



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

COMPARACIÓN DE LAS FIRMAS DE VIBRACIÓN Y CORRIENTE DE
UN MOTOR DE INDUCCIÓN PARA LA DETECCIÓN DE SEVERIDAD
DE FALLOS EN ENGRANAJES RECTOS

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

AUTOR: GALO SEGUNDO JIMÉNEZ LUDIZACA
TUTOR: Ing. RENÉ VINICIO SÁNCHEZ LOJA, PhD
CO-TUTOR: Ing. DIEGO ROMAN CABRERA MENDIETA, PhD

Cuenca – Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Galo Segundo Jiménez Ludizaca con documento de identificación N° 0302555487; manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo de titulación; 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, 19 de septiembre 2023

Atentamente,



Galo Segundo Jiménez Ludizaca
0302555487

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

Yo, Galo Segundo Jiménez Ludizaca con documento de identificación N° 0302555487, 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 FIRMAS DE VIBRACIÓN Y CORRIENTE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN PARA LA DETECCIÓN DE SEVERIDAD DE FALLOS EN ENGRANAJES RECTOS", 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, 19 de septiembre 2023

Atentamente,



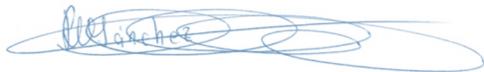
Galo Segundo Jimenéz Ludizaca
0302555487

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Rene Vinicio Sánchez Loja, con documento de identificación N° 0103409587, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: COMPARACIÓN DE LAS FIRMAS DE VIBRACIÓN Y CORRIENTE DE UN MOTOR DE INDUCCIÓN PARA LA DETECCIÓN DE SEVERIDAD DE FALLOS EN ENGRANAJES RECTOS, realizado por Galo Segundo Jiménez Ludizaca con documento de identificación N° 0302555487, 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, 19 de septiembre 2023

Atentamente,



Ing. Rene Vinicio Sánchez Loja, PhD
0103409587

Dedicatoria

Galo Segundo

El presente proyecto de titulación está dedicado:

A Dios, quien me ha brindado la sabiduría y la salud para llevar a cabo una de mis metas.

A mis padres Ángelo y Marlene, quienes han sido un ejemplo de perseverancia, además, de brindarme su apoyo incondicional durante este proceso de aprendizaje.

A mis hermanos Bryan y Ninfa, y a mi primo Elian, quienes me han dado su apoyo a pesar de la distancia.

A mi familia, en especial a mi abuelo Segundo y a mis tíos Juan y Franklin, quienes han sido mis tutores en mi formación, como persona y como profesional.

Finalmente, dedicar a las personas que estuvieron presentes, y también a los que ya no están, gracias por brindarme su apoyo durante este proceso, y hacer de mí una mejor persona.

Agradecimientos

Galo Segundo

Agradezco principalmente a mis padres Ángelo y Marlene que gracias a sus consejos, a su esfuerzo, paciencia y comprensión brindada en cada momento, fue posible cumplir este propósito planteado.

Agradezco a mi tutor, el Dr. Vinicio Sánchez, que con su conocimiento y experiencia fue mi guía durante este proceso de aprendizaje.

Agradezco a los miembros del GIDTEC: Ing. Mauricio Villacis, Ing. Deiver Jimenez, Ing. Mauricio Cabrera, Ing. Renato Ortega en especial al Ing. Renan Montesinos, por su disposición, por su paciencia y apoyo, que fueron indispensables para alcanzar este propósito.

Finalmente, quiero agradecerme a mí mismo, por no rendirme en los peores momentos.

Este documento fue realizado enteramente en L^AT_EX

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	XIV
Abstract	XV
1. Introducción	1
2. Problema	2
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
3. Objetivo	8
3.1. Objetivo General	8
3.2. Objetivos Específicos	8
4. Marco Teórico	9
4.1. Mantenimiento Basado en la Condición	9
4.1.1. Monitoreo de la condición	9
4.1.1.1. Monitoreo de vibraciones	10
4.1.1.2. Monitoreo de la corriente eléctrica del motor	11
4.1.1.2.1. Frecuencias de fallos en señales de corriente eléctrica	11
4.1.2. Adquisición de señales de monitoreo de la condición	13

4.2.	Vibración	13
4.2.1.	Caracterización de las vibraciones	14
4.3.	Corriente eléctrica	15
4.3.1.	Sensores de medición de corriente eléctrica	15
4.4.	Engranajes y cajas de engranajes	15
4.4.1.	Fallos en engranajes	18
4.4.2.	Frecuencia de los engranajes	19
4.5.	Carta de Charlotte	20
4.6.	Severidad de fallos	21
4.7.	Transformada Rápida de Fourier	22
4.8.	Normativa para el análisis de firmas de vibración	23
4.8.1.	Norma ISO 10816: Estándar de análisis de severidad en vibraciones	23
4.9.	Resumen del capítulo	25
5.	Marco metodológico	26
5.1.	Metodología del proceso	26
5.2.	Metodología experimental: Adquisición de señales de monitoreo de la condición	27
5.2.1.	Banco de pruebas para el análisis de vibraciones y corriente	27
5.2.1.1.	Elementos mecánicos de la caja de engranajes	29
5.2.2.	Proceso experimental para la adquisición de señales de monitoreo de la condición	30
5.2.2.1.	Emplazamiento de los sensores	31
5.2.2.1.1.	Conexión de los sensores	31
5.2.2.1.2.	Emplazamiento de los acelerómetros	38
5.2.2.1.3.	Emplazamiento de las pinzas de corriente	39
5.2.2.2.	Acondicionamiento del software de adquisición de datos	41
5.2.2.2.1.	Descripción de la interfaz gráfica	41
5.2.2.3.	Línea base	42
5.2.2.3.1.	Validación de línea base	42
5.2.2.3.2.	Establecimiento de línea base	47
5.2.2.4.	Adquisición de señales	48
5.2.2.4.1.	Codificación de los fallos implantados para severidades	48
5.2.2.4.2.	Patrones de fallos por rotura en dientes de engranajes.	49
5.2.2.4.3.	Fallos implantados para el análisis de diente roto	52
5.2.2.5.	Análisis de señales de vibración y corriente	52
6.	Resultados	53
6.1.	Comparación visual de las firmas de vibración y corriente	54
6.2.	Comparación de las frecuencias características entre firmas de vibración y corriente	55

7. Conclusiones	58
8. Recomendaciones	59
Referencias	62

Lista de Tablas

2.1. Trabajos de titulación realizados en el grupo GIDTEC	3
4.1. Niveles de severidad.	22
5.1. Especificaciones del banco de vibraciones	28
5.2. Parámetros de operación del motor Siemens 1LA7 096-6YA60.	29
5.3. Características de los engranajes.	30
5.4. Especificaciones técnicas del acelerómetro ICP 603C01	33
5.5. Especificaciones técnicas de la pinza amperimétrica	35
5.6. Especificaciones técnicas del módulo de adquisición de señales NI-9234	36
5.7. Características técnicas del chasis NI cDAQ-9188	38
5.8. Comparación de las frecuencias calculadas con las frecuencias obtenidas de la firma de vibración.	44
5.9. Comparación de las frecuencias calculadas con las frecuencias obtenidas de la firma de corriente.	46
5.10. Tipos de fallos en diente de engranaje	49
5.11. Patrones de rotura de dientes en engranajes.	50
5.12. Caracterización de los niveles de severidad.	52
6.1. Resumen de resultados obtenidos de la comparación visual de las firmas de vibración y corriente.	54
6.2. Resumen de los valores obtenidos en la comparación de firmas de vibración. .	55
6.3. Resumen de los valores obtenidos en la comparación de firmas de corriente. .	56

Lista de Figuras

2.1. Esquema representativo de la adquisición de datos con la pinza de corriente.	5
2.2. Ubicación de la Universidad Politécnica Salesiana	6
4.1. Técnicas de monitoreo de la condición.	10
4.2. Componentes del espectro de corriente alrededor de la frecuencia de alimentación.	13
4.3. Características de la vibración.	14
4.4. Flujo de corriente eléctrica.	15
4.5. Engranaje de diente recto	16
4.6. Definiciones de un engranaje.	17
4.7. Tipos de fallos en dientes de engranajes.	18
4.8. Espectro normal de engranaje.	20
4.9. Espectro típico de desgaste del diente.	21
4.10. Ejemplo de aplicación de la FFT.	23
4.11. Tabla de indicadores de severidad.	24
4.12. Resumen del marco teórico.	25
5.1. Metodología del proceso	26
5.2. Unidades del banco de vibraciones.	27
5.3. Banco de vibraciones del GIDTEC.	28
5.4. Caja de engranajes del banco de vibraciones.	29
5.5. Proceso experimental para la adquisición de señales de vibración y corriente.	30
5.6. Secuencia de conexión del sistema de adquisición de señales de vibracion. . .	31
5.7. Secuencia de conexión del sistema de adquisición de señales de corriente. . .	32
5.8. Acelerómetro piezoeléctrico ICP 603C01.	33
5.9. Pinza amperimétrica fluke I30s.	34
5.10. Módulo de adquisición de señales NI-9234.	36
5.11. Chasis NI cDAQ-9188.	37
5.12. esquema del emplazamiento de los acelerómetros.	39
5.13. Esquema de conexión de las pinzas amperimétricas.	40
5.14. Conexión real de las pinzas amperimétricas.	40
5.15. Software de adquisición de datos.	41
5.16. Proceso de validación de línea base.	42

5.17. Frecuencias características de la caja de engranajes para el análisis de vibración.	43
5.18. Firma característica de vibración.	44
5.19. Frecuencias características de la caja de engranajes para el análisis de corriente.	45
5.20. Firma característica de corriente del motor.	45
5.21. Firma característica de corriente del motor.	46
5.22. Línea base de vibración en los diferentes niveles de severidad.	47
5.23. Línea base de corriente en los diferentes niveles de severidad.	48
5.24. Codificación de los engranajes.	49
6.1. Niveles de severidad empleados en la comparación de firmas de vibración y corriente.	53
6.2. Comparación de los espectros de vibración en condición normal y con fallo. .	56
6.3. Comparación de los espectros de corriente en condición normal y con fallo. .	57

LISTA DE ACRÓNIMOS

AFCM Análisis de firmas de corriente del motor.

GIDTEC Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales.

DBs Bases de datos.

CA Corriente alterna.

CC Corriente continua.

CPM Ciclos por minuto.

MBC Mantenimiento Basado en la condición.

MC Monitoreo de la condición.

MV Monitoreo de vibraciones.

GMF Frecuencia de engranaje.

FT Transformada de Fourier.

FFT Transformada rápida de Fourier.

DTF Transformada discreta de Fourier.

LabVIEW Software de programación gráfica.

Hz Unidad de frecuencia del sistema internacional.

F Frecuencia

T Periodo

Resumen

El presente trabajo de titulación trata de la comparación de las firmas de vibración y corriente de un motor de inducción para la detección de severidad de fallos en engranajes rectos, este trabajo forma parte del ámbito del mantenimiento basado en la condición la cual se lleva a cabo en base a la adquisición de señales del banco de vibraciones, simulando fallos en engranes rectos, y mediante la comparación de firmas aportar en el estudio de la detección de fallos en engranes.

El capítulo 1 contiene la introducción del trabajo de titulación; el capítulo 2 contiene los antecedentes, en conjunto con la descripción del problema, y los problemas que dieron paso al desarrollo del trabajo de titulación. El capítulo 3 contiene los objetivos que abarca el trabajo de titulación.

El capítulo 4 contiene el marco teórico donde se tratan temas relevantes como: mantenimiento basado en la condición, monitoreo de vibraciones, monitoreo de corriente eléctrica del motor, Vibración, corriente, engranajes, fallos en engranajes, cartas de Charlotte, severidad de fallos, transformada rápida de Fourier. Además, se detallan las fórmulas empleadas para el análisis de vibración como en el análisis de corriente

El capítulo 5 contiene la metodología a seguir durante el desarrollo del trabajo de titulación, abarcando la metodología de la investigación, la metodología del proceso y la metodología experimental. En la metodología experimental se detalla las partes que conforman el banco de vibraciones, así como los parámetros de operación, los quipos empleados para la adquisición de señales, el emplazamiento de los sensores, además se presenta la metodología de validación de la línea base. Por otro lado, se presenta la caracterización del fallo, junto con los niveles de severidad correspondientes al fallo de rotura.

Finalmente, se presenta la información de los resultados obtenidos de los diferentes niveles de severidad, las conclusiones y recomendaciones que han sido realizadas acorde con los objetivos planteados.

Palabras clave: Análisis de vibración, Análisis de corriente, Detección de fallos de rotura de diente, Análisis de severidad de fallo.

Abstract

The current thesis work deals with the comparison of vibration and current signatures of an induction motor for the detection of failure severity in straight gears. This work is part of the realm of condition-based maintenance, which is carried out based on signal acquisition from the vibration bench. Simulated failures in straight gears are compared using signatures to contribute to the study of gear failure detection.

Chapter 1 introduces the thesis work, while Chapter 2 presents the background, along with the problem description and the issues that led to the development of the thesis work. Chapter 3 outlines the objectives of the thesis work.

Chapter 4 provides the theoretical framework covering relevant topics such as condition-based maintenance, vibration monitoring, motor current monitoring, Vibration, current, gears, gear failures, Charlotte charts, failure severity, Fast Fourier Transform. It also details the formulas used for both vibration analysis and current analysis.

Chapter 5 outlines the methodology to be followed during the development of the thesis work, encompassing research methodology, process methodology, and experimental methodology. The experimental methodology details the components of the vibration bench, operation parameters, equipment used for signal acquisition, sensor placement, and the baseline validation methodology. Additionally, it presents the characterization of the failure, along with the severity levels corresponding to the breakage failure.

Finally, the information on the results obtained from different severity levels is presented, along with the conclusions and recommendations aligned with the stated objectives.

Keywords: Vibration analysis, Current analysis, Detection of tooth breakage failures, Failure severity analysis.

1. Introducción

Dentro del campo industrial, las estrategias de mantenimiento han generado un gran impacto en las tomas de decisiones que benefician la conservación del estado de la máquina. El MBC durante los últimos años ha ganado mayor relevancia por su enfoque centrado en el análisis de los datos recopilados de una máquina, lo cual permite establecer los lineamientos ideales para la recomendación de políticas de mantenimiento más eficiente.

Las máquinas rotativas empleadas para la transmisión de potencia son principalmente cajas de engranajes, mismas que van de la mano con equipos eléctricos, facilitando la generación de energía mecánica comúnmente empleada en líneas de producción. Estos sistemas llegan a cumplir un rol fundamental en la producción, debido a que permiten el aumentar la productividad, por lo cual, la presencia de fallos genera pérdidas dentro de las empresas.

De los fallos suscitados en engranajes el más común es diente roto, mismo que puede generarse por los diversos factores que influyen en la operación de la caja de engranajes. Con la importancia de los sistemas de engranajes, es crucial establecer nuevos métodos que beneficien a la detección de fallos de rotura. Este trabajo está orientado hacia la comparación de firmas de vibración y corriente de un motor de inducción para la detección de severidad de fallos en engranajes rectos, lo cual beneficia en el estudio de indicadores de condición. Por otro lado, el método de análisis de corriente facilita la adquisición de datos, debido a que es un método no invasivo como lo son los acelerómetros empleados en el análisis de vibración. Para llevar a cabo el trabajo de titulación se parte del establecimiento de la línea base en condición normal, para luego mediante la implementación del fallo de rotura realizar la comparación correspondiente que proporciona información acerca de la condición del engrane.

2. Problema

2.1. Antecedentes

En la actualidad, uno de los mantenimientos más empleados es el MBC, el cual permite la detección de fallos, el aislamiento de fallos e identificación de fallos. Además, el MBC también es aplicado en equipos eléctricos, así lo indica Mohammadreza Tahan (2017) señalando que el MBC ayuda a pronosticar la evolución del deterioro del motor, teniendo como objetivos el pronosticar las fallas inminentes y estimar la vida útil restante del motor.

Dentro del MBC, existen métodos que lo complementan, como es el caso del monitoreo de la condición que según Marimon y Castillo (2004) indica, que consiste en estudiar la evolución temporal de ciertos parámetros y asociarlos a la evolución de fallos, permitiendo determinar en que período de tiempo ese fallo va a tomar una relevancia importante, lo cual posibilita llevar a cabo la planificación de las intervenciones con tiempo suficiente para que ese fallo no genere consecuencias graves.

De la misma manera, en el monitoreo de la condición se emplean diversas técnicas para el análisis, destacando el análisis de vibraciones y el AFCM; este último presenta trabajos que emplean señales de corriente para la detección de fallos mismo que fue desarrollado por Benbouzid (1998) quien indica que el AFCM es uno de los métodos de detección de fallos usada para el diagnóstico de la condición de un motor eléctrico, esta técnica utiliza los resultados del análisis espectral de la corriente del estator (precisamente, la corriente de suministro) de una inducción motor para detectar una falla existente o incipiente del motor o del sistema de accionamiento.

En la tabla 2.1 se presentan de manera resumida alguno de los proyectos de titulación que se han realizado en el grupo de investigación y desarrollo en tecnologías industriales (GIDTEC).

Tabla 2.1*Trabajos de titulación realizados en el grupo GIDTEC*

Autores (Año)	Título	Descripción	Señales adquiridas	Mecanismos estudiados
Caranguí (2014)	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 acaparrando fallos en engranajes rectos, rodamientos rígidos de bolas y combinando fallos en ambos elementos	Vibración mecánica	Engranajes. Rodamientos.
Nivelo y Romero (2014)	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. Además, se elaboró una guía de prácticas para la detección de fallos en rodamientos.	Vibración mecánica	Engranajes.
Muñoz y Vera (2015)	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 engranajes helicoidales en una caja de engranajes.	Vibración mecánica Emisión acústica.	Engranajes. Rodamientos.
Ortiz y Perez (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”	Se analizó la comparación de las señales de emisiones acústicas y señales de vibración adquiridas en un sistema mecánico rotativo con diferentes configuraciones y construcciones de fallos en rodamientos y engranajes.	Vibración mecánica Emisión acústica.	Engranajes. Rodamientos.

Autores (Año)	Título	Descripcion	Señales adquiridas	Mecanismos estudiados
Pacheco E. (2018)	Adquisición de señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de severidad de fallos en maquinaria rotativa”	Se estableció una base de datos de severidad de fallos en engranajes y rodamientos, por medio de la adquisición de señales de vibración y emisión acústica.	Vibración mecánica Emisión acústica.	Engranajes. Rodamientos.
Chingal D. (2018)	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. Corriente.	Engranajes.
Lojano F. (2019)	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 rectos.	Vibración mecánica Emisión acústica.	Engranajes rectos.
Llivicura H. (2019)	Señales de vibración: Evaluación de indicadores de condición extraídos 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.
Vacacela A. (2019)	Establecimiento de tres bases de datos para la detección de fallos en rodamientos mediante señales acústicas, vibracionales y de corriente”.	Se levanto tres bases de datos, de señales acústicas, vibracionales y de corriente a base de combinaciones diferentes acaparando fallas en los rodamientos.	Vibración mecánica. Emisión acústica. Corriente.	Rodamientos.

Nota: Se presenta los trabajos de titulación realizados en el grupo GIDTEC.

