0.8921	1.475	0.9126	0.4422	0.8952
R3	1.255	0.871	1.421	0.8566	0.4612	0.9197
R4	1.229	0.8303	1.399	0.8541	0.4153	0.9243
R5	1.197	0.8043	1.388	0.9119	0.4098	0.9909
Media $\pm$ std	1.231 $_{+0.022}^{-0.022}$	0.849 $_{+0.034}^{-0.034}$	1.425 $_{+0.034}^{-0.034}$	0.894 $_{+0.037}^{-0.037}$	0.437 $_{+0.023}^{-0.023}$	0.924 $_{+0.039}^{-0.039}$
Valor-p	0.00000018245		0.00000001271		0.00000012911	
Hipótesis	Diferente		Diferente		Diferente	

**Nota:** Se calculó la media y desviación estándar de las 5 repeticiones adquiridas.

Las señales de vibración adquiridas, en el dominio de la frecuencia, para engranajes metálicos y plásticos con fallo, acepta la hipótesis alternativa para las velocidades de 360, 540 y 720 rpm, debido a que el comportamiento que presentan estos materiales respecto a la amplitud de la GMF con fallo es estadísticamente distinto.

En la Tabla 7.7, se presentan las señales de vibración en el dominio de la frecuencia para los engranajes helicoidales metálicos, sin fallo, con fallo y sin carga (0V).

**Tabla 7.7***Señales de vibración engranes metálicos en el dominio de la frecuencia sin fallo y con fallo*

	360 rpm		540 rpm		720 rpm	
	Sin fallo	Con fallo	Sin fallo	Con fallo	Sin fallo	Con fallo
R1	1.249	1.23	1.667	1.442	1.274	0.4581
R2	1.423	1.246	1.743	1.475	1.217	0.4422
R3	1.288	1.255	1.776	1.421	1.062	0.4612
R4	1.109	1.229	1.74	1.399	1.065	0.4153
R5	1.128	1.197	1.71	1.388	1.156	0.4098
Media $\pm$ std	1.239 $_{+0.128}^{-0.128}$	1.231 $_{+0.022}^{-0.022}$	1.727 $_{+0.041}^{-0.041}$	1.425 $_{+0.034}^{-0.034}$	1.154 $_{+0.093}^{-0.093}$	0.437 $_{+0.023}^{-0.023}$
Valor-p	0.8968		0.000001884		0.000031189	
Hipótesis	Igual		Diferente		Diferente	

**Nota:** Se calculó la media y desviación estándar de las 5 repeticiones adquiridas.

A continuación, en la Tabla 7.8 se presentan las señales de vibración en el dominio de la frecuencia para los engranajes helicoidales plásticos, con fallo, sin fallo y sin carga (0V).

**Tabla 7.8**

*Señales de vibración engranes plásticos en el dominio de la frecuencia con fallo y sin fallo*

	360 rpm		540 rpm		720 rpm	
	Sin fallo	Con fallo	Sin fallo	Con fallo	Sin fallo	Con fallo
R1	2.604	0.849	1.895	0.9368	0.7027	0.8942
R2	2.69	0.8921	1.811	0.9126	0.7372	0.8952
R3	2.663	0.871	1.721	0.8566	0.7114	0.9197
R4	2.613	0.8303	1.525	0.8541	0.7187	0.9243
R5	2.521	0.8043	1.567	0.9119	0.7053	0.9909
Media $\pm$ std	2.618 $_{+0.064}^{-0.064}$	0.849 $_{+0.034}^{-0.034}$	1.703 $_{+0.157}^{-0.157}$	0.894 $_{+0.037}^{-0.037}$	0.715 $_{+0.013}^{-0.013}$	0.924 $_{+0.039}^{-0.039}$
Valor-p	0.0000000022841		0.00020126		0.0001011	
Hipótesis	Diferente		Diferente		Diferente	

**Nota:** Se calculó la media y desviación estándar de las 5 repeticiones adquiridas.

Las señales de vibración adquiridas, en el dominio de la frecuencia, para engranajes metálicos con y sin fallo y para los engranajes plásticos con y sin fallo, aceptan la hipótesis alternativa, excepto en la comparación de la amplitud de los engranajes metálicos con y sin fallo a 360 rpm donde se acepta la hipótesis nula porque la media de sus valores es estadísticamente similares. Esto podría deberse que al trabajar con frecuencia, las bajas rpm no permiten detectar fácilmente un fallo, aunque esto dependerá del material a trabajar.

