

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

## CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

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

### PROYECTO TÉCNICO

“ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE VIBRACIÓN Y EMISIÓN ACÚSTICA PARA EL  
DIAGNÓSTICO DE SEVERIDAD DE FALLOS EN MAQUINARIA ROTATIVA”

Autor:

Edison Eugenio Pacheco Córdova

Tutor:

Ing. René Vinicio Sánchez, Ph.D.

Cuenca – Ecuador

2018

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, Edison Eugenio Pacheco Córdova, con documento de identificación N° 0105150049, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: “ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE VIBRACIÓN Y EMISIÓN ACÚSTICA PARA EL DIAGNÓSTICO DE SEVERIDAD DE FALLOS EN MAQUINARIA ROTATIVA”, mismo que 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 aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, mayo del 2018



---

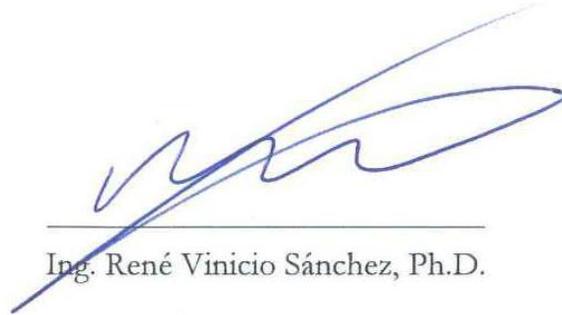
Edison Eugenio Pacheco Córdova

C.I.: 0105150049

## CERTIFICACIÓN

Yo declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE VIBRACIÓN Y EMISIÓN ACÚSTICA PARA EL DIAGNÓSTICO DE SEVERIDAD DE FALLOS EN MAQUINARIA ROTATIVA”, realizado por Edison Eugenio Pacheco Córdova, obteniendo el Proyecto Técnico, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca mayo del 2018



Ing. René Vinicio Sánchez, Ph.D.

## **DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, Edison Eugenio Pacheco Córdova con C.I.: 0105150049 autor del trabajo de titulación “ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE VIBRACIÓN Y EMISIÓN ACÚSTICA PARA EL DIAGNÓSTICO DE SEVERIDAD DE FALLOS EN MAQUINARIA ROTATIVA” certifico que el total contenido del proyecto técnico, es de mí exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, mayo del 2018



---

Edison Eugenio Pacheco Córdova

C.I.: 0105150049

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto principalmente a Dios por haberme brindado salud y sabiduría para lograr mis objetivos en la vida, además de su infinito amor y bondad.

A mis padres Rosendo y Delia por demostrarme siempre su cariño y todo su apoyo incondicional para que esta meta sea cumplida.

A mis hermanas Marlene, Fanny y Lorena por todo su apoyo y confianza brindada.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres Rosendo y Delia por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado y principalmente por ser un ejemplo de vida a seguir. A mis hermanas Marlene, Fanny y Lorena por apoyarme en todos los momentos de mi vida y haber confiado en mí siempre.

Al Ing. Vinicio Sánchez por haber confiado en mí, y que con sus conocimientos, experiencia y motivación ha logrado que pueda concluir mi carrera con éxito. A los miembros del GIDTEC de la UPS, Mariela Cerrada, Diego Cabrera, Christian Ortiz, Pablo, Jean Carlo, David, Andrés, Cristian y Franco; quienes siempre me colaboraron para que este proyecto sea una realidad. A los laboratoristas Carlos y Mauricio; quienes siempre estuvieron dispuestos en ayudarme a resolver cualquier duda que se presentara durante el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos Christian, Geovanny, Andrés, Cindy y Marilú. Por su gran amistad brindada y los momentos vividos a lo largo de todos estos años.

## RESUMEN

En el presente proyecto técnico se realizó el levantamiento de señales de vibración y emisión acústica asociados a la severidad de fallos en engranajes y rodamientos. Los fallos propuestos para los engranes son grietas en la raíz del diente y el gripado en la cara del diente, mientras que para los rodamientos se fabricaron fallos en la pista interna, pista externa y elementos rodantes. Con esta base de datos se aporta para el estudio del monitoreo de condición de los sistemas mecánicos rotativos.

En el capítulo 1, se presenta una introducción, el problema, la justificación y los objetivos planteados para el presente proyecto de titulación. Se explica también la importancia de la aplicación del monitoreo de las señales de emisión acústica y la vibración para la detección de la severidad de fallos en rodamientos y engranes.

El capítulo 2, contiene el marco teórico del proyecto donde se presentan los temas de interés como el mantenimiento basado en la condición, monitoreo de la condición y sus principales técnicas como son el monitoreo de vibraciones, monitoreo de corriente y monitoreo de emisión acústica. De este último, se profundiza el tema debido a que la emisión acústica es una técnica nueva dentro del monitoreo de la condición en maquinaria rotativa. Además, se presenta una revisión bibliográfica para la construcción de fallos en engranes específicamente el gripado y agrietamiento; para el caso de los rodamientos se centró en pista interna, pista externa y elementos rodantes.

El capítulo 3, presenta el desarrollo experimental del proyecto, donde se diseñó la configuración del sistema mecánico rotativo para el monitoreo de la condición. Se detalla el banco de pruebas utilizado para el montaje de los elementos mecánicos y sensores de vibración y emisión acústica. También se detalla los parámetros a seguir para la correcta instalación del sensor de emisión acústica y la validación de la señal. Además, se presentan los cinco planes experimentales con diferentes configuraciones de la severidad de fallos en pista interna, pista externa y elementos rodantes para el caso de los rodamientos, y grietas y gripado para el caso de los engranes. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones acorde a los objetivos planteados y una propuesta de trabajos futuros.

## **ABSTRACT**

In this technical project, vibration and acoustic emission signals associated with faults severity were collected gears and bearings. The proposed fault for the gears are cracks in the tooth root and scuffing on the tooth face, while fault in inner race, outer race and rolling element were induced for bearings. This database is used to study the condition monitoring of rotating mechanical systems.

In the chapter 1, it is presented an introduction, the problem under study, the justification of this work and the objectives proposed for the present degree project. It also explains the importance of the application of the acoustic emission signal and vibration monitoring to detect the faults severity of bearing and gear.

Chapter 2, contains the theoretical framework of the project where the topics of interest are presented, such as condition-based maintenance, condition monitoring and its main techniques such as vibration monitoring, current monitoring and acoustic emission monitoring. The latter is further developed because acoustic emission is a new technique in the condition monitoring in rotating machinery. In addition, a bibliographic review is presented for the construction of gear fault particularly scuffing and crack; inner race, outer race and rolling elements were combined for bearings.

Chapter 3, presents the experimental development of the project, where the configuration of the rotating mechanical system is designed for condition monitoring purposes. The test bench used for the assembly of the mechanical elements and vibration and acoustic emission sensors is detailed. It also details the parameters to be considered for the correct installation of the acoustic emission sensor and the validation of the signal acquisition. In addition, five experimental plans are presented with different configurations of the fault severity on the inner race, outer race and rolling elements for bearings, and cracks and scuffing for gears. Finally, the conclusions and recommendations are presented according to the proposed objectives and the proposals for future works.

## ÍNDICE

Cesión de derechos de autor .....	II
Certificación.....	III
Declaratoria de responsabilidad .....	IV
Dedicatoria.....	V
Agradecimientos.....	VI
Resumen .....	VII
Abstract.....	VIII
Índice .....	IX
Índice de figuras .....	XIII
Índice de tablas.....	XV
1 Capítulo 1 - Introducción.....	1
1.1 Problema.....	1
1.1.1 Antecedentes.....	1
1.1.2 Importancia y alcance.....	3
1.1.3 Delimitación.....	5
1.2 Objetivos .....	5
1.2.1 Objetivo general.....	5
1.2.2 Objetivos específicos.....	5
2 Capítulo 2 – Marco Teórico .....	6
2.1 Mantenimiento basado en la condición.....	6
2.2 Monitoreo de la condición.....	6
2.3 Monitoreo de vibraciones .....	6
2.4 Monitoreo de la corriente eléctrica del motor .....	7
2.5 Monitoreo de emisiones acústicas .....	7
2.5.1 Principio físico.....	8
2.5.2 Historia .....	9

2.5.3	Fuentes EA .....	11
2.5.4	Tipos de ondas para EA .....	12
2.5.5	Señales EA .....	13
2.5.6	Parámetros de la señal acústica .....	14
2.5.7	Normas para EA .....	15
2.5.8	Equipo de adquisición.....	16
2.5.8.1	Acoplador .....	17
2.5.8.2	Sensores EA .....	18
2.5.8.2.1	Principio de funcionamiento de los sensores EA.....	19
2.5.8.2.2	Evolución de los sensores EA .....	19
2.5.8.2.3	Tipos de sensores EA .....	20
2.5.8.2.4	Descripción del sensor WD S/N FV52.....	21
2.5.8.3	Descripción del preamplificador.....	22
2.5.8.4	Filtro de frecuencia .....	23
2.5.8.5	Convertidor analógico-digital (A/D) .....	23
2.5.9	Prueba de lápiz para EA .....	24
2.5.9.1	Atenuación.....	24
2.5.9.2	Calibración.....	25
2.5.10	Aplicaciones de las EA.....	26
2.5.11	Ventajas y limitaciones de las EA.....	26
2.6	Fallos en rodamientos .....	27
2.6.1	Distribución de fallos en rodamientos .....	28
2.6.2	Localización de los sensores para detectar fallos en rodamientos .....	29
2.6.3	Características de la severidad de fallos en rodamientos. ....	31
2.6.4	Selección y caracterización de fallos en rodamientos.....	33
2.6.4.1	Fallo en pista interna.....	34
2.6.4.1.1	Revisión bibliográfica de la construcción del fallo en pista externa .....	34
2.6.4.1.2	Nivel de severidad para fallos en pista interna .....	37
2.6.4.1.3	Fallos propuestos .....	38

2.6.4.2	Fallo en pista externa .....	39
2.6.4.2.1	Revisión bibliográfica de la construcción del fallo en pista externa .....	39
2.6.4.2.2	Nivel de severidad para fallos en pista externa .....	42
2.6.4.2.3	Fallos propuestos .....	43
2.6.4.3	Fallo en elementos rodantes .....	44
2.6.4.3.1	Revisión bibliográfica de la construcción del fallo en los elementos rodantes .....	44
2.6.4.3.2	Nivel de severidad para fallos en los elementos rodantes .....	47
2.6.4.3.3	Fallos propuestos .....	48
2.7	Fallos en engranajes .....	49
2.7.1	Selección y caracterización de fallos en engranajes .....	49
2.7.1.1	Fallo por grieta .....	49
2.7.1.1.1	Características del fallo de grieta por fatiga .....	52
2.7.1.1.2	Revisión bibliográfica de la construcción de fallos de grietas .....	54
2.7.1.1.3	Experimentación para grietas en engranes .....	59
2.7.1.1.4	Nivel de severidad para grietas en engranes .....	59
2.7.1.1.5	Fallos propuestos .....	62
2.7.1.2	Fallo por gripado .....	64
2.7.1.2.1	Características del fallo por gripado .....	66
2.7.1.2.2	Revisión bibliográfica de la construcción de fallos de gripado .....	68
2.7.1.2.3	Experimentación para gripado en engranes .....	71
2.7.1.2.4	Nivel de severidad para gripado en engranes .....	71
2.7.1.2.5	Fallos propuestos .....	74
3	Capítulo 3 - Experimentación .....	77
3.1	Montaje de línea base .....	77
3.1.1	Banco de vibraciones .....	77
3.1.2	Montaje de elementos mecánicos y sensores .....	77
3.1.3	Validación de línea base .....	78
3.1.3.1	Verificación visual .....	78
3.1.3.2	Verificación de ruidos extraños .....	78
3.1.3.3	Verificación de frecuencias características .....	78
3.1.4	Establecimiento de la línea base .....	80

3.2	Metodología para el monitoreo de las emisiones acústicas .....	80
3.2.1	Instalación del sensor EA .....	80
3.2.1.1	Selección de la posición del sensor EA.....	80
3.2.1.2	Pretratamiento de la superficie donde se instalará el sensor EA .....	80
3.2.1.3	Instalación mecánica del sensor EA.....	81
3.2.1.4	Conexión del sensor EA .....	82
3.2.2	Control de la sensibilidad del sensor EA .....	82
3.2.2.1	Revisión del estado general de la conexión.....	82
3.2.2.2	Posicionamiento del sensor EA en la caja de engranajes.....	83
3.2.3	Programa de adquisición de datos.....	83
3.2.4	Severidad de los fallos mediante señales de vibración y EA.....	84
3.3	Planes experimentales.....	89
	Conclusiones.....	92
	Recomendaciones.....	93
	Trabajos futuros .....	93
	Referencias bibliográficas.....	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso del mantenimiento basado en la condición. ....	6
Figura 2. Generación de la EA debido a la liberación de energía de deformación [29]. ....	9
Figura 3. Historia de las EA aplicadas a la maquinaria rotativa.....	10
Figura 4. (a) Señal tipo ráfaga ( <i>burst signal</i> ), (b) señal continua ( <i>continuous signal</i> ) [39]......	13
Figura 5. Parámetros de la señal EA [29].....	14
Figura 6. Normas para emisión acústica. ....	15
Figura 7. Clasificación de las normas para EA. ....	16
Figura 8. Proceso de EA y los equipos utilizados [37]. ....	17
Figura 9. Sensibilidad del sensor EA usando diferentes tipos de acopladores [38].....	18
Figura 10. Sensor de EA hecho de material piezoeléctrico [42].....	19
Figura 11. Sensor WD S/N FV52. ....	21
Figura 12. Soporte magnético MHSTD.....	22
Figura 13. Preamplificador 0/2/4C.....	23
Figura 14. Ilustración esquemática de la atenuación [29]. ....	24
Figura 15. Cabezal de calibración Hsu-Nielsen [49]. ....	25
Figura 16. Clasificación de fallos en rodamientos según la norma ISO 15243.....	28
Figura 17. Principales partes de un rodamiento. ....	28
Figura 18. Señales típicas y envolventes de fallos localizados en rodamientos [64]. ....	30
Figura 19. (a) Fallo ubicado en la posición 12:00 en punto, (b) fallo ubicado en la posición 9:00 en punto [62]. ....	30
Figura 20. Rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3.....	33
Figura 21. Dimensiones del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3 [68].....	33
Figura 22. Fallo en pista interna [60]. ....	34
Figura 23. Tendencia de la severidad del fallo con relación al ancho de la pista interna.....	37
Figura 24. Fallo en pista externa [61]. ....	39
Figura 25. Tendencia de severidad del fallo con relación al ancho de la pista externa. ....	42
Figura 26. Fallo en los elementos rodantes [1]. ....	44
Figura 27. Tendencia de la severidad del fallo con relación al diámetro del elemento rodante. .....	48
Figura 28. Grieta en la raíz de un diente de engrane [84].....	50

Figura 29. Clasificación de los fallos por grieta según la norma ISO 10825. ....	50
Figura 30. Grieta por fatiga [81]. ....	51
Figura 31. Grietas en el límite de la capa endurecida [81]. ....	51
Figura 32. Grietas de la llanta y disco [81]. ....	52
Figura 33. Grietas de rectificado [81]. ....	52
Figura 34. Iniciación de una grieta [85]. ....	53
Figura 35. Avance de la grieta [85]. ....	53
Figura 36. Fractura del diente por fatiga [86]. ....	53
Figura 37. Fallo por grieta [82]. ....	54
Figura 38. (a) Ángulo de la grieta, (b) ancho de la cara y espesor del diente [91]. ....	60
Figura 39. Evolución de la severidad del fallo. ....	62
Figura 40. Fallo por gripado en la cara del diente de un engrane [101]. ....	64
Figura 41. Clasificación de fallos por gripado según la norma ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010 E-95. ....	64
Figura 42. Gripado leve [102]. ....	65
Figura 43. Gripado moderado [102]. ....	65
Figura 44. Gripado severo [104]. ....	65
Figura 45. Patrones de fallo [100]. ....	68
Figura 46. Relación entre área de gripado y el área de la cara del diente. ....	71
Figura 47. Altura activa del diente del engrane. ....	72
Figura 48. Área de gripado. ....	73
Figura 49. Evolución de la severidad del fallo por gripado. ....	74
Figura 50. Banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana. ....	77
Figura 51. Proceso para el montaje de elementos mecánicos y sensores. ....	78
Figura 52. Espectro característico de una caja de engranajes en buenas condiciones [5]. ....	79
Figura 53. Sensor WD S/N FV52 en un soporte magnético MHSTD. ....	81
Figura 54. Conexión del sensor WD S/N FV52. ....	82
Figura 55. Preamplificadores 0/2/4C. ....	82
Figura 56. Ubicación de los sensores EA en la caja de engranajes. ....	83
Figura 57. Interfaz del programa vibraciones. ....	83
Figura 58. Señales EA para severidad de fallo por grietas. ....	85
Figura 59. Señales de vibración para severidad de fallo por grieta. ....	86

Figura 60. Señales EA para severidad de fallo por gripado. ....	87
Figura 61. Señales de vibración para severidad de fallo por gripado.....	88
Figura 62. Configuración de la caja de engranes para la adquisición de datos.....	90

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proyectos de titulación realizados en el GIDTEC.....	3
Tabla 2. Factores que afectan la amplitud EA [30]. ....	11
Tabla 3. Tipos de ondas para EA [37].....	12
Tabla 4. Acopladores más comunes para sensores de EA [36]......	18
Tabla 5. Evolución de los sensores EA [39], [43].....	20
Tabla 6. Tipos de sensores EA [5].....	20
Tabla 7. Características del sensor WD S/N FV52. ....	22
Tabla 8. Características del preamplificador 2/6/4C [45]......	23
Tabla 9. Características del lápiz. ....	26
Tabla 10. Características de los niveles de severidad del rodamiento [66], [65], [67]......	32
Tabla 11. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos en pista interna.....	35
Tabla 12. Niveles de severidad de fallos para pista interna.....	37
Tabla 13. Fallos propuestos para pista interna.....	38
Tabla 14. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos en pista externa. ....	40
Tabla 15. Niveles de severidad de fallos para pista externa. ....	42
Tabla 16. Fallos propuestos para pista externa.....	43
Tabla 17. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos en los elementos rodantes....	45
Tabla 18. Niveles de severidad de fallos en elementos rodantes.....	47
Tabla 19. Fallos propuestos para los elementos rodantes.....	48
Tabla 20. Características de un engrane con grietas.....	54
Tabla 21. Niveles de severidad de grietas en un engrane. ....	55
Tabla 22. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos para grietas en engranes.....	56
Tabla 23. Características geométricas para el engrane. ....	59
Tabla 24. Porcentajes de severidad.....	61
Tabla 25. Niveles de severidad para grietas.....	61
Tabla 26. Fallos propuestos para la generación de grietas. ....	62

Tabla 27. Características del fallo por gripado.....	66
Tabla 28. Niveles de severidad del gripado en un engrane [103]. .....	67
Tabla 29. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos por gripado en engranes. ....	69
Tabla 30. Característica geométrica para el engrane. ....	72
Tabla 31. Niveles de severidad para el gripado.....	74
Tabla 32. Fallos propuestos para el gripado.....	75

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN**

El monitoreo de la condición ha ido evolucionado con nuevas técnicas para detectar fallos en maquinaria rotativa, una de ellas y la más utilizada es el monitoreo de vibraciones, esta técnica debido a su alta confiabilidad en detectar fallos en engranes y rodamientos ha sido muy bien aceptada en la industria. Las emisiones acústicas (EA) están empezando a ser aplicadas como una técnica nueva para el mantenimiento predictivo, debido a que se pueden detectar fallos de forma más temprana que en el caso de las vibraciones.

Es importante tener claro que dentro del mantenimiento basado en la condición el “fallo” es considerado como una alteración del elemento mecánico, pero la máquina puede seguir operando normalmente y la “falla” es cuando la máquina presenta una avería y no puede seguir operando. El “engrane” es en sí una sola rueda dentada mientras que “engranajes” es el conjunto piñón-engrane.

Los engranes y rodamientos son elementos mecánicos que cumplen un rol muy importante en la industria, por lo que, si un fallo se presenta en estos elementos y no es detectado a tiempo, puede producir una avería catastrófica en la maquinaria generando grandes pérdidas económicas e incluso puede generar pérdidas humanas. En el medio se encuentran disponibles ciertas tecnologías que ayudan a la detección temprana de los fallos como es el caso de vibraciones, emisiones acústicas, termografía, señales de corriente del motor entre otras. Las emisiones acústicas son ideales para la detección de fallos incipientes o iniciales, debido a que trabajan a altas frecuencias.

### **1.1 Problema**

#### **1.1.1 Antecedentes**

En los últimos años el mantenimiento basado en la condición ha ganado territorio dentro del sector industrial, actualmente la Universidad Politécnica Salesiana cuenta con un laboratorio de análisis de vibraciones, donde el Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC) ha realizado estudios sobre mantenimiento basado en la condición. A continuación, se detallan algunos de los proyectos de titulación para el grado de Ingeniero Mecánico que se han desarrollado en el laboratorio de vibraciones.

En 2014, Carangui [1] desarrolló su proyecto de titulación denominado “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 realizó la investigación de vibraciones mecánicas en una caja reductora, haciendo el levantamiento de la base de datos con un total de 60 pruebas, es decir 60 combinaciones diferentes acaparando fallos en engranajes rectos, rodamientos rígidos de bolas y combinando fallos en ambos elementos al mismo tiempo, con un total de 60000 muestras.

En 2014, Niveló y Romero [2] realizaron su proyecto de titulación, “Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas para sistemas mecánicos rotativos con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en rodamientos” el proyecto consistió en la recopilación de señales de vibración en un sistema mecánico rotativo completo, simulando fallos en rodamientos y engranajes con perturbaciones en los ejes de transmisión, esto con el fin de aportar en el estudio de detección de fallos en maquinaria mediante señales de vibraciones aplicados en el mantenimiento predictivo.