En la tabla presentada anteriormente se observan trabajos con relación a las señales de vibración, emisión acústica y corriente, donde se centran en la detección de fallos en engranajes y rodamientos, destacando el hecho de no existir un trabajo de la detección de severidad de fallos empleando el AFCM, la realización de estos proyectos forman parte del

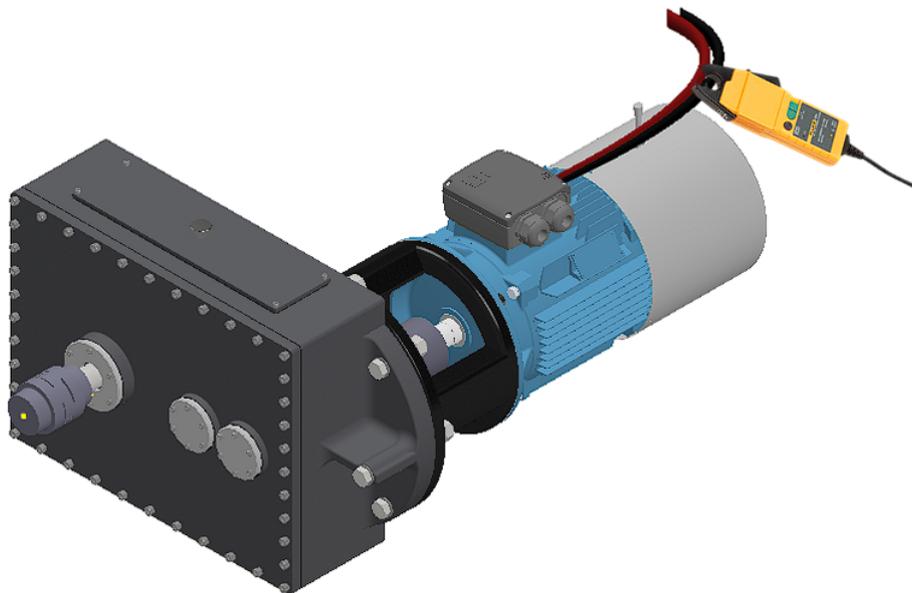
desarrollo del monitoreo de la condición, el cual en la actualidad es un importante método que permite la detección de fallos en etapas iniciales, evitando de esta forma pérdidas de producción o paros innecesarios.

2.2. Descripción del problema

Dentro de las industrias, uno de los sistemas mecánicos más usados son las cajas de engranajes, esto debido a que son una de las maneras más eficientes para la transmisión de potencia en espacios reducidos entre ejes (Sánchez, 2018). Es así como en la figura 2.1 podemos observar un ejemplo del montaje de estos sistemas; para diagnosticar los fallos en las cajas de engranajes, uno de los métodos más empleados es el monitoreo de la condición; comúnmente aplicando la técnica de análisis de vibración, la misma que requiere del montaje de los acelerómetros, por lo cual, el momento del montaje representa un peligro para el personal de trabajo debido a que los equipos están comúnmente en operación, existiendo además situaciones en donde no es de fácil acceso el lugar de montaje de los acelerómetros. Por otro lado, tenemos la técnica AFCM que permite la detección de los fallos únicamente tomando las señales de corriente del motor, esta técnica no requiere del montaje de instrumentos como los acelerómetros, además el análisis puede realizarse de las mismas señales de corriente de la máquina e incluso a distancias que no representan un peligro para el operario.

Figura 2.1

Esquema representativo de la adquisición de datos con la pinza de corriente.



Nota: Se puede observar la diferencia entre la adquisición de datos entre el acelerómetro y la pinza de corriente.

2.3. Importancia y alcances

La presente propuesta de trabajo de titulación es muy importante dentro del área de la investigación, porque este estudio ampliara los conocimientos sobre el monitoreo de la condición, específicamente en el análisis de firmas de corriente. Este proyecto beneficiará al grupo GIDTEC, cuya información será utilizada para futuros proyectos de investigación con miras a la implementación en industrias que deseen aplicar el monitoreo de condición con base en el MBC. Con el empleo de un banco de pruebas se buscará en este proyecto detectar la severidad de fallos con base en el análisis de las firmas de corriente, estableciendo de esta forma datos para proporcionar información eficaz, confiable y estructurada que sirva en el campo de la investigación y en el sector industrial.

2.4. Delimitación

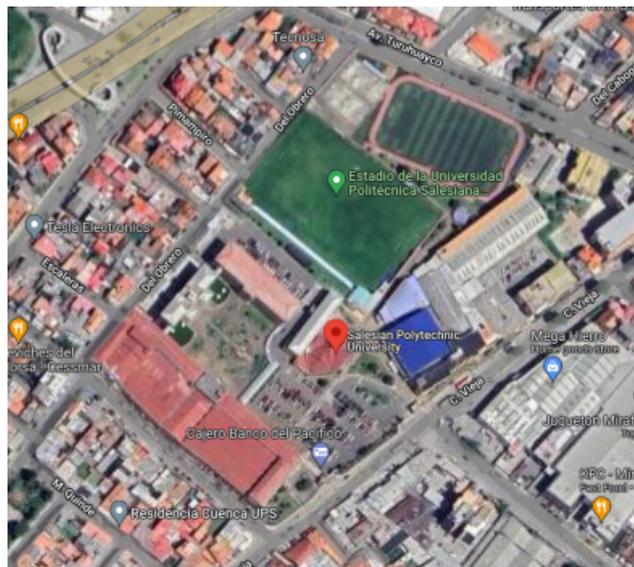
El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

2.4.1. Espacial o geográfica

La siguiente propuesta de desarrollo se lo realizará en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay, específicamente en el laboratorio de vibraciones, de la Universidad Politécnica Salesiana, que se ubica en la Calle vieja 12-30 y Elia Liut, como se observa en la figura 2.2.

Figura 2.2

Ubicación de la Universidad Politécnica Salesiana.



Nota: Obtenido de Google Maps.

2.4.2. Temporal

El trabajo de titulación se realizará en el periodo comprendido entre marzo a junio del 2023, teniendo un alcance de 240 horas efectivas.

2.4.3. Sectorial o institucional

El presente trabajo de titulación se desarrollará en el grupo de investigación GIDTEC, en torno al área de mantenimiento.

2.5. Problema General

- ¿Es posible comparar las firmas de vibración y corriente de un motor de inducción para la detección de severidad de fallos en engranajes rectos?

2.6. Problemas Específicos

- ¿Es posible identificar mediante revisión bibliográfica estudios de severidad en sistemas de engranajes?
- ¿Es posible configurar la caja de engranajes para levantar una base de datos con señales de vibración y corriente del motor, a base de condiciones normales y con rotura de diente en los engranajes rectos?
- ¿Es posible adquirir datos de señales de vibración y corriente del motor de inducción de la caja de engranajes en condiciones normales y con rotura de diente en los engranajes rectos?
- ¿Se puede analizar la severidad de fallos entre las firmas de vibración y corriente del motor empleando la técnica FFT?

3. Objetivo

3.1. Objetivo General

- Comparar las firmas de vibración y corriente de un motor de inducción para la detección de severidad de fallos en engranajes rectos.

3.2. Objetivos Específicos

- Identificar mediante revisión bibliográfica estudios de severidad en sistemas de engranajes.
- Configurar la caja de engranajes para levantar una base de datos con señales de vibración y corriente del motor, a base de condiciones normales y con rotura de diente en los engranajes rectos.
- Adquirir datos de señales de vibración y corriente del motor de inducción de la caja de engranajes en condiciones normales y con rotura de diente en los engranajes rectos.
- Analizar la severidad de fallos entre las firmas de vibración y corriente del motor empleando la técnica FFT.

4. Marco Teórico

4.1. Mantenimiento Basado en la Condición

Según Jardine, Lin, y Banjevic (2006), el mantenimiento basado en la condición (MBC) hace referencia a un programa de mantenimiento que se basa en la información obtenida a través del monitoreo de la condición de los equipos, lo cual permite la toma de decisiones de mantenimiento de manera precisa y oportuna. Uno de los principales objetivos del MBC es evitar tareas de mantenimiento innecesarias y realizarlas solo cuando exista evidencia de comportamientos anormales de una maquinaria. Dentro del MBC se destacan dos aspectos importantes, los cuales son, el diagnóstico y el pronóstico. El diagnóstico comprende la parte de detección, aislamiento e identificación del fallo, mientras que el pronóstico se encarga de predecir el fallo antes de que ocurra.

Además, Jardine y cols. (2006) indica que el MBC consta de tres pasos principales, los cuales son:

1. Adquisición de datos: Este primer paso consiste en la obtención de datos relevantes de la salud del sistema.
2. Procesamiento de datos: Consiste en el análisis y manejo de datos o señales recolectadas en el primer paso con la finalidad de obtener una mejor comprensión e interpretación de los datos.
3. Toma de decisiones: este último paso consiste en la recomendación de políticas de mantenimiento eficientes (Jardine y cols., 2006).

4.1.1. Monitoreo de la condición

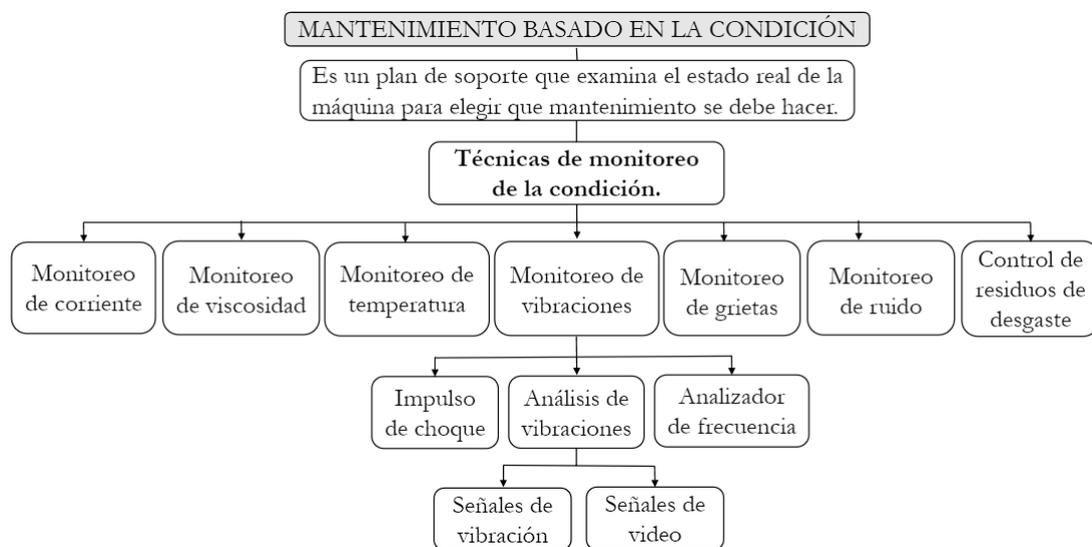
Según Courrech y Eshleman (1995) el monitoreo de la condición (MC) es la medición de los parámetros relacionados con la condición mecánica de la maquinaria, lo cual permite determinar el estado de la máquina. Es importante resaltar que si la condición de una máquina no es óptima, el MC permite determinar la causa del problema. El MC es comúnmente empleado junto con el mantenimiento predictivo.

Los sistemas de MC manejan varios tipos de entrada, siendo los más comunes sistemas de análisis de vibración, emisión acústica y residuos de aceite, los mismos que se encuentran establecidos en la industria (Kreidl y Smid, 2005).

Para analizar los diversos tipos de sistemas presentes en la industria, existen las técnicas de monitoreo de la condición, que son una serie de procedimientos empleados comúnmente para obtener información específica sobre el estado de una máquina. Por lo cual, la adquisición de datos se lleva a cabo utilizando diversas técnicas que se detallan en la figura 4.1.

Figura 4.1

Técnicas de monitoreo de la condición.



Nota: Tipos de tecnicas empleadas para el monitoreo de la condicion en maquinarias. Obtenido de (Carrion y Montesinos, 2021).

4.1.1.1. Monitoreo de vibraciones

Según Kumar, Goyal, Dang, Dhimi, y Pabla (2018) el monitoreo de vibraciones (MV) es un proceso fiable que permite determinar el estado funcional de la máquina, además destaca que este método es uno de los más empleados y reconocidos en la industria debido a que permite un monitoreo sin interferir en el proceso de la máquina. Las vibraciones están comúnmente relacionadas con causas como el desequilibrio, la desalineación, desprendimiento de elementos, daños en rodamientos y daños en engranajes.

La adquisición y medición de vibraciones se realiza utilizando sensores, tales como acelerómetros y transductores de velocidad, sin embargo, una parte importante de la adquisición de señales es el montaje, por lo que, para adquirir mediciones precisas, los sensores deben montarse firmemente en la máquina (Zhou, Habetler, y Harley, 2007).

El estudio realizado por Dalpiaz y Rivola (1997) indica que el monitoreo de vibraciones

presenta una baja sensibilidad para detectar y diagnosticar fallos que se desarrollan durante las etapas tempranas. Esto significa que el MV no proporciona información suficiente para determinar la causa del origen del problema en su etapa inicial, destacando la importancia de complementar este método junto con otras técnicas de monitoreo de la condición, como lo son termografía, análisis de corriente eléctrica, análisis acústico, entre otros.

4.1.1.2. Monitoreo de la corriente eléctrica del motor

Según Kia, Henao, y Capolino (2007) el análisis de sistemas electromecánicos, estudia principalmente las señales de vibración, sin embargo, estas señales presentan desventajas, entre las principales se destaca el ruido generado en el fondo de la señal debido a la excitación externa, la sensibilidad a la posición de instalación y su medición invasiva; mientras que el monitoreo de la corriente eléctrica del motor representa una alternativa para el MC debido a su fácil accesibilidad en todas las aplicaciones industriales.

Además, Poncelas López (2008) indica que el monitoreo de la corriente eléctrica del motor posibilita la detección de fallos antes que sucedan, siendo el tipo de fallo el que genere mayor o menor cambio en el campo eléctrico, lo cual determinara su nivel de importancia. Sin embargo, los fallos deben ser detectados cuando aún no afectan el funcionamiento de la máquina, debido a que, si el fallo afecta significativamente el funcionamiento del sistema, se debe emplear el mantenimiento correctivo.

4.1.1.2.1. Frecuencias de fallos en señales de corriente eléctrica

Según Kia y cols. (2007) los sistemas electromecánicos comúnmente presentan variaciones en las señales de torsión, mismas que son ocasionadas por cambios en la rigidez de los dientes, errores de transmisión, excentricidad de las ruedas y defectos de instalación, siendo las variaciones de torsión la causante de cambios en el par de carga que es detectado por el motor. Dependiendo el tipo de cambio, se pueden observar frecuencias únicas en el espectro de corriente; sin embargo, cuando se presentan componentes de corriente junto a la frecuencia de alimentación, se las relacionan con fallos en algún componente del sistema, como se observa en la figura 4.2. En el caso de fallos por rotura de diente se emplean las siguientes ecuaciones:

$$f_{Gr1} = f \pm m f_{r1} \quad (4.1)$$

$$f_{Gr2} = f \pm n f_{r2} \quad (4.2)$$

$$f_{Gr1r2} = f \pm m f_{r1} \pm n f_{r2} \quad (4.3)$$

$$f_{Gm} = f \pm qf_m \quad (4.4)$$

$$f_{Gr1m} = f \pm m.f_{r1} \pm qf_m \quad (4.5)$$

$$f_{Gr2m} = f \pm n.f_{r2} \pm qf_m \quad (4.6)$$

$$f_{Gr1r2m} = f \pm m.f_{r1} \pm n.f_{r2} \pm qf_m \quad (4.7)$$

Donde:

f : corresponde a la frecuencia eléctrica del motor.

$m, n, q = 1, 2, 3, \dots$ número de armónicas en el espectro de corriente.

f_{r1} y f_{r2} : velocidad del eje de entrada y salida de la caja de engranajes.

f_m : frecuencia de engranaje (GMF).

f_{Gr1} y f_{Gr2} : componentes de frecuencia de giro del eje de entrada y salida de la caja de engranajes.

f_{Gr1r2} : es la suma de las componentes de la frecuencia de giro del eje de entrada y salida de la caja de engranajes.

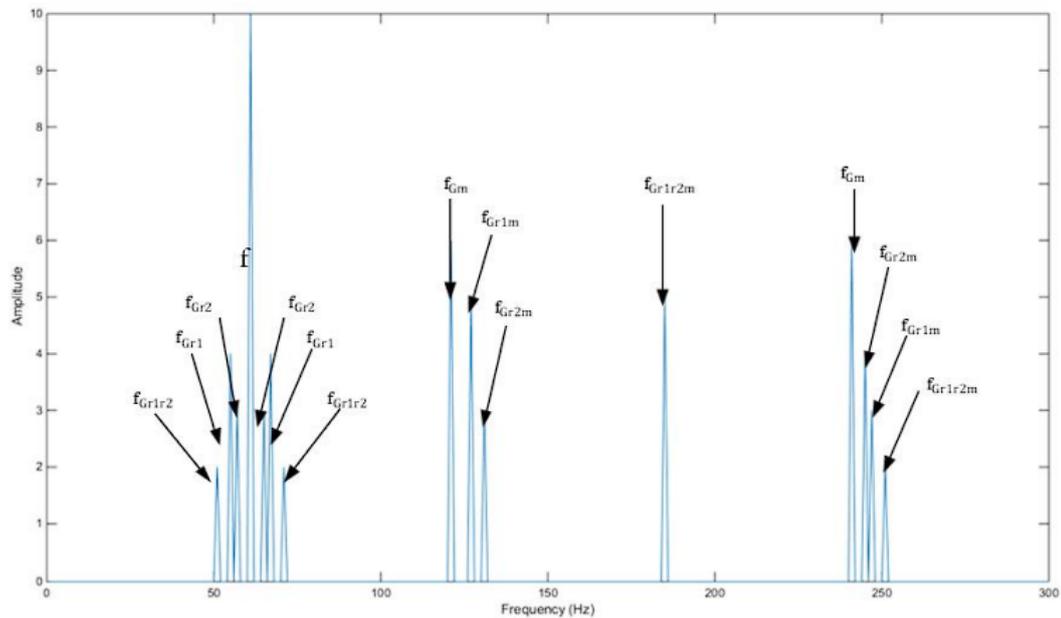
f_{Gm} : Componente de la frecuencia de engranaje (GMF).

f_{Gr1m} y f_{Gr2m} : es la suma de los componentes de la frecuencia de engranaje y la frecuencia de giro de los ejes de entrada y salida de la caja de engranajes.

f_{Gr1r2m} : es la suma total de la frecuencia de engranaje y frecuencia de giro de los ejes de entrada y salida de la caja de engranajes respectivamente.

Figura 4.2

Componentes del espectro de corriente alrededor de la frecuencia de alimentación.



Nota: Obtenido de (Chingal, 2017).