## 8. Conclusiones

El trabajo se realizó sobre el banco de vibraciones del grupo GIDTEC para la simulación de fallos. Primero se diseñó un protocolo de montaje y desmontaje del banco, esto para garantizar la repetibilidad del experimento. Las bases de datos fueron adquiridas señales de engranajes helicoidales plásticos y metálicos con modo normal y diente roto a diferentes posiciones, velocidades y cargas. El instrumento para la adquisición fueron acelerómetros colocados en distintos puntos del banco, estas señales fueron adquiridas por un software desarrollado en LabView y procesado en Matlab. Para el análisis comparativo de las señales, se decidió trabajar con un nivel medio de fallo, con una carga y tres velocidades, utilizando las técnicas de la FFT para el dominio de la frecuencia y la Kurtosis para el dominio del tiempo.

El protocolo de montaje permitió demostrar que sí es posible lograr la repetibilidad del experimento al realizar el montaje y desmontaje del banco en tres ocasiones, logrando que los espectros de vibración muestran un comportamiento similar. Esto es crucial para poder apreciar la diferencia de los datos al cambiar el material de los engranajes.

La línea base adquirida servirá para realizar el análisis comparativo entre los engranajes plásticos y metálicos en condición normal y cuando sufre un fallo y así determinar si su comportamiento cambia respecto al material. Se decidió trabajar en la posición P5 al ser un nivel medio de fallo, una carga de 0v lo que corresponde a un trabajo normal del banco y a tres velocidades de 360, 540, 720 rpm para diferencias el comportamiento al cambio de velocidad.

Para el análisis comparativo de las señales de vibración se utilizó el método t de dos muestras. El método de la kurtosis para el análisis de las señales en el dominio del tiempo puede ser considerado como un indicador de fallos. Este método permite conocer la cantidad de datos cercanos a la media, así logrando distinguir comportamientos al cambiar el material del engranaje o la velocidad. Se debe considerar que este método consiguió la aceptación de la hipótesis alternativa en todas sus pruebas, excepto en la señal de vibración de engranajes plásticos y metálicos con fallo a 720 rpm debido a que el valor-p es de 0.1528. Esto podría deberse a que al aumentar las rpm el tiempo de contacto entre dientes se reduce, por lo que al adquirir los datos podría no detectarse la diferencia del material del engranaje.

El método de la FFT para el análisis de las señales en el dominio de la frecuencia demostró no ser un método tan adecuado. Esto se debe a que cuando se trabaja con frecuencias, la velocidad de análisis afectara al comportamiento que presenten las señales de vibración, como en la señal de engranajes plásticos y metálicos sin fallo a 540 rpm debido a que el valor-p es de 0.7619. Otro problema es que al trabajar a bajas rpm no permiten detectar fácilmente un fallo, aunque esto dependerá del material a trabajar. Esto se demuestra porque al comparar las señales con y sin fallo a 360 rpm de los engranajes metálicos la hipótesis nula es aceptada, mientras que para los engranajes plásticos con iguales condiciones esta hipótesis es rechazada.

## **9. Recomendaciones**

Se recomienda como mínimo encender el equipo 10 minutos antes de empezar con la adquisición de cualquier dato, esto para que el sistema se asiente y evitar la señales de vibración extrañas.

El sistema al trabajar por lubricación manual se recomienda que al cambiar de posición la rueda, cambiar la velocidad o la carga lubricar el sistema para disminuir el ruido y el sistema trabaje de mejor manera.

La alineación del banco es clave para evitar la aparición de frecuencias que no interesan en el trabajo y que dificultan la evaluación de las señales.

Para trabajos futuros se propone realizar el análisis comparativo de las señales en el dominio del tiempo y frecuencia, pero en esta ocasión con otro tipo de fallo y cambiando el engranaje plástico por otro metálico y comprobar el comportamiento de las señales.