En 2015, Guiracocha [3] desarrollo su proyecto de titulación, “Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones acústicas e imágenes termográficas infrarrojas para un sistema mecánico rotativo con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en engranajes”. El proyecto generó bases de datos de señales de emisión acústica, señales de vibración mecánicas e imágenes termográficas sobre un sistema mecánico rotativo que se emplearán en el diagnóstico de fallos en engranajes y rodamientos aplicado al monitoreo de la condición dentro del mantenimiento predictivo.

En 2015, Muñoz y Vera [4] desarrollaron su proyecto de titulación “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 practica para desbalanceo estático”. En este proyecto se obtuvo señales de vibraciones mecánicas y emisiones acústicas en un sistema mecánico rotativo, al simular fallos en

rodamientos y engranajes helicoidales en una caja de engranajes, y así aportar para el estudio de diagnóstico y pronóstico de fallos en sistemas mecánicos rotativos.

Un último proyecto fue desarrollado en 2016, Ortiz y Pérez [5] desarrollaron su proyecto de titulación “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”. En este documento se realizó una comparación de señales de emisiones acústicas con señales vibracionales en un sistema mecánico rotativo con diferentes configuraciones de fallos en rodamientos y engranes, realizando un levantamiento de dos bases de datos.

En la Tabla 1 se presenta de manera resumida todos los proyectos de titulación que se han realizado con relación a las señales de vibración y emisión acústica, donde los trabajos se centran más en las combinaciones de fallos en engranajes y rodamientos, pero ninguno de estos proyectos ha adquirido datos con relación a la severidad de fallos en estos elementos mecánicos.

Tabla 1. Proyectos de titulación realizados en el GIDTEC.

<b>Autor (Año)</b>	<b>Señales adquiridas</b>	<b>Maquina simulada</b>	<b>Severidad de fallos</b>
Caranguí (2014)	Vibración mecánica	Caja reductora	No realiza
Nivelo y Romero (2014)	Vibración mecánica	Rodamientos y engranajes con perturbaciones en los ejes de transmisión	No realiza
Guiracocha (2015)	Vibración mecánica Emisión acústica Imágenes termográficas infrarrojas	Sistema mecánico rotativo	No realiza
Muñoz y Vera (2015)	Vibración mecánica Emisión acústica	Rodamientos y engranajes	No realiza
Ortiz y Pérez (2016)	Vibración mecánica Emisión acústica	Engranajes y rodamientos	No realiza

### 1.1.2 Importancia y alcance

El mantenimiento basado en la condición (MBC) es un programa que usa la información que se obtiene a través del monitoreo de la condición (MC). Estableciendo correctamente se puede reducir significativamente el costo, tareas innecesarias y riesgos asociados al mantenimiento preventivo y contribuir a la productividad [6], [7], [8]. En mantenimiento, los problemas más

comunes que se presentan son el envejecimiento y el deterioro. Estas condiciones son indicadores útiles de posibles problemas potenciales antes de que ocurra una falla en el equipo [9]. Mediante un monitoreo de la condición que tiene como parámetros a las señales de vibraciones, emisiones acústicas y corriente, se puede lograr un diagnóstico temprano para disminuir paradas de emergencia [3].

El estudio de severidad de fallos es una parte importante en un programa de mantenimiento basado en la condición [10]. En maquinaria rotativa como los engranes y rodamientos la estimación de la severidad de fallos es esencial para que las acciones preventivas se puedan tomar mucho antes y se pueda evitar que ocurra una falla en la maquinaria [11], si bien estos elementos no son costosos, pero son vitales para el correcto funcionamiento de la maquinaria, por lo que un fallo en uno de estos elementos podría generar cuantiosas pérdidas.

La técnica de emisiones acústicas es un método nuevo y exitoso en el monitoreo de la condición de maquinaria rotativa y diagnóstico de fallos, debido a su alta sensibilidad en localizar micro grietas en el dominio de alta frecuencia [12]. Un limitado estudio de emisiones acústicas genera la necesidad de crear una base de datos que contenga información de la severidad de fallos en los engranajes y rodamientos, lo cual ayudará con un aporte científico e industrial para futuros proyectos de investigación que se realicen en esta área.

La medición de emisiones acústicas se ha convertido en una técnica viable en el monitoreo de la condición en maquinaria rotativa [13]. La detección temprana de grietas es posible mediante la adquisición y el análisis de EA, recientemente han captado la aceptación, debido a que el sensor de EA puede ser más sensible a detectar la presencia de fallos iniciales que los sensores de vibración [14], [15].

El análisis de vibraciones es la técnica de mantenimiento de mayor desarrollo en el sector industrial, sin embargo el análisis de la emisión acústica está empezando a ganar terreno en los últimos años, debido a que puede detectar fallos de menor tamaño o en la etapa inicial, esto no se puede lograr mediante las señales de vibración, además se puede usar un solo sensor, puesto que es una técnica no direccional [5].

La Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, cuenta actualmente con un laboratorio de vibraciones mecánicas que ayuda en la adquisición y análisis de las señales de vibración y emisión acústica para el mantenimiento basado en la condición. Ayudando de esta manera, a dar mayor soporte al sector industrial y a estudiantes de pregrado que se desarrollen dentro de este campo.

### **1.1.3 Delimitación**

El banco de pruebas de la Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca, permite realizar diferentes configuraciones de maquinaria rotativa como desbalanceo, desalineación, combinación de fallos en engranajes y rodamientos, con lo cual se logra realizar simulaciones lo más cercanas posibles a las que se encuentran en la industria. Con la utilización del banco de pruebas y la configuración de los sistemas planteados en este proyecto para el establecimiento de la base de datos, se pretende, proporcionar información valiosa, confiable y estructurada que sirva en el campo investigativo. El grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC), se encargará de dicho análisis para la realización de futuros proyectos de investigación con miras hacia industrias que deseen implementar un mantenimiento basado en la condición.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo general**

Adquirir señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de severidad de fallos en maquinaria rotativa.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Conceptuar mediante revisión bibliográfica, las técnicas de mantenimiento basado en la condición y determinar los niveles de severidad de fallos en rodamientos y engranajes.
- Configurar la maquinaria rotativa para levantar las cinco bases de datos de severidad de los fallos en engranajes y rodamientos.
- Obtener datos de señales de vibración y emisión acústica para los distintos casos de severidad de fallos seleccionados.

## CAPÍTULO 2 – MARCO TEÓRICO

### 2.1 Mantenimiento basado en la condición

El mantenimiento basado en la condición (MBC), es una estrategia que realiza acciones de mantenimiento antes de que ocurran los fallos en los equipos, evaluando las condiciones de la maquinaria, incluyendo los entornos operativos y prediciendo el riesgo de fallos en tiempo real [16]. Para la aplicación de un correcto programa de MBC se tiene que seguir tres pasos fundamentales que se indican en la Figura 1 [6], [17], [18].

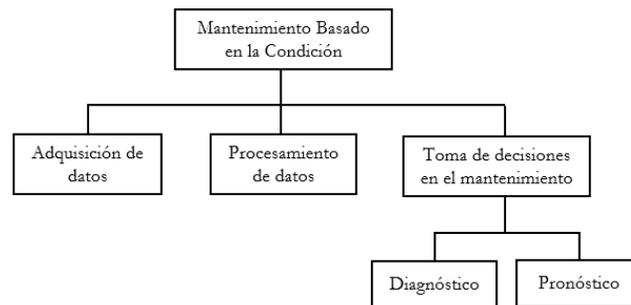


Figura 1. Proceso del mantenimiento basado en la condición.

### 2.2 Monitoreo de la condición

El monitoreo de la condición (MC) se puede definir como un medio para evaluar el estado de las máquinas y prevenir que ocurran fallas, recomendando acciones de mantenimiento cuando sea necesario. El MC es un medio para la implementación del MBC. Para la recopilación de datos del sistema el MC utiliza diversos sensores, para luego ser procesados por las diferentes técnicas del monitoreo de la condición y detectar que fallo se está produciendo en la maquinaria, inclusive se puede detectar que elemento tiene el fallo en la máquina [6], [19], [20]. Las principales técnicas para el MC son el análisis de vibraciones, emisión acústica, temperatura y análisis de residuos de aceite; estas técnicas están muy bien establecidas en la industria [21].

### 2.3 Monitoreo de vibraciones

El análisis de vibraciones ha demostrado ser una técnica eficiente en la detección de fallos en maquinaria rotativa y en los sistemas mecánicos empleados en diferentes sectores de la industria [22]. En el MC el análisis de vibraciones es la técnica más utilizada de la industria, debido a que puede identificar con gran precisión el 90% de todos los fallos de maquinaria por

el cambio en las señales de vibración que se producen y el nivel de señal puede dar una predicción con gran exactitud de una futura falla [23].

#### **2.4 Monitoreo de la corriente eléctrica del motor**

En las industrias se utilizan los motores eléctricos en más del 90% de accionamientos mecánicos, las unidades mecánicas que son impulsadas por estos motores son cajas de engranes, ventiladores, compresores y bombas. Los fallos que se presentan en los motores eléctricos pueden ser detectados mediante un análisis de vibraciones. El análisis de firma de corriente del motor (AFCM) es otra técnica para detectar fallos en los motores eléctricos, la ventaja de esta técnica es que no se necesita montar ningún sensor en el motor cómo es el caso del análisis de vibraciones. La corriente que el estator extrae puede ser medida en lugares distantes del motor, siempre y cuando se tenga acceso al cable de la corriente del motor. Los fallos que se presentan en el motor como excentricidad del rotor, barra rota del rotor y fallo de los rodamientos son fácilmente identificados por sus frecuencias características en el dominio de frecuencia [24].

#### **2.5 Monitoreo de emisiones acústicas**

Se puede definir a las Emisiones Acústicas (EA) como ondas elásticas transitorias generadas por la liberación rápida de energía causada por la deformación o un fallo en la superficie de un material [25]. Dentro del MC en maquinaria rotativa, las EA se definen como ondas transitorias generadas por la interacción de dos elementos en movimiento relativo, estas pueden ser causadas por impacto, fatiga cíclica, fricción, turbulencia, pérdida de material, cavitación, fugas entre otras [26].

En la maquinaria rotativa, los procesos relacionados con la fricción son los principales factores de las EA; principalmente, porque estas se producen por la interacción mecánica y química de las superficies que se encuentran en contacto, la interacción elástica de las rugosidades superficiales, los cambios estructurales y químicos en las capas superficiales y su fuerte interacción con el medio ambiente. Todos esos procesos se acompañan de factores como: calor, eléctricos, corrosión, magnéticos y electromagnéticos; todos estos factores son los resultados de procesos rápidos que se producen en la fricción, por lo que la principal

característica distintiva de las EA producidas por fricción es la presencia de estos factores, en paralelo a la deformación y daño de la superficie en contacto [27].

Las EA permiten monitorizar en tiempo real los cambios en la estructura del material investigado. Sin embargo, la interpretación de los resultados es a menudo difícil. Hasta el presente no existe una teoría exacta para la caracterización de las EA, ya que la descripción de las fuentes de EA y la propagación de las ondas plantea muchos problemas matemáticos no resueltos. Afortunadamente, la combinación de los resultados de experimentos de EA y las cogniciones sobre la estructura de los materiales dio lugar a varios modelos empíricos que proporcionan una guía para el uso de EA [28].

### **2.5.1 Principio físico**

Cuando una fuerza externa se aplica a un material sólido, este se deforma, si esta fuerza es pequeña se tiene una baja tensión, por lo que el material deformado se recupera elásticamente a su forma original, como se muestra en la Figura 2a, esta deformación se denomina deformación plástica. Existe un límite para la acumulación de energía en el material sólido. Si la energía de deformación almacenada en el material debido a la fuerza externa alcanza el límite, se libera y se produce deformación plástica, es decir, cuando la fuerza externa se retira del material, este no puede regresar a su forma original, tal como se muestra en la Figura 2b. Si la fuerza externa aplicada es aún mayor, normalmente se producen fisuras en el material, en este caso, la energía de deformación acumulada dentro del material es consumida por la generación y crecimiento de las grietas, ver la Figura 2c [29].

Cuando el material sólido es agrietado, consume energía de deformación. Por lo tanto, la mayor parte de esta energía es liberada. La energía restante se consume para generar sonido y calor. El fenómeno en el cual el sonido se genera por la liberación de energía se conoce como EA, y se describe como el grito "*scream*" del material bajo tensión [29]. Este principio físico de las EA se enfoca más a los materiales que trabajen en estado estático que a los materiales que trabajen en condiciones rotativas.

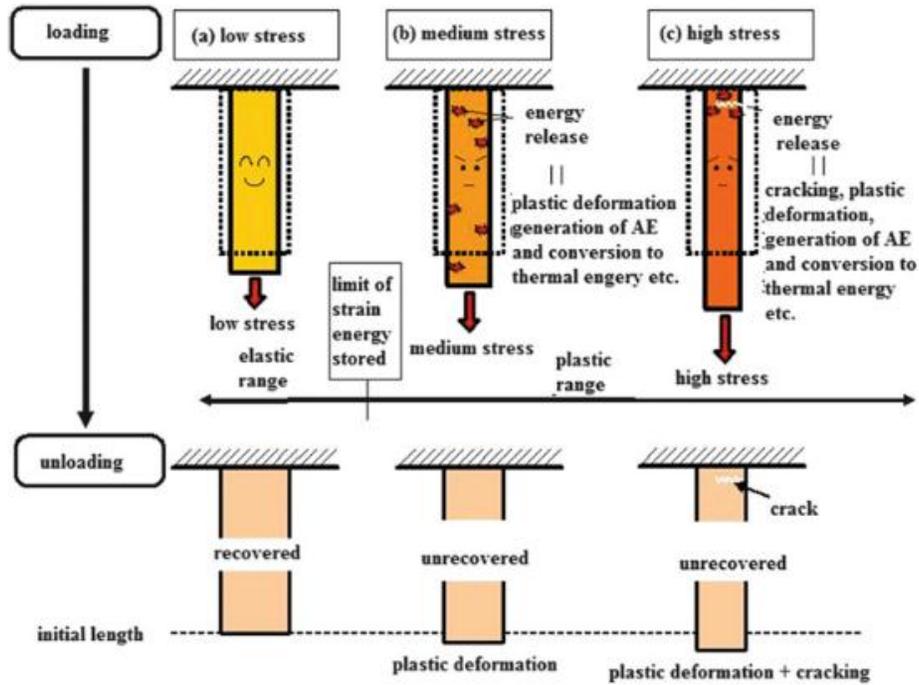


Figura 2. Generación de la EA debido a la liberación de energía de deformación [29].

## 2.5.2 Historia

Las investigaciones técnicas en las EA de la deformación de materiales fueron realizadas a principios del siglo XX. En 1933, Kishinouye desarrollo la instrumentación EA para monitorear la deformación en la madera con el fin de comprender y desarrollar métodos para estudiar la fractura de la corteza. En 1936, Foster y Scheil construyen independientemente la instrumentación para monitorear las EA generadas durante las transformaciones martensíticas [30]. Por el año de 1950, J. Káiser realizó pruebas de tracción para determinar las características de EA de los materiales de ingeniería. Él demostró el fenómeno de la irreversibilidad que ahora es conocida como el Efecto Káiser[31]. Durante los años 50 y 60 se profundizó en los fundamentos de la EA, donde fueron desarrollando la instrumentación específicamente para EA. Por sus capacidades únicas las EA empezaban a ser reconocidas como un método de ensayos no destructivos para el monitoreo de procesos dinámicos [32]. En Estados Unidos, por el año de 1954, Bradford Schofield inicia un intenso primer programa para examinar las aplicaciones de la EA en diversos materiales de ingeniería [33]. En 1964, Dunegan, Tatro y Harris extendieron el rango de frecuencias hasta 1 MHz. En 1969, Dunegan y Knauss fundaron la primera empresa productora de instrumentación EA: la *Dunegan Research Corporation* [30]. La edad de oro para las EA inicio a finales de 1960 mediante la organización

de los grupos de trabajo de EA y continuó a la década de 1970. A partir de 1980 hasta el presente se considera el periodo de transición para las EA. Hoy en día la aplicación de las EA es muy amplia en la industria aeroespacial y petroquímica [34]. Dentro del monitoreo de la condición en maquinaria rotativa, la aplicación de las EA puede ser un tema relativamente nuevo, pero en las últimas décadas ha crecido significativamente, y su aplicación se ha extendido al monitoreo de maquinarias rotativas, incluyendo rodamientos, engranes, bombas, etc. [26], [35]. En la Figura 3 se presenta de manera resumida la historia de las EA.

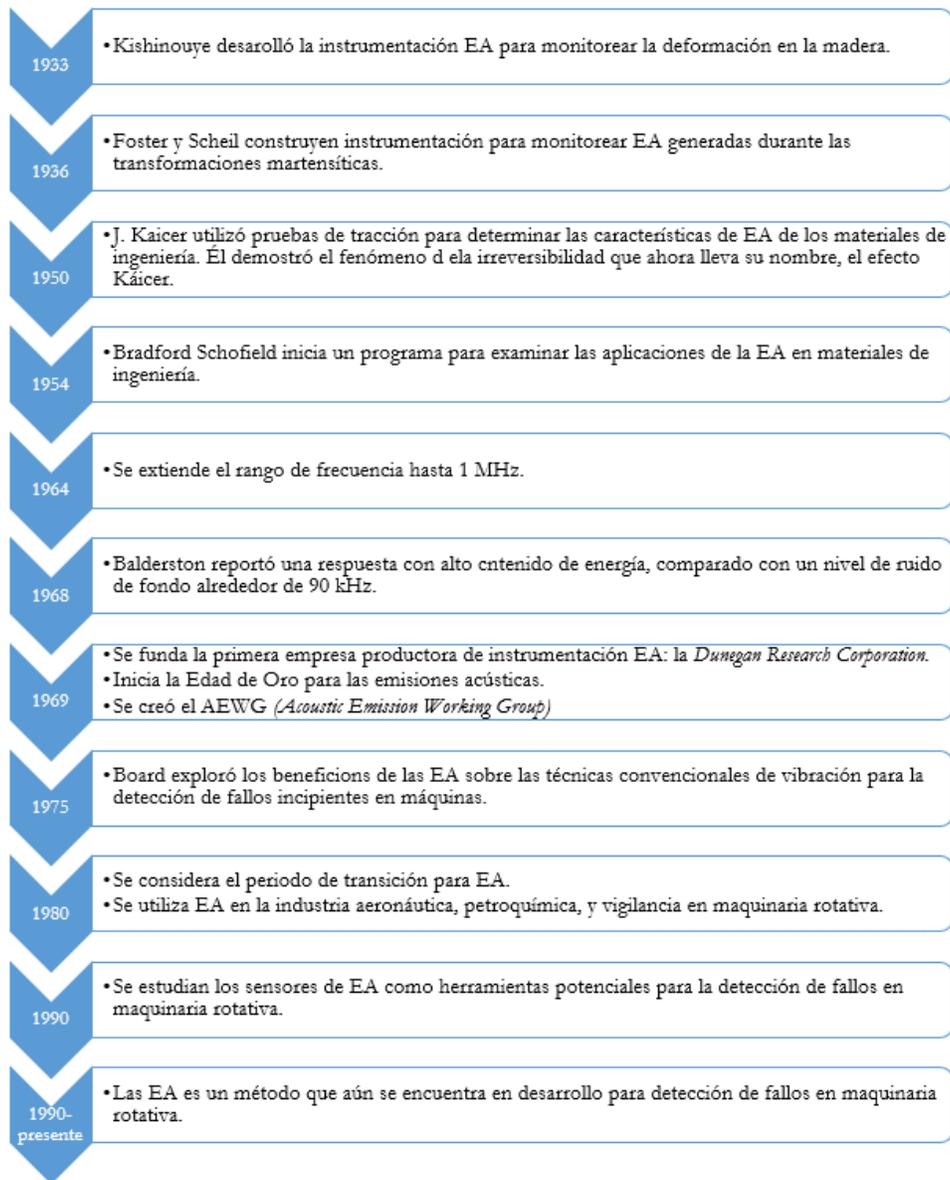


Figura 3. Historia de las EA aplicadas a la maquinaria rotativa.

### 2.5.3 Fuentes EA

La actividad principal se produce cuando el material experimenta nuevos cambios relacionados con la deformación y la propagación de una fractura, debido a que las tensiones locales son superiores a los niveles de tensión originales. La amplitud puede variar dependiendo tanto del mecanismo de deformación que esté produciendo y de las propiedades del material. En la Tabla 2 se enumeran los factores que determinan la amplitud de un evento EA [30].

Tabla 2. Factores que afectan la amplitud EA [30].

Factores que incrementan la amplitud EA	Factores que decrecen la amplitud EA
Alta resistencia	Baja Resistencia
Alta velocidad de deformación	Baja velocidad de deformación
Baja temperatura	Alta temperatura
Sin homogeneidad	Homogeneidad
Perfiles gruesos	Perfiles finos
Fractura de los conductos (cavidad)	Fractura dúctil (cizalla)
Materiales que contienen discontinuidades	Materiales sin discontinuidades
Transformación de fase martensítica	Transformación de fase controlada por difusión
Propagación de grietas	Deformación plástica
Materiales fundidos	Materiales forjados
Tamaño de grano grande	Tamaño de grano pequeño
Hermanamiento inducido mecánicamente	Hermanamiento inducido térmicamente

A continuación, se describen las principales fuentes que afectan la amplitud de una señal de emisión acústica.