4.1.2. Adquisición de señales de monitoreo de la condición

La adquisición de datos o señales es un proceso de recopilación y almacenamiento de datos de una máquina específica con el propósito de aplicar el MBC. Este proceso es uno de los más importantes al momento de implementar un programa MBC para el diagnóstico y pronóstico de fallos de maquinaria. Los datos obtenidos del programa MBC pueden clasificarse en dos tipos: datos de evento y datos de monitoreo de la condición. Los datos de eventos incluyen información de lo ocurrido y/o lo que se hizo cuando se detectó el fallo; los datos de monitoreo de la condición son mediciones asociadas a la condición/estado de salud de la máquina. Estos datos son muy versátiles, pudiendo ser datos de: vibración, acústicos, análisis de aceite, temperatura, presión, humedad, meteorológicos o ambientales, entre otros. Es importante destacar que los datos de eventos y los datos de monitoreo de condición son igualmente importantes en el MBC. Sin embargo, en la práctica del MBC, las personas tienden a poner más énfasis en la recopilación de datos de monitoreo de condición, descuidando la recopilación de datos de eventos (Jardine y cols., 2006).

4.2. Vibración

Para llevar a cabo el trabajo de titulación es importante entender el análisis de vibraciones, debido a que constituye una de las partes centrales de nuestro estudio. Según White (2010),

la vibración hace referencia al movimiento oscilatorio o repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio, la cual se alcanza cuando la fuerza que actúa es nula. Esta forma de vibración se denomina vibración de cuerpo entero, lo que indica que las partes del elemento se mueven juntas en una misma dirección.

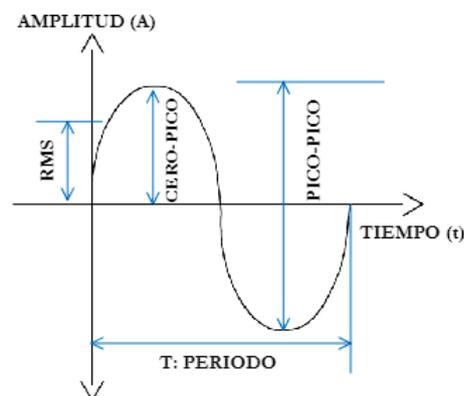
4.2.1. Caracterización de las vibraciones

En la figura 4.3 se presenta la forma de onda, la cual está conformada por las características que se describen a continuación:

- Periodo (T): Es el tiempo necesario para que ocurra una oscilación o se complete un ciclo.
- Frecuencia (F): Es el recíproco del periodo y significa el número de oscilaciones completas por unidad de tiempo.
- Valor eficaz (RMS): Este valor es igual a 0.707 del valor pico, se lo utiliza para medir la energía que brinda la forma de onda.
- Amplitud de la vibración (A): es la aceleración siendo su unidad de medida el m/s^2 .
- Ejes de vibración: se producen en el eje X, eje Y, y eje Z (SA, 2005).

Figura 4.3

Características de la vibración.



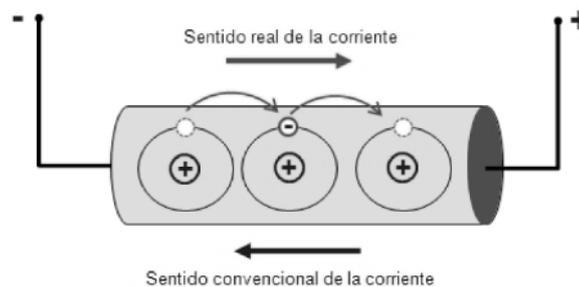
Nota: Obtenido de (SA, 2005).

4.3. Corriente eléctrica

Según Hernandez Martin (2014) define a la corriente eléctrica como la diferencia de potencial que se produce por la circulación de cargas eléctricas desde el conductor de mayor potencial hacia el de menor potencial, generando una diferencia de potencial, el flujo de cargas se observa en la figura 4.4.

Figura 4.4

Flujo de corriente eléctrica.



Nota: Se puede observar el flujo real de la corriente eléctrica.

4.3.1. Sensores de medición de corriente eléctrica

En la actualidad, existen diversos equipos de adquisición y análisis de datos que permiten el estudio de las firmas de corriente del motor. Según Xiao, Zhao, Asada, Odendaal, y van Wyk (2003), para el análisis de corriente en sistemas eléctricos y electrónicos podemos emplear, elementos como transformadores de corriente, bobinas de Rogowski, sensores de efecto Hall, sensores de magneto impedancia (MI) y sensores de magneto resistivos gigantes (GMR); estos equipos cuentan con sensores ópticos de corriente y semiconductores, lo que permite obtener mediciones precisas y confiables.

4.4. Engranajes y cajas de engranajes

Según Mobley, R. Keith, and R Keith Mobley (2004) indica que un engranaje es una forma de disco o rueda que tiene dientes alrededor de su periferia para el propósito de proporcionar un impulso positivo al engranar los dientes con dientes similares en otro engranaje o cremallera. Los engranajes forman una parte importante de muchos sistemas electromecánicos. En la mayoría de los sistemas, el engranaje forma parte de la carga mecánica que se acopla a un dispositivo eléctrico, que suele ser un motor eléctrico. Varias fallas pueden ocurrir en la disposición de engranajes. Las fallas en los engranajes pueden causar discontinuidades en los programas de producción en las industrias, lo que reduce la productividad (Rajagopalan, Habetler, Harley, Sebastian, y Lequesne, 2006).

Según Rajagopalan y cols. (2006) los tipos más comunes de engranajes en uso son:

- Engranajes rectos (Figura 4.5).
- Engranajes helicoidales.
- Engranajes cónicos.
- Engranajes rectos (tipo cremallera).

Figura 4.5

Engranaje recto.

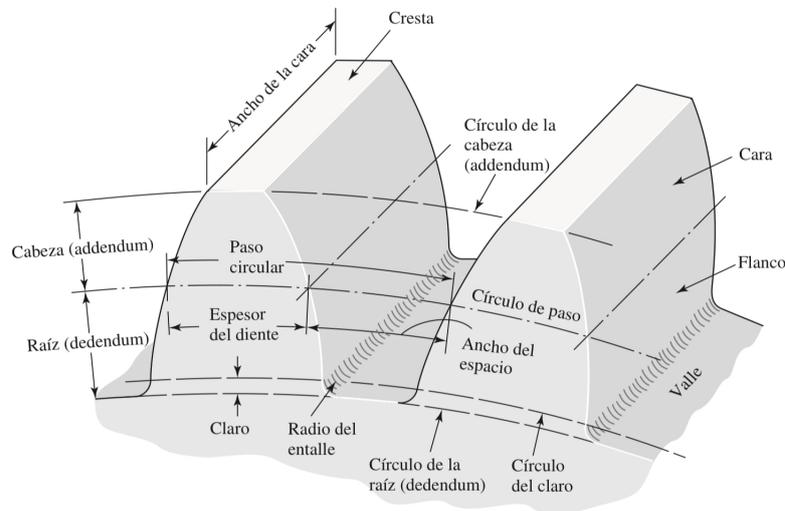


Nota: Obtenido de Ortega (2021)

Dentro del estudio de los engranajes es importante comprender la terminología de los dientes de engranajes rectos, la cual podemos observar en la figura 4.6. En el diseño de engranajes, se destaca el círculo de paso, que es un círculo teórico empleado comúnmente en los cálculos, y su diámetro se conoce como diámetro de paso. Cabe destacar que los círculos de paso de un par de engranajes acoplados son tangentes entre sí. Además, el engranaje más pequeño se denomina piñon, mientras que al mayor se lo denomina rueda. Budynas y Nisbett (2008)

Figura 4.6

Definiciones de un engranaje.



Nota: Principales deficiones de un engranaje segun Budynas y Nisbett (2008).

Según Budynas y Nisbett (2008) indica que las definiciones principales de los engranajes rectos son:

Paso circular (p): es la distancia, medida sobre el círculo de paso, desde un punto en un diente a un punto correspondiente en un diente adyacente. De esta manera, el paso circular es igual a la suma del espesor del diente y del ancho del espacio.

Módulo (m): representa la relación del diámetro de paso con el número de dientes. La unidad de longitud que suele emplearse es el milímetro. El módulo señala el índice del tamaño de los dientes en unidades del SI.

Paso diametral (P): está dado por la relación del número de dientes en el engrane respecto del diámetro de paso. Por lo tanto, es el recíproco del módulo. Debido a que el paso diametral se utiliza solo con unidades del sistema inglés, se expresa en dientes por pulgada.

La cabeza (addendum) a se determina por la distancia radial entre la cresta y el círculo de paso.

La raíz (dedendum) b equivale a la distancia radial desde el fondo hasta el círculo de paso.

La altura (h): es la suma de la cabeza (addendum) y la raíz (dedendum) (Budynas y Nisbett, 2008).

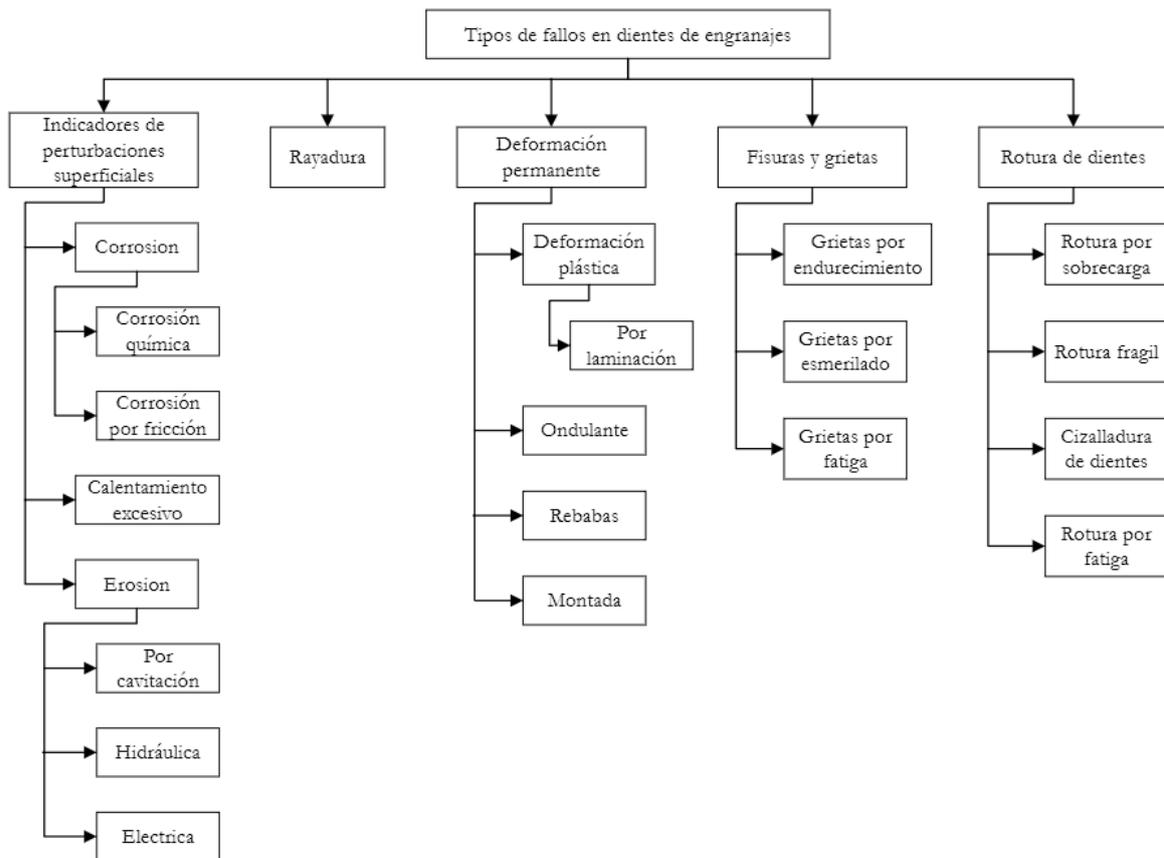
Una vez se han identificado las definiciones de un engranaje, el siguiente paso en el estudio consiste en identificar los diferentes tipos de fallos que se generan. Es importante destacar que los fallos suelen suscitarse comúnmente en los dientes del engranaje.

4.4.1. Fallos en engranajes

La identificación de los tipos de fallos en dientes de engranajes está regida con base en los factores de operación del equipo rotativo, destacando que la designación de los fallos se encuentra regulada por estándares internacionales, teniendo como referente a la norma ISO 10825, la cual proporciona una descripción de los diferentes tipos de desgastes y daños que se producen en los dientes de los engranajes, así como además de especificaciones bajo las cuales se producen dichos daños. La figura 4.7 muestra los tipos de fallos que abarca esta norma.

Figura 4.7

Tipos de fallos en dientes de engranajes.



Nota: Tipos de fallos en dientes de engranaje recto segun la normativa ISO 10825.

Por otro lado, autores como Llivicura (2019) indican que los engranajes son uno de los principales elementos mecánicos que se encuentran en gran parte de las maquinarias rotativas para transmitir movimiento, por lo tanto, un fallo representa una pérdida económica como productiva. Dentro de las causas de los fallos en engranajes podemos encontrar la desalineación, mala lubricación, fatiga, altas velocidades, entre otras. La normativa AGMA 1010-F14 destaca que los fallos más comunes en engranajes son:

- Agrietamiento (crack).
- Rayadura (Scuffing).
- Picadura (pitting).
- Rotura de diente (broken tooth).

4.4.2. Frecuencia de los engranajes

Para el análisis de las firmas de vibración en sistemas mecánicos, es importante conocer las frecuencias características de los elementos que se van a evaluar. Según Sánchez (2018) los sistemas mecánicos presentan patrones de vibración que reflejan el estado en el cual se encuentra, estos patrones se conocen como firmas de vibración. Para determinar las frecuencias características se utilizarán las siguientes fórmulas:

Frecuencia de engranaje (o meshing, como se conoce en inglés) f_m : Es la frecuencia propia de cada engranaje y aparece en el espectro sin importar la condición de engranaje. Su amplitud depende de la carga, se calcula mediante la ecuación (4.8):

$$F_m = f_g \cdot Z_g \quad (4.8)$$

Frecuencia de entrada f_g : Es la frecuencia de entrada producida por el motor de entrada y se calcula mediante la ecuación (4.9):

$$F_g = \frac{N_g}{60} \quad (4.9)$$

Frecuencia de salida f_p : Es la frecuencia en el engranaje de salida, se calcula mediante la ecuación (4.10):

$$F_p = \frac{f_g \cdot Z_g}{Z_p} \quad (4.10)$$

Frecuencia de bandas laterales $f_{1,i}$ y $f_{2,i}$: Son las frecuencias que se encuentran equidistantes a la frecuencia de mesh, son múltiplos de frecuencia de entrada y salida, se calculan con las ecuaciones (4.11) y (4.12):

$$F_{1,i} = f_m \pm f_g \quad (4.11)$$

$$F_{2,i} = f_m \pm f_p \quad (4.12)$$

Donde:

Z_g : es el número de dientes del engranaje de entrada.

Z_p : es el número de dientes del engranaje de salida.

N_g : es la velocidad del engranaje de entrada en RPM (Berrezueta, 2021).

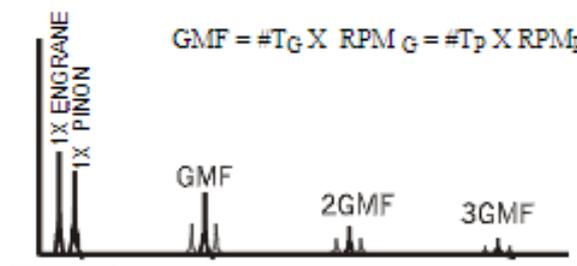
4.5. Carta de Charlotte

En el análisis de vibraciones, es importante detectar los fallos en etapas iniciales con la interpretación de patrones que se reflejan en las frecuencias características de los engranajes. Para ello, las cartas de Charlotte representan un manual de los principales fallos que se dan en equipos rotativos junto con su espectro típico en condiciones normales.

En la figura 4.8 se puede apreciar el espectro de un engranaje en condiciones normales, es importante tener en consideración que pueden aparecer frecuencias naturales, así como bandas laterales a diferentes niveles de amplitud, estas frecuencias comúnmente se las asocian con fallos anteriormente mencionados.

Figura 4.8

Espectro normal de engranaje.



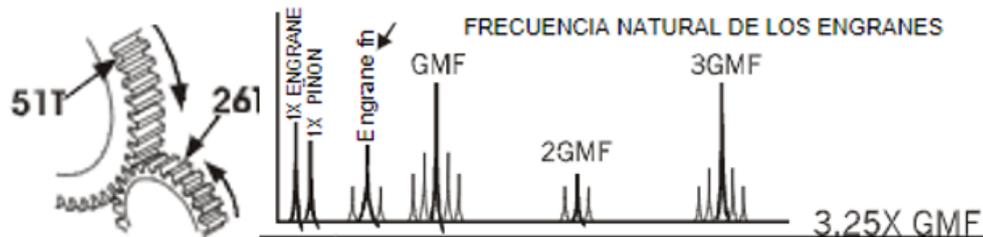
Nota: Obtenido de (Orts, Davó, y Sánchez, 2008).

El espectro normal presentado en la figura 4.8, muestra las velocidades de engranaje y del piñón, así como la frecuencia de engranajes GMF (del inglés Gear Mesh Frequency) y sus armónicas de amplitud muy baja. Las armónicas de GMF generalmente tienen bandas laterales de velocidad de giro a su alrededor, y no alteran las frecuencias naturales de los engranajes. Si se conoce el número de dientes, se recomienda FMAX en un mínimo de 3.25

veces el GMF (mínimo). En caso de desconocer el número de dientes, se sugiere fijar el FMAX en 200 veces las RPM en cada eje (Associates of charlotte, 2016).

Figura 4.9

Espectro típico de desgaste del diente.



Nota: Obtenido de (Orts y cols., 2008).

Cuando se trata de sistemas rotativos, los problemas se presentan comúnmente en engranajes o rodamientos, los cuales surgen dependiendo de los factores de operación, siendo uno de los principales inconvenientes la presencia de desgaste en los engranajes, el cual presenta como principal indicador la excitación de la frecuencia natural del mismo, que se refleja como una señal fn. Este desgaste puede observarse en el espectro de la figura 4.9 junto con bandas laterales que rodean la señal fn (Associates of charlotte, 2016).

Es fundamental comprender la utilidad de las cartas de Charlotte, debido a que no solo se emplean para detectar fallos en engranajes, sino también nos presenta los principales fallos que pueden ocurrir en equipos rotativos, así como podemos observar en la figura ???. Por tanto, su utilización resulta crucial para garantizar el óptimo rendimiento de equipos rotativos y poder prolongar su vida útil.

4.6. Severidad de fallos

Para llevar a cabo el análisis de las señales de vibración y corriente es importante tener en cuenta la severidad de fallos, debido a que se trata de uno de los conceptos más relevantes para determinar el estado de un equipo. La norma ISO (2012) define la severidad como el alcance de la pérdida, daño o perjuicio causado por una falla o fallos. En otras palabras, los niveles de severidad nos permiten determinar el nivel de daño que ha sufrido un equipo o elemento.

De acuerdo con un estudio realizado por Liu y Wang (2013), la severidad de fallos se puede clasificar en cuatro niveles, tal y como se indica en la tabla 4.1, este estudio también resalta que la falla más grave tiene mayor peso que la menos grave, y que la falla con alta probabilidad de ocurrencia tiene mayor peso que la falla con baja probabilidad de ocurrencia.

Esta información es muy importante para evaluar la criticidad de los fallos y establecer prioridades en el mantenimiento de los equipos

Tabla 4.1

Niveles de severidad.