## Referencias Bibliográficas

- Abraham, R. M. (2014). *An experimental study of scuffing performance of a helical gear pair subjected to different lubrication methods* (Tesis Doctoral no publicada). The Ohio State University.
- Alaswad, S., y Xiang, Y. (2017). A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system. *Reliability engineering & system safety*, 157, 54–63.
- América, N. L. (2023). Cómo analizar fallas de engranajes.
- Borja, H. J. (1980). Engranajes cilíndricos helicoidales.
- Cardona Morales, O. (2011). *Análisis tiempo-frecuencia de señales de vibraciones mecánicas para la detección de fallos en máquinas rotativas* (Tesis Doctoral no publicada).
- Charlotte. (1986). Cartas de charlotte.
- Errichello, R., y Muller, J. (2002). How to analyze gear failures. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 2(6), 8–16.
- Flórez, E., Cardona, S., y Jordi, L. (2009). Selección de la ventana temporal en la transformada de fourier en tiempos cortos utilizada en el análisis de señales de vibración para determinar planos en las ruedas de un tren. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(50), 145–158.
- Google Maps. (2023). *Ubicación en google mapsn*. [Disponible en: <https://www.google.com.ec/maps/place/Universidad+Polit%C3%A9cnica+Salesiana+del+Ecuador/@-2.8865291,-78.9920678,17z/data=!3m1!4b1!4m6!3m5!1s0x91cd1826d90c7e47:0x8eb47b6b0138cb74!8m2!3d-2.8865291!4d-78.9898791!16s%2Fm%2F0cpdx8q?hl=es>; Acedido el: 3 marzo del 2023].
- Hernández, L. E. B. (1985). Las fallas en los engranajes. *Ingeniería e investigación*(12), 40–52.
- Iturbide Feliciano, E., y Ramírez Valdés, A. M. (2012). Fundamentos de desgaste por deslizamiento.
- Jardine, A. K., Lin, D., y Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical systems and signal processing*, 20(7), 1483–1510.
- Llivicura Orellana, H. F. (2019). *Señales de vibración: evaluación de indicadores de condición extraídos del dominio de frecuencia para el diagnóstico de fallos en cajas de engranajes rectos* (B.S. thesis).



- Magalhães, L., y Seabra, J. (2003). Teeth surface failures in austempered ductile iron (adi) gears. En *Gears and transmission workshop, paper no* (Vol. 13, pp. 269–286).
- Malla Buestán, J. A., y Samaniego Marca, F. A. (2017). *Desarrollo de un protocolo de pruebas de funcionamiento para el vehículo fórmula sae eléctrico 2017* (B.S. thesis).
- Moubray, J. (2004). Mantenimiento centrado en confiabilidad (rcm). *Asheville, North Carolina USA: Aladon LLC*.
- Olarte, W., Botero, M., y Cañon, B. A. (2010). Análisis de vibraciones: una herramienta clave en el mantenimiento predictivo. *Scientia et technica*, 16(45), 219–222.
- Olarte, W., Botero, M., y Cañon, B. A. (2010). Análisis de vibraciones: una herramienta clave en el mantenimiento predictivo. *Scientia et technica*, 16(45), 219–222.
- Ortiz Farfán, C. G., y Pérez Rivera, I. A. (2016). *Adquisición de señales vibracionales y emisiones acústicas combinando fallos en maquinaria rotativa y elaboración de guías de práctica sobre detección de fallos en engranajes por medio de emisiones acústicas* (B.S. thesis).
- Pacheco Córdova, E. E., Montesinos Loaiza, R. X., Sánchez Loja, R. V., Cerrada Lozada, M., Cabrera Mendieta, D. R., y Berrezueta Parra, A. A. (2022). Comparación de señales de vibración y emisión acústica para la detección de diente roto mediante la transformada rápida de fourier, transformada hilbert y cepstrum.
- Pazos, O. T., Hernández-Alcantara, D., y Morales-Menendez, R. (s.f.). Diagnóstico de fallas en husillos usando la transformada rápida de fourier.
- Rodríguez, Á., y Rodríguez, J. (2005). Principales fallas en las transmisiones por engranajes. *Centro Azúcar*, 32(4), 62–67.
- Suárez Michelena, J. A. (2017). *Deterioro y modo de fallo en engranajes* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ingeniería . . .
- Trocel, D. (2020). *Análisis de vibraciones en cajas de engranajes*. [Disponible en: <https://power-mi.com/es/content/an%C3%A1lisis-de-vibraciones-en-cajas-de-engranajes-0>; Acedido él: 8 de marzo del 2023].
- Vaca, C., Martínez, J., y Leguísamo, J. (2020). Selección de materiales mediante uso de multicriterio aplicado a un engranaje helicoidal de la caja de cambios de dmax 3.0. *CienciAmérica*, 9(1), 34–50.
- Vachtsevanos, G. J., Lewis, F., Roemer, M., Hess, A., y Wu, B. (2006). *Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems* (Vol. 456). Wiley Hoboken.
- Vassileva, M. P. (2008). Análisis de señales vibratorias. *Ciencia y sociedad*, 33(1), 29–46.
- White, G. (2010). Introducción al análisis de vibraciones. *Woburn, MA, Estados Unidos: Ázima*, 551, 1990–2010.