- i. **Precipitados e inclusiones:** las partículas de carburos son generalmente muy pequeñas, a la orden de unos pocos cientos de átomos, comúnmente llamados precipitados. La rotura de precipitados e inclusiones, como las partículas de sulfuro de manganeso que se forman durante el proceso de fabricación, es la principal fuente de EA, cuando se deforman los metales libres de fisuras. La amplitud de tales emisiones es generalmente pequeña y no representa una amenaza significativa para la integridad estructural [30].
- ii. **Avance del frente de una grieta:** una fractura brusca permite el avance del frente de una grieta a través del material; por lo tanto, se ha comprobado que cuando se somete a esfuerzos una probeta con grietas, la deformación plástica que da lugar a una EA inicia en los extremos de la grieta [36]. La propagación de grietas representa una gran amenaza para la integridad estructural del material y la detección de este proceso es el

objetivo más común, no sólo en las EA, sino en la mayoría de técnicas no destructivas. Las emisiones de la propagación o inicio de grietas tienden a producir señales de mayor amplitud que la rotura de inclusiones [30].

- iii. **Desplazamiento de una dislocación:** todos los procesos de EA empiezan con un material sometido a tensión, este material responde a la tensión cambiando su forma. Si la tensión es lo suficientemente alta como para superar el límite elástico del material, se producirá una deformación plástica que cambiará de forma permanente la posición relativa de los átomos en el material. Las irregularidades que se presentan en la estructura cristalina de un material se las conoce como dislocaciones, estas permiten que los planos atómicos se deslicen uno sobre otro, provocando las EA [30].

#### 2.5.4 Tipos de ondas para EA

Dentro de las EA existen tres tipos de ondas que se presentan en los materiales: las ondas longitudinales o de compresión (ondas P), las ondas transversales o de cortante (ondas S) y las ondas de superficie (ondas Rayleigh). Las características principales que se presenta en cada tipo de onda son la dirección del movimiento de las partículas y la velocidad de propagación, en la Tabla 3 se presenta un resumen de los tipos de ondas EA [37].

Tabla 3. Tipos de ondas para EA [37].

Tipo de onda	Dirección del movimiento	Características	Velocidad de propagación
Ondas longitudinales o de compresión (ondas P).	Paralela a la dirección de propagación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se asocian a tensiones normales.</li> <li>• Se propagan en todo tipo de medios.</li> <li>• Son las más rápidas.</li> </ul>	$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1-\nu)(1-2\nu)}}$ Ecuación 1
Ondas transversales o de cortante (ondas S).	Perpendicular a la dirección de propagación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se asocian a tensiones tangenciales.</li> <li>• Se propagan en medios con rigidez cortante.</li> </ul>	$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ Ecuación 2
Ondas de superficie (ondas Rayleigh).	Elíptico retrógrado.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se propaga a lo largo de un sólido.</li> <li>• Son las más lentas.</li> </ul>	$V_R = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} V_s$ Ecuación 3

Donde:

$E$ : Módulo de elasticidad (longitudinal)

$\nu$ : Coeficiente de Poisson

$\rho$ : Densidad

$G$ : Módulo de elasticidad (transversal)

### 2.5.5 Señales EA

Las señales de EA pueden clasificarse en señal de ráfagas (*bursts*) y señal continua. Las señales tipo ráfagas se dan cuando las fuentes monitoreadas no son repetibles y ocurren discretamente, además tienen puntos definidos claramente de principio y fin del ruido que provoca un defecto, son características de aparición y crecimiento de grietas en un material, cavitación y corrosión [37], [38]. Estas señales tienden a no ser más largas que unas pocas centésimas de segundo [30].

Las señales continuas tienen amplitudes y frecuencias variables, pero nunca se terminan, son típicamente emisiones de baja energía que ocurren cuando los mecanismos de fricción ocurren dentro de una estructura y no muestran ninguna característica visualmente obvia en el dominio del tiempo. La monitorización de emisiones continuas es adecuada para la detección y análisis de señales producidas por deformación plástica en materiales dúctiles, figuración por corrosión bajo tensión y fluencia [30], [37], [38]. En la Figura 4 se puede observar la diferencia entre las señales tipo ráfaga y continua.

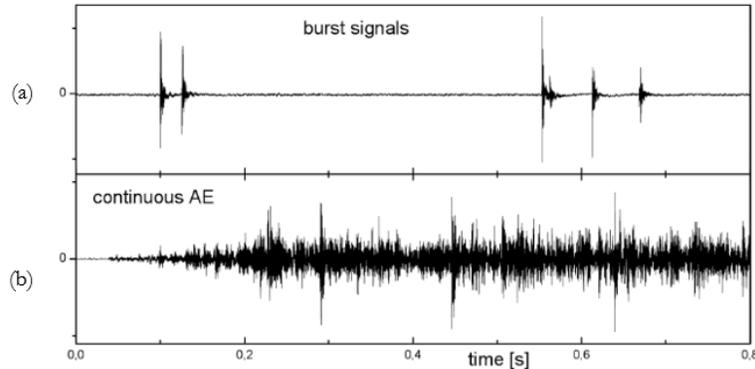


Figura 4. (a) Señal tipo ráfaga (*burst signal*), (b) señal continua (*continuous signal*) [39].

Los dos tipos de forma de onda, están asociados con la maquinaria rotativa, por ejemplo, una señal continua puede resultar de un flujo de fluido turbulento, mientras que la señal tipo ráfagas está asociada con la acción rodante transitoria. El ruido también es de tipo continuo [26]. El impacto que es importante cuando se monitorea el fallo de un rodamiento, se considera una fuente de señal tipo ráfagas [30]. Las señales tipo ráfaga son emitidas por estructuras estáticas, los eventos pueden ser vistos claramente y pueden ser analizados por separado. En el caso de maquinaria rotativa, es posible que eventos individuales tengan una amplitud muy similar y se

generen con la suficiente frecuencia como para que la señal parezca continua; sin embargo, la señal más común en maquinaria rotativa es cuando la señal continua aparece como fondo y los eventos más energéticos aparecen como picos [31].

### 2.5.6 Parámetros de la señal acústica

Una señal característica de EA tipo ráfaga se presenta en la Figura 5, los datos que se obtienen de la forma de onda, se usan para sacar información sobre la fuente, tal como su actividad e intensidad [37], [40].

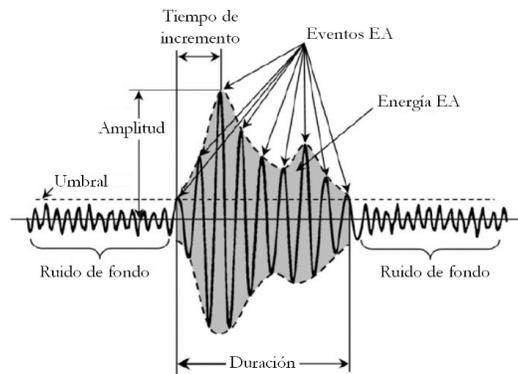


Figura 5. Parámetros de la señal EA [29].

- a) **Amplitud (A):** se la define como la tensión de pico de una onda, la cual es medida en decibelios (dB). La amplitud de una señal en dB es:

$$A(dB_{AE}) = 20 \log \frac{V_p}{V_{ref}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$V_p$ : voltaje máximo en la salida del elemento transformador

$V_{ref}$ : voltaje de referencia

- b) **Tiempo de llegada:** tiempo absoluto en el cual aparece la primera señal de descubrimiento de un fallo.
- c) **Tiempo de incremento:** es el tiempo que tarda la onda en alcanzar su máximo valor tomando como inicio el primer cruce con el umbral.

- d) **Duración:** es el tiempo existente entre el primer y último cruce de la onda con el umbral.
- e) **Energía:** área bajo la curva generada por la envolvente de la señal de tiempo.
- f) **Eventos:** número de pulsos emitidos por el circuito de medición cuando la señal es mayor que el umbral.

### 2.5.7 Normas para EA

En la Figura 6 se presentan las normas para emisión acústica, donde se subdividen en normas para calibración de sensores, montaje, vocabulario y monitoreo. Las normas más utilizadas en maquinaria rotativa es la norma ASTM E1106-86(2002), debido a que cubre los requisitos para la calibración absoluta de los sensores de EA, la respuesta de tensión del transductor se determina a intervalos de frecuencia discreta de aproximadamente 10 kHz hasta 1 MHz. La norma ASTM E650-97(2002), presenta los estándares para el montaje de los sensores piezoeléctricos de EA para el diagnóstico de maquinaria rotativa. Finalmente, la norma ISO 22096(2007) presenta los principios generales para el diagnóstico de maquinaria rotativa, esta norma se puede aplicar a todas las máquinas y sus componentes.

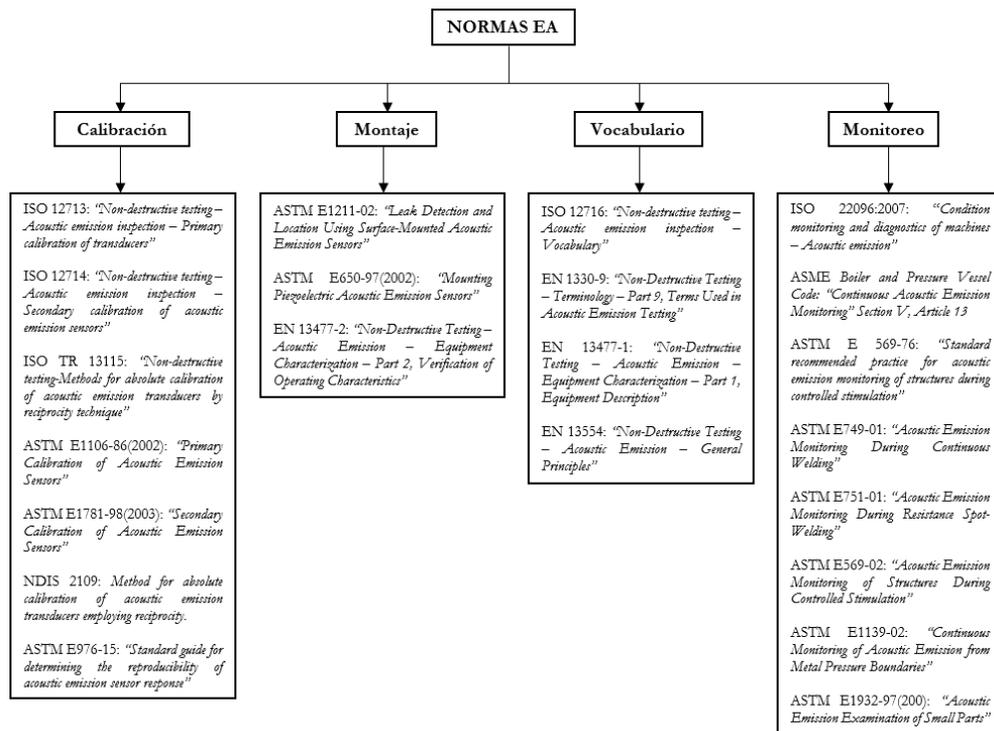


Figura 6. Normas para emisión acústica.

Las normas que se aplican dentro de las EA se pueden clasificar en dos grupos: normas para pruebas estáticas y para pruebas rotativas. En la Figura 7 se tiene la clasificación de las normas EA.

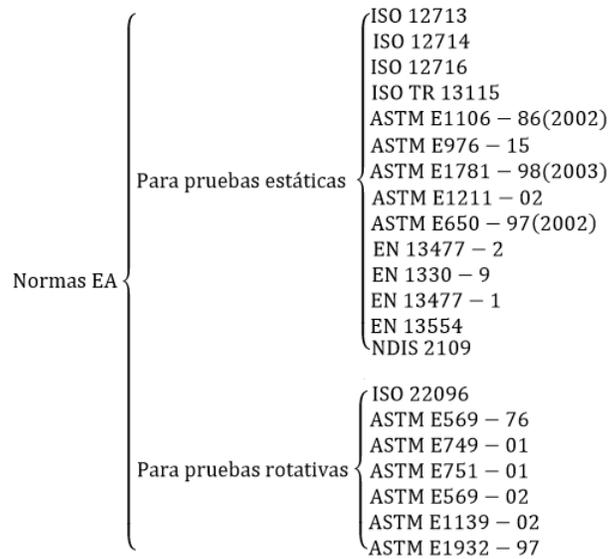


Figura 7. Clasificación de las normas para EA.

### 2.5.8 Equipo de adquisición

Para adquirir la señal de EA hay un procedimiento antes de almacenar datos en un computador. Se realiza una descomposición espectral basado en el método de la Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform, FFT*), este método permite el procesamiento de una señal en forma digital que dentro del campo investigativo conlleva a reconocer y clasificar patrones en las señales EA [5]. En la Figura 8 se muestra el proceso de monitorización, utilizando diferentes tipos de instrumentos, como sensores, acopladores, preamplificador, filtro de frecuencia, software y computador para la obtención y procesamiento de la señal de EA.

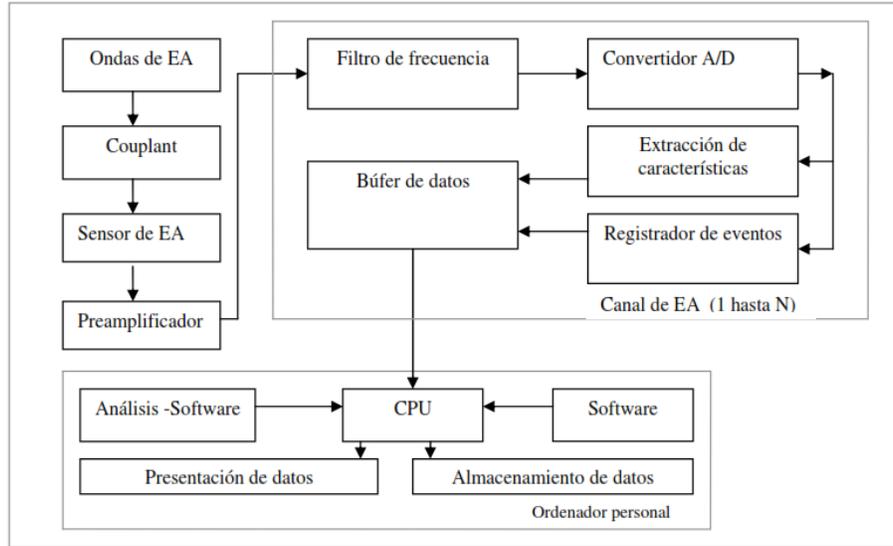


Figura 8. Proceso de EA y los equipos utilizados [37].

### 2.5.8.1 Acoplador

El acoplador o también conocido en inglés como *couplant*, debe asegurar un contacto entre el sensor acústico y la superficie de prueba. Este agente no debe corroer la superficie de contacto. Los acopladores más utilizados son grasa de silicona (grasa de vacío alta), petróleo o pegamento [37]. Para la selección de un acoplador, se deben considerar una serie de factores como la estabilidad a largo plazo, dependiendo de la longitud de la medición, el estado y la temperatura de la superficie de montaje [41].

La forma en la que trabaja el acoplador es igualando la impedancia acústica entre el sensor EA y la superficie a la que está acoplado, además impide que el aire esté en contacto entre el área del sensor y la superficie. La impedancia acústica ( $Z$ ) del material se define como:

$$Z = \rho * V \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde  $\rho$  es la densidad y  $V$  es la velocidad de las ondas acústicas en el material.

La baja impedancia acústica del aire en comparación con las superficies de contacto, permite muy poca transmisión de energía acústica a las frecuencias típicas de EA, por lo tanto, al usar un acoplador se puede mejorar en gran medida esta transmisión alrededor de dos veces a 100 kHz y más de diez veces a 500 kHz. La Figura 9 muestra la diferencia en la transmisión entre los diferentes tipos de acopladores de EA más comunes para diferentes frecuencias [38].

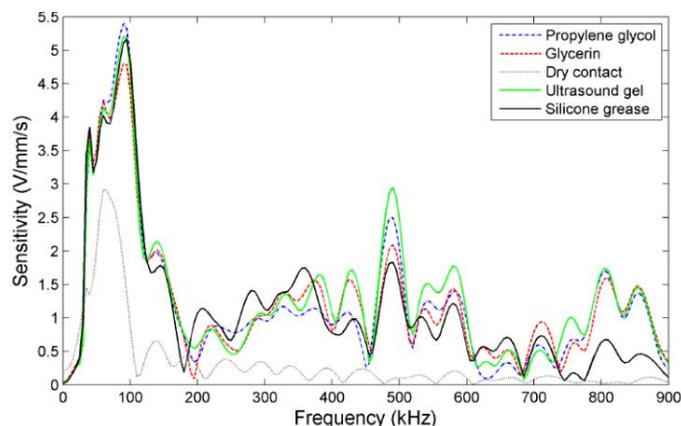


Figura 9. Sensibilidad del sensor EA usando diferentes tipos de acopladores [38].

En la Tabla 4 se presenta algunos de los acopladores más comunes y el rango de temperatura aproximado en los que se pueden utilizar.

Tabla 4. Acopladores más comunes para sensores de EA [36].

Acoplador	Temperatura
Acoplamientos ultrasónicos	Temperatura ambiente
Grasa de petróleo	Temperatura ambiente
Agua	1° a 99° C
Salicilato de fenilo o salol	-40 °C a 40 °C
Cemento dental	0 °C a 50 °C
50% indio – 50% Mezcla de galio	20 °C a 700 °C

El acoplador utilizado para el sensor de emisión acústica en el GIDTEC es la cinta adhesiva a doble cara.

### 2.5.8.2 Sensores EA

En el mercado se pueden conseguir diferentes tipos de sensores EA, la mayoría de estos sensores se basan principalmente en el efecto piezoeléctrico, en el GIDTEC se cuenta con dos sensores de EA para el monitoreo en maquinaria rotativa, este sensor se describe en la sección 2.5.8.2.4. Es necesario que los sensores de EA se conecten a un preamplificador para eliminar cualquier tipo de ruido que no se desea y tener una mejor visualización de la señal acústica.

### 2.5.8.2.1 Principio de funcionamiento de los sensores EA

El sensor de EA más común se realiza añadiendo un elemento piezoeléctrico dentro de una carcasa protectora como se muestra en la Figura 10. Fue fabricado por Beattie en 1983, estos sensores se basan exclusivamente en el efecto piezoeléctrico [42].

El material más utilizado es el circonato-titanato de plomo o PZT, este material tiene la característica de generar campos eléctricos cuando sufren deformaciones. Los sensores EA son sensibles al desplazamiento normal de la superficie en la que están instalados, además el tipo de sensor seleccionado influye fuertemente en la forma de la señal eléctrica medida debido a la diferente sensibilidad, respuesta de frecuencia, impacto de temperatura, frecuencia de resonancia y direccionalidad [38].

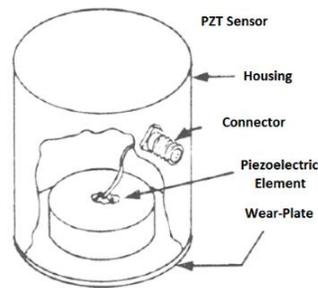


Figura 10. Sensor de EA hecho de material piezoeléctrico [42].

El material piezoeléctrico es sensible a la energía de la onda y genera una tensión proporcional a través del conector. La principal diferencia entre los sensores de vibración y los de EA es el rango de frecuencia de trabajo, por ejemplo, la frecuencia de trabajo de los sensores de vibración está entre 1 Hz y 20 kHz, sin embargo, los sensores de EA funcionan entre 20 kHz y 1 MHz. Por lo tanto, los sensores de EA son más sensibles con altas frecuencias [42]. La tensión generada por los sensores EA es de muy baja amplitud (uV o pocos mV). Por esta razón, es necesaria una etapa de amplificación de la señal, las ganancias más comunes que se utilizan para amplificar las señales de EA son 20 dB, 40 dB y 60 dB dependiendo de la amplitud de la fuente [38].

### 2.5.8.2.2 Evolución de los sensores EA

La instrumentación que se ha utilizado en los primeros trabajos para medir las EA en distintos campos, han sido muy variadas. A partir de los años 80 se crea un sensor basado en el efecto

piezoeléctrico. Actualmente la gran mayoría de sensores EA siguen siendo fabricados bajo el efecto piezoeléctrico. En la Tabla 5 se presenta un resumen de la evolución de los sensores EA.

Tabla 5. Evolución de los sensores EA [39], [43].

<b>Autor</b>	<b>Año</b>	<b>Descripción del sensor</b>
Fuyuhiko Kishinouye	1933	Un amplificador de tres tubos de un sismógrafo y un fono captador con una aguja de acero insertado en el lado tensionado de una tabla de madera.
Friedrich Foster y Erich Scheil	1936	Transmisor electrodinámico y un sistema receptor para transformar la vibración mecánica y la emisión acústica a voltajes eléctricos.
Warren P. Mason, Herbert J. McSkimin y William Shockley	1948	Transductor de cristal de cuarzo, siendo la frecuencia desde unos pocos KHz hasta 5 MHz.
Joseph Kaiser	1950	Detectores piezoeléctricos, un amplificador de alta ganancia y un osciloscopio.
Aleen T. Green, Charles S. Lockman y Richard K. Steele	1961	Micrófonos de contacto, una cinta grabadora y equipamiento de análisis del nivel del sonido registrado.
C. B. Scruby y H. N. G. Wadley	1978	Transductor de capacitancia, sensible al desplazamiento con una respuesta amplia de frecuencia y un tiempo de subida de 20 ns.
Beattie	1983	Crea el primer sensor basado en el efecto piezoeléctrico, colocando dicho elemento dentro de una carcasa protectora.

### 2.5.8.2.3 Tipos de sensores EA

En la Tabla 6 se presentan los sensores acústicos *PHYSICAL ACOUSTICS* [44], estos sensores permiten captar ondas de EA de alta frecuencia.

Tabla 6. Tipos de sensores EA [5].

<b>Tipo de sensor</b>	<b>Descripción</b>	<b>Imagen</b>
Aero elevado ( <i>airborne</i> )	Al tomar contacto con la superficie deja una cama de aire reduciendo el ruido y presentando alta sensibilidad para la adquisición de datos.	