Nivel	Definicion
I	La función del sistema se pierde o la vida útil se acorta considerablemente
II	La función del sistema se degrada seriamente o la vida útil se reduce ente $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{2}$.
III	La función del sistema se degrada parcialmente o la vida útil se reduce por debajo del $\frac{1}{4}$.
IV	Hay poco afecto en la función del sistema y la vida útil

Nota: Definición de niveles de severidad según Liu y Wang (2013).

4.7. Transformada Rápida de Fourier

Según Cochran y cols. (1967) indica que la transformada rápida de Fourier o FFT (del inglés Fast Fourier Transform) es una herramienta computacional que facilita el análisis de señales como el análisis de espectro de potencia y la simulación de filtros por medio de computadoras digitales. Además, la FFT es una transformada como la transformada integral de Fourier o la Transformada en serie de Fourier; destacando que la FFT no solo reduce el tiempo de cálculo, también reduce los errores de redondeos asociados al cálculo.

Por otro lado, Smith (1997) indica que la FFT opera descomponiendo en N puntos una señal de dominio de tiempo N , cada una compuesta por un solo punto. El segundo paso es calcular los espectros de frecuencia N correspondientes a estos dominios de tiempo N señales.

Sin embargo, el procesamiento y análisis de firmas de vibración y corriente se rigen por diferentes modelos matemáticos, entre los cuales destaca la FFT, siendo este modelo empleado para el análisis de datos, sin embargo, para poder comprender este concepto es importante primero definir el concepto de la Transformada de Fourier (FT), siendo Bracewell y Bracewell (1986) quien describe a la FT como un modelo matemático que descompone una señal que es función del tiempo en frecuencias constituyentes, siendo la ecuación (4.13) la expresión matemática característica. Además, Barszcz (2019) indica que la TF es un modelo matemático que no solo se emplea en señales periódicas, si no más bien puede analizar señales periódicas, casi periódicas o aleatorias.

$$x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (4.13)$$

La TF es una función continua, por lo cual si analizamos datos en tiempo real, estos no podrán ser analizados debido a que son datos discretos muestreados. Las señales muestreadas están limitadas en el tiempo, debido a que la capacidad de almacenar y procesar información es finita, lo cual implica la utilización de la transformada discreta de Fourier (DTF), la misma que Bracewell y Bracewell (1986) describe como un modelo que permite el procesamiento de señales digitales para encontrar el espectro de señal durante un tiempo de muestreo finito. La DFT está definida por la ecuación (4.14).

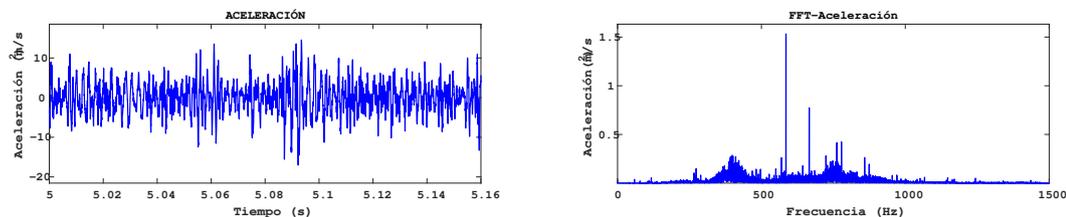
$$x(w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-jwt} dt \quad (4.14)$$

Donde $w = 2\pi/T$, lo cual representa la frecuencia.

La DTF a menudo requiere métodos discretos para la implementación y análisis computarizado, lo cual se ve reflejado en diferentes modelos matemáticos derivados de la ecuación (4.14). Con la implementación de sistemas computacionales en el análisis de señales surge la Transformada rápida de Fourier (FFT), el cual es un algoritmo eficiente de computadora que calcula la DFT y su inversa para obtener una señal de serie temporal estacionaria, la cual representa una reducción significativa de la complejidad (Ahmed y Nandi, 2020), en la figura 4.10 se observa un ejemplo de la utilización de la FFT.

Figura 4.10

Ejemplo de aplicación de la FFT.



Nota: Empleo de la FFT en el procesamiento de señal.

4.8. Normativa para el análisis de firmas de vibración

Para analizar la severidad de fallos, debemos tener en consideración los parámetros a evaluar, por lo tanto, en esta sección se presenta la normativa para el análisis de severidad en señales de vibración.

4.8.1. Norma ISO 10816: Estándar de análisis de severidad en vibraciones

Según la ISO (2009), la norma ISO 10816 establece las condiciones y procedimientos generales para medir y evaluar la severidad de la vibración de maquinaria rotativa mediante mediciones efectuadas en planta en partes no giratorias de las mismas. Los criterios analizados

son únicamente aplicables para vibraciones generadas por la propia máquina y no para vibraciones desde fuentes externas. Esta norma presenta la tabla que se muestra en la figura 4.11, la cual presenta los niveles de severidad de acuerdo al tipo de máquina, potencia o altura del eje. Las máquinas se clasifican en los siguientes grupos:

Grupo 1: Máquinas rotativas grandes con potencia superior 300 kW. Máquinas eléctricas con altura de eje $H=315$ mm.

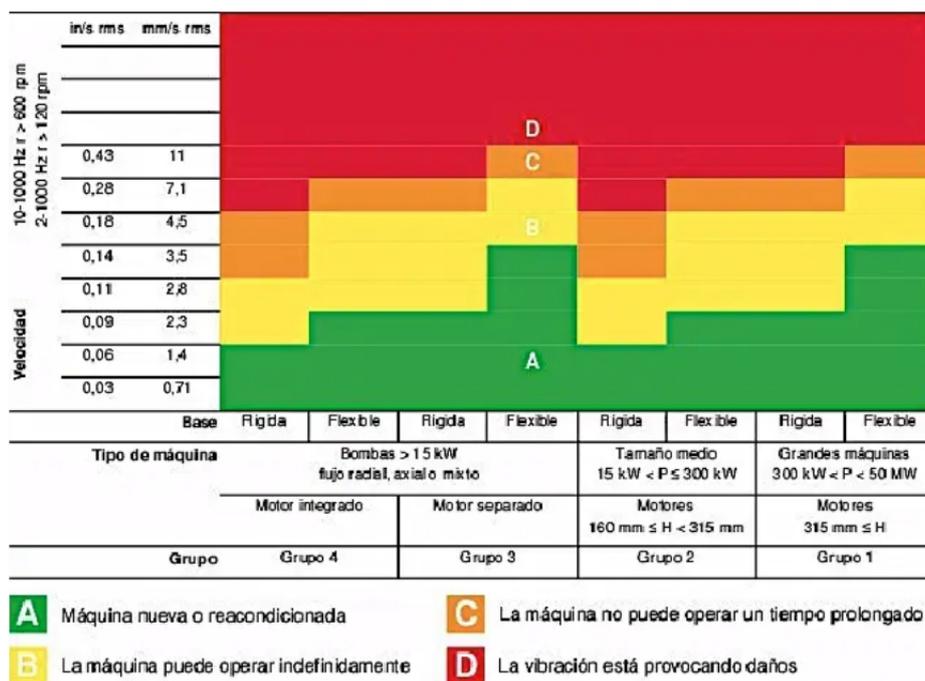
Grupo 2: Máquinas rotativas medianas con potencia entre 15 y 300 kW. Máquinas eléctricas con altura de eje $160 \leq H < 315$ mm.

Grupo 3: Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor separado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 kW.

Grupo 4: Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor integrado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15 kW ISO (2009).

Figura 4.11

Tabla de indicadores de severidad.

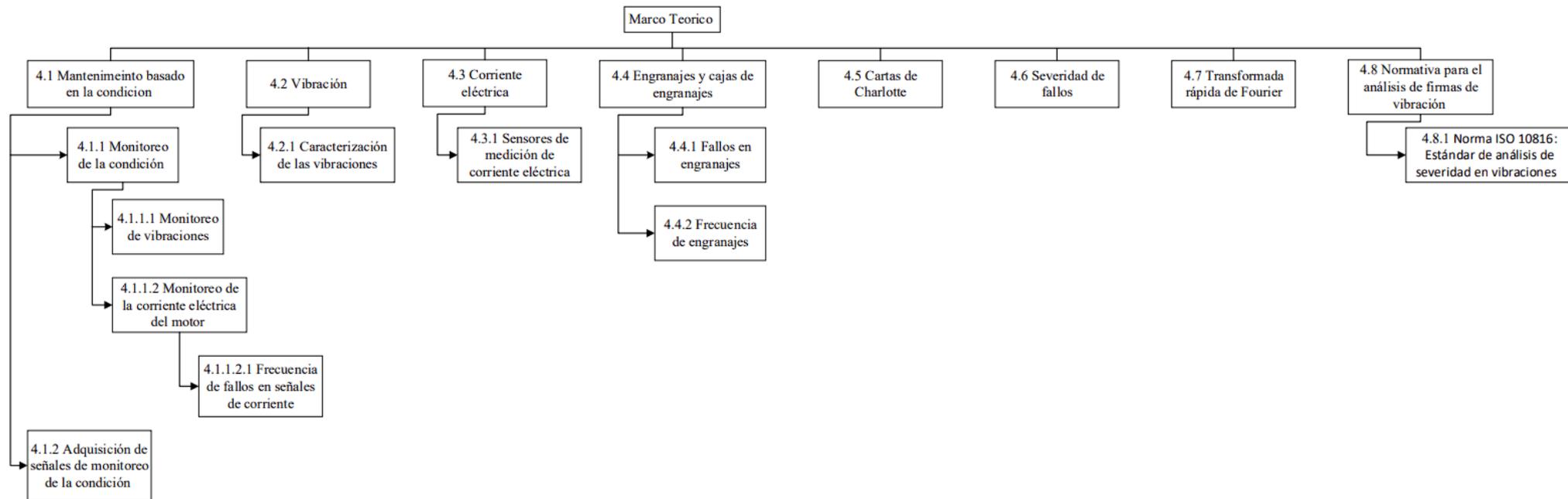


4.9. Resumen del capítulo

En la figura 4.12 se presenta un cuadro resumen del capítulo.

Figura 4.12

Resumen del marco teórico.



5. Marco metodológico

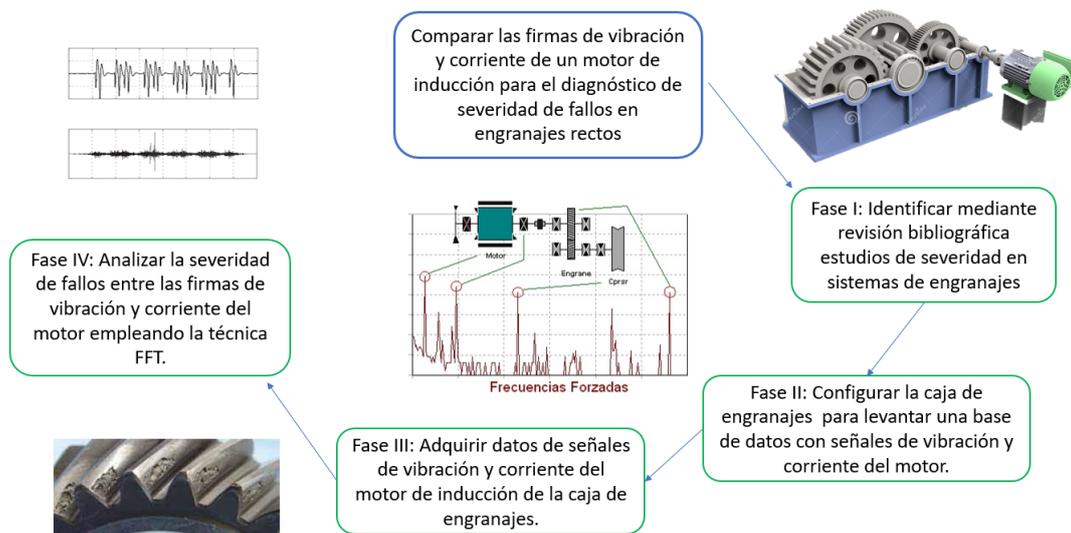
A continuación, se presenta el marco metodológico que se utiliza para el desarrollo del trabajo de titulación.

5.1. Metodología del proceso

A continuación, en la figura 5.1 se presenta la metodología del proceso que se utiliza en el trabajo de titulación.

Figura 5.1

Metodología del proceso.



La metodología que se emplea durante el desarrollo del trabajo de titulación parte de la identificación mediante revisión bibliográfica de estudios de severidad en sistemas de engranajes, los mismos que identifican los parámetros a considerar para la configuración de la caja de engranajes del laboratorio de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana; una vez configurada la caja de engranajes en base en los parámetros, se adquiere datos de señales de vibración y corriente, para posteriormente establecer una línea base de señales acorde a las condiciones de estudio, siendo la finalidad el análisis de severidad de fallos entre las firmas de vibración y corriente empleando la técnica de FFT.

5.2. Metodología experimental: Adquisición de señales de monitoreo de la condición

5.2.1. Banco de pruebas para el análisis de vibraciones y corriente

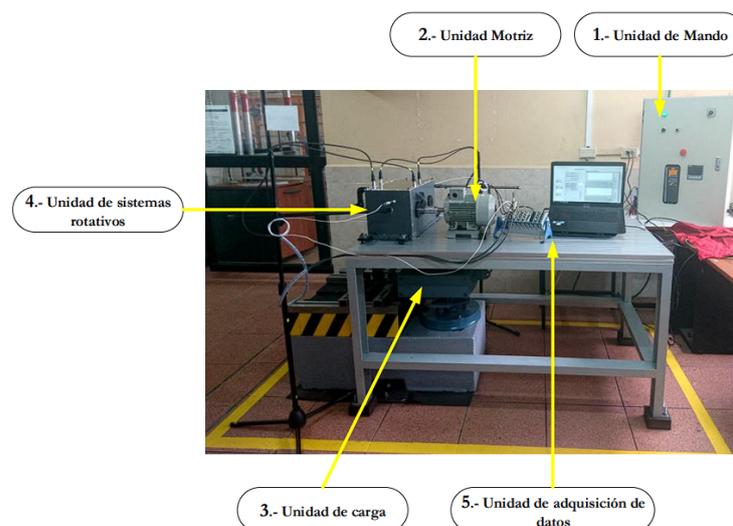
El desarrollo del trabajo de titulación se lleva a cabo en el laboratorio del grupo GIDTEC de la Universidad Politécnica Salesiana, que dispone de diversos equipos para el monitoreo de la condición en maquinaria rotativa. Para el análisis, se emplea el banco de vibraciones en donde se realiza el emplazamiento de los sensores y pinzas de corriente para la adquisición de señales de vibración y corriente. Este banco permite realizar mediciones en condiciones controladas y reproducibles, lo cual asegura la calidad de los datos obtenidos, facilitando el análisis posterior.

En la figura 5.2 se presenta las unidades principales que conforman el banco de vibraciones, estas son:

1. Unidad de mando.
2. Unidad motriz.
3. Unidad de carga.
4. Unidad de sistemas rotativos.
5. Unidad de adquisición de datos.

Figura 5.2

Unidades del Banco de vibraciones.

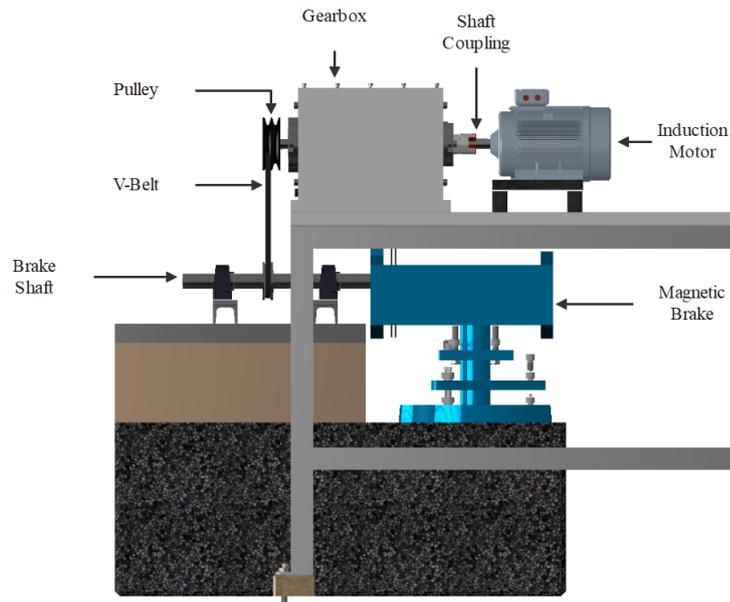


Nota: Obtenido de Lojano Armijos (2019).

La figura 5.3 muestra el banco de vibración, que está compuesto por un motor de 2 HP, conectado a un acoplamiento tipo mordaza con un diámetro de 24 mm al eje del piñon de la caja de engranajes. El movimiento se transmite del piñon a la rueda que se conecta a un freno magnético mediante dos poleas y una correa en V.

Figura 5.3

Banco de vibraciones del GIDTEC.



En la tabla 5.1, se presenta las especificaciones de los elementos mecánicos del banco de vibraciones.

Tabla 5.1

Especificaciones del banco de vibraciones

Especificaciones de los elementos del banco de vibraciones	
Motor	Siemens 1LA7 096-6YA60
Rodamiento	Rodamiento de bolas SKF 1205E
Acoplamiento	Acoplamiento Lovejoy D24
Tipo de transmisión	Electromagnética mediante transmisión
Relación de reducción	1 : 1.8

Por otra parte, en la tabla 5.2 se muestran los parámetros del motor empleado en el proceso experimental de la adquisición de señales.

Tabla 5.2

Parámetros de operación del motor Siemens 1LA7 096-6YA60.

Parámetro	Unidad	Valor
Frecuencia de suministro	Hz	60
Velocidad del motor	rpm	800
Alimentación del motor	V	220
Potencia del motor	HP	2
Tipo de transmisión	-	polea-correas V

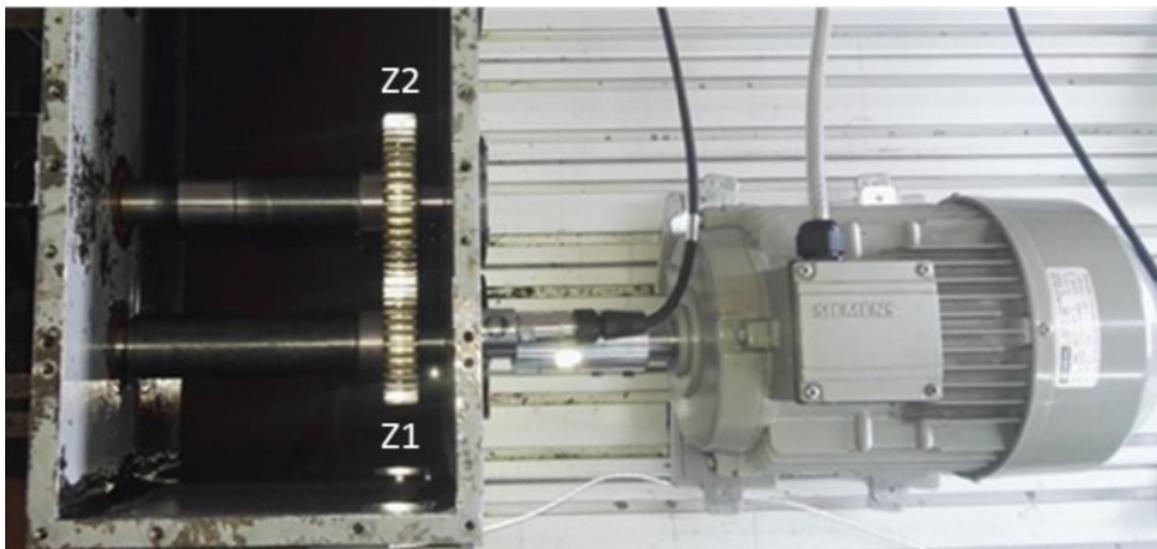
Nota: En la tabla se observa los parámetros empleados para el proceso experimental.