# **ANEXOS**

## Anexo A: Matriz de Consistencia Lógica

**Tabla 9.1**

*Matriz de consistencia.*

MATRIZ DE CONSISTENCIA				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Es posible comparar las señales de vibración en engranajes plásticos y metálicos de diente helicoidal con fallo de deinte roto?	Conocer las diferencias entre las señales de vibración en engranajes plásticos y metálicos de diente helicoidal con fallo de deinte roto.	Existirán diferencias en las señales de vibración en engranajes plásticos y metálicos de diente helicoidal con fallo de deinte roto.	- <b>VI</b> : Diseño.	Caja de engranajes.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES	MARCO TEÓRICO
¿Es posible establecer un protocolo de montaje para una caja de engranajes helicoidal que garantice la repetibilidad del experimento?	Establecer un protocolo de montaje para una caja de engranajes helicoidal que garantice la repetibilidad del experimento.	Una caja de engranajes helicoidal que garantice la repetibilidad del experimento Establecerá un protocolo de montaje.	- <b>VI</b> : Caja de engranajes. - <b>VD</b> :Protocolo de montaje.	Protocolo de montaje.
¿Será factible obtener una línea base de señales de vibración en la caja de engranajes de diente helicoidal de los engranajes plásticos y metálicos?	Obtener una línea base de señales de vibración en la caja de engranajes helicoidal de los engranajes plásticos y metálicos.	Se Obtendrá una línea base de señales de vibración en la caja de engranajes helicoidal.	- <b>VI</b> : Caja de engranajes.	Señales de vibración línea base.
¿Se podrá realizar un análisis comparativo de las señales de vibración obtenidas en la caja de engranajes helicoidal en el dominio del tiempo y frecuencia para las líneas base de estudio?	Realizar un análisis comparativo de las señales de vibración obtenidas en la caja de engranajes helicoidal en el dominio del tiempo y frecuencia para las líneas base de estudio.	Se Realizará un análisis comparativo de las señales de vibración obtenidas en la caja de engranajes helicoidal en el dominio del tiempo y frecuencia para las líneas base de estudio.	- <b>VI</b> : Caja de engranajes.	Engranajes plásticos y metálicos helicoidales.

**Nota:** Matriz de consistencia donde se encuentran los principales puntos a tener en consideración para el desarrollo de este trabajo.

## Anexo B: Operacionalización de Variables

La Tabla 9.2 presenta la operacionalización de la variable dependiente: Protocolo de montaje.

**Tabla 9.2**

*Variable dependiente.*

---

VARIABLE DEPENDIENTE: PROTOCOLO DE MONTAJE				
Dimensiones	Definiciones	Indicador	Magnitud	Instrumento de medición o Fuente
Protocolo de montaje de engranajes	Definición conceptual: Establecer un protocolo de montaje que garantice la repetibilidad del experimento.	Señales		

---

**Nota:** Variables dependientes que intervienen en el trabajo realizado.

## Anexo C: Operacionalización de Variables

La Tabla 9.3 presenta la operacionalización de la variable independiente: Caja de engranajes.

**Tabla 9.3**

*Variable independiente.*

VARIABLE INDEPENDIENTE: CAJA DE ENGRANAJES				
Dimensiones	Definiciones	Indicador	Magnitud	Instrumento de medición o Fuente
Caja de engranajes helicoidal	Definición conceptual: Comparación de señales (Entre los fallos y línea base).	Señales	Frecuencia	Acelerómetro

**Nota:** Variables independientes que intervienen en el trabajo realizado.