Tabla 6. Tipos de sensores EA [5].

Tipo de sensor	Descripción	Imagen
Diferencial ( <i>differential</i> )	Posee dos sensores con direcciones opuestas de polarización con cables que se conectan a un pre-amplificador para eliminar ruido.	
Para frecuencia plana ( <i>flat frequency response</i> )	Alta respuesta a frecuencias planas, eliminando el ruido por medio de una identificación de la fuente	
Propósito general ( <i>general purpose</i> )	Aísla los terminales de detección eléctricamente, por lo que resulta conveniente para cualquier aplicación. Por su aislamiento eléctrico introduce ruido a la señal	
Para altas temperaturas ( <i>high temperatura</i> )	Cumple con requisitos IP66 para funcionar a muy altas temperaturas. Cuenta con recubrimiento de un polímero especial	

#### 2.5.8.2.4 Descripción del sensor WD S/N FV52

El sensor diferencial WD S/N FV52 se muestra en la Figura 11, es ideal para adquirir señales de EA, debido a su alta sensibilidad; tiene un rango en la respuesta de frecuencia de 125 – 1000 kHz. Cuenta con dos cables de señal que alimentan a un preamplificador diferencial que elimina el ruido en modo común.



Figura 11. Sensor WD S/N FV52.

Estos sensores de EA a más de adquirir señales en maquinaria rotativa, son ideales para el diagnóstico estructural en tanques de almacenamiento, tuberías, entre otros. La Tabla 7 presenta las principales características del sensor acústico.

Tabla 7. Características del sensor WD S/N FV52.

Designación	Especificación
Tipo de sensor	Piezoeléctrico
Sensibilidad máxima	56dB
Rango operacional de frecuencia	125-1000kHz
Frecuencia de resonancia	125kHz
Direccionalidad	+/- 1.5dB
Rango de temperatura	-65 a 177°C
Dimensiones	17.8mm OD x 16.5mm H
Peso	20gr
Material externo	Acero Inoxidable
Material de la cara	Cerámica
Conector	BNC
Acoplador recomendado	Pegamento epoxi
Certificado de calibración	NIST

Para una correcta sujeción del sensor con la superficie de máquina a monitorear se utiliza un soporte magnético MHSTD de *PHYSICAL ACOUSTICS*, el soporte se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Soporte magnético MHSTD.

### 2.5.8.3 Descripción del preamplificador

El preamplificador 0/2/4C está diseñado para soportar a todos los sensores EA de *PHYSICAL ACOUSTICS* con alimentación BNC, se le suministra 20 o 40 dB de ganancia que se selecciona manualmente, puede trabajar con un sólo sensor acústico a la vez, el cual puede ser de entrada diferencial o simple. En la Figura 13 se presenta la forma física del preamplificador MISTRAS [45].



Figura 13. Preamplificador 0/2/4C.

En la Tabla 8 se muestran las características más importantes del preamplificador 2/6/4C.

Tabla 8. Características del preamplificador 2/6/4C [45].

Designación	Especificación
Ganancia seleccionable	20/0/40dB + 0.5%dB
Rango de amplitud dinámica	>90dB Estándar
Impedancia de entrada	10k $\Omega$
Energía requerida	18-28V DC
Rango de temperatura	-40 a 65°C
Corriente operacional	30mA (con AST instalado) 28mA (sin AST instalado)

#### 2.5.8.4 Filtro de frecuencia

El filtro de frecuencia se usa para eliminar variedades de frecuencias no deseadas como son las fuentes de ruido [37]. El borde inferior de filtrado se suele situar por encima de 100 Hz para eliminar ruidos que se encuentren asociados a la frecuencia de la red. Se logra también mejorar el resultado, modificando el límite superior de la banda de filtrado, lo que elimina posibles fuentes de ruido. La banda más utilizada es de 100 a 300 Hz [36].

#### 2.5.8.5 Convertidor analógico-digital (A/D)

Una de las principales preocupaciones en la adquisición de datos es la conversión A/D (analógica a digital). Normalmente, el convertidor A/D está equipado para cada canal de la unidad de grabación. Se requieren filtros *antialiasing* para que las señales puedan ser transformadas del dominio del tiempo al dominio de frecuencia de una manera adecuada. La gran mayoría de los datos de las señales se digitalizan utilizando un computador [39].

### 2.5.9 Prueba de lápiz para EA

La rotura de la mina del lápiz (*Pencil-lead breakage, PLB*), es un método establecido desde hace mucho tiempo como una fuente para la calibración de los sensores EA. A menudo a este método también se lo conoce como la fuente Hsu-Nielsen. Usando un lápiz mecánico, se presiona la mina firmemente contra la estructura bajo investigación hasta que esta se rompa, haciendo que la superficie de la estructura se deforme. En el momento de la rotura de la mina, el esfuerzo acumulado se libera repentinamente, lo que provoca un desplazamiento microscópico de la superficie y provoca una onda acústica que se propaga en la estructura. Dado que este principio es fácil de manejar en entornos de laboratorio, así como en pruebas de campo, se convirtió en el tipo más común para la calibración de sensores EA [46].

#### 2.5.9.1 Atenuación

La atenuación se presenta en el tiempo y espacio; el tiempo se relaciona con el movimiento en serie de un material y por lo general se le denomina amortiguación viscosa. Mientras que el espacio produce una amortiguación de la amplitud con la distancia y se denomina atenuación de distancia. A medida que la onda EA se propaga desde su fuente, su amplitud disminuye tal como se ilustra en la Figura 14, por lo tanto es necesario determinar las posiciones y el número de sensores EA adecuados, dependiendo de las distancias entre los sensores [29].

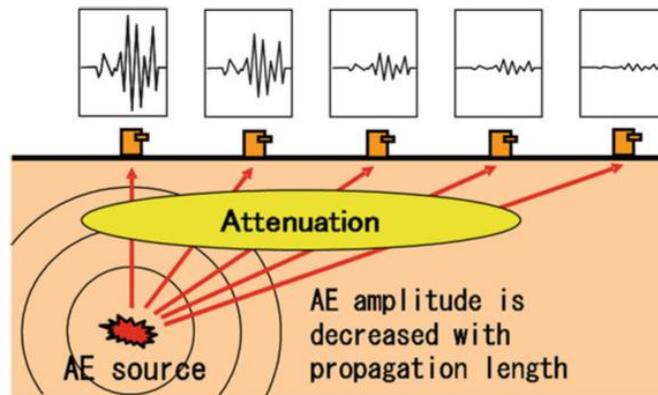


Figura 14. Ilustración esquemática de la atenuación [29].

En aplicaciones de EA, la atenuación es una propiedad muy importante porque determina la intensidad de la señal en función de la distancia; por lo tanto juega un papel muy importante en la especificación de las ubicaciones de los sensores de EA [47], [48].

La atenuación se puede producir simulando una señal de EA, esto se realiza utilizando la fuente Hsu-Nielsen. Las ondas de tensión producidas por la deformación de una mina de lápiz son muy reproducibles y tienen un contenido de amplitud y frecuencia similar al de una señal típica de grietas. Se puede crear un gráfico de atenuación realizando esta técnica a varias distancias de un sensor y trazando la amplitud del pico contra la distancia. Esta técnica puede ayudar al usuario a decidir la mejor ubicación de los sensores EA para garantizar que se obtendrán todos los eventos relevantes de las EA [30].

### 2.5.9.2 Calibración

La señal de calibración debe ser característica de los parámetros determinados en los dominios de tiempo y frecuencia; y estar tan cerca de la señal de EA como sea posible. Los métodos de calibración más adecuados son los que hacen posible producir un pulso de parámetros estrictamente determinados y repetibles que son fáciles de realizarlos en condiciones de laboratorio. La longitud de la mina será de 3 mm lo que garantiza el mismo ángulo de rotura para cada prueba, lo cual permite que se genere una onda acústica repetible [49].

En la Figura 15 se presenta el cabezal de calibración, está hecho de teflón o de poli metacrilato de metilo. Estos materiales garantizan durabilidad y constancia en la forma y medidas requeridas del cabezal [49], [50].

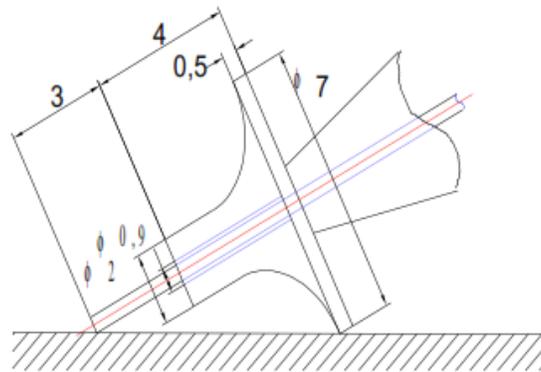


Figura 15. Cabezal de calibración Hsu-Nielsen [49].

La longitud de la mina libre, el ángulo de inclinación del lápiz en relación con la estructura de prueba y el diámetro de la mina son las principales características a tomar en cuenta al desarrollar la prueba del lápiz para EA. En la Tabla 9 se presentan las características del lápiz para la prueba [46].

Tabla 9. Características del lápiz.

<b>Características</b>	
Lápiz	Pentel P205
Dirección de carga	-y
Longitud de chaflán	0.1 mm
Diámetros de la mina	0.5 & 0.3 [mm]
Dureza	2H
Longitud del plomo	2-3 mm
Ángulo	30°

Para una correcta ejecución de la prueba del lápiz se tiene que ejercer una presión hacia abajo hasta que se rompa la mina, teniendo cuidado de no permitir que la punta metálica del lápiz entre en contacto con la estructura, ya que causaría un evento acústico secundario [51], [52], [53].

### 2.5.10 Aplicaciones de las EA

Según Hamel (2013), las aplicaciones de las EA son [35]:

- Supervisión de soldadura
- Análisis de firma mecánica
- Detección y localización de fugas en tanques de almacenamiento
- Aplicaciones geológicas
- Industria química y petrolera
- Industrias eléctricas y centrales hidroeléctricas
- Industria aeronáutica y aeroespacial
- Industria metalmecánica
- Ingeniería civil

### 2.5.11 Ventajas y limitaciones de las EA

Dentro del MC las EA están siendo empleadas debido a que presentan ciertas ventajas frente al análisis de vibraciones, aunque también se pueden presentar ciertas limitaciones, todas estas son citadas a continuación [52], [53], [54], [55], [56], [57]:

Ventajas:

- Son más eficaces al detectar fallos iniciales, esto debido a que los factores que producen los fallos generan EA a nivel microscópico.
- Las señales de EA son sensibles a la ubicación de los fallos y pueden ayudar en la detección de grietas subsuperficiales.
- Las EA son más sensibles que las vibraciones para detectar fallos en elementos que giren a bajas velocidades y con cargas altas.
- Las señales de EA son omnidireccionales, de modo que un sensor de EA puede colocarse en cualquier lugar de donde se generan las fuentes de EA.

Limitaciones:

- Las señales de salida de los sensores de EA son generalmente de alta frecuencia, incluso hasta varios MHz, por lo tanto, en general se requiere alta velocidad de muestreo, 2 – 10 MHz.
- Debido a que las señales de EA tienden a ser de baja amplitud y de alta frecuencia, el sensor de EA debe colocarse cercano a las fuentes.
- Las señales de EA se limitan generalmente a fallos producidos en el material o dentro de él, esto puede ser agrietamiento, desgaste o picaduras.
- La temperatura del aceite puede afectar a las señales de EA.
- Comercialmente no se dispone de analizadores de EA para maquinaria rotativa, como si es el caso de los analizadores de vibraciones.

## 2.6 Fallos en rodamientos

En aplicaciones industriales, los rodamientos se consideran como elementos mecánicos críticos, si un fallo en el rodamiento no es detectado a tiempo, causa un mal funcionamiento e incluso puede producir una avería catastrófica en la maquinaria. Diferentes métodos son utilizados para la detección y diagnóstico de los defectos en rodamientos, los cuales son medidas de vibración, emisión acústica y medidas de temperatura [57].

La clasificación de fallos en los rodamientos está dada por la norma ISO 15243, la cual divide a los fallos en seis categorías y 16 tipos de fallos. En la Figura 16 se presenta la clasificación de los fallos en rodamientos [58].

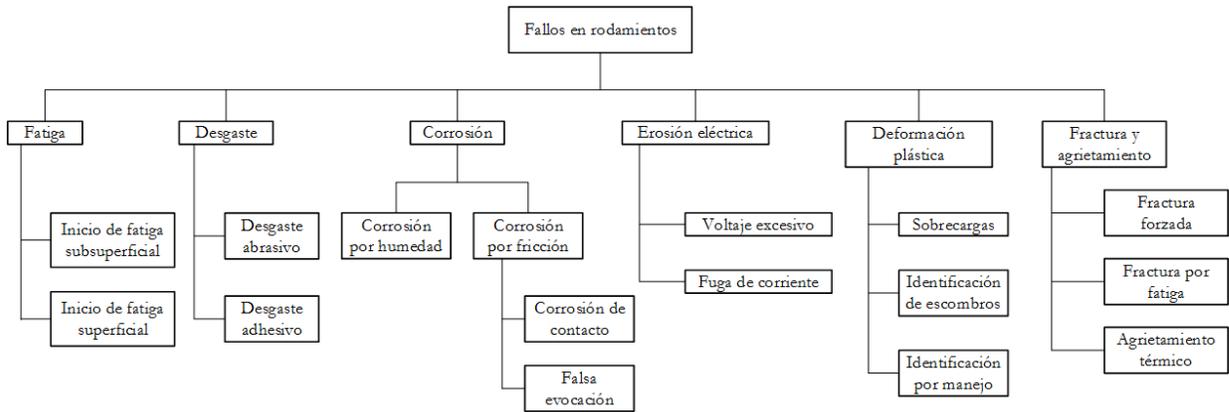


Figura 16. Clasificación de fallos en rodamientos según la norma ISO 15243.

Estos fallos pueden estar distribuidos en todos los elementos que conforman el rodamiento, por lo tanto, para determinar la severidad de fallos en los rodamientos se ha tomado tres de las partes del rodamiento tal como se muestra en la Figura 17.

- Pista interna (*inner race*)
- Pista externa (*outer race*)
- Elemento rodante (*ball*)

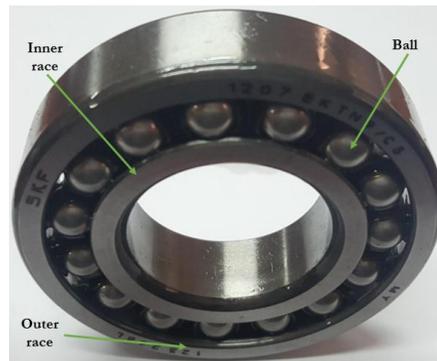


Figura 17. Principales partes de un rodamiento.

### 2.6.1 Distribución de fallos en rodamientos

Los fallos en rodamientos, básicamente se clasifican como (i) defecto de punto único, (ii) defecto de punto múltiple, y (iii) rugosidad generalizada; también llamados “fallos distribuidos”. Al defecto de punto único se lo puede definir como un fallo localizado en la superficie del rodamiento, produce ciertas frecuencias de fallo características que aparecen en

las señales de vibración, EA, corriente o sonido. Estas frecuencias son predecibles y dependen de la superficie del rodamiento que contiene el punto de fallo, es decir, pista externa, pista interna, elementos rodantes y jaula [59], [60].

Un rodamiento puede tener múltiples defectos, los cuales consisten en varios defectos de punto único, quizás superpuestos. Los espectros de la señal de vibración difieren de los que se esperan del defecto de punto único. Por ejemplo, las líneas espectrales pueden ocurrir en las mismas frecuencias esperadas para los defectos de punto único, pero las amplitudes relativas de los componentes pueden cambiar considerablemente, y quizás, sus armónicos no son necesariamente los más grandes [60].

Finalmente, los fallos por rugosidad generalizada se deben al deterioro sobre una gran parte del área de la superficie del rodamiento, que se vuelve áspera, irregular o deformada. Un típico ejemplo es la rugosidad superficial total producida por contaminación, falta o pérdida del lubricante, corrientes de eje, desalineación o por la progresión de fallos localizados [60]. Este tipo de fallo tiende a generar patrones de fallo más complejos que aquellos con fallos localizados, entonces este tipo de fallo es difícil de predecir [61].

### **2.6.2 Localización de los sensores para detectar fallos en rodamientos**

Las localizaciones óptimas de los sensores ayudan a mejorar la calidad de la adquisición de datos y la eficacia en el monitoreo del estado de las máquinas [62]. Los fallos localizados en los rodamientos producen una serie de respuestas de impulso de banda ancha en la señal de aceleración, ya que los componentes del rodamiento atacan de forma repetida el fallo. Localizar precisamente el fallo determina la naturaleza de la serie de respuesta de impulso y la Figura 18 muestra los casos típicos. La señal de envolvente obtenida a través de la demodulación de la amplitud es un punto clave en el diagnóstico de rodamientos, debido a que normalmente contiene información del fallo más clara que la señal cruda, por lo que las señales de envolvente también se ilustran en la Figura 18 [63].

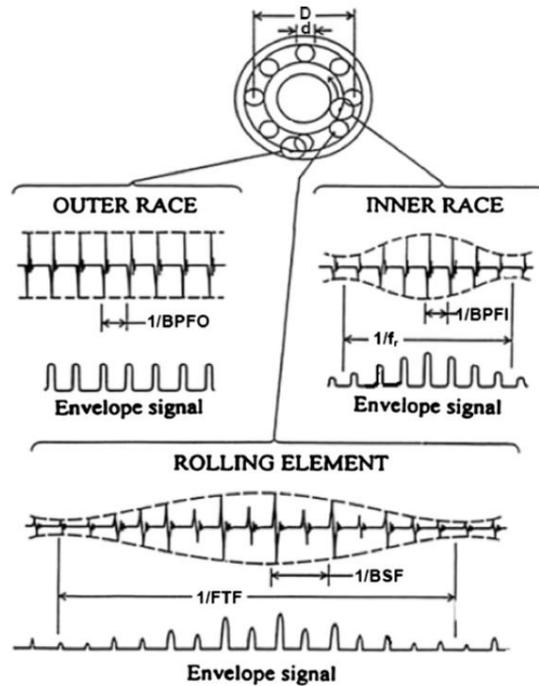


Figura 18. Señales típicas y envolventes de fallos localizados en rodamientos [64].

Generalmente, para obtener una buena señal del fallo, los sensores se colocarán lo más cerca posible de la fuente de vibración donde se encuentre el fallo. En aplicaciones reales, la posición exacta del fallo puede ser desconocida, debido a la naturaleza de las máquinas rotativas, además las ubicaciones adecuadas para colocar el sensor pueden ser inaccesibles o estar sujetas a restricciones estructurales. En la Figura 19 se presenta un ejemplo de la posición del sensor para detectar un fallo localizado en la pista interna del rodamiento [62].

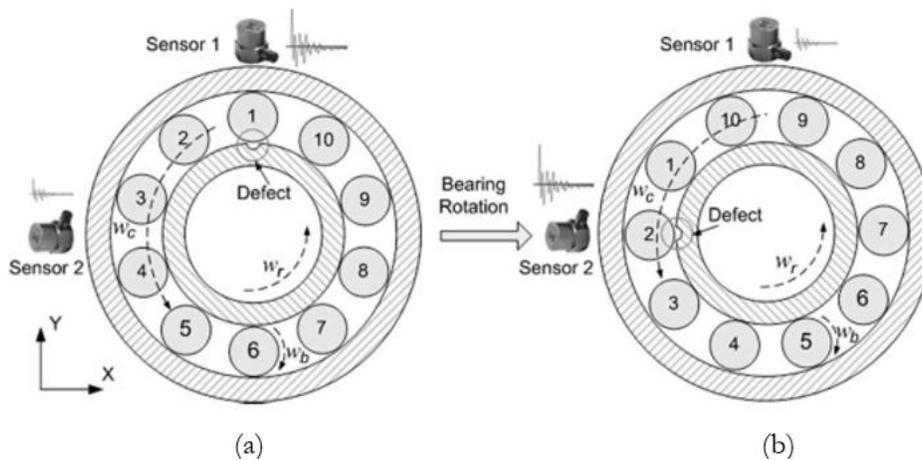


Figura 19. (a) Fallo ubicado en la posición 12:00 en punto, (b) fallo ubicado en la posición 9:00 en punto [62].

Cuando el fallo se localiza en la posición superior del rodamiento (12.00 en punto) interactúa con el elemento rodante #1 tal como se ilustra en la Figura 19a, la intensidad de la señal medida por el sensor de la parte superior del rodamiento será generalmente mayor que la medida por el sensor colocado en la parte izquierda del rodamiento. Si el fallo se ubica en la parte izquierda del rodamiento (9.00 en punto) así como se muestra en la Figura 19b, la señal captada por el sensor ubicado en la parte izquierda será mayor [62].

### **2.6.3 Características de la severidad de fallos en rodamientos.**

En la Tabla 10 se muestran las características que se presentan en cada etapa de severidad de fallo del rodamiento. En el nivel leve es muy difícil identificar el fallo por lo que se requiere de dispositivos de aumento para la observación del mismo, en el nivel moderado es donde el personal de mantenimiento elige sustituir al rodamiento debido a que el fallo es visible. Si el rodamiento llega a la etapa severa, la máquina tendrá que salir de servicio, para reemplazar el rodamiento [65].

Tabla 10. Características de los niveles de severidad del rodamiento [66], [65], [67].