5.2.1.1. Elementos mecánicos de la caja de engranajes

Dentro de la parte experimental del trabajo de titulación, el proceso se realiza sobre la caja de engranajes conformada por un piñon y una rueda, como se observa en la figura 5.4.

Figura 5.4

Caja de engranajes del banco de vibraciones.



Por otra parte, en la tabla 5.3 se observa las características principales de los engranajes que forman parte del banco de vibraciones.

Tabla 5.3

Características de los engranajes.

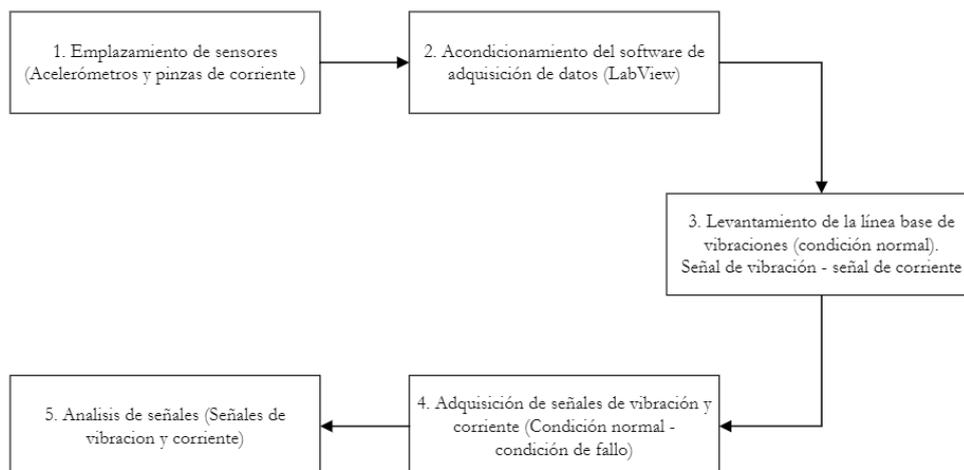
Características de los engranajes	
Tipo de engranaje	Recto
Material	SAE 5115
Módulo	2.5
Ángulo de presión	20°
N.º dientes del piñon	30
N.º dientes de la rueda	54

5.2.2. Proceso experimental para la adquisición de señales de monitoreo de la condición

Para garantizar la repetibilidad en la adquisición de datos de señales de vibración y corriente, el GIDTEC plantea una metodología acorde a las experimentaciones previamente realizadas. Este proceso consta de cinco etapas que permiten asegurar la veracidad de los datos obtenidos. En la figura 5.5, se presenta el proceso de adquisición de datos de señales de vibración y corriente, el cual fue realizado de manera detallada con la finalidad de minimizar cualquier posible error en la medición.

Figura 5.5

Proceso experimental para la adquisición de señales de vibración y corriente.



Nota: Adaptado de Vacacela (2020).

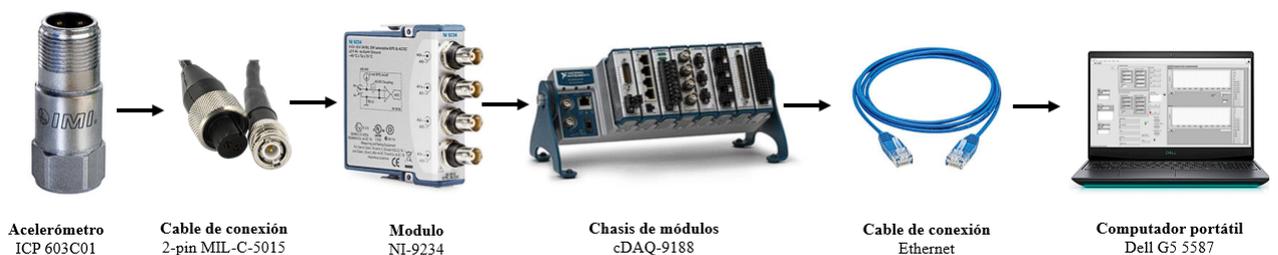
5.2.2.1. Emplazamiento de los sensores

5.2.2.1.1. Conexión de los sensores

Para la obtención de señales en nuestro trabajo de titulación, se utilizarán dos instrumentos de medición principales, los cuales son el acelerómetro y la pinza amperimétrica. En la figura 5.6 se pueden observar los elementos utilizados para la adquisición de datos a través del acelerómetro. Las señales de vibración son adquiridas por los acelerómetros piezoeléctrico modelo IPC 603C01, los cuales están emplazados en la caja de engranajes y en el motor asíncrono. La señal de salida de los acelerómetros se recopila a una frecuencia de 50 kS/s mediante la tarjeta NI cDAQ-9234. A su vez, la tarjeta NI 9234 se conecta al chasis NI cDAQ-9188, que envía los datos vía Ethernet al ordenador portátil ASUS ROG GL752VWDH74, el cual cuenta con LabVIEW y MATLAB para la adquisición de señales.

Figura 5.6

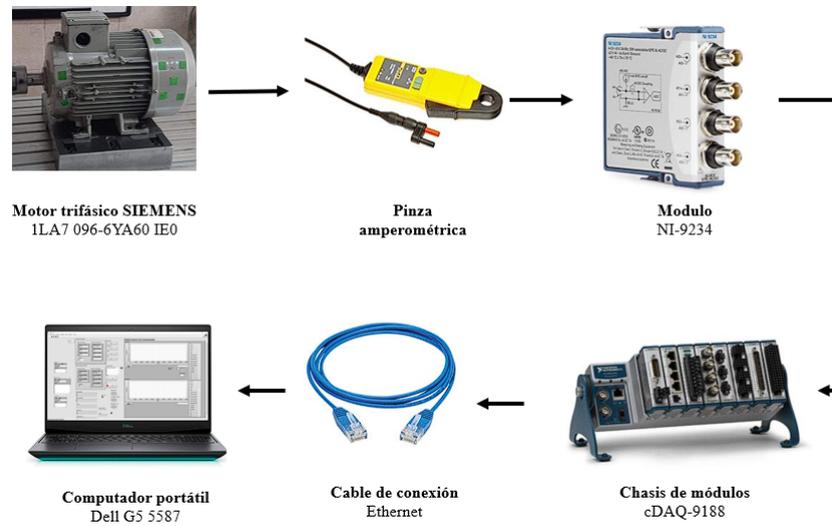
Secuencia de conexión del sistema de adquisición de señales de vibración.



En la figura 5.7 podemos observar los elementos empleados para la adquisición de datos a través de la pinza amperimétrica. Las señales de corriente son adquiridas por las pinzas amperimétricas de efecto hall, los cuales están emplazados al motor asíncrono. La señal de la pinza se recopila a una frecuencia de 50 kS/s mediante la tarjeta NI cDAQ-9234. La tarjeta NI 9234 se conecta al chasis NI cDAQ-9188, que envía los datos vía Ethernet al ordenador portátil ASUS ROG GL752VWDH74, el cual cuenta con LabVIEW y MATLAB para la adquisición de señales.

Figura 5.7

Secuencia de conexión del sistema de adquisición de señales de corriente.



A continuación, se detallará cada uno de los elementos empleados para la adquisición de datos del banco de vibraciones.

Acelerómetro ICP 603C01

El acelerómetro IPC 603C01 es un sensor piezoeléctrico generalmente utilizado para aplicaciones en maquinaria rotativas como lo son las cajas de engranajes. Los sensores piezoeléctricos generan una tensión eléctrica por presión, sobre un cristal piezoeléctrico, que es proporcional a la aceleración (MI, 2018). El modelo 603C01 lo podemos observar en la figura 5.8, este puede captar señales entre 0,5 a 10000 Hz, siendo apropiado para adquirir datos de vibración a altas frecuencia lo cual permite apreciar grandes esfuerzos con desplazamiento relativamente pequeños (Sensors, 2019).

Figura 5.8

Acelerómetro piezoeléctrico ICP 603C01.



Nota: Acelerómetro empleado para la adquisición de señales de vibración. Obtenido de (Sensors, 2019).

La tabla 5.4 muestra las características técnicas del sensor ICP 603C01.

Tabla 5.4

Especificaciones técnicas del acelerómetro ICP 603C01

Características del acelerómetro ICP 603C01	
Sensibilidad ($\pm 10\%$)	10.2 mV (m/s ²)
Rango de medición	± 490 m/s ²
Rango de frecuencia (± 3 dB)	0.5 a 10.000 Hz
Frecuencias de resonancia	25 kHz
No linealidad	$\pm 1\%$
Sensibilidad transversal	$\leq 7\%$
Rango de temperatura	-54 a +121 °C
Grado de protección	IP68
Voltaje de excitación	18 a 28 VDC
Excitación de corriente constante	2 a 20 mA

Nota: Obtenido de (Sensors, 2019).

Pinza amperimétrica

La pinza amperimétrica CA/CC i30s utilizan la tecnología del efecto Hall. Según Pujadas y Valdés Dini (2012) y Xiao y cols. (2003) el efecto Hall es un fenómeno electromagnético que permite la detección de corriente CC o CA mediante la transformación de señales magnéticas en señales eléctricas. Este tipo de sensores tienen una corriente máxima limitada debido a la saturación del núcleo, además, existen dos tipos principales: lazo abierto (Open loop) y lazo cerrado (closed loop). Este último presenta una mejor precisión y un rango dinámico más amplio.

En el banco de vibraciones se emplearon tres pinzas amperimétricas para la adquisición de señales, la cual se muestra en la figura 5.9. Estas pinzas pueden ser utilizadas en conjunto con osciloscopios u otros instrumentos para obtener medidas precisas de corriente CC o CA, sin necesidad de interrumpir el circuito (Fluke, 2023).

Figura 5.9

Pinza amperimétrica fluke I30s.



Nota: Pinza amperimétrica empleada para la adquisición de señales de corriente. Obtenido de (Fluke, 2023).

La tabla 5.5 describe las características técnicas de este tipo de pinzas amperimétricas.

Tabla 5.5*Especificaciones técnicas de la pinza amperimétrica*

Características técnicas de la pinza amperimétrica	
Rango de corriente	20 A CA rms o CC
Rango de medida	± 30 A
Sensibilidad de salida	100 mV/A
Precisión (a +25°C)	$\pm 1\%$ de lectura ± 2 mA
Resolución	± 1 mA
Impedancia de carga	>10 k Ω y $\leq 100pF$
Sensibilidad de la posición del conductor	$\pm 1\%$ respecto a la lectura central
Rango de frecuencias	CC a 100 kHz (-0,5 dB)
Alimentación eléctrica	9 V alcalina, MN1604/PP3, 30 horas, indicador de batería baja.
Tensión de servicio	300 V CA rms o CC

Nota: Principales características de la pinza amperimétrica. Obtenido de (Fluke, 2023).

Módulo de adquisición National Instruments NI-9234

El módulo NI 9234 es un módulo de adquisición de señales dinámicas de cuatro canales desarrollada por la National Instruments como se presenta en la figura 5.10, este módulo está acondicionado para medir señales de sensores piezoeléctricos electrónicos integrados (IEPE) como acelerómetros, micrófonos, tacómetros y sensores de proximidad. Además, el módulo incluye filtros antialiasing incorporados que se ajustan automáticamente a la frecuencia de muestreo (Instruments, 2014).

El canal de entrada mide las señales simultáneamente a velocidades de hasta 51.2 kS/s. Cuando es usado con software de NI, este módulo ofrece funcionalidad de procesamiento para monitoreo de condición como pruebas de ruido, análisis de frecuencia y rastreo de orden (Instruments, 2014).

Figura 5.10

Módulo de adquisición de señales NI-9234.



Nota: Obtenido de (Instruments, 2014).

La tabla 5.6 muestra las características técnicas del módulo NI 9234

Tabla 5.6

Especificaciones técnicas del módulo de adquisición de señales NI-9234

Designación	Especificación
Número de canales de entrada	4 analógicos
Tipo de conexión de canales	BNC
Rango de voltaje analógico de entrada	± 5 V
Protección de sobrecarga de voltaje	± 30 V
Frecuencia de muestreo máxima	51.2kS/s por canal
Resolución del convertidor A/D	24 bits
Rango dinámico general	102 dB
Voltaje operativo	60VCC
Dimensiones generales	25mm x 115mm x 80mm

Nota: En la tabla se observa las principales características del modulo de adquisicion de señales NI-9234 (Instruments, 2014).

Chasis de módulos cDAQ 9188

El chasis NI cDAQ-9188 es un sistema CompactDAQ Ethernet diseñado para la adquisición de datos en sistemas pequeños y distribuidos. Cuenta con 8 ranuras, como se presenta en la figura 5.11. Su diseño permite la medición de hasta 127 muestras por ranura de señales analógicas, digitales y de temporizadores. Además, el chasis se comunica a través de Ethernet a una PC o portátil, lo cual garantiza una transferencia de datos rápida y eficiente.

El software controlador NI-DAQmx permite el registro de los datos obtenidos durante los experimentos realizados en el laboratorio. También, facilita la creación de sistemas de pruebas distribuidos, utilizando entornos de programación como NI LabVIEW. Esta característica proporciona flexibilidad y versatilidad en la configuración y control de adquisición de datos en diferentes aplicaciones (Instruments, 2015).

Figura 5.11

Chasis NI cDAQ-9188.



Nota: Chasis NI cDAQ-9188 empleado para la transferencia de datos. Obtenido de (Instruments, 2015).

La tabla 5.7 muestra las características técnicas del chasis NI cDAQ-9188.

Tabla 5.7*Características técnicas del chasis NI cDAQ-9188*

Características del chasis NI cDAQ-9188	
Marca	National Instruments
Número de canales	256
Número de ranuras	8
Voltaje de entrada	9V-30V
Resolución de tiempo	12,5 ns
Resolución	32 bits
Frecuencia de entrada de tiempo	0 MHz a 20 MHz
Temperatura de funcionamiento	-20 °C a 55 °C

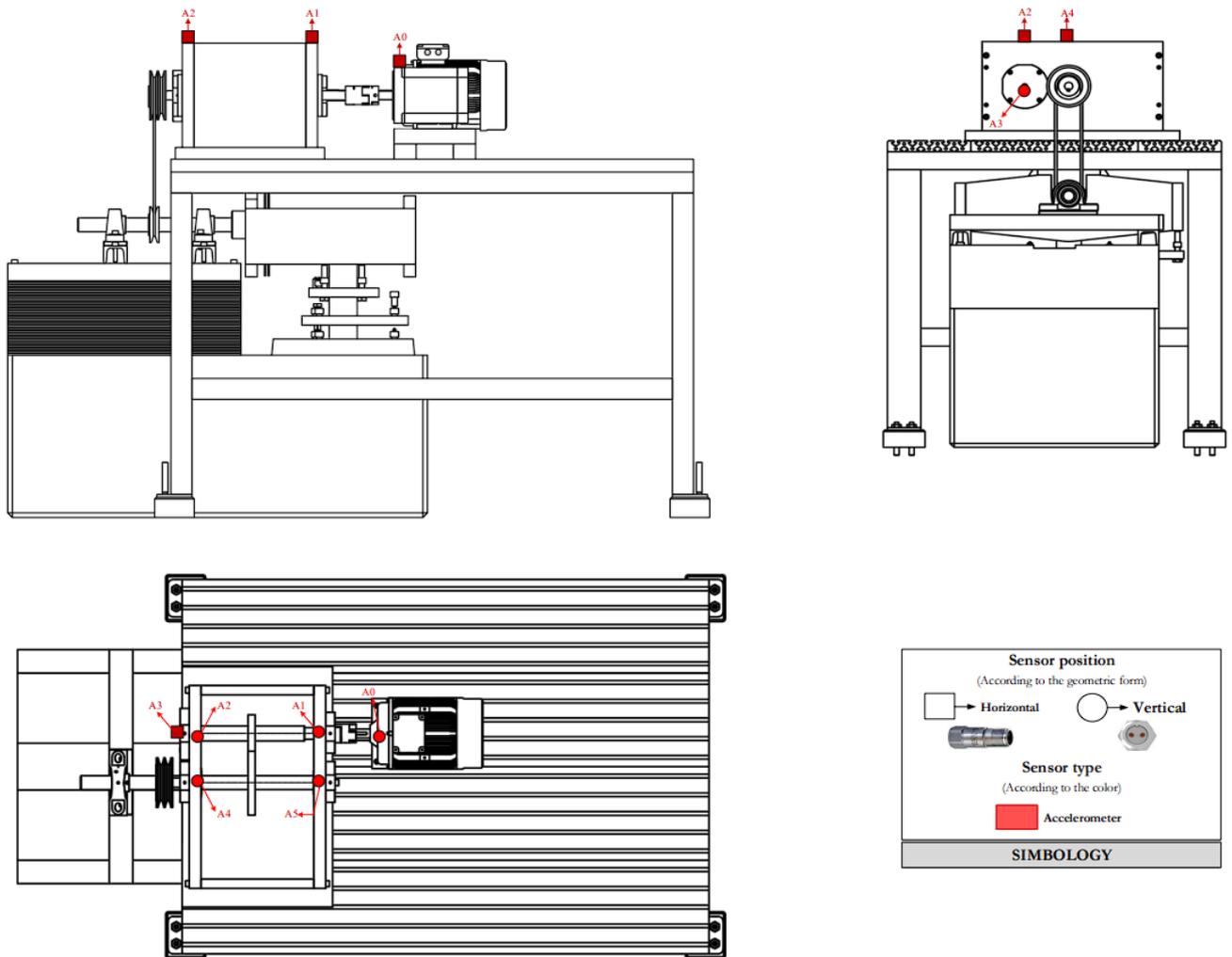
Nota: Obtenido de (Instruments, 2015).**5.2.2.1.2. Emplazamiento de los acelerómetros**

Los acelerómetros se rigen bajo el efecto piezoeléctrico, lo cual indica que deben ser emplazados directamente en la superficie de la caja de engranajes. El acelerómetro empleado en este trabajo es un ICP 603C01, el cual cuenta con un prisionero con rosca $\frac{1}{4}$ como elemento de sujeción. La posición y ubicación de los acelerómetros, está de acuerdo con la norma internacional ISO 10816-3 “Mechanical vibration-Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts”.

En la figura 5.12 se ilustra el plano de emplazamiento de los acelerómetros en el banco de vibraciones, los acelerómetros 1 y 2 (A1 y A2) se ubican de forma radial y tangencial al motor; mientras que los acelerómetros desde el 3 hasta el 8 (A3 hasta A8), se encuentran empleados en la caja de vibraciones. Los acelerómetros 4, 5 y 7 (A4, A5 y A7) se ubican con respecto al eje de giro del rodamiento SKF 1205 EKTN9, ubicándose radialmente los acelerómetros 4 – 5 y axialmente el acelerómetro 7. Por otro lado, los acelerómetros 3, 6 y 8 (A3, A6 y A8) se ubican con respecto al eje de giro del rodamiento SKF 1204 EKTN9, ubicándose radialmente los acelerómetros 3 – 6 y axialmente el acelerómetro 8.