ESTADO DEL RODAMINETO		Normal	Leve	Moderado	Severo
IMAGEN DEL FALLO					
DESCRIPCIÓN DEL FALLO	Causa del fallo	-----	Alta concentración de tensiones	Cargas periódicas	Cargas periódicas suficientemente elevadas
	Componentes frecuenciales	-----	Generalmente mayores a 5 kHz	Aparecen componentes frecuenciales relacionadas con las frecuencias de fallo del rodamiento.	La vibración en la región de alta frecuencia disminuye, crece la componente a la velocidad de rotación y las vibraciones tienden a ser aleatoria.
	Temperatura	Temperatura normal	La temperatura no se incrementa	Se incrementa en algunos casos	Se produce sobrecalentamiento
	Vida útil restante	80 %	10 – 20 %	5 – 10 %	1 – 5 %
	Tamaño de picadura	-----	Agujeros de 0.1 mm	Agujeros de 0.5 mm	Agujeros de 1 mm
	Ruido durante su funcionamiento	No causa ruido	No causa ruido	Poca presencia de ruido durante su funcionamiento	El ruido incrementa significativamente

### 2.6.4 Selección y caracterización de fallos en rodamientos

Para la experimentación se utiliza rodamientos de bolas a rótula marca SKF 1207 EKTN9/C3. Estos rodamientos tienen dos hileras de bolas y un camino de rodadura esférico común en el aro exterior. Los rodamientos son insensibles a la desalineación angular del eje en relación con el soporte. Los rodamientos de bolas a rótula generan menos fricción que cualquier otro tipo de rodamiento, lo que les permite funcionar a menos temperatura incluso a altas velocidades. En la Figura 20 se muestra un rodamiento con un diseño básico de bolas a rótula [68].

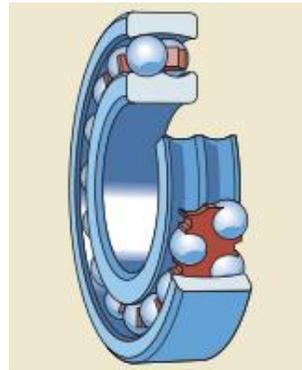


Figura 20. Rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3.

En la Figura 21 se presenta las dimensiones respectivas para el rodamiento.

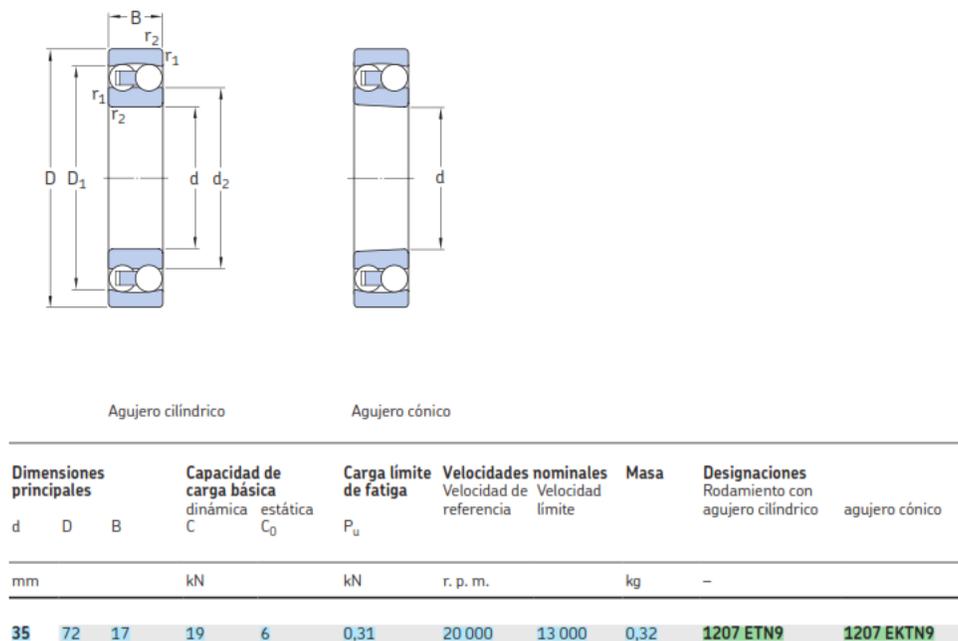


Figura 21. Dimensiones del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3 [68].

#### 2.6.4.1 Fallo en pista interna

El fallo en pista interna se produce principalmente por errores de ensamblaje, esfuerzos anormales, corrosión y lubricación deficiente; se presenta como agrietamientos y/o astillamientos del material, tal como se muestra en la Figura 22 [69].



Figura 22. Fallo en pista interna [60].

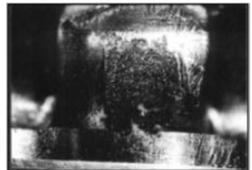
##### 2.6.4.1.1 Revisión bibliográfica de la construcción del fallo en pista externa

En la Tabla 11 se presenta un resumen de la revisión bibliográfica sobre los fallos en pista interna de un rodamiento, indicando principalmente el método de construcción y las dimensiones de los fallos introducidos artificialmente.

Tabla 11. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos en pista interna.

Referencia	Descripción del artículo	Imagen del fallo	Método de construcción	Dimensiones	Nivel de severidad
[70]	En el artículo se presenta un estudio para analizar las vibraciones características relacionadas con cuatro condiciones de fallo en un rodamiento, incluyendo las normales, falla en pista interna, pista externa y elementos rodantes.		El fallo fue creado artificialmente con una pluma eléctrica.	Una picadura con diámetro de 2mm.	Moderado: 40%
[71]	El artículo presenta un estudio comparativo entre las técnicas de redes neuronales artificiales y mapas auto organizados, para el diagnóstico de fallos en rodamientos.		Se simula el fallo a diferentes velocidades de rotor (250, 500, 1000, 1500 y 2000 rpm)	Desprendimiento Long: 10mm Ancho: 5mm Profundidad: 3mm	Severo: 100%
[72]	Utilizan rodamientos de rodillos para las pruebas en condiciones normales y con fallo en pista externa e interna.	-----	El fallo se realiza artificialmente mediante corte por láser.	Ranura Ancho: 0.15mm Profundidad: 0.13mm	Leve: 3%
[73]	Las pruebas se realizan en dos partes, induciendo defectos, variando tanto el tamaño del mismo como la posición y número de picaduras.	-----	Las picaduras se realizan mediante descargas eléctricas usando la máquina de electroerosión.	Variación del diámetro P1: Ancho=0.8mm, Prof=0.35mm P2: Ancho=1.5mm, Prof=0.40mm P3: Ancho= 2 mm, Prof=0.40mm Variando la posición y número de picaduras P1: Dos picaduras con ángulo de separación de 60°. P2: cuatro picaduras con ángulo de separación de 45°.	P1 Leve: 16% P2-P3 Moderado: 30%-40% P4-P5 Severo >50%

Tabla 11. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos en pista interna.

Referencia	Descripción del artículo	Imagen del fallo	Método de construcción	Dimensiones	Nivel de severidad
[74]	Un rodamiento con fallo se instala en un eje el cual es accionado por un motor. El método propuesto en el artículo se aplicó para evaluar el rendimiento y reconocer las diferentes categorías de fallos en rodamientos.		El método utilizado para la construcción de los fallos es por mecanizado por electroerosión.	Profundidad= 0.3 mm Ancho= 1.2 mm Longitud= todo el ancho de la pista externa.	Leve: 24%
[75]	El rodamiento de prueba utilizado es uno de rodillos cilíndricos, SKF NF307, con anillo exterior e interior separables, además permite un fácil acceso a la pista de rodadura para detectar defectos y observar el estado de la superficie. Los fallos a simular son agrietamiento y desprendimientos.		Para el agrietamiento utilizan una broca de diamante. Para el desprendimiento utilizan un esmerilado con una herramienta de pulido.	Grieta Ancho= 0.1 mm Desprendimiento Ancho= 0.6mm La longitud en los dos casos ocupa todo el ancho de la pista externa.	Grieta Leve: 2% Desprendimiento Moderado: 12%
[76]	En este artículo presentan la investigación de cuatro tipos de fallas bajo condiciones sin carga. Todos los defectos en engranajes y rodamientos se colocaron en la entrada de la caja de cambios.		El fallo fue realizado mediante mecanizado por láser.	Ancho= 2mm Profundidad= 1mm La longitud ocupa todo el ancho de la pista externa.	Moderado: 40%
[77]	Los ensayos son realizados en tres rodamientos de bolas autoalineables de doble hilera FAG 1204, con 12 elementos rodantes. Cada rodamiento se utilizó para estudiar un sólo tipo de fallo superficial.		Las condiciones de fallos fueron producidas artificialmente por una pluma eléctrica.	En la pista interna se creó una línea transversal de aproximadamente 1mm de ancho, extendida a lo largo de la dirección longitudinal para cubrir la zona cuadrada.	Leve: 20%

Los fallos incipientes que se presentan en la pista interna de un rodamiento son los más estudiados, los fallos se presentan comúnmente en forma de desprendimientos ocupando desde un pequeño porcentaje del ancho de la pista interna hasta llegar a ocupar todo el ancho de la pista en algunos casos. Los fallos son creados artificialmente por medio de electroerosión.

#### 2.6.4.1.2 Nivel de severidad para fallos en pista interna

Con la revisión bibliográfica realizada en la sección anterior, se asume que un fallo con un ancho de 2 mm en la pista interna será un fallo con 100% de severidad; por lo tanto, mediante una regla de tres se obtendrán los porcentajes de las severidades para los anchos propuestos. En la Tabla 12 se presenta las dimensiones para la generación del fallo en la pista interna del rodamiento.

Tabla 12. Niveles de severidad de fallos para pista interna.

Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Longitud de fallo (mm)	Porcentaje de severidad	Nivel de severidad
0,50	0,30	5,00	25,00%	Leve
0,90	0,30	5,00	45,00%	Moderado
1,30	0,30	5,00	65,00%	Severo

En la Figura 23 se presenta la tendencia de la severidad con relación al ancho del fallo.

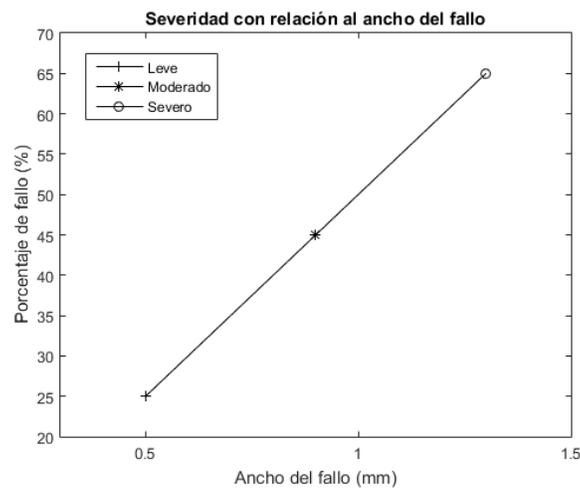
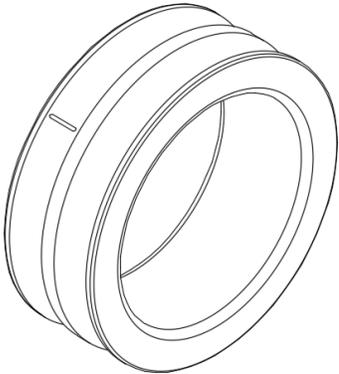
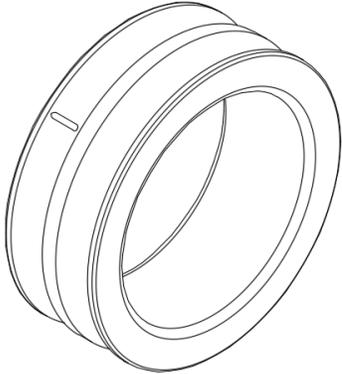
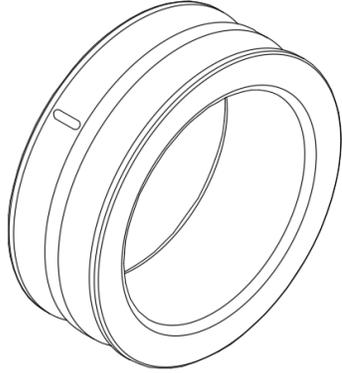


Figura 23. Tendencia de la severidad del fallo con relación al ancho de la pista interna.

### 2.6.4.1.3 Fallos propuestos

En la Tabla 13 se presenta siete niveles de severidad para fallos en pista interna del rodamiento SKF 1207 EKT8/C3.

Tabla 13. Fallos propuestos para pista interna.

Dimensiones	Código	Imagen
Ancho= 0.50 mm Profundidad= 0.30 mm Longitud= 5.00 mm Severidad= 25.00%	IR_1	
Ancho= 0.90 mm Profundidad= 0.30 mm Longitud= 5.00 mm Severidad= 45.00%	IR_2	
Ancho= 1.30 mm Profundidad= 0.30 mm Longitud= 5.00 mm Severidad= 65.00%	IR_3	

#### 2.6.4.2 Fallo en pista externa

El fallo en pista externa se caracteriza principalmente por el agrietamiento (*crack*) o desastillamiento (*spalling*) del material, las principales causas de este fallo son por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o una lubricación deficiente, en la Figura 24 se presenta un fallo por pista externa [1].

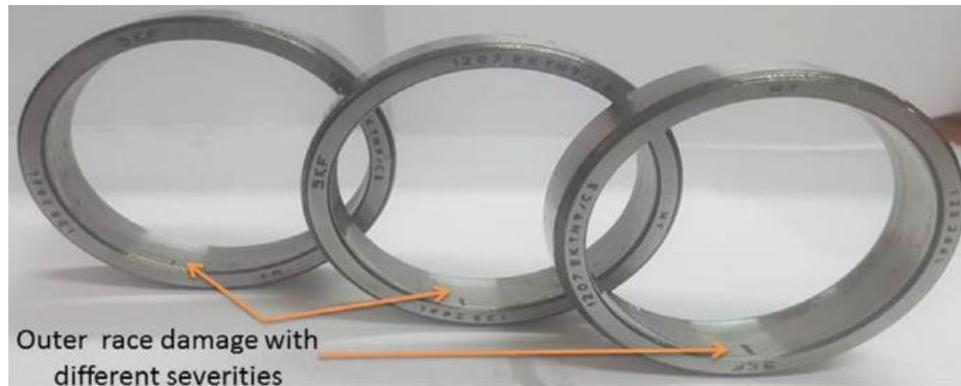


Figura 24. Fallo en pista externa [61].

##### 2.6.4.2.1 Revisión bibliográfica de la construcción del fallo en pista externa

En la Tabla 14 se presenta un resumen de la revisión bibliográfica sobre los fallos en la pista externa de un rodamiento, indicando principalmente el método de construcción y las dimensiones de los fallos introducidos artificialmente.

Tabla 14. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos en pista externa.

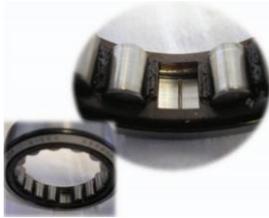
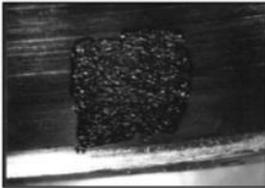
Referencia	Descripción del fallo	Imagen del fallo	Método de construcción	Dimensiones	Nivel de severidad
[70]	En el artículo se presenta un estudio para analizar las vibraciones características relacionadas con cuatro condiciones de fallo en un rodamiento, incluyendo las normales, falla en pista interna, pista externa y elementos rodantes.		El fallo fue creado artificialmente con una pluma eléctrica.	Una picadura con diámetro de 2mm.	Moderado
[71]	El artículo presenta un estudio comparativo entre las técnicas de redes neuronales artificiales y mapas auto organizados, para el diagnóstico de fallos en rodamientos.		Se simula el fallo a diferentes velocidades de rotor (250, 500, 1000, 1500 y 2000 rpm)	<i>Spalling</i> Long: 10mm Ancho: 5mm Profundidad: 3mm	Severo: 100%
[78]	El rodamiento de prueba es ubicado en uno de los bordes del eje para facilitar el montaje y desmontaje y se carga radialmente. El rodamiento de prueba fue de rodillos cilíndricos, donde los niveles de severidad se miden para el ancho de la fisura, ya que la longitud y profundidad es constante.		Se realizan las fisuras artificialmente a través de mecanizado por electroerosión.	Longitud: 13mm Profundidad: 1mm Ancho: 0.2 mm 0.5 mm 1 mm 1.5 mm 2 mm	Leve: 4, 10 y 20%  Moderado: 30-40%
[73]	Las pruebas se realizan en dos partes, induciendo defectos, variando tanto el tamaño del mismo como la posición y número de picaduras.	-----	Las picaduras se realizan mediante descargas eléctricas usando la máquina de electroerosión.	Variación del diámetro P1: Ancho=0.8mm, Prof= 0.35mm P2: Ancho=1.5mm, Prof= 0.40mm P3: Ancho= 2 mm, Prof= 0.40mm Variando la posición y número de picaduras P4: Dos picaduras con ángulo de separación de 60°. P5: cuatro picaduras con ángulo de separación de 45°.	P1 Leve: 16%  P2-P3 Moderado: 30%-40%  P4-P5 Severo >50%

Tabla 14. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos en pista externa.

Referencia	Descripción del fallo	Imagen del fallo	Método de construcción	Dimensiones	Nivel de severidad
[72]	Utilizan rodamientos de rodillos para las pruebas en condiciones normales y con fallo en pista externa e interna.	-----	El fallo se realiza artificialmente mediante corte por láser.	Ranura Ancho: 0.15mm Profundidad: 0.13mm	Leve: 3%
[74]	Un rodamiento con fallo se instala en un eje el cual es accionado por un motor. El método propuesto en el artículo se aplicó para evaluar el rendimiento y reconocer las diferentes categorías de fallos en rodamientos.		El método utilizado para la construcción de los fallos es por mecanizado por electroerosión.	Profundidad= 0.3 mm Ancho= 1.2 mm Longitud= todo el ancho de la pista externa.	Leve: 24%
[75]	El rodamiento de prueba utilizado es uno de rodillos cilíndricos, SKF NF307, con anillo exterior e interior separables, además permite un fácil acceso a la pista de rodadura para detectar defectos y observar el estado de la superficie. Los fallos a simular son agrietamiento y desprendimientos.		Para el agrietamiento utilizan una broca de diamante. Para el desprendimiento utilizan un esmerilado con una herramienta de pulido.	Grieta Ancho= 0.1 mm  Desprendimiento Ancho= 0.7mm La longitud en los dos casos ocupa todo el ancho de la pista externa.	Grieta Leve: 2%  Desprendimiento Leve: 14%
[76]	En este artículo presentan la investigación de cuatro tipos de fallas bajo condiciones sin carga. Todos los defectos en engranajes y rodamientos se colocaron en la entrada de la caja de cambios.		El fallo fue realizado mediante mecanizado por láser.	Ancho= 2mm Profundidad= 1mm La longitud ocupa todo el ancho de la pista externa.	Moderado: 40%
[77]	Los ensayos son realizados en tres rodamientos de bolas autoalineables de doble hilera FAG 1204, con 12 elementos rodantes. Cada rodamiento se utilizó para estudiar un sólo tipo de fallo superficial.		Las condiciones de fallos fueron producidas artificialmente por una pluma eléctrica.	En la pista externa se creó una línea transversal de aproximadamente 1mm de ancho, extendida a lo largo de la dirección longitudinal para cubrir la zona cuadrada.	Leve: 20%

La construcción de los fallos es artificial, se los realiza mediante mecanizado por electroerosión, este método de construcción es muy utilizado debido a que se puede controlar las profundidades y ancho del fallo. La geometría de los fallos es en forma de ralladura, empieza ocupando un pequeño porcentaje del ancho de la pista externa hasta en algunos casos ocupar todo el ancho. Para el presente trabajo el fallo se realizó utilizando electroerosión.

#### 2.6.4.2.2 Nivel de severidad para fallos en pista externa

Con la revisión bibliográfica realizada en la sección anterior, se asume que un fallo con un ancho de 2 mm en la pista externa será un fallo con 100% de severidad; por lo tanto, mediante una regla de tres se obtendrán los porcentajes de las severidades para los anchos propuestos. En la Tabla 15 se presenta las dimensiones para la generación del fallo en la pista externa del rodamiento.

Tabla 15. Niveles de severidad de fallos para pista externa.

Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Longitud de fallo (mm)	Porcentaje de severidad	Nivel de severidad
0,50	0,30	5,00	25,00%	Leve
0,90	0,30	5,00	45,00%	Moderado
1,30	0,30	5,00	65,00%	Severo

En la Figura 25 se presenta la tendencia de la severidad con relación al ancho del fallo.

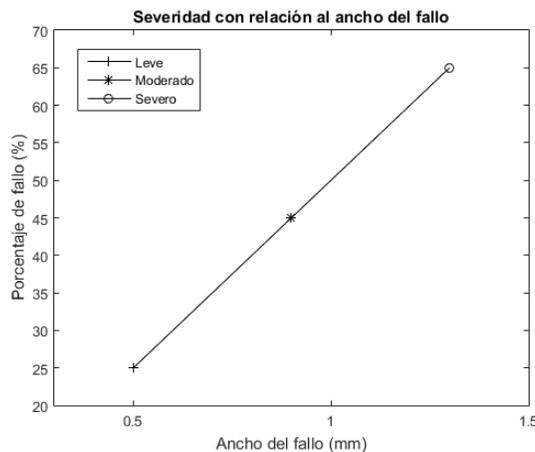
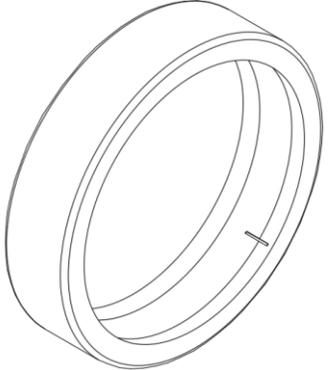
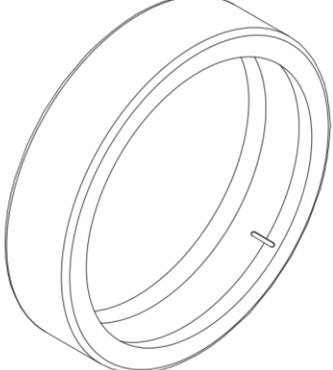
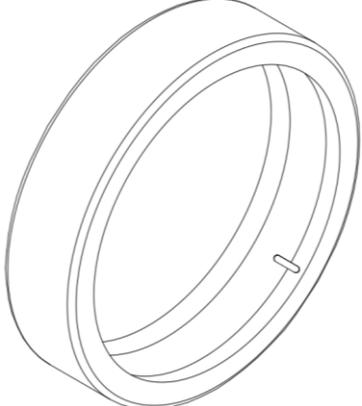


Figura 25. Tendencia de severidad del fallo con relación al ancho de la pista externa.

### 2.6.4.2.3 Fallos propuestos

En la Tabla 16 se presenta siete niveles de severidad para fallos en pista externa del rodamiento SKF 1207 EKT8/C3.

Tabla 16. Fallos propuestos para pista externa.

Dimensiones	Código	Imagen
Ancho= 0.50 mm Profundidad= 0.30 mm Longitud= 5.00 mm Severidad= 25.00 %	OR_1	
Ancho= 0.90mm Profundidad= 0.30 mm Longitud= 5.00 mm Severidad= 45.00 %	OR_2	
Ancho= 1.30 mm Profundidad= 0.30 mm Longitud= 5.00 mm Severidad= 65.00 %	OR_3	

### 2.6.4.3 Fallo en elementos rodantes

Los fallos en los elementos rodantes se presentan principalmente como picaduras (*pitting*), las cuales son producidas básicamente por factores externos como una lubricación deficiente o partículas extrañas en el aceite y corrosión, en la Figura 26 se presenta un fallo en los elementos rodantes [69].



Figura 26. Fallo en los elementos rodantes [1].

#### 2.6.4.3.1 Revisión bibliográfica de la construcción del fallo en los elementos rodantes

En la Tabla 17 se presenta un resumen de la revisión bibliográfica sobre los fallos en los elementos rodantes, indicando principalmente el método de construcción y las dimensiones de los fallos introducidos artificialmente.

Tabla 17. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos en los elementos rodantes.

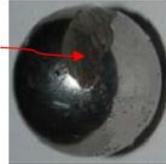
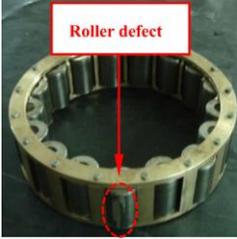
Referencia	Descripción del artículo	Imagen del fallo	Método de construcción	Dimensiones	Nivel de severidad
[71]	El artículo presenta un estudio comparativo entre las técnicas de redes neuronales artificiales y mapas auto organizados, para el diagnóstico de fallos en rodamientos.		Se simula el fallo a diferentes velocidades de rotor (250, 500, 1000, 1500 y 2000 rpm)	Desprendimiento Long: 10.00mm Ancho: 5.00mm Profundidad: 3.00mm	Severo: 100%
[73]	Las pruebas se realizan en dos partes, induciendo defectos, variando tanto el tamaño del mismo como la posición y número de picaduras.	-----	Las picaduras se realizan mediante descargas eléctricas usando la máquina de electroerosión.	Variación del diámetro P1: Diámetro=0.80mm, Prof=0.35mm P2: Diámetro =1mm, Prof=0.40mm P3: Diámetro = 2 mm, Prof=0.40mm Variando la posición y número de picaduras P4: Dos picaduras con ángulo de separación de 80°. P5: cuatro picaduras dispersas	P1-P2 Leve: 16%-20% P3 Moderado: 40% P4-P5 Severo>50%
[74]	Un rodamiento con fallo se instala en un eje el cual es accionado por un motor. El método propuesto en el artículo se aplicó para evaluar el rendimiento y reconocer las diferentes categorías de fallos en rodamientos.		El método utilizado para la construcción de los fallos es por mecanizado por electroerosión.	Profundidad= 0.30 mm Ancho= 1.20 mm Longitud= 2.00mm	Leve: 24%

Tabla 17. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos en los elementos rodantes.

Referencia	Descripción del artículo	Imagen del fallo	Método de construcción	Dimensiones	Nivel de severidad
[75]	El rodamiento de prueba utilizado es uno de rodillos cilíndricos, SKF NF307, con anillo exterior e interior separables, además permite un fácil acceso a la pista de rodadura para detectar defectos y observar el estado de la superficie. El fallo a simular es el desprendimiento ( <i>spalling</i> ).		Para el desprendimiento utilizan un esmerilado con una herramienta de pulido.	Ancho B1= 10mm Ancho B2= 1.60mm La longitud en los dos casos ocupa todo el ancho del elemento rodante.	B1 Leve:20%  B2 Moderado: 32%
[79]	El artículo presenta los datos de vibración de rodamientos de <i>Case Western Reserve University Bearing Data Center</i> . Cada rodamiento es analizado bajo cuatro cargas diferentes (0, 1, 2 y 3 hp).		Los fallos se introducen en un punto único mediante mecanizado por electroerosión.	Diámetros P1= 0.007 in P2= 0.014 in P3= 0.021 in P4= 0.028 in	Leve P1: 3.60% P2: 7.20% P3: 10.60% P4: 14.20%
[77]	Los ensayos son realizados en tres rodamientos de bolas autoalineables de doble hilera FAG 1204, con 12 elementos rodantes. Cada rodamiento se utilizó para estudiar un sólo tipo de fallo superficial.		Las condiciones de fallos fueron producidas artificialmente por una pluma eléctrica.	Se produjo una fosa redonda: su radio incremento gradualmente de 1mm, en la última etapa el fallo cubre un hemisferio.	Leve: 20%  Severo >50%

Si el rodamiento es de bolas, el fallo que se presenta generalmente es la picadura, mientras si los elementos rodantes son cilíndricos el principal fallo a presentarse es una ralladura. Para generar los fallos de forma artificial, la mayoría de autores utiliza el mecanizado por electroerosión. En los casos de fallo severo las picaduras pueden cubrir todo un hemisferio del elemento rodante. En el presente trabajo el fallo fue construido mediante electroerosión.

#### 2.6.4.3.2 Nivel de severidad para fallos en los elementos rodantes

Con la revisión bibliográfica realizada en la sección anterior, se asume que un fallo con un diámetro de 1.60 mm en un elemento rodante será un fallo con 100% de severidad; por lo tanto, mediante una regla de tres se obtendrán los porcentajes de las severidades para los diámetros propuestos. El fallo se genera aleatoriamente en una sola bola del rodamiento. En la Tabla 18 se presenta las dimensiones para la generación del fallo en los elementos rodantes.

Tabla 18. Niveles de severidad de fallos en elementos rodantes.

<b>Peso (g)</b>	<b>Diámetro de fallo (mm)</b>	<b>Profundidad (mm)</b>	<b>Volumen del fallo (mm<sup>3</sup>)</b>	<b>Porcentaje de severidad (%)</b>	<b>Nivel de severidad</b>
2,70473	0,50	0,10	0,02	3,00%	Leve
2,70417	0,60	0,30	0,08	13,00%	Leve
2,7036	0,70	0,30	0,12	18,00%	Leve
2,70353	0,80	0,30	0,15	23,00%	Moderado
2,703	0,90	0,50	0,32	49,00%	Moderado
2,70103	1,00	0,50	0,39	60,00%	Severo

En la Figura 27 se presenta la tendencia de la severidad del fallo en los elementos rodantes con relación al diámetro del fallo.

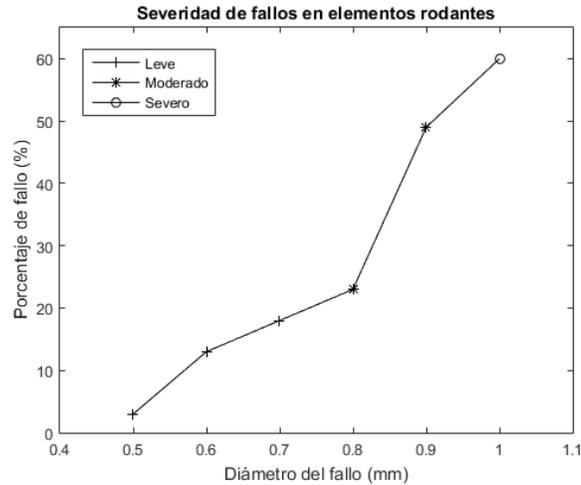


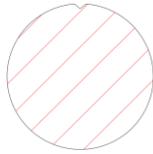
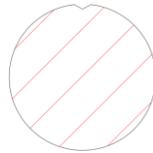
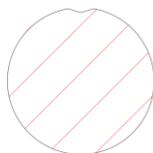
Figura 27. Tendencia de la severidad del fallo con relación al diámetro del elemento rodante.

### 2.6.4.3.3 Fallos propuestos

En la Tabla 19 se presenta siete niveles de severidad para fallos en los elementos rodantes del rodamiento SKF 1207 EKT8/C3. La geometría del fallo es en forma de cono.

Tabla 19. Fallos propuestos para los elementos rodantes.

Dimensiones	Código	Imagen
Buenas condiciones Diámetro: 8.65 mm Peso: 2.70563 gr	N	
N. elementos= 1 Diámetro= 0,50 mm Profundidad= 0,10 mm Peso= 2.70473 gr	RE_1	
N. elementos= 1 Diámetro= 0,60 mm Profundidad= 0,30 mm Peso= 2.70417 gr	RE_2	
N. elementos= 1 Diámetro= 0,70 mm Profundidad= 0,30 mm Peso= 2.70360 gr	RE_3	

N. elementos= 1 Diámetro= 0,80 mm Profundidad= 0,30 mm Peso= 2.70353 gr	RE_4	
N. elementos= 1 Diámetro= 0.90 mm Profundidad= 0,50 mm Peso= 2.70300 gr	RE_5	
N. elementos= 1 Diámetro= 1.00 mm Profundidad= 0,30 mm Peso= 2.70103 gr	RE_6	

## 2.7 Fallos en engranajes

Los engranes son uno de los principales elementos mecánicos que se encuentran en la gran mayoría de la maquinaria rotativa para transmitir movimiento, un fallo en uno de estos elementos puede generar daños catastróficos. Las causas de los fallos en engranajes es la desalineación, mala lubricación, fatiga, altas velocidades, entre otras. Los principales fallos que se presentan en los dientes de los engranajes es el agrietamiento (*cracking*), gripado (*scuffing*), rotura de diente (*brooken tooth*), picaduras (*pitting*) y desgaste (*wear*).

La detección de fallos en los engranes se realiza mediante técnicas de monitoreo de la condición, estas técnicas pueden ser: vibraciones, emisiones acústicas, análisis de corriente, termografía, entre otros. El monitoreo de vibraciones es la técnica más utilizada para detectar fallos en engranes, pero actualmente el monitoreo de emisiones acústicas está empezando a ganar terreno en la detección de fallos, debido a su precisión en detectar fallos incipientes. En el presente proyecto se seleccionaron dos fallos: grietas en los dientes del engrane y el gripado en la cara del diente del engrane.

### 2.7.1 Selección y caracterización de fallos en engranajes

#### 2.7.1.1 Fallo por grieta

Un fallo por grieta (*crack*) es uno de los modos de fallos más frecuentes en los engranes. La identificación de diferentes niveles de grietas, especialmente para las iniciales, es un gran desafío en el diagnóstico de fallos de engranes [80]. Las grietas pueden ocurrir en cualquier

parte del diente, debido a las altas tensiones mecánicas o de temperatura, defectos de los materiales por el uso de tecnología de fabricación de baja calidad [81], cargas excesivas o fatiga [82]. Si las grietas no son detectadas en una etapa temprana, terminan con la fractura del diente, por esta razón también son denominadas fracturas progresivas [83]. En la Figura 28 se puede observar el agrietamiento (*cracking*) en la raíz de un diente de engrane.



Figura 28. Grieta en la raíz de un diente de engrane [84].

La norma ISO 10825 clasifica al fallo por grietas en tres tipos, tal como se muestra en la Figura 29.

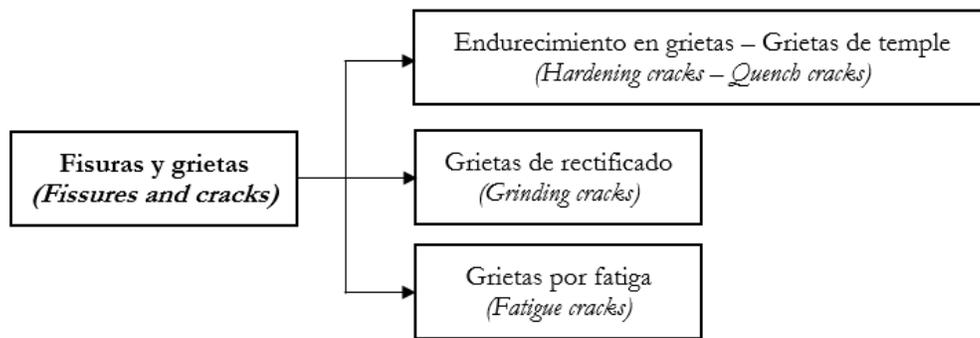


Figura 29. Clasificación de los fallos por grieta según la norma ISO 10825.

Las causas y su tipo de fallo son:

- i. **Grietas por fatiga (*fatigue cracks*):** son aquellas que surgen y se propagan bajo el efecto de tensiones repetidas o cíclicas que pueden ser inferiores a la resistencia a la tracción del material. En la Figura 30 se puede observar una grieta que se produce al sobrecargarse en diente del engrane, desarrollándose como una grieta por fatiga [81].



Figura 30. Grieta por fatiga [81].

- ii. **Grietas a lo largo del límite de la capa endurecida (*cracks along the boundary of the hardened layer*):** se producen daños en los engranes con dientes endurecidos cuando aparecen grietas internas en la interfaz del núcleo del diente y la capa endurecida. Estas grietas internas producen descamación de ángulos, bordes y partes superiores de los dientes, en la Figura 31 se puede observar este tipo de fallo [81].

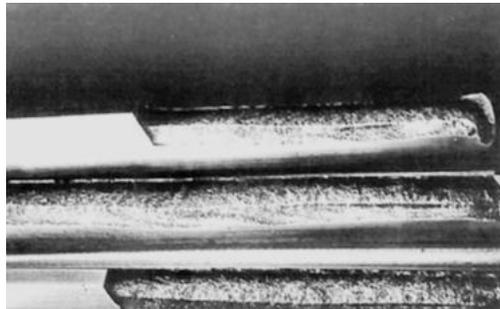


Figura 31. Grietas en el límite de la capa endurecida [81].

- iii. **Grietas de llanta y disco (*cracks of the wheel rim and disc*):** se originan en la ranura entre los dientes y se propagan a través del borde del disco. El fallo es causado por las tensiones de flexión que surgen en el borde, la causa más común es el grosor insuficiente. En los engranes de alta velocidad, las grietas pueden desarrollarse rápidamente bajo la acción de fuerzas centrífugas, lo que resulta en un daño catastrófico, en la Figura 32 se presenta este tipo de grieta [81].



Figura 32. Grietas de la llanta y disco [81].

- iv. **Grietas de rectificado (*grinding cracks*):** son grietas superficiales que pueden surgir durante o después del rectificado de los dientes. Estas grietas son pequeñas en longitud y profundidad además aparecen como grietas casi paralelas. La profundidad de la fisura es de 0.07-0.13 mm. Las grietas pueden ser el resultado de un incorrecto rectificado, excesiva profundidad del rectificado, aumento de la velocidad de corte y/o suministro insuficiente de refrigerante. En la Figura 33 se presenta este tipo de fallo [81].

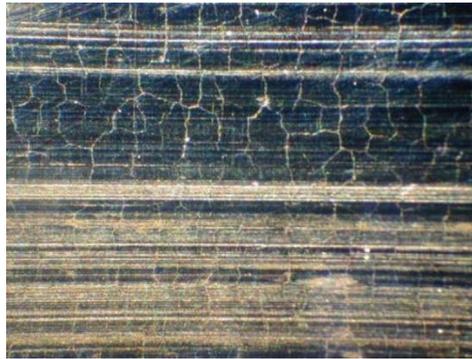


Figura 33. Grietas de rectificado [81].

#### 2.7.1.1.1 Características del fallo de grieta por fatiga

Debido a la aplicación de carga sobre los dientes del engrane estos están sometidos a la flexión. Cuando se repite la carga durante varios ciclos, se produce un fallo por fatiga, debido a la flexión del engrane. La fatiga en el diente del engrane es la causa raíz de las grietas, por lo que se dice que es un defecto localizado, se propaga a lo largo del diente causado por cargas repetidas y generalmente ocurre en tres estados [85] [66]:

- i. **Iniciación de la grieta:** formación de una grieta pequeña en alguna región de altas concentraciones de tensiones como se presenta en la Figura 34.

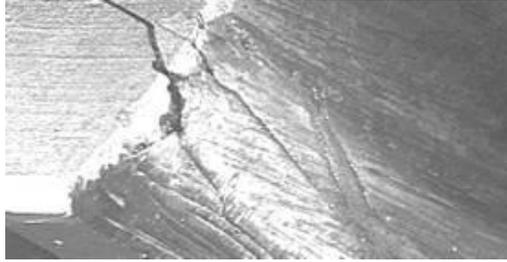


Figura 34. Iniciación de una grieta [85].

- ii. **Propagación de grietas:** las grietas avanzan de forma gradual en cada ciclo de carga como se presenta en la Figura 35.



Figura 35. Avance de la grieta [85].

- iii. **Fractura:** cuando las grietas crecen lo suficiente, se produce una fractura súbita como se observa en la Figura 36.



Figura 36. Fractura del diente por fatiga [86].

En la Tabla 20 se presenta un resumen de las características que presenta un engrane con grietas [80], [81], [87], [88].

Tabla 20. Características de un engrane con grietas.

<b>Categoría de fallo</b>	Fisuras y grietas ( <i>ISO 10825</i> )
<b>Tipo del fallo</b>	Grietas por fatiga
<b>Causas</b>	Tratamiento térmico inadecuado Imperfecciones en el material Desalineación Cargas excesivas Fatiga
<b>Localización</b>	Inicialmente se presenta en la raíz del diente del engrane
<b>Dimensiones</b>	Ángulo= 30°, 45°, 70° Profundidad= 0 – 4 mm (No debe superar la mitad del espesor del diente) Longitud= hasta toda la longitud del diente Espesor= 0.1 – 1 mm
<b>Evolución</b>	Inician como pequeñas muescas en el área de la raíz del diente del engrane, debido a que éste es el punto de mayor esfuerzo de flexión en la superficie del diente; conforme avanzan los ciclos de trabajo las grietas empiezan a expandirse a lo largo del diente que en casos severos pueden romper el diente.
<b>Soluciones</b>	Simetría al momento de la construcción del engranaje para evitar variaciones bruscas en el grosor de la sección. Diseño de engranajes con concentradores de esfuerzo. Elección del medio de endurecimiento y la temperatura, teniendo en cuenta el diseño del engranaje y la templabilidad del acero.

**Imagen**

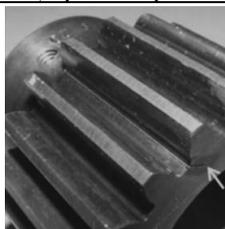


Figura 37. Fallo por grieta [82]

En la Tabla 21 se presentan los diferentes niveles de severidad para el fallo por grietas, donde se resumen las principales características que se presentan mientras el fallo va evolucionando. Para determinar la severidad de las grietas se toma principalmente la profundidad y la propagación a lo largo del ancho de la cara del diente del engrane [5], [89].

#### 2.7.1.1.2 Revisión bibliográfica de la construcción de fallos de grietas

En la Tabla 22 se presenta un resumen de la construcción de grietas en engranes. Los puntos principales a tomar en cuenta son la forma geométrica y constructiva, el método de construcción, las dimensiones y el nivel de severidad, en casos que el autor no presente los niveles de severidad, éste se basará con el porcentaje de grieta que da la Tabla 21.

Tabla 21. Niveles de severidad de grietas en un engrane.

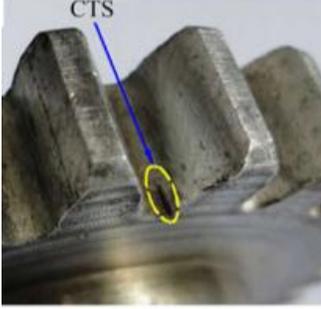
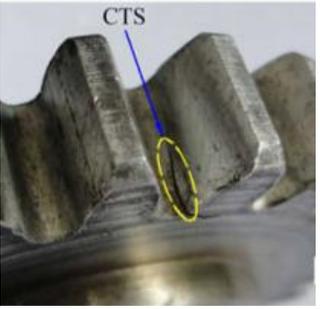
ESTADO DEL ENGRANE		Normal	Leve	Moderado	Severo
IMAGEN DEL FALLO					
DESCRIPCIÓN DEL FALLO	Causa del fallo	-----	Alta concentración de tensiones	Cargas periódicas	Cargas periódicas suficientemente elevadas
	Estado del diente del engrane	-----	Micro grietas en la raíz del diente	Línea más notoria en la base del diente	La grieta alcanza un tamaño crítico
	Ubicación	-----	Se localiza en la raíz del diente	Se localiza en la raíz del diente	Se localiza en la raíz del diente
	Porcentaje de la grieta	-----	Menores al 50% del ancho de cara del diente y profundidades hasta 1 mm	Ente 50% y 75% del ancho de cara del diente y profundidades entre 1 y 1.5 mm	Mayor al 75% del ancho de cara del diente y profundidades mayores a 1.5 mm
	Ruido durante su funcionamiento	No causa ruido	Poca presencia de ruido durante su funcionamiento	Poca presencia de ruido durante su funcionamiento	Causa ruido considerable

Tabla 22. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos para grietas en engranes.