Figura 5.12

Esquema del emplazamiento de los acelerómetros.



Nota: Se observa el emplazamiento de los acelerómetros de acuerdo con la norma ISO 10816-3.

Para evitar errores en la adquisición de señales, es importante comprobar que los cables de los acelerómetros no se encuentren en contacto con partes móviles del banco de vibraciones o que reciban vibración externa.

5.2.2.1.3. Emplazamiento de las pinzas de corriente

Las pinzas amperimétricas emplean el efecto Hall para la adquisición de datos, por lo cual sujetan entre sus tenazas al cable conductor de corriente que alimenta al motor de inducción del banco de vibraciones, según Vacacela (2020) es importante resaltar que para el análisis de firmas de corriente del motor, la medición de corriente se realiza en el estator del

motor, por este motivo, las pinzas deben ser emplazadas al inicio del suministro de energía del sistema, esto se evidencia en la figura 5.14 que muestra la conexión real de las pinzas amperimétricas, mientras que la figura 5.13 muestra el esquema del emplazamiento de las pinzas amperimétricas (CVC1, CVC2, CVC3).

Figura 5.13

Esquema de conexión de las pinzas amperimétricas.

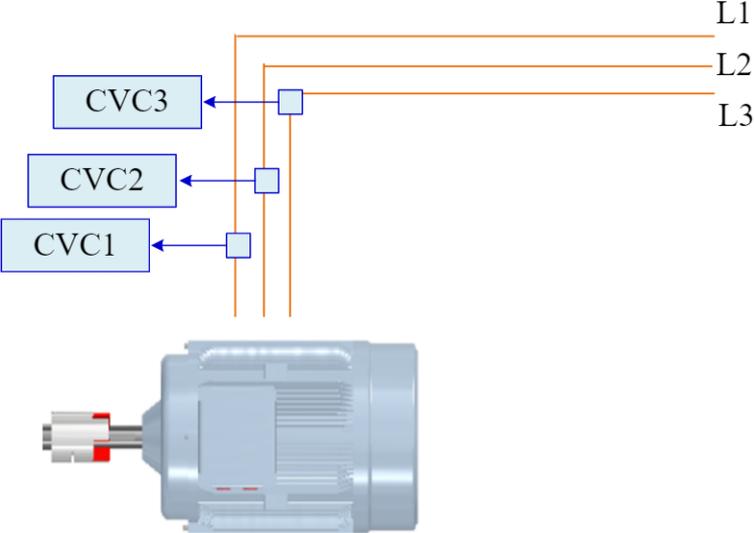


Figura 5.14

Conexión real de las pinzas amperimétricas.

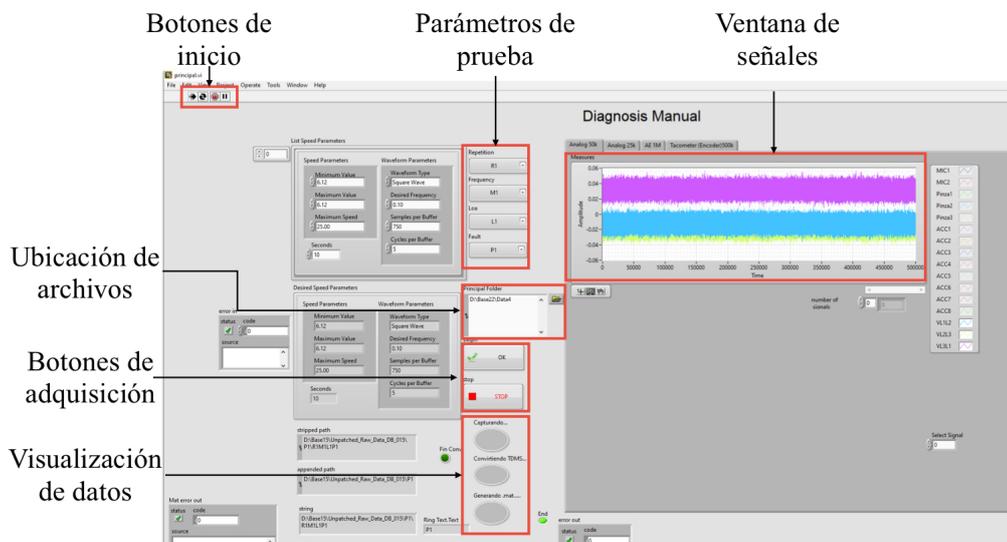


5.2.2.2. Acondicionamiento del software de adquisición de datos

El GIDTEC ha desarrollado un programa en el software LabVIEW como parte sus estudios en el área del monitoreo de la condición. Este programa permite la adquisición de señales del monitoreo de la condición, incluyendo señales de vibraciones y corriente. En la figura 5.15 se muestran las principales partes de la interfaz gráfica del programa de adquisición denominado “Diagnostic Manual Gearbox”

Figura 5.15

Software de adquisición de datos.



Nota: En la tabla se observa las partes que conforman el software de adquisición de datos.

5.2.2.2.1. Descripción de la interfaz gráfica

Botones de inicio: permiten poner en marcha, pausar, actualizar y detener el programa.

Botones de adquisición: mediante estos botones se da inicio a la adquisición de datos.

Parámetros de prueba: se configuran cuando el programa se encuentra en ejecución según la repetición y el fallo.

Ubicación de archivos: presenta el folder donde serán almacenados los archivos que contienen a las señales adquiridas.

Visualización de datos: permite visualizar el proceso de captura y conversión de las señales, así como la generación del archivo con extensión (.mat) para el procesamiento en el software MATLAB.

Ventana de señales: en esta ventana se verifica de manera visual las señales adquiridas (Vacacela, 2020).

5.2.2.3. Línea base

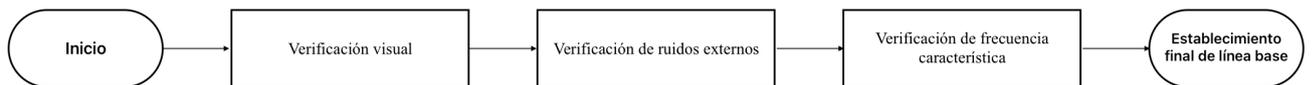
La línea base consiste en establecer la condición inicial estable de la máquina en su estado normal de operación, lo cual permite realizar comparaciones con las mediciones posteriores una vez que se implementen los fallos en los elementos críticos de la caja de engranajes. La finalidad de la línea base es proporcionar una referencia clara para evaluar y analizar los cambios en los parámetros medidos cuando se introducen fallos en los elementos críticos.

5.2.2.3.1. Validación de línea base

Con el emplazamiento de los sensores y la verificación de los parámetros de operación, se procede a la adquisición de la línea base, siendo el primer paso la validación de la línea base, para llevar a cabo este proceso, empleará los pasos que se presentan en la figura 5.16.

Figura 5.16

Proceso de validación de línea base.



Nota: En la tabla se observa los pasos a seguir para la validación de la línea base. Adaptado de Vacacela (2020).

Verificación visual

La verificación visual permite examinar de manera general el banco de vibraciones, permitiendo determinar posibles desalineamientos, desajustes de pernos, mala conexión de los sensores, interferencias en los cables de conexión, mala configuración del motor, entre otros.

Verificación de ruidos externos

La verificación de ruidos implica asegurarse de que no existan ruidos anormales al encender la caja de engranajes, los cuales pueden ser un indicativo de un mal ensamble o un fallo en

algún componente mecánico. Para llevar a cabo la verificación, es importante contar con una persona con experiencia en el mantenimiento de caja de engranajes.

Verificación de frecuencia característica

Las cajas de engranajes en condiciones estables de operación generan frecuencias características determinadas por la velocidad de giro, la relación de transmisión y los elementos mecánicos que conforman el sistema. Estos factores son los que caracterizan la línea base, para la verificación de dicha línea base, se emplean señales de vibración, debido al respaldo bibliográfico relacionado con vibración en cajas de engranajes.

Para establecer la línea base se debe validar el espectro de vibración y corriente obtenido en condiciones normales, con base en las frecuencias características que emplean los datos físicos y de operación de los elementos del banco de vibración, es así como, las frecuencias características de vibración se observan en la figura 5.17, mientras que en la figura 5.18 se observa la señal de vibración característica del banco de vibraciones, la cual fue adquirida por el acelerómetro 1 (A1), además, presenta los valores de las frecuencias fundamentales correspondientes a la caja de engranajes.

Figura 5.17

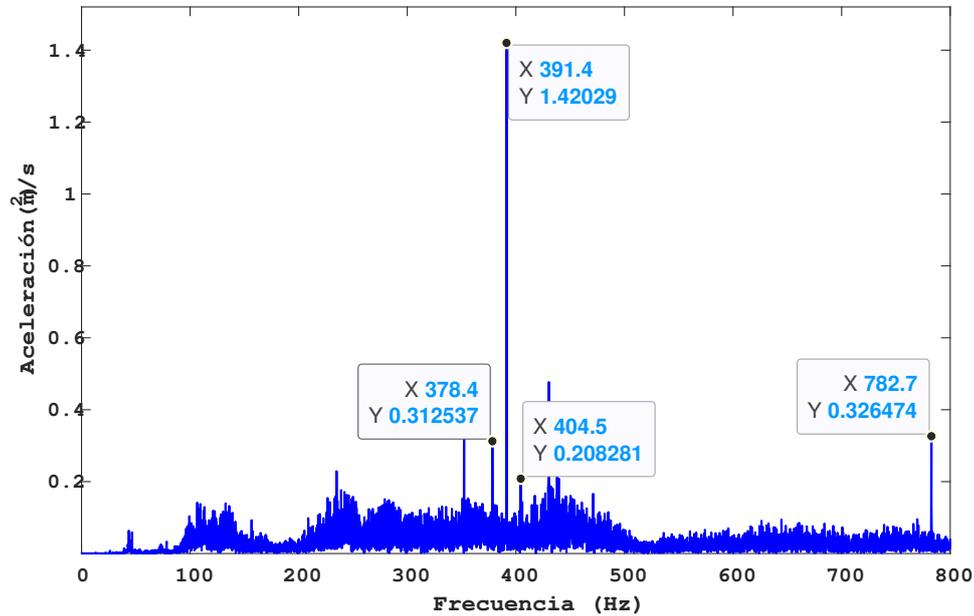
Frecuencias características de la caja de engranajes para el análisis de vibración.

Elemento	Datos	Formula	Frecuencia (Hz)
Motor	Vmotor = velocidad nominal = 800 rpm	$Frecuencia = \frac{velocidad}{60}$	13.33
	Engranajes	Ng = Velocidad eje de entrada = 800 rpm	Frecuencia de entrada: f_g $f_g = \frac{N_g}{60}$
Zg = N° de dientes engranaje de entrada = 30		Frecuencia de salida: f_p $f_p = \frac{f_g \cdot Z_g}{Z_p}$	7.40
		Frecuencia de engranaje: f_m $f_m = f_g \cdot Z_g$	399.9
Zp = N° de dientes engranaje de salida = 54		Frecuencia de bandas laterales: $f_{1,i} - f_{2,i}$ $f_{1,i} = f_m \pm f_g$ $f_{2,i} = f_m \pm f_p$	$\frac{f_{1,1} = 413.32}{f_{1,2} = 386.66}$ $\frac{f_{2,1} = 407.39}{f_{2,2} = 392.59}$

Nota: En la tabla se observa el calculo de las señales características de los elementos que conforman la caja de engranajes para el análisis de vibración.

Figura 5.18

Firma característica de vibración.



Nota: Firma de vibración del banco de vibraciones en condición normal.

En la tabla 5.8 se presenta las características de cada punto que resaltan en el espectro de vibración.

Tabla 5.8

Comparación de las frecuencias calculadas con las frecuencias obtenidas de la firma de vibración.

Punto	Frecuencia real [Hz]	Frecuencia calculada [Hz]	Amplitud	Denominación
1	391.4	399.9	1.42	GMF: Frecuencia de engranaje
2	782.7	799	0.32	2 GMF
3	404.5	413.3	0.20	$f_{1,1}$: Banda lateral
4	378.4	386.6	0.31	$f_{1,2}$: Banda lateral

Nota: En la tabla se observa la comparación de las frecuencias características de la caja de engranajes para el análisis de vibración.

El análisis de corriente se realizará con base en las fórmulas descritas desde la ecuación (4.1) hasta la ecuación (4.7), mismas que determinan las frecuencias características que

presenta el banco de vibraciones, es así, como se obtuvieron las frecuencias que se presentan en la figura 5.19, mientras que en las figuras 5.20 y 5.21, presentan la señal de corriente obtenida de la pinza amperimétrica 1.

Figura 5.19

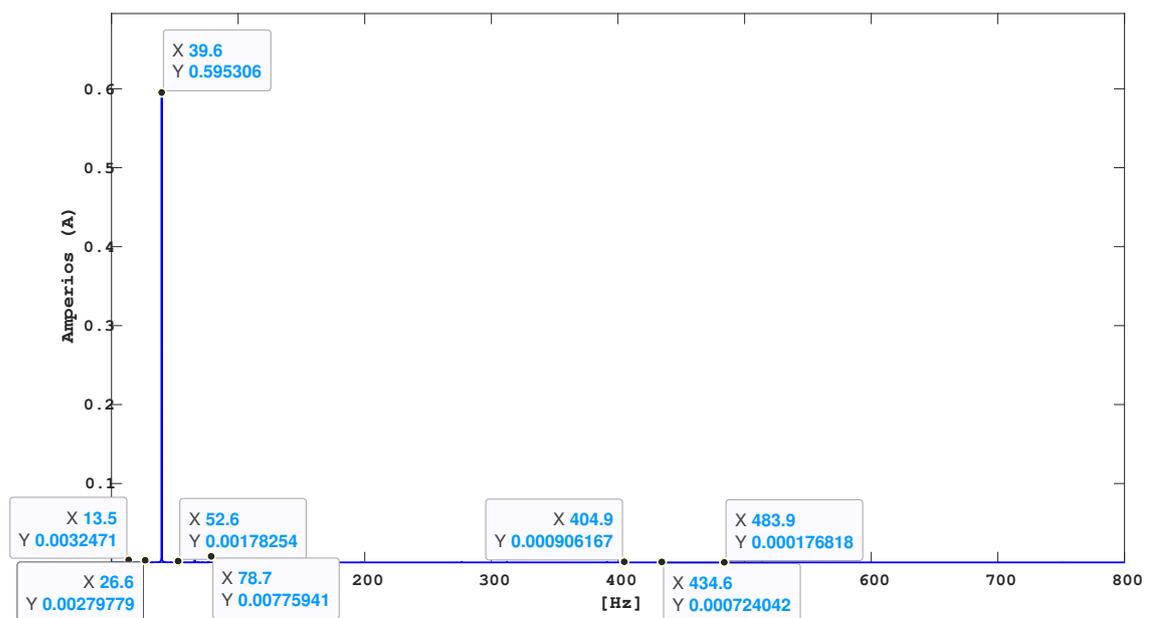
Frecuencias características de la caja de engranajes para el análisis de corriente.

Denominación	Datos	Formula	Frecuencia [Hz]
Frecuencia de giro	Vmotor: velocidad nominal = 800 rpm	$F_{r1} = \frac{\text{velocidad}}{60}$	13,33
Frecuencia de alimentacion del estator	p: Numero de pares de polos = 3	$F = F_{r1} \cdot p$	40
Frecuencia de giro del eje de entrada	m: numero de armonicas en el espectro de corriente = 1	$F_{Gr1} = F \pm mF_{r1}$	26,67 53,33
Frecuencia de engranaje	Fm: Frecuencia de engranaje = 400 Hz q: numero de armónicos en el espectro de corriente = 1	$F_{Gm} = F + qF_m$	440
Suma de las frecuencias de engranaje y de giro del eje de entrada	Fm: Frecuencia de engranaje = 400 Hz F: frecuencia de alimentación del estator= 40 Hz q, n: n° de armónicos en el espectro de corriente = 1	$F_{Gr1m} = F + qF_m \pm mF_{r1}$	493,33 413,33

Nota: En la tabla se observa el calculo de las señales características de los elementos que conforman la caja de engranajes para el analisis de corriente.

Figura 5.20

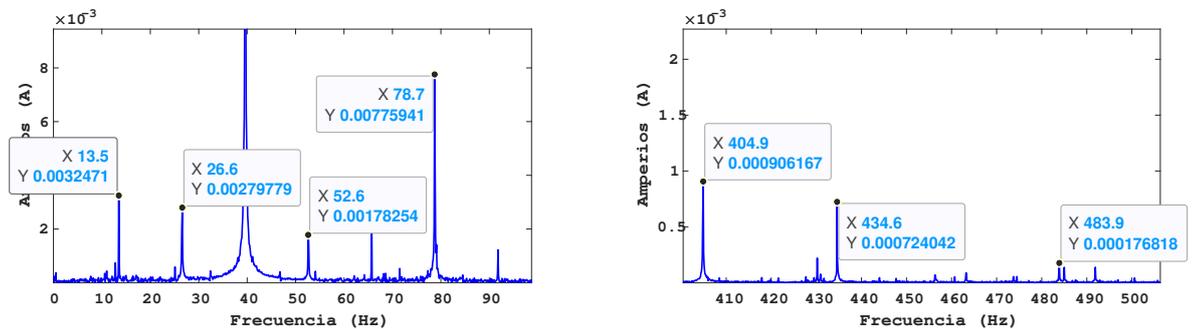
Firma característica de corriente del motor.



Nota: Firma de corriente del banco de vibraciones en condicion normal.

Figura 5.21

Firma característica de corriente del motor.



Nota: Firma de corriente del banco de vibraciones en condición normal.

En la tabla 5.9 se presenta las características de cada punto que resaltan en el espectro de corriente.

Tabla 5.9

Comparación de las frecuencias calculadas con las frecuencias obtenidas de la firma de corriente.