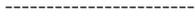
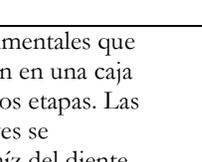
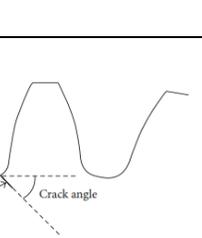
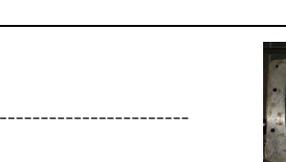
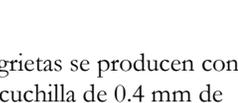
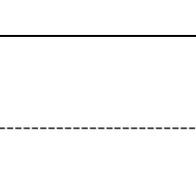
Referencia	Descripción del fallo	Forma geométrica	Forma constructiva	Método de construcción	Dimensiones del fallo	Nivel de severidad
[90]	La grieta se realiza en un sólo diente de cada engrane justo en la región del filete (lado cargado).			Las grietas se fabricaron utilizando mecanizado por electroerosión ( <i>Electrodischarge machining, EDM</i> ), con hilo de 0.10 mm de diámetro.	Largo: 0.20mm Ancho: 0.13 mm	Leve: 2.04%
[80], [91]	Se fabrican engranes con diferentes niveles de severidad de grietas, bajo diferentes condiciones de trabajo.			Las grietas se producen con una cuchilla de 0.4 mm de espesor.	Profundidad (mm): 0.25, 0.5, 0.75, 1 Ancho (mm): 6.25, 12.5, 18.75, 25 Espesor (mm): 0.4 Angulo (grados): 45	Leve: 25% Moderado: 50% Moderado: 75% Severo: 100%
[92]	Las pruebas experimentales que se realizaron fueron en una caja de engranajes de dos etapas. Las grietas leves y graves se procesaron en la raíz del diente #40.				Leve Longitud= 5mm  Severo Longitud= 15mm	Leve: 10%  Moderado: 30%
[93]	Se tiene una caja de engranajes, donde el piñón se lo utiliza para evaluar los distintos niveles de severidad de agrietamiento en la raíz del diente, bajo diferentes condiciones de carga y velocidad.			Las grietas se fabricaron utilizando EDM, con hilo de 0.25 mm de diámetro.	Longitud de la grieta: 10%, 20%, 30%, 40%, 50% de la longitud del diente.	Leve: 10-40% Moderado: 50%

Tabla 22. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos para grietas en engranes.

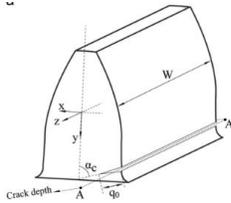
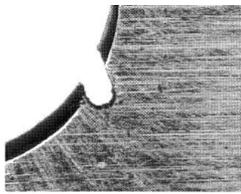
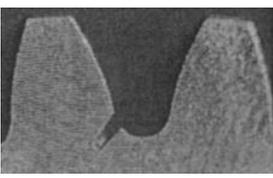
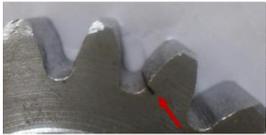
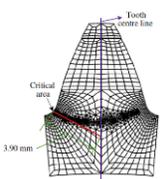
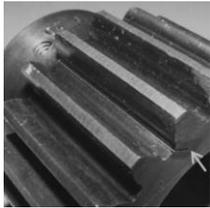
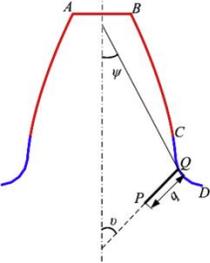
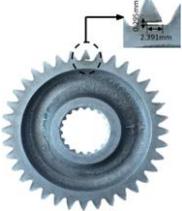
Referencia	Descripción del fallo	Forma geométrica	Forma constructiva	Método de construcción	Dimensiones del fallo	Nivel de severidad
[87]	La grieta se extiende a lo largo de todo el ancho del diente con una distribución uniforme de la profundidad de la grieta.		-----	-----	Se introdujeron 13 casos de agrietamientos de diferentes profundidades, desde 0 a 1.2 mm con un paso de 0.1 mm.	Leve: 0 - 40.54 %
[88]	Se mecaniza una muesca en la raíz del diente del engrane, para producir un defecto desde el cual podría iniciar la grieta.	-----		La muesca atraviesa todo el ancho de la cara del engranaje, esto se realiza mediante el proceso EDM.	La profundidad de la grieta es de 0.254 mm (0.010 pulgadas)	Leve: 10.2%
[94]	Los engranes defectuosos se obtuvieron mediante la introducción de grietas por fatiga. la propagación de las grietas es a través de la cara del diente. En el caso más severo del fallo la grieta cubre toda la cara del diente	-----		Se utilizó una fresa de disco de 55mm de diámetro y 0.3 mm de espesor.	Todos los fallos Espesor: 0.3 mm Angulo: 40° Fallo 1 Prof: 0.8 mm Longitud: 8mm Fallo 2 Prof: 1.6 mm Longitud:16 mm Fallo3 Prof: 2.4 mm Longitud:25 mm	Fallo 1 Leve: 32% Fallo2: Moderado: 64% Fallo 3: Severo: 100%

Tabla 22. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos para grietas en engranes.

Referencia	Descripción del fallo	Forma geométrica	Forma constructiva	Método de construcción	Dimensiones del fallo	Nivel de severidad
[95]	Se introducen dos engranes en condición defectuosa. Las grietas introducidas fueron de forma individual. La diferencia entre las grietas es la profundidad.			Las grietas en la raíz del diente fueron creadas usando EDM.	Long: 30 mm Ancho: 0.25 mm Fallo1 Prof: 1.5 mm Fallo2 Prof: 2.5 mm	Fallo1 Moderado: 63.8% Fallo2 Severo: 100%
[82]	La grieta fue creada en el engranaje solar, se inicia con longitudes pequeñas y para poder amplificar los síntomas del fallo se crea una grieta que atraviesa todo el ancho del diente.			La grieta fue creada en el diente del engranaje solar utilizando EDM.	Profundidad: 3.9 mm. La grieta atraviesa todo el ancho de la cara del diente.	Severo: 100%
[96]	En una caja reductora de una etapa se implanta una grieta cerca de la raíz del diente del engrane accionado. Se obtienen cuatro profundidades para la grieta. La longitud del fallo es en todo el ancho de cara del diente.			La grieta se fabrica cerca de la raíz del diente mediante EDM.	Profundidades: q1: 1 mm q2: 2 mm q3: 3 mm q4: 4 mm Ángulo $\psi = 45^\circ$	q1 Moderado: 63.7% q2-q4 Severo: >75%
[97]	Se generan defectos artificiales en el engrane de salida sano. Las grietas son producidas en tres dimensiones diferentes de corte en la raíz de un diente.			Se producen tres tipos diferentes de grietas mediante EDM.	Grieta 1: Prof: 1.475 mm Grieta 2: Prof: 2.395 mm Grieta 3: Prof: 3.391 mm	Las grietas sobrepasan la mitad del espesor del diente. Severo: 100%

La Tabla 22 presentó un resumen de los principales métodos para la construcción de grietas en la raíz de los dientes de engranajes. Se presenta mayor atención en los fallos incipientes, debido a que, si no son tomados en cuenta estos van progresando de forma rápida hasta volverse un fallo severo y producir averías en las maquinarias rotativas.

El método más utilizado para la construcción de fallos es el mecanizado por electroerosión por hilo, debido a que este mecanizado es de alta precisión, y no presenta rebabas en los dientes del engrane [90], [93]. Como un número máximo de niveles de severidad se introducen trece casos de grietas a diferentes profundidades, los cuales fueron presentados en [87].

El fallo por grieta es simulado principalmente en la raíz del diente, esto se debe a que un engranaje que trabaja bajo diferentes cargas y velocidades genera grandes tensiones en la raíz de sus dientes, las cuales se pueden propagar en diferentes profundidades y longitudes.

#### 2.7.1.1.3 Experimentación para grietas en engranes

Luego de la revisión bibliográfica se ha optado por la construcción de fallos usando el mecanizado por electroerosión como se propone en [90], [91], [93]. La grieta se realizará en la raíz del diente, para determinar el nivel de severidad en cada fallo se tendrá en cuenta principalmente la profundidad y longitud de la grieta, mientras que el espesor y el ángulo de propagación en las grietas se mantendrán constantes para todos los casos.

#### 2.7.1.1.4 Nivel de severidad para grietas en engranes

Como método de determinación del porcentaje de grieta se calculará la profundidad y su ancho para lo cual se requiere de los siguientes datos presentados en la Tabla 23 y la Figura 38.

Tabla 23. Características geométricas para el engrane.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Módulo (m)	2.25
Ancho cara diente (c)	20.3 [mm]
Ángulo de la grieta ( $\alpha$ )	45°

El espesor del diente, el ancho y el ángulo de la grieta se representan en la Figura 38 (a) y (b), respectivamente. El diámetro de hilo del EMD es de 0.4 mm.

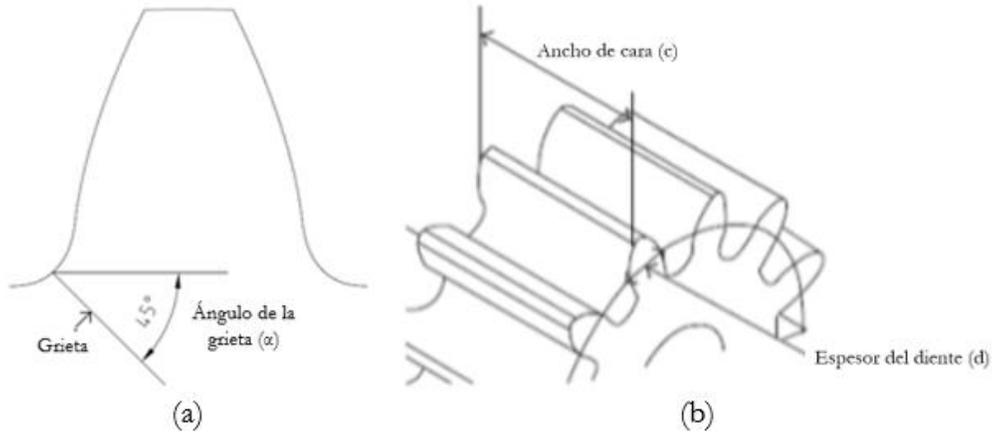


Figura 38. (a) Ángulo de la grieta, (b) ancho de la cara y espesor del diente [91].

Mediante la Ecuación 6 se calcula la profundidad de la grieta, y con la Ecuación 7 se realiza el cálculo del ancho de la grieta.

$$P_{grieta} = \frac{N_s}{100\%} * \frac{d}{2} [mm] \quad \text{Ecuación 6}$$

$$L_{grieta} = \frac{N_s}{100\%} * c [mm] \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$P_{grieta}$ : profundidad de la grieta

$L_{grieta}$ : longitud de la grieta

$N_s$ : nivel de severidad [%]

$d$ : espesor del diente [mm]

$c$ : ancho de cara del diente [mm]

Para el cálculo del espesor del diente primero se tiene el paso circular (P) que se calcula mediante la Ecuación 8:

$$P = m * \pi [mm] \quad \text{Ecuación 8}$$

Finalmente, el espesor del diente (d) se calcula por medio de la Ecuación 9:

$$d = \frac{P}{2} [mm] \quad \text{Ecuación 9}$$

Para el nivel de severidad ( $N_s$ ) los valores se obtienen de trabajos de titulación anteriores realizado en el GIDTEC, la Tabla 24 muestra estos niveles de severidad.

Tabla 24. Porcentajes de severidad.

$N_s$ (%)								
5	12,5	25	37,5	45	60	75	85	100

La máxima profundidad de la grieta es la mitad del espesor del diente, debido a que el diente se romperá rápidamente cuando la profundidad sea más de la mitad del espesor del diente [80], [91]. En todos los casos, la grieta se construirá en un sólo diente con un ángulo de 45° y un espesor de 0.40 [mm]. En la Tabla 25 se especifica la profundidad y la longitud para cada nivel de severidad.

Tabla 25. Niveles de severidad para grietas.

Porcentaje de severidad	Profundidad [mm]	Longitud [mm]	Nivel de severidad
5,00%	0,10	1,00	Leve
12,50%	0,20	2,50	Leve
25,00%	0,50	5,00	Leve
37,50%	0,70	7,60	Leve
45,00%	0,90	9,00	Leve
60,00%	1,00	12,00	Moderado
75,00%	1,50	15,00	Moderado
85,00%	1,70	17,00	Severo
100,00%	1,90	20,30	Severo

En la Figura 39 se presenta la evolución de la severidad del fallo.

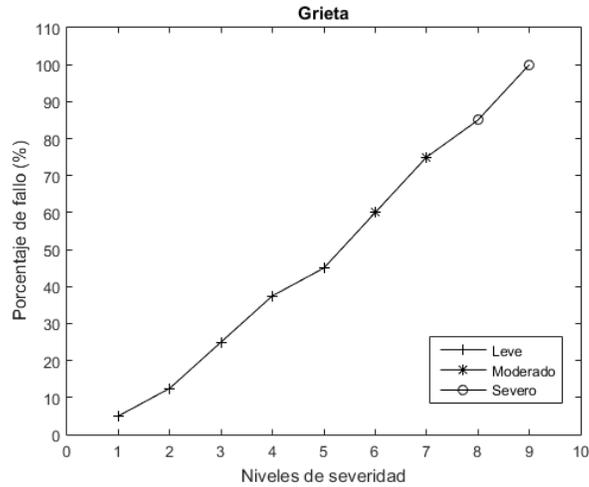


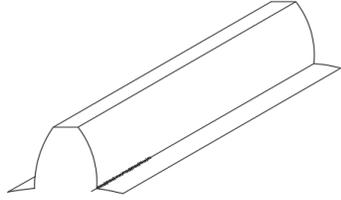
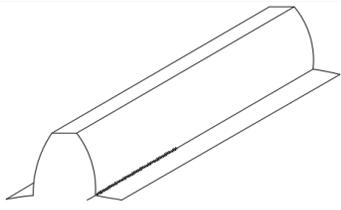
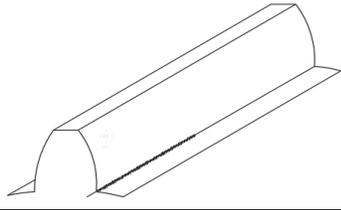
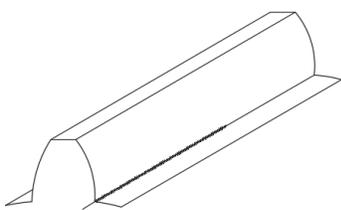
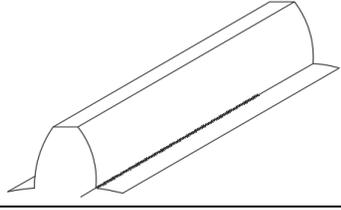
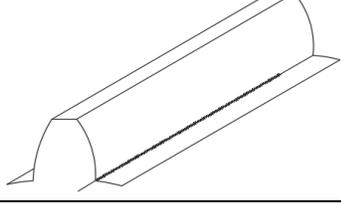
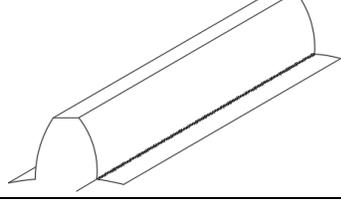
Figura 39. Evolución de la severidad del fallo.

### 2.7.1.1.5 Fallos propuestos

Con las longitudes y profundidades calculadas, se proceden a construir los fallos en los engranes, en la Tabla 26 se presentan los nueve grados de severidad propuestos.

Tabla 26. Fallos propuestos para la generación de grietas.

Posición	Código interno	Tipo de fallo	Descripción del fallo	Imagen
Z1	N	Normal	-----	
Z1	Z1_4_1	Grieta	Grieta en la raíz del diente Profundidad: 0.10 mm Ancho: 1.00 mm Grosor: 0.40 mm $\alpha=45^\circ$ Porcentaje de fallo 5%	
Z1	Z1_4_2	Grieta	Grieta en la raíz del diente Profundidad: 0.20 mm Ancho: 2.50 mm Grosor: 0.40 mm $\alpha=45^\circ$ Porcentaje de fallo 12.50%	

Z1	Z1_4_3	Grieta	Grieta en la raíz del diente Profundidad: 0.50 mm Ancho: 5.00 mm Grosor: 0.40 mm $\alpha=45^\circ$ Porcentaje de fallo 25.00%	
Z1	Z1_4_4	Grieta	Grieta en la raíz del diente Profundidad: 0.70 mm Ancho: 7.60 mm Grosor: 0.40 mm $\alpha=45^\circ$ Porcentaje de fallo 37.50%	
Z1	Z1_4_5	Grieta	Grieta en la raíz del diente Profundidad: 0.90 mm Ancho: 9.00 mm Grosor: 0.40 mm $\alpha=45^\circ$ Porcentaje de fallo 45,00%	
Z1	Z1_4_6	Grieta	Grieta en la raíz del diente Profundidad: 1.00 mm Ancho: 12.00 mm Grosor: 0.40 mm $\alpha=45^\circ$ Porcentaje de fallo 60.00%	
Z1	Z1_4_7	Grieta	Grieta en la raíz del diente Profundidad: 1.50 mm Ancho: 15.00 mm Grosor: 0.40 mm $\alpha=45^\circ$ Porcentaje de fallo 75,00%	
Z1	Z1_4_8	Grieta	Grieta en la raíz del diente Profundidad: 1.70 mm Ancho: 17.00 mm Grosor: 0.40 mm $\alpha=45^\circ$ Porcentaje de fallo 85.00%	
Z1	Z1_4_9	Grieta	Grieta en la raíz del diente Profundidad: 1.90 mm Ancho: 20.30 mm Grosor: 0.40 mm $\alpha=45^\circ$ Porcentaje de fallo 100%	

### 2.7.1.2 Fallo por gripado

El fallo por gripado o rayado, conocido en inglés como “*scuffing*”, se presenta como una eliminación o deformación plástica de la superficie de contacto de los dientes, causada principalmente por sobrecarga en el funcionamiento durante ciclos prolongados y mala lubricación. Una vez iniciado el fallo este se propaga pasando de líneas de espesor despreciables a líneas marcadas incluso del mismo espesor del ancho del diente [98], [99], [100]. En la Figura 40 se presenta el fallo por gripado.

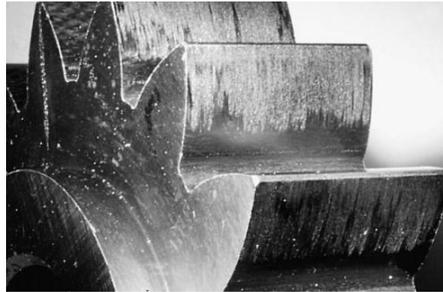


Figura 40. Fallo por gripado en la cara del diente de un engrane [101].

Las normas ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010-E95, dividen al fallo por gripado en tres tipos tal como se muestra en la Figura 41.

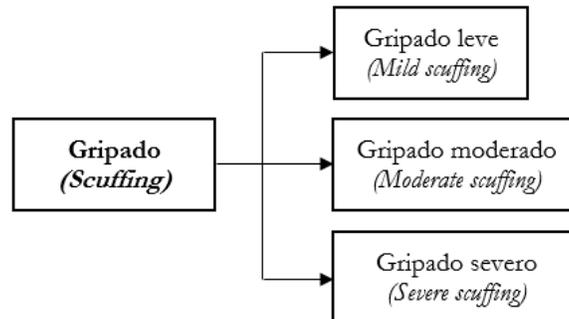


Figura 41. Clasificación de fallos por gripado según la norma ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010 E-95.

- i. **Gripado leve:** el gripado leve puede ser corregido por sí mismo después de que la máquina siga operando, una forma fácil de detectar que se ha producido el gripado leve es por medio de una inspección visual [102]. En la Figura 42 se presenta un ejemplo de gripado leve en el diente de un engrane.

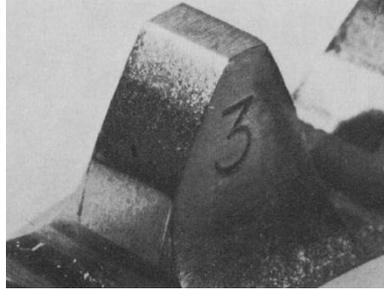


Figura 42. Gripado leve [102].

- ii. **Gripado moderado:** la Figura 43 muestra una etapa intermedia de gripado, donde el diente del engrane está gravemente dañado, pero no roto. Este fallo se puede obtener al aplicar cargas elevadas [102].

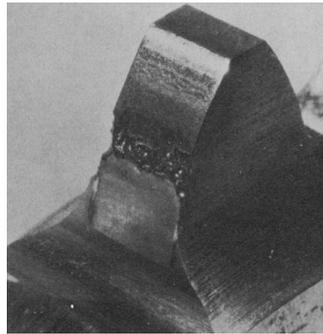


Figura 43. Gripado moderado [102].

- iii. **Gripado severo:** el gripado severo puede conducir a la rotura del diente [102], se produce cuando la película de lubricación es muy delgada, y junto con una alta temperatura de contacto, la posibilidad del gripado es muy alta, la Figura 44 muestra un ejemplo del gripado severo [103].

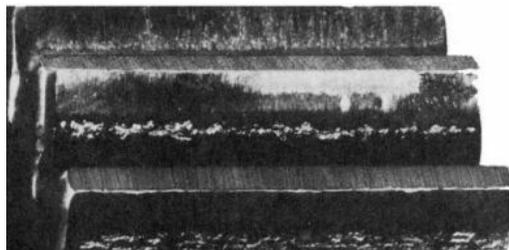


Figura 44. Gripado severo [104].