Punto	Frecuencia real [Hz]	Frecuencia calculada [Hz]	Amplitud	Denominación
1	483.9	493.33	0.00021	Banda lateral
2	434.6	440	0.00072	Frecuencia de engranaje
3	404.9	413.33	0.0009	Banda lateral
4	78.7	80	0.0077	Armónico de la Frecuencia del estator
5	52.6	53.33	0.0017	Frecuencia de giro del eje de entrada
6	39.6	40	0.595	Frecuencia de alimentación del estator
7	26.6	26.67	0.0027	Frecuencia de giro del eje de entrada
8	13.5	13.33	0.0032	Frecuencia de giro

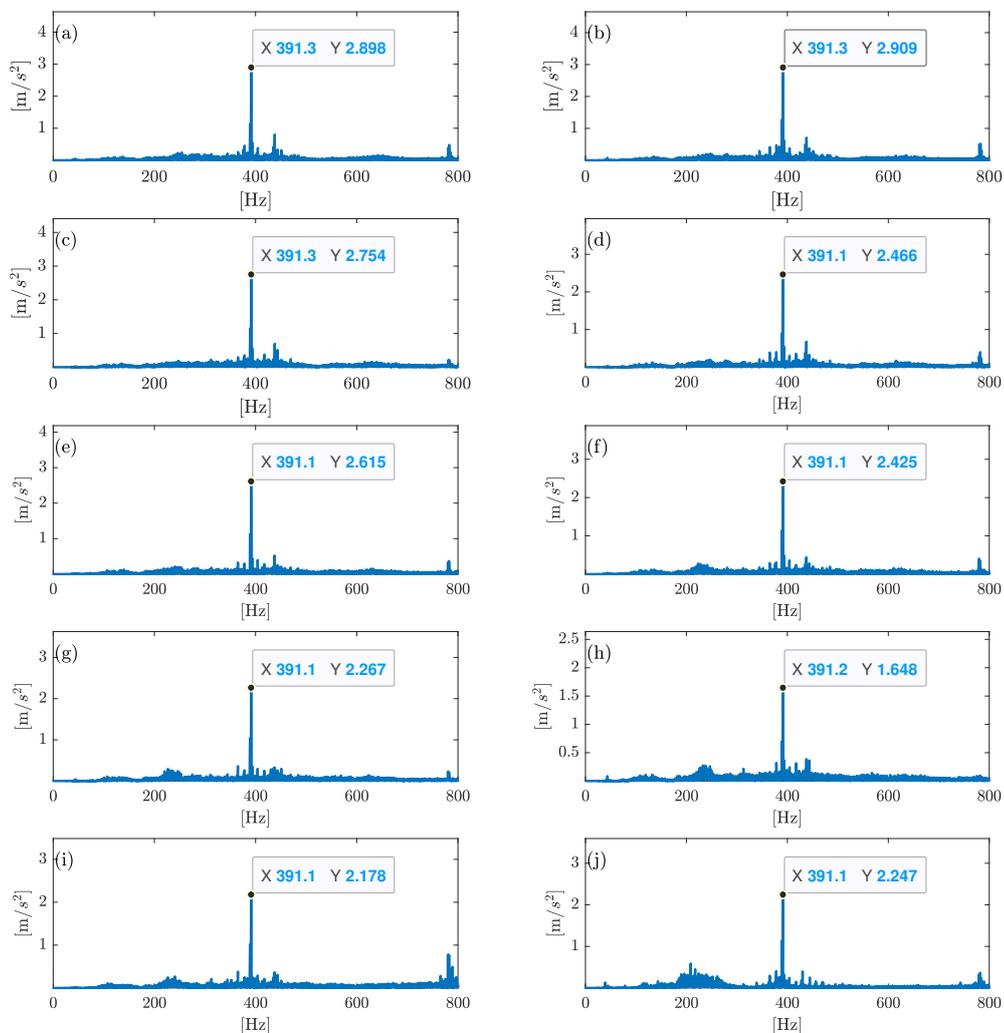
Nota: En la tabla se observa la comparación de las frecuencias características de la caja de engranajes para el análisis de corriente.

5.2.2.3.2. Establecimiento de línea base

Una vez realizada la validación de las señales adquiridas, se procede al establecimiento de la línea base, obteniendo como resultado los espectros de señales de vibración que se presentan en la figura 5.22, mientras que los espectros de señales de corriente se presentan en la figura 5.23. Las señales que se adquirirá con los fallos implantados en el diente del piñón de la caja de engranajes se comprobarán con esta línea base, misma que nos permitirá detectar las variaciones que se presentan en las señales según el nivel de severidad que presenta el fallo implantado.

Figura 5.22

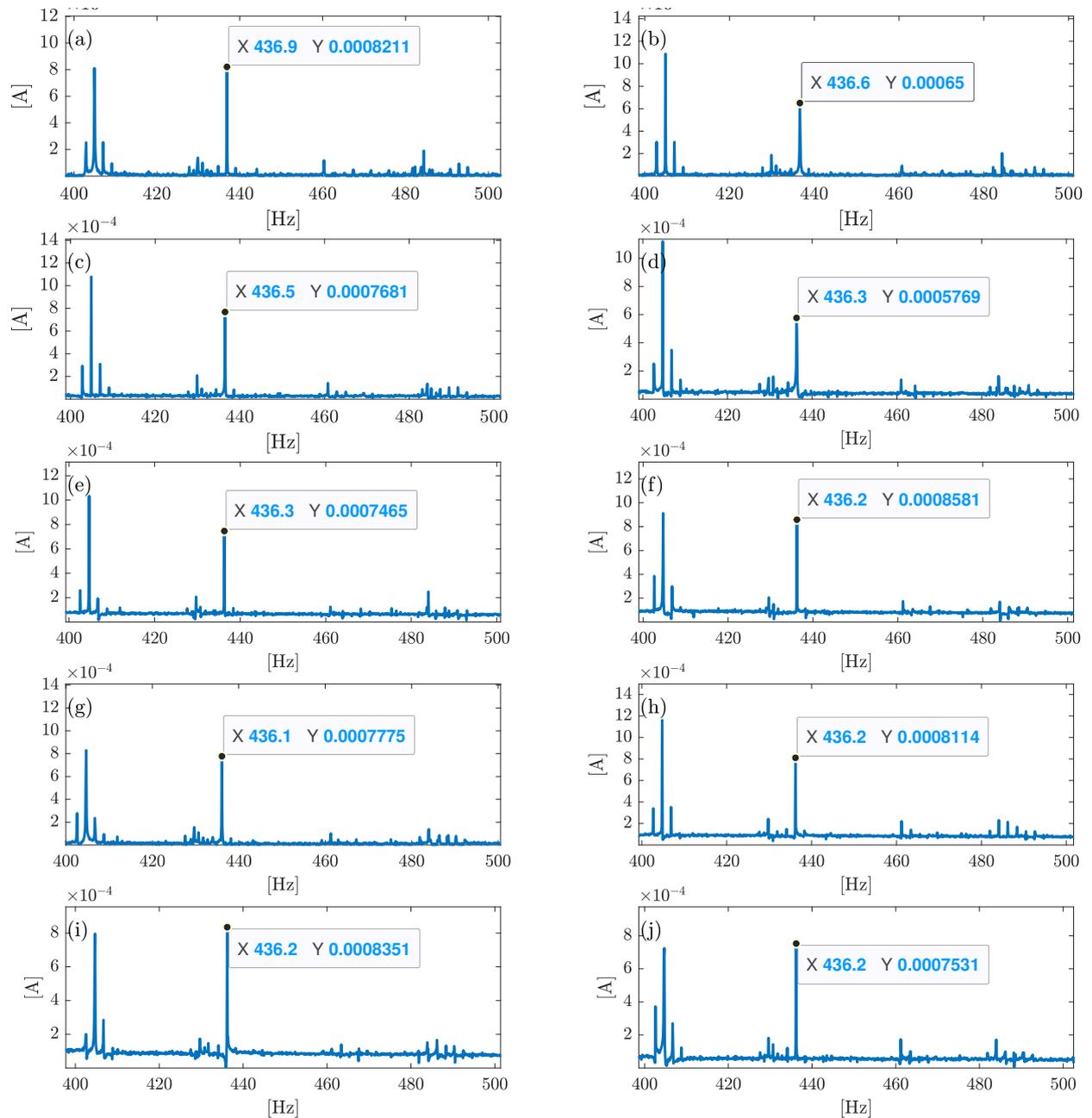
Línea base de vibración en los diferentes niveles de severidad.



Nota: En la figura se observa las firmas de vibración obtenidas por el Acc 1 correspondientes a los niveles de severidad que se identifican con P1:a, P2:b, P3:c, P4:d, P5:e, P6:f, P7:g, P8:h, P9:i, P10:j.

Figura 5.23

Línea base de corriente en los diferentes niveles de severidad.



Nota: En la figura se observa las firmas de corriente obtenidas por la pinza amperimetrica 1 correspondientes a los niveles de severidad que se identifican con P1:a, P2:b, P3:c, P4:d, P5:e, P6:f, P7:g, P8:h, P9:i, P10:j.

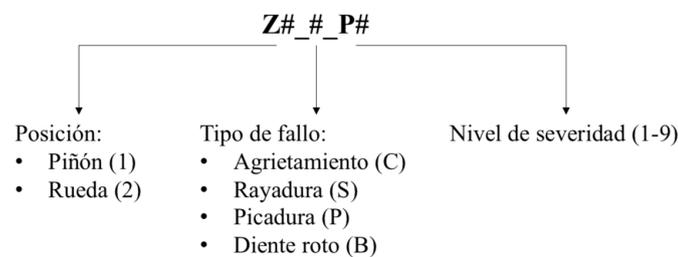
5.2.2.4. Adquisición de señales

5.2.2.4.1. Codificación de los fallos implantados para severidades

Como parte del desarrollo experimental se presenta el proceso de codificación para el fallo por rotura, mismo, que permitirá su identificación dentro de las bases de datos (DBs), siendo el fallo propuesto localizado en el engranaje (Z1), donde cada estado del engranaje con fallo o estado normal se denomina condición. El fallo está conformado por la condición normal (P1) y ocho niveles de severidad (P2 a P9). La nomenclatura para los fallos y su severidad se presentan en la figura 5.24, y se denomina (Z1-#-P#), donde, los primeros dos términos (Z1) corresponden a la posición del engranaje, el segundo término (#), corresponde al tipo de fallo que se muestra en la tabla 5.10, y el tercer término (P#) corresponde a los niveles de severidad que van del 1 al 9.

Figura 5.24

Codificación de los engranajes.



Nota: En la tabla se observa las partes que conforman la codificación de fallos.

Tabla 5.10

Tipos de fallos en diente de engranaje

Fallo	Designación
Normal	N
Rayadura (Scuffing)	S
Picadura (Pitting)	P
Diente roto (Broken tooth)	B

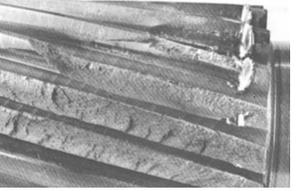
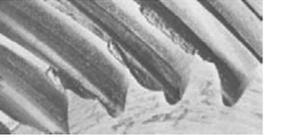
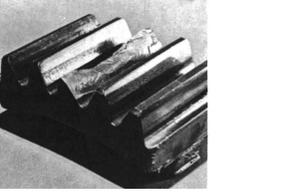
Nota: Se presenta la nomenclatura de los diferentes fallos presentes en engranajes.

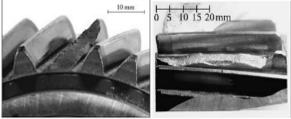
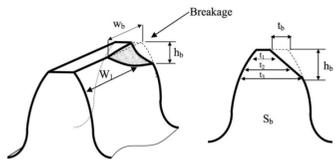
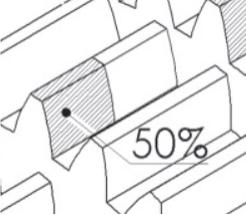
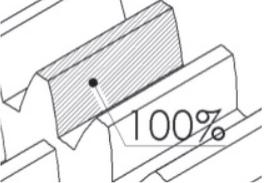
5.2.2.4.2. Patrones de fallos por rotura en dientes de engranajes.

En la tabla 5.11 se presenta la revisión bibliográfica que describe los tipos de diente roto que pueden ocurrir en engranes.

Tabla 5.11

Patrones de rotura de dientes en engranajes.

REFERENCIAS	DESCRIPCION DEL FALLO	IMAGEN DEL FALLO
Rexnord (1978)	La fractura por fatiga se origina en el filete de la raíz en el lado de tensión del diente y progresa lentamente hasta completar la fractura a lo largo o través del diente. Es el resultado de esfuerzos de flexión repetidos por encima del límite de resistencia del material.	
Rexnord (1978)	La fractura por impacto se produce por un número bajo de ciclos con carga alta o una sola carga muy alta; esto se produce en la fluencia plástica de los dientes, lo cual desplaza el paso de este grupo de dientes sometidos a carga dinámica anormalmente alta a las sometidas en operación.	
Rexnord (1978)	La fractura asociada a las fosas, se produce cuando en el extremo de un diente existen áreas severamente picadas, las cuales generan tensión y dan origen a las grietas, para posterior generarse la rotura.	
Benitez (1985)	La rotura de la superficie templada se produce por fallas del material del núcleo, al no existir una profundidad de capa de endurecimiento adecuada, la superficie del diente tiende a agrietarse para posteriormente generarse la rotura.	

REFERENCIAS	DESCRIPCION DEL FALLO	IMAGEN DEL FALLO	METODO DE CONST	DIMENSIONES	NIVEL DE SEVERIDAD
MackAldener (2001)	Este tipo de rotura no encaja en la rotura de la fatiga por flexión de la raíz del diente ni por la fatiga por contacto. Se caracteriza por una falla aproximadamente a la mitad de la altura del diente.		—	—	—
Chaari, Baccar, Abbas, y Haddar (2008)	En el diente del engranaje se presenta una rotura en la parte superior.		Se elimina la esquina superior del diente con una fresa.	—	Leve.
Herrera, Jaimes, y Quiroga (2016)	El diente presenta rotura desde la cara frontal hasta la mitad de este.		Se elimina la mitad del diente con una fresa.	50% de la rotura de un diente.	Intermedia.
Herrera y cols. (2016)	El diente presenta una rotura en su totalidad.		Se elimina toda la superficie de un diente con una fresadora.	100% de la rotura de un diente.	Severo.

Nota: La tabla de caracterización presenta los patrones de fallos que se producen comúnmente en la rotura de dientes de engranajes.

5.2.2.4.3. Fallos implantados para el análisis de diente roto

El establecimiento del fallo por rotura en el diente parte de la revisión bibliográfica referente a los patrones de fallos, es así como con base a las dimensiones de los engranes se determinaron 10 niveles de severidad a analizar, siendo cada nivel un indicativo del desarrollo del fallo en el diente. Para el análisis de señales de vibración y corriente se emplearon los niveles P1, P4, P8 y P10.

Con los niveles de severidad, se procede a caracterizar la rotura del diente del engrane, que se situara en un solo diente del piñón de la caja de engranajes (Z1), mientras que la rueda (Z2) mantendrá su condición normal, por lo tanto, en la tabla 5.12 se presenta la descripción de cada nivel de fallo, junto con la codificación correspondiente, además, de presentar el porcentaje de rotura en cada nivel de severidad.

Tabla 5.12

Caracterización de los niveles de severidad.

Niveles de severidad	Codificación de fallo		% de fallo	Descripción de fallo	Indicador de severidad
	Piñon	Rueda			
P1	Z1-B-P1	Z2	0%	Buena condición	Normal
P4	Z1-B-P4	Z2	31.25%	Área rota: 25.4mm ²	Leve
P8	Z1-B-P8	Z2	81.25%	Área rota: 66.05mm ²	Moderado
P10	Z1-B-P10	Z2	100 %	Área rota: 81.3mm ²	Severo

5.2.2.5. Análisis de señales de vibración y corriente

A continuación, se describe el proceso para llevar a cabo el análisis de las señales de vibración y corriente, para obtener los resultados de la comparación de las señales en condición normal y con condición de fallo en diferentes niveles de severidad, los pasos a realizar son los siguientes:

1. En primer lugar, se realizará una comparación visual entre las señales en el dominio de la frecuencia, empleando las diferentes técnicas de procesamiento de señales, en condición normal y en condición de fallo del engrane.
2. Luego, se presenta la comparación de los espectros de vibración y corriente en cada uno de los niveles de severidad, que permitirán establecer las frecuencias que presentan cambios luego de la implementación del fallo en el engrane.
3. Por último, se presenta una tabla resumen de los resultados obtenidos en los espectros de vibración y corriente, que permitirán establecer las técnicas que desempeñan una mejor función al momento de detectar fallos en engranes.

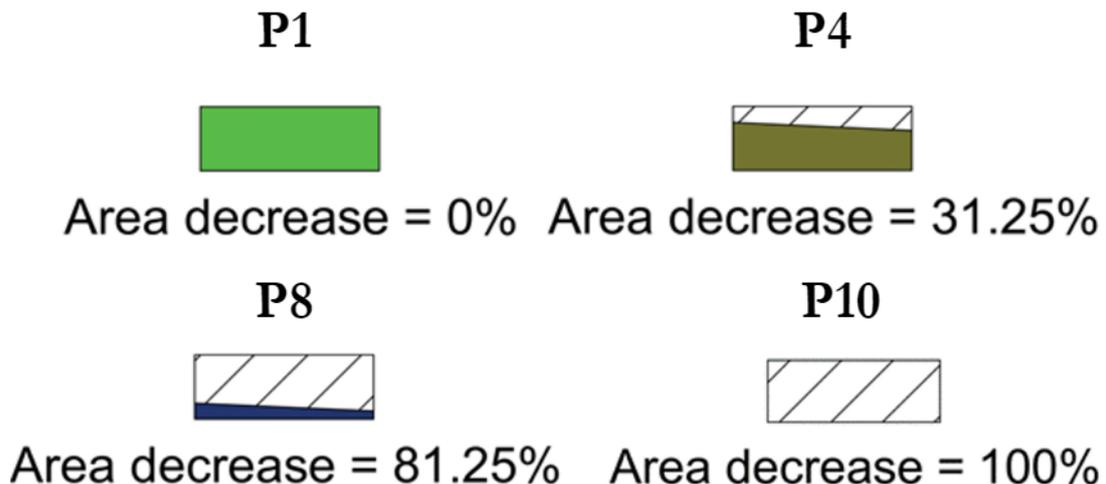
6. Resultados

A continuación, se presenta un resumen de los resultados obtenidos de la comparación de las firmas de vibración y corriente en condición normal y con fallo. El resumen se elaboró con base en el informe titulado "Informe de la comparación de firmas de vibración y corriente del banco de vibraciones", mismo que se encuentra dentro del repositorio del grupo de investigación GIDTEC.

Los resultados obtenidos de la comparación entre firmas de vibración y corriente en condición normal y con implementación de fallo de rotura de diente, se desarrolló en los niveles de severidad P1, P4, P8 y P10, siendo el último, el que representa la rotura total del diente, lo cual se observa en la figura 6.1. Las técnicas empleadas para el procesamiento de señales son la FFT, la envolvente de Hilbert y cepstrum.

Figura 6.1

Niveles de severidad empleados en la comparación de firmas de vibración y corriente.



Los resultados que se presentan están compuestos por dos secciones, la primera consiste en la presentación de la comparación visual, en la segunda sección se presenta la comparación de las frecuencias características entre las firmas de vibración y corriente con base en los engranes.

6.1. Comparación visual de las firmas de vibración y corriente

De la comparación visual realizada en los espectros de vibración y corriente, se presenta un resumen de los resultados obtenidos, los cuales se observan en la Tabla 6.1.

Las técnicas de cepstrum y FFT (frecuencia - decibelios) para el análisis de vibración presentan dificultades para identificar las frecuencias características del banco de vibración, mientras que en el análisis de corriente las técnicas de cepstrum y envolvente de Hilbert, presentan dificultades para identificar la GMF, puesto que únicamente presentan las bandas laterales de la GMF. Por lo tanto, se puede concluir que la técnica que menos aporta a la detección de fallo en este caso de estudio es cepstrum.

Durante el análisis, se constató que no se puede considerar únicamente una técnica para establecer criterios respecto a la detección de fallos, debido a que las técnicas pueden llegar a percibir o no el cambio que se genera en el espectro debido a la presencia de anomalías, este factor se refleja en la comparación de corriente, en la cual la FFT (frecuencia -aceleración) detecta el fallo; sin embargo, al momento de comparar amplitudes esta no denota un cambio, mientras que al emplear la FFT (frecuencia -decibelios) para comparar la condición normal y con fallo, se denota una diferencia en el ruido presente a lo largo del espectro.

Por otro lado, en la comparación visual se aprecia que en las firmas de vibración las técnicas de la FFT y la envolvente permiten observar la diferencia en las amplitudes de las frecuencias características, mientras que en las firmas de corriente esto se aprecia en la técnica de la FFT.

Tabla 6.1

Resumen de resultados obtenidos de la comparación visual de las firmas de vibración y corriente.

Observación	Análisis de vibración				Análisis de corriente			
	FFT		Envolvente	Cepstrum	FFT		Envolvente	Cepstrum
	Hz - dB	Hz - m/s^2			Hz - dB	Hz - m/s^2		
Se aprecia la GMF	Si	Si	Si	No	Si	Si	No	No
Se aprecia la 2 GMF	Si	Si	Si	No	No	No	No	No
Incrementa la amplitud de los picos con presencia de fallo	No	Si	Si	No	No	No	No	No
Se aprecia con claridad las frecuencias características	No	Si	Si	No	Si	Si	No	No
Presencia de bandas laterales	Si	Si	No	No	No	No	No	No
Presencia de armónicos	No	Si	Si	No	Si	Si	Si	No
Se aprecia diferencia en las amplitudes de las frecuencias características	Si	No	Si	No	Si	Si	No	No

6.2. Comparación de las frecuencias características entre firmas de vibración y corriente

Con relación a lo presentado en la Tabla 18 a Tabla 33 del informe titulado Informe de la comparación de firmas de vibración y corriente del banco de vibraciones"; se presenta un resumen de los resultados de la comparación de las firmas de vibración y corriente, en condición normal y con el fallo en el engrane. Los resultados se centran en la comparación de las amplitudes en las frecuencias características de los engranajes.

En la Tabla 6.2 se presenta un resumen de los valores máximos de las amplitudes obtenidas correspondientes a la GMF. En las señales de la FFT, se observa, que la amplitud máxima en condición normal es 2.89 m/s^2 , mientras que en condición de fallo la amplitud máxima es 6.34 m/s^2 . Los valores que corresponden al nivel de severidad P8, presentan la menor amplitud entre los niveles analizados. Por otro lado, los niveles de severidad P8 y P10 tienen en el mayor porcentaje de rotura de diente, siendo los espectros de fallo de estos niveles los que presentan un aumento en la amplitud de la 2 GMF, mientras que, en la técnica de la envolvente, no se aprecia un aumento de la 2 GMF. La técnica de la envolvente en condición de fallo presenta la mayor amplitud de la GMF en el nivel de severidad P1, con una amplitud de 39.02 m/s^2 , mientras que el nivel de severidad P8 presenta la menor amplitud con 13.05 m/s^2 . Con base en la Tabla 18 a Tabla 33 se aprecia como las amplitudes máximas se generan en la carga de trabajo de 10V, mientras que en la técnica de la FFT las amplitudes máximas se obtienen en diferentes cargas de trabajo.

Tabla 6.2

Resumen de los valores obtenidos en la comparación de firmas de vibración.

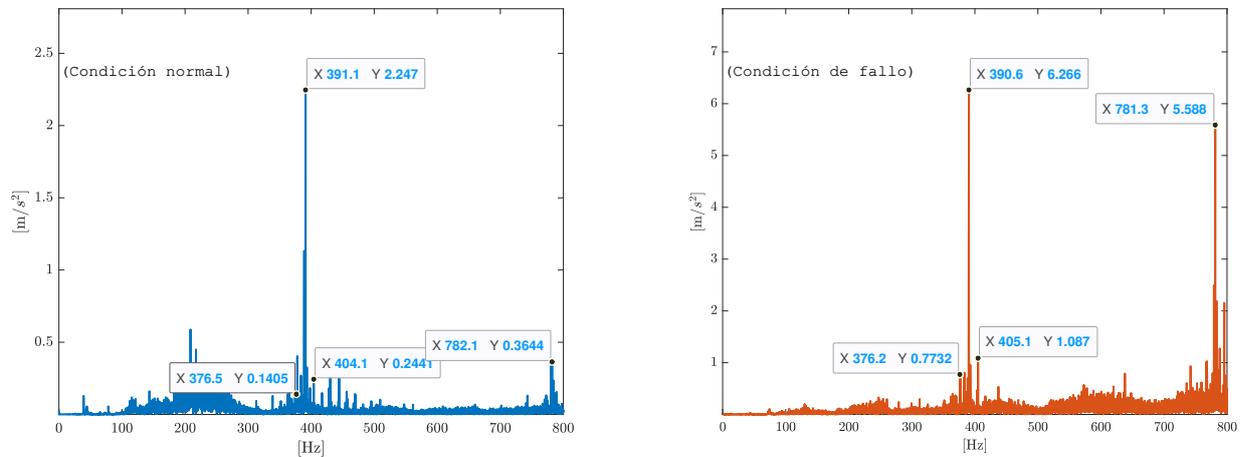
Técnicas de procesamiento	Niveles de severidad	Condición normal	Condición de fallo
		Amplitud GMF [m/s^2]	Amplitud GMF [m/s^2]
FFT	P1	2.89	6.15
	P4	2.46	6.34
	P8	1.64	4.82
	P10	2.24	6.26
Envolvente	P1	1.01	39.02
	P4	0.64	24.08
	P8	0.55	13.05
	P10	0.22	14.46

Nota: Valores de amplitudes de vibración obtenidas en los niveles de severidad evaluados.

En la figura 6.2 se observa la diferencia de las amplitudes correspondientes a las frecuencias características de la caja de engranajes.

Figura 6.2

Comparación de los espectros de vibración en condición normal y con fallo.



Nota: Se observa la diferencia entre la condición normal y con fallo.

En la Tabla 6.3 se presenta un resumen de los valores obtenidos en los espectros de corriente, la GMF calculada de forma analítica se localiza en 440 Hz, en condición normal se localiza en 436 Hz, mientras que en condición de fallo se localiza entre 436 y 440 Hz. En los espectros de FFT (m/s^2 -Hz) se observa que la amplitud de la GMF no presenta variación significativa entre la condición normal y con fallo.

Tabla 6.3

Resumen de los valores obtenidos en la comparación de firmas de corriente.

FFT	Niveles de severidad	Condición normal		Condición de fallo	
		Frecuencia [GMF]	Amplitud GMF	Frecuencia [GMF]	Amplitud GMF
Amperios	P1	437	0.0008	440.5	0.0008
	P4	436.5	0.0005	439.5	0.0008
	P8	436.3	0.0008	436.6	0.0007
	P10	436.3	0.0007	439.2	0.0007
Decibelios	P1	437	-65.71	440.5	-61.36
	P4	436.4	-64.77	439.5	-60.97
	P8	436.3	-61.81	436.6	-62.88
	P10	436.3	-62.46	439.2	-62.55

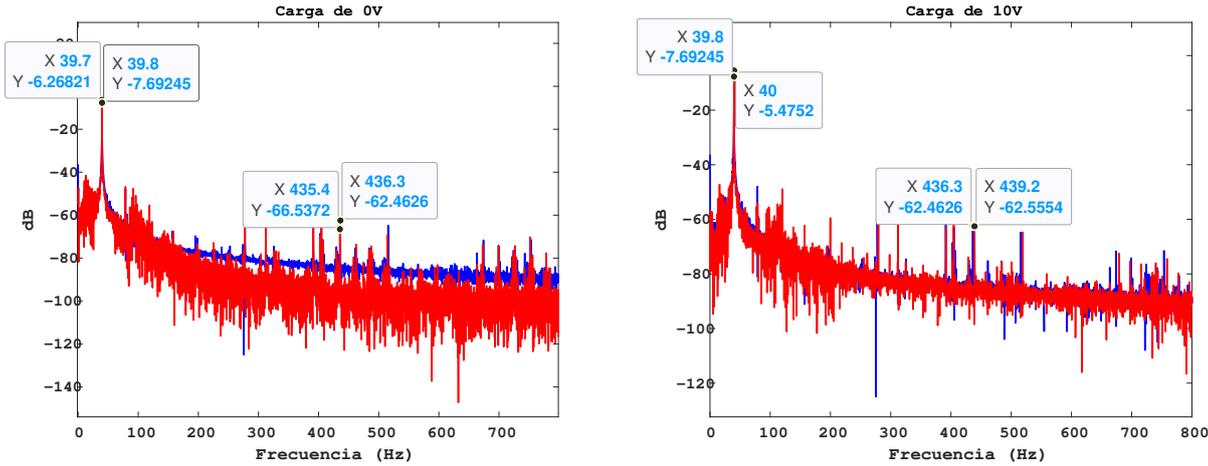
Nota: Valores de amplitudes de vibración obtenidas en los niveles de severidad evaluados.

Por otro lado, en la FFT (dB -Hz) el cambio notorio se produce en la localización de la GMF, debido a que en P1, P4 y P10, la localización obtenida es más próximo al valor

calculado. Además, si se compara la condición normal y con el fallo, se observa un incremento del ruido a lo largo del espectro cuando existe la presencia del fallo, esto se observa en la figura 6.3, en la cual tenemos la condición normal representada por el espectro azul, y la condición de fallo, representado con el espectro rojo.

Figura 6.3

Comparación de los espectros de corriente en condición normal y con fallo.



Nota: Se observa la diferencia entre la condición normal (azul) y con fallo (rojo).

7. Conclusiones

Con el desarrollo del proyecto de titulación se comparó las firmas de vibración y corriente de un motor de inducción para la detección de severidad de fallos en engranajes rectos, obteniendo las siguientes conclusiones:

- Por medio de revisión bibliográfica, se logró caracterizar el fallo por diente roto, determinando los tipos de rotura que se suscitan, junto con las principales características que presenta este tipo de fallo. La revisión bibliográfica permitió la implementación del fallo en el engranaje, obteniendo 10 niveles de severidad.
- Se estableció la configuración de la caja de engranajes para la adquisición de señales en condición normal y con el fallo implantado, empleando como referencia la normativa ISO 10816-3, mientras que para la configuración del sistema de adquisición se empleó el plan experimental “EP_22” que forma parte de las DBs del grupo de investigación GIDTEC.
- Se adquirió señales de vibración y corriente en condiciones normales y con fallo en el engranaje, lo cual, permitió establecer una base de datos para el análisis de fallo de diente roto en engranajes rectos.
- Se comparó las firmas de vibración y corriente, empleado las técnicas de procesamiento de señales: FFT, envolvente de Hilbert y Cepstrum, lo cual brindo los siguientes resultados: para la detección de fallos de diente roto se determinó que la técnica Cepstrum es la que menos información presenta al momento de realizar la comparación. En la comparación de los espectros de vibración, el estudio se centró en las técnicas de la FFT y envolvente de Hilbert. Al comparar la condición normal y la condición con fallo en ambas técnicas se observa el aumento de la GMF, mientras que en la FFT en la rotura total del diente se observa un aumento en la 2GMF. Por otro lado, en la comparación de espectros de corriente, la técnica de la FFT (Decibelios) permitió detectar de forma clara el fallo de rotura de diente al presentar incremento en el ruido a lo largo del espectro de corriente.

8. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos del desarrollo del trabajo de titulación, se recomienda para trabajos investigativos realizados sobre el mismo banco experimental lo siguiente:

- Verificar la condición de los componentes eléctricos y mecánicos que conforman el banco de vibraciones.
- Diseñar un sistema eficiente de lubricación, debido a que el sistema al trabajar por lubricación manual se desperdicia lubricante.
- Emplear velocidades de operación por debajo de 800 rpm debido al ruido presente en la adquisición de datos de engranajes rectos.
- Establecer un protocolo de validación de datos.
- Establecer un estándar de los scripts empleados en el procesamiento de señales.
- Extender el fallo de rotura en dientes aledaños al fallo implantado.
- Verificar la alineación de los componentes mecánicos del sistema.

Para futuros trabajos de investigación se recomienda la implementación de sensores acústicos, encoders, con la finalidad de ampliar el análisis de datos.

Referencias Bibliográficas

- Ahmed, H., y Nandi, A. K. (2020). *Condition monitoring with vibration signals: Compressive sampling and learning algorithms for rotating machines*. John Wiley & Sons.
- Associates of charlotte. (2016). *Vibration diagnostic handbook* 1era ed.
- Barszcz, T. (2019). *Vibration-based condition monitoring of wind turbines*. Springer.
- Benbouzid, M. (1998). A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. En *Iecon '98. proceedings of the 24th annual conference of the ieee industrial electronics society (cat. no.98ch36200)* (Vol. 4, p. 1950-1955 vol.4). doi: 10.1109/IECON.1998.724016
- Benitez, L. (1985). Las fallas en los engranajes.
- Berrezueta, A. (2021). *Modelamiento matemático de una caja de engranajes con diferentes cargas para la obtención de los patrones de vibración* (B.S. thesis). Universidad Politécnica Salesiana.
- Bracewell, R. N., y Bracewell, R. N. (1986). *The fourier transform and its applications* (Vol. 31999). McGraw-Hill New York.
- Budynas, R., y Nisbett, k. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de shigley, novena edición*. McGRAW-HILL.
- Carrion, C., y Montesinos, R. (2021). *Evaluación de las señales de vídeo para la detección de fallos en rodamientos y acoplamientos empleando la técnica espejo* (B.S. thesis). Universidad Politécnica Salesiana.
- Chaari, F., Baccar, W., Abbas, M., y Haddar, M. (2008, 07). Effect of spalling or tooth breakage on gearmesh stiffness and dynamic response of a one-stage spur gear transmission. *European Journal of Mechanics A-solids - EUR J MECH A-SOLID*, 27, 691-705. doi: 10.1016/j.euromechsol.2007.11.005
- Chingal, D. (2017). *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*. (B.S. thesis). Universidad Politécnica Salesiana.
- Cochran, W., Cooley, J., Favin, D., Helms, H., Kaenel, R., Lang, W., ... Welch, P. (1967). What is the fast fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, 55(10), 1664-1674. doi: 10.1109/PROC.1967.5957
- Courech, J., y Eshleman, R. L. (1995). *Condition monitoring of machinery, 5th ed*. McGRAW-HILL.
- Dalpiaz, G., y Rivola, A. (1997). *Condition monitoring and diagnostics in automatic*

- machines: Comparison of vibration analysis techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11(1), 53-73. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327096900679> doi: <https://doi.org/10.1006/mssp.1996.0067>
- Fluke. (2023). Data sheet: Pinza amperimétrica ca/cc i30s.
- Hernandez Martin, J. L. (2014). *Electricidad: fundamentos y problemas de electrostatica, corriente continua, electromagnetismo y corriente alterna*. RA-MA Editorial. Descargado de <https://elibro.net/es/lc/bibliotecaups/titulos/106425>
- Herrera, A., Jaimes, I., y Quiroga, J. (2016). Estudio experimental de fallas en engranajes rectos por desalineación, excentricidad y diente roto. *Ingeniería y Desarrollo*, 34(1), 1-23.
- Instruments, N. (2014). Datasheet of ni 9234.
- Instruments, N. (2015). Ni cdaq-9188 specifications.
- ISO. (2009). *Mechanical vibration — evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts (iso 10816-3)*.
- ISO. (2012). *Condition monitoring and diagnostics of machines — vocabulary (iso 13372)*.
- 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. Descargado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327005001512> doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2005.09.012>
- Kia, S. H., Henao, H., y Capolino, G.-A. (2007). Gearbox monitoring using induction machine stator current analysis. En *2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives* (p. 149-154). doi: 10.1109/DEMPED.2007.4393086
- Kreidl, M., y Smid, R. (2005, 06). Condition indicators for gearbox condition monitoring systems. *Acta Polytechnica*, 45, 35-.
- Kumar, S., Goyal, D., Dang, R. K., Dhama, S. S., y Pabla, B. (2018). Condition based maintenance of bearings and gears for fault detection – a review. *Materials Today: Proceedings*, 5(2, Part 1), 6128-6137. (7th International Conference of Materials Processing and Characterization, March 17-19, 2017) doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.219>
- Liu, C., y Wang, D. (2013). Reconfigurability analysis method for spacecraft autonomous control. En *2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)* (p. 105-110). doi: 10.1109/ICCA.2013.6565078
- Llivicura, H. (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). Universidad Politécnica Salesiana.
- Lojano Armijos, F. J. (2019). *Señales acústicas y de vibración: estudio comparativo para la detección de severidad de fallos en engranes rectos* (B.S. thesis). Universidad Politécnica Salesiana.

- MackAldener, M. (2001). Tooth interior fatigue fracture y robustness of gears.
- Marimon, M., y Castillo, G. (2004). *Metodología para la implementación de un programa de monitoreo por condición (vibraciones) para la empresa tsi ltda.*
- MI, P. (2018). Manual analisis de vibraciones, 1ra ed.
- Mobley, R. Keith, and R Keith Mobley. (2004). *Maintenance fundamentals*. Elsevier Science Technology.
- Mohammadreza Tahan, M. M. Z. A. K., Elias Tsoutsanis. (2017). Performance-based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines: A review, applied energy. *Applied Energy*, 198(7), 122-144. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.04.048>.
- Ortega, L. (2021). *Estimación del par de carga en motores de inducción basado en su modelo matemático y orientado a la detección de fallos en caja de engranajes* (B.S. thesis). Universidad Politécnica Salesiana.
- Orts, R. P., Davó, N. C., y Sánchez, E. V. (2008). Bancos de ensayo para docencia en vibraciones mecánicas. *Sea Acustica*.
- Poncelas López, O. (2008). Diagnóstico de motores de inducción mediante la adquisición de corrientes de estator con sonda rogowski.
- Pujadas, L., y Valdés Dini, M. (2012). Efecto hall.
- Rajagopalan, S., Habetler, T. G., Harley, R. G., Sebastian, T., y Lequesne, B. (2006). Current/voltage-based detection of faults in gears coupled to electric motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 42(6), 1412-1420. doi: 10.1109/TIA.2006.882636
- Rexnord. (1978). Failure analysis gears-shafts-bearings-seals.
- SA, R. P. A.-M. (2005). *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*. Enero.
- Sensors, I. (2019). Icp model 603c01 specifications.
- Smith, S. (1997). *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*.
- Sánchez, R. (2018). *Diagnóstico de fallos en caja de engranajes con base en la fusión de datos de señales de vibración, corriente y emisión acústica*. [Disponible en: <https://repository.upb.edu.co>; Accedido el: 6 de marzo del 2023].
- Vacacela, A. (2020). *Establecimiento de tres bases de datos para la detección de fallos en rodamientos mediante señales acústicas, vibracionales y de corriente* [B.S. thesis].
- White, G. (2010). *Introducción al análisis de vibraciones* (Vol. 1). Azima DLI.
- Xiao, C., Zhao, L., Asada, T., Odendaal, W., y van Wyk, J. (2003). An overview of integratable current sensor technologies. En *38th ias annual meeting on conference record of the industry applications conference, 2003*. (Vol. 2, p. 1251-1258 vol.2). doi: 10.1109/IAS.2003.1257710
- Zhou, W., Habetler, T. G., y Harley, R. G. (2007). Bearing condition monitoring methods for electric machines: A general review. En *2007 ieee international symposium on diagnostics for electric machines, power electronics and drives* (p. 3-6). doi: 10.1109/DEMPED.2007.4393062