### 2.7.1.2.1 Características del fallo por gripado

El fallo por gripado empieza con líneas leves que no siguen un patrón determinado, las cuales van avanzando a medida que el fallo prosigue. El *ASM Handbook* [105], define el gripado como un daño localizado causado por la aparición de ralladuras o arañazos entre las superficies deslizantes. Las distintas características que se presentan en este fallo se describen en la Tabla 27 [102], [106].

Tabla 27. Características del fallo por gripado.

<b>Categoría de fallo</b>	Gripado ( <i>ISO 10825</i> )
<b>Tipo del fallo</b>	Gripado
<b>Causas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento abrupto de fricción.</li> <li>- Altas velocidades de deslizamiento.</li> <li>- Aumento de carga.</li> <li>- Mala lubricación.</li> <li>- Temperaturas excesivas.</li> </ul>
<b>Localización</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Línea de paso.</li> <li>- Raíz del diente.</li> <li>- Altura de la cabeza del diente.</li> </ul>
<b>Dimensiones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Leve: <math>L &lt; 2 [mm]</math></li> <li>- Moderado: <math>2 [mm] \leq L &lt; 4 [mm]</math></li> <li>- Severo: <math>L \geq 4 [mm]</math></li> </ul>
<b>Dirección</b>	Se presenta comúnmente de forma vertical en el diente del engranaje.
<b>Evolución</b>	Una vez iniciado el fallo por gripado, éste afecta a cada diente del engranaje, lo que resulta en un gran volumen de residuos de desgaste. Las marcas que se presentan en los dientes del engrane están en la dirección de deslizamiento.
<b>Soluciones</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento de la velocidad de laminación.</li> <li>- Incremento de la viscosidad del lubricante.</li> </ul>
<b>Imagen</b>	

En la Tabla 28 se presentan los diferentes niveles de severidad para el fallo por gripado, donde se resumen las principales características que se presentan mientras el fallo va evolucionando. Para determinar la severidad del gripado se toma principalmente la longitud y el número de líneas que se presentan en todo el ancho de la cara del diente del engrane.

Tabla 28. Niveles de severidad del gripado en un engrane [103].

ESTADO DEL ENGRANE		Normal	Fallo leve	Fallo moderado	Fallo severo
IMAGEN DEL FALLO					
DESCRIPCIÓN DEL FALLO	Causa de fallo	-----	Defectos de fabricación Mala lubricación.	Unión de dientes a alta presión. Velocidades elevadas. Crestas en los dientes que provocan líneas tras elevar la temperatura. Mala lubricación. Cargas de trabajo altas	Velocidades elevadas. Operación en malas condiciones. Elevadas cargas de trabajo.
	Estado del diente del engrane	-----	Líneas perceptibles visualmente que pueden desaparecer durante el funcionamiento.	Líneas iniciales perceptibles a la vista. No responden a un patrón determinado.	Líneas marcadas que pueden desbordar en rotura del diente.
	Ancho de líneas (L)	-----	$L < 2mm$ < 10%	$2mm \leq L < 4mm$ 10 a 30%	$L \geq 4mm$ > 30%
	Ruido durante su funcionamiento	No causa ruido	Sin ruido en el funcionamiento.	Bajo ruido.	Ruido alto.

### 2.7.1.2.2 Revisión bibliográfica de la construcción de fallos de gripado

El estudio de gripado se ha visto limitado a pruebas de ejecución hasta el fallo o también conocido en inglés como *run to fault* normadas según la ISO 14635, en las cuales se da una carga mayor a la carga de diseño de tal forma que al terminar la prueba los dientes presentaran señales de fallo en las superficies de contacto. De esta forma, diversos autores como [107], [108], [109] repiten este experimento, obteniendo patrones similares a los que se presentan en la Figura 45. Conforme aumenta la severidad del gripado se puede notar con más claridad la propagación del fallo a lo largo del ancho de cara del diente de engranaje. Es importante notar que el gripado se forma de manera vertical en la cara del diente.

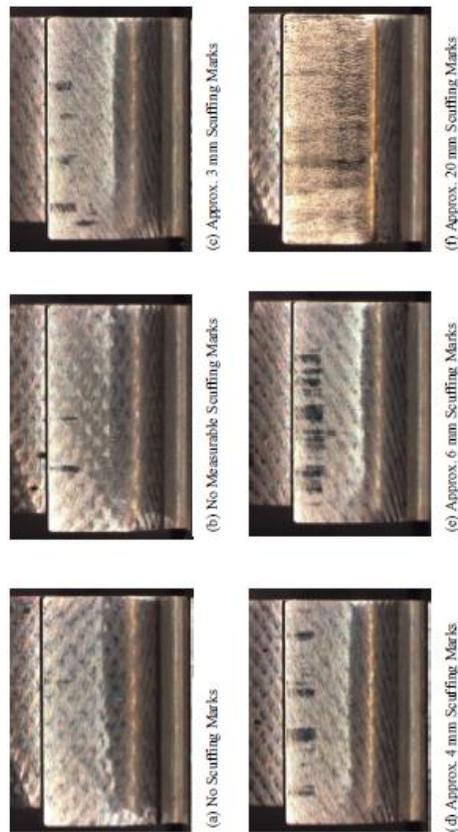


Figura 45. Patrones de fallo [100].

En la Tabla 29 se presenta un resumen de la parte experimental para la construcción del fallo por gripado en engranes. Los puntos principales a tomar en cuenta es la forma geométrica y constructiva, el método de construcción, las dimensiones y la dirección de las líneas en el ancho de cara del engrane.

Tabla 29. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos por gripado en engranes.

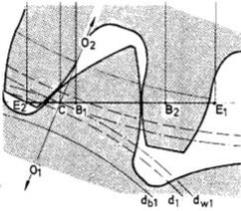
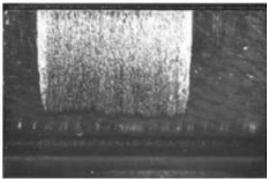
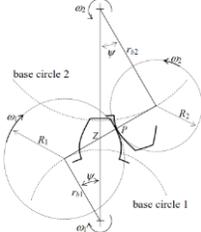
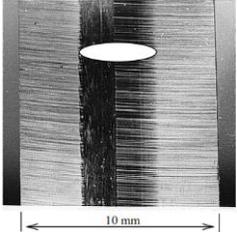
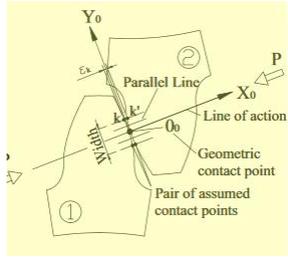
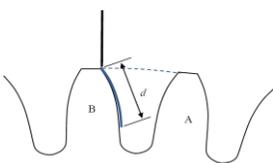
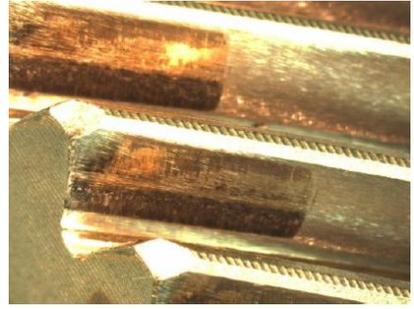
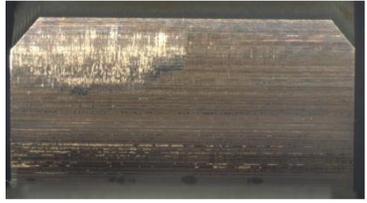
Referencia	Descripción del fallo	Forma geométrica	Forma constructiva	Método de construcción	Dimensiones del fallo	Dirección de líneas
[110]	Utilizan un equipo de prueba estandarizado según la norma DIN 51354. Los engranajes tienen una forma de diente con distribución deslizante irregular que está especialmente diseñada para un alto riesgo de gripado.			Las pruebas de gripado se realizan a una velocidad de línea de paso de 8.3 m/s y una carga incrementada por pasos. La temperatura inicial del aceite es de 90°C.	-----	Vertical
[111]	La experimentación del gripado se lleva a cabo bajo condiciones severas de carga, velocidad de deslizamiento y temperatura.			Los ensayos de gripado se realizaron a velocidades de deslizamiento comprendidas entre 7 m/s y 20 m/s.	Espesor: 3.2 um 2.7 um	Vertical
[112]	Se utiliza un engrane cónico en el cuál se realizará la generación del gripado incrementándole gradualmente la carga.	-----		Para producir el fallo del engranaje, el par de carga se incrementó desde la primera hasta la 12ª etapa de carga. Después de la prueba los dientes del piñón fueron examinados para detectar signos de gripado.	Área de fallo Sin recubrimiento: $A_p=1575 \text{ mm}^2$ Con recubrimiento: $A_p=960 \text{ mm}^2$	-----

Tabla 29. Revisión bibliográfica para la construcción de fallos por gripado en engranes.

Referencia	Descripción del fallo	Forma geométrica	Forma constructiva	Método de construcción	Dimensiones del fallo	Dirección de líneas
[113]	Las pruebas de gripado se realizaron con la máquina FZG con varios tipos de aceite.			El fallo se realizó con una velocidad de 1450 rpm, con aceite a una temperatura de 90°C y una carga de 1590 N.	-----	Vertical
[114]	Se presenta una configuración de prueba diseñada para operar pares de engranajes helicoidales en condiciones de altas velocidades y altas cargas para que ocurran fallos de gripado.			Las pruebas de gripado consistieron en 17 etapas de velocidad, iniciando con una velocidad de 1000 rpm a 9000 rpm en incrementos de 500 rpm. Cada etapa de velocidad se ejecutó durante un periodo de 10 minutos, lo que equivale a una duración de prueba completa de 170 minutos.	-----	Vertical
[115]	Se realizan pruebas de gripado por carga en engranajes rectos, bajo condiciones de velocidad y temperatura constante.	-----		La prueba de gripado consiste en 12 etapas de carga. Se requiere que cada etapa sea de 21.700 ciclos y se realice independientemente, con la temperatura del aceite fijada a 90°C al principio de cada etapa.	Rugosidades (piñón): T11: 0.877 um T12: 0.499 um T13: 0.610 um Rugosidades (engrane) T11: 0.754 um T12: 0.763 um T13: 0.469 um	Vertical

La detección de fallos incipientes o iniciales del gripado es compleja, esto se debe a que los engranes trabajan a velocidades y cargas altas, por lo cual se verán afectados por este tipo de fallo. La temperatura del lubricante también juega un rol importante en la generación del gripado. El número máximo de pruebas que se han realizado es con 12 fallos aplicando diferentes condiciones de carga para generar el gripado.

Para generar el gripado en los dientes del engrane la mayoría de autores desarrollaron experimentos de ejecución hasta el fallo, aplicando diferentes cargas, temperaturas del lubricante y velocidades, obteniendo resultados satisfactorios de gripado. La ralladura se genera principalmente con líneas verticales en el ancho de la cara del diente de engrane, dependiendo de las condiciones de trabajo, este fallo irá cubriendo una mayor área.

### 2.7.1.2.3 Experimentación para gripado en engranes

Después de la revisión bibliográfica, se concluye que ningún autor genera los fallos artificialmente, sino el método más común que llevan es desarrollar experimentos de ejecución hasta el fallo, bajo distintas condiciones de trabajo, para así obtener resultados de fallo por gripado. En el presente caso de estudio el fallo será creado artificialmente por medio del mecanizado por electroerosión, debido a que con esta técnica de mecanizado se puede ir controlando los porcentajes requeridos del fallo.

### 2.7.1.2.4 Nivel de severidad para gripado en engranes

El porcentaje del área ocupada por el gripado en un engrane, es la relación existente entre el área de la cara del diente y el área ocupada por el gripado, tal como se muestra en la Figura 46. En la Tabla 30 se presentan los parámetros para iniciar con el cálculo del área del diente del engrane.

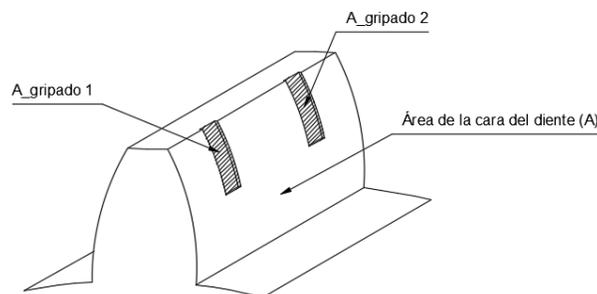


Figura 46. Relación entre área de gripado y el área de la cara del diente.

Tabla 30. Característica geométrica para el engrane.

Parámetro	Valor
Módulo ( $m$ )	2.25
Número de dientes ( $Z$ )	32
Ángulo de presión ( $\alpha$ )	20°
Ancho de diente ( $c$ )	20.30 [mm]

Para calcular el área de la cara del diente se requiere multiplicar la altura de trabajo activa por el ancho del diente siguiendo el proceso:

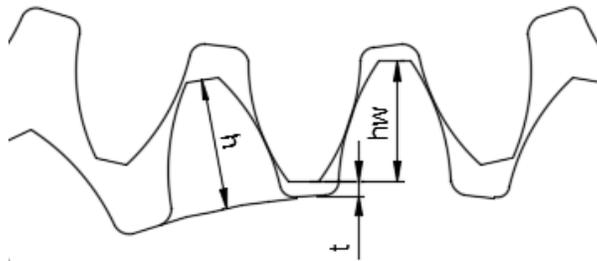


Figura 47. Altura activa del diente del engrane.

Donde:

$h$ : altura total del diente

$h_w$ : altura de trabajo activa del diente

$t$ : juego en cabeza o tolerancia

Para obtener el porcentaje de gripado se debe seguir los siguientes pasos:

1. De la Figura 47 se calcula la altura total del diente ( $h$ ):

$$h = 2.25 * m \text{ [mm]} \quad \text{Ecuación 10}$$

2. Se calcula el juego en cabeza o tolerancia ( $t$ ):

$$t = 0.25 * m \text{ [mm]} \quad \text{Ecuación 11}$$

3. Se calcula la altura de trabajo activa del engrane ( $h_w$ ):

$$h_w = h - t \text{ [mm]} \quad \text{Ecuación 12}$$

4. Con la altura de trabajo activa se calcula el área de la cara del diente ( $A$ ):

$$A = h_w * c \text{ [mm}^2\text{]} \quad \text{Ecuación 13}$$

5. Se calcula el área de gripado tal como se muestra en la Figura 48.

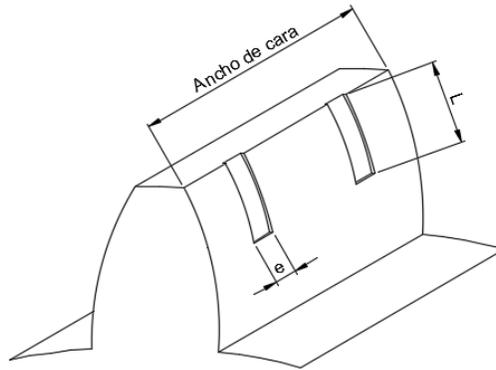


Figura 48. Área de gripado.

Donde:

Número de líneas:  $Nl$

Longitud:  $L$  [mm]

Espesor de línea:  $e$  [mm]

$$A_{gripado} = Nl * L * e \text{ [mm}^2\text{]} \quad \text{Ecuación 14}$$

6. Se calcula el porcentaje de fallo:

$$\%_{gripado} = \frac{A_{gripado}}{A} * 100 \quad \text{Ecuación 15}$$

El área total de un diente del engrane es 90 [mm<sup>2</sup>], el cual se obtuvo por medio de la Ecuación 13. El fallo por gripado será simulado en un sólo diente del engrane, con una profundidad constante de 0.1 mm para todos los casos. La Tabla 31 especifica el porcentaje del nivel de severidad para la generación del gripado.

Tabla 31. Niveles de severidad para el gripado.

Número de líneas	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Área del gripado (mm <sup>2</sup> )	Porcentaje de fallo (%)	Severidad
2	1,50	0,50	1,50	1,67	Leve
2	1,50	1,00	3,00	3,33	Leve
2	1,50	1,50	4,50	5,00	Leve
2	1,50	2,00	6,00	6,67	Leve
2	2,00	2,00	8,00	8,89	Leve
2	2,50	3,00	15,00	16,67	Moderado
2	3,00	3,50	21,00	23,33	Moderado
2	4,50	4,00	36,00	40,00	Severo
3	4,50	4,00	54,00	60,00	Severo

En la Figura 49 se presenta la evolución del fallo por gripado.

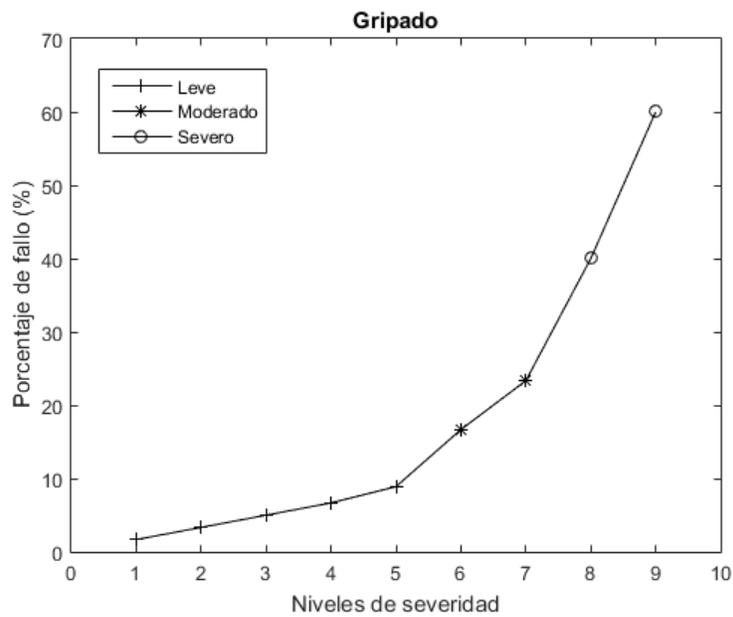
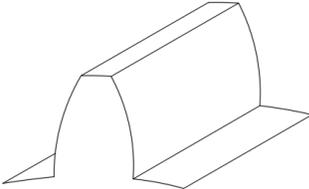
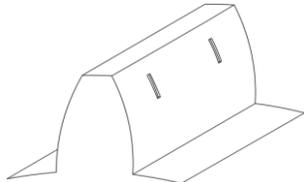
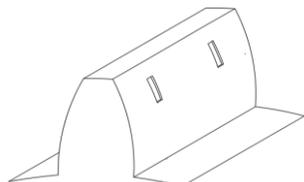
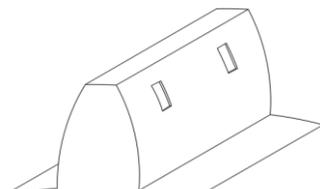
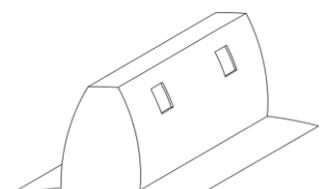
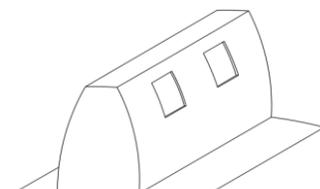
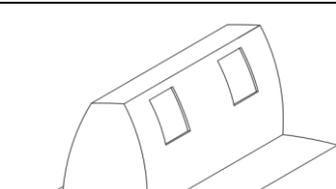


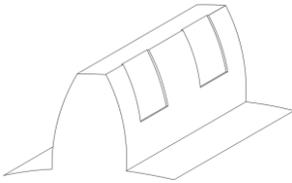
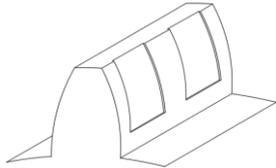
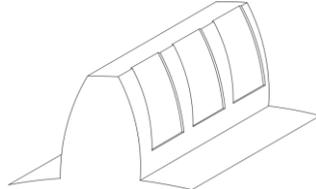
Figura 49. Evolución de la severidad del fallo por gripado.

### 2.7.1.2.5 Fallos propuestos

Con el porcentaje de gripado calculado se procede a simular los fallos en los engranes. La Tabla 32 muestra los fallos propuestos.

Tabla 32. Fallos propuestos para el gripado.

Posición	Código interno	Tipo de fallo	Descripción del fallo	Imagen
Z1	N	Normal	-----	
Z1	Z1_2_1	Gripado	Longitud: 1.50 mm Espesor: 0.50 mm Profundidad: 0.10 mm Líneas: 2 Porcentaje de Gripado: 1.67 %	
Z1	Z1_2_2	Gripado	Longitud: 1.50 mm Espesor: 1.00 mm Profundidad: 0.10 mm Líneas: 2 Porcentaje de Gripado: 3.33 %	
Z1	Z1_2_3	Gripado	Longitud: 1.50 mm Espesor: 1.50 mm Profundidad: 0.10 mm Líneas: 2 Porcentaje de Gripado: 5.00 %	
Z1	Z1_2_4	Gripado	Longitud: 1.50 mm Espesor: 2.00 mm Profundidad: 0.10 mm Líneas: 2 Porcentaje de Gripado: 6.67 %	
Z1	Z1_2_5	Gripado	Longitud: 2.00 mm Espesor: 2.00 mm Profundidad: 0.10 mm Líneas: 2 Porcentaje de Gripado: 8.89 %	
Z1	Z1_2_6	Gripado	Longitud: 2.50 mm Espesor: 3.00 mm Profundidad: 0.10 mm Líneas: 2 Porcentaje de Gripado: 16.67 %	

Z1	Z1_2_7	Gripado	Longitud: 3.00 mm Espesor: 3.50 mm Profundidad: 0.10 mm Líneas: 2 Porcentaje de Gripado: 23.33 %	
Z1	Z1_2_8	Gripado	Longitud: 4.50 mm Espesor: 4.00 mm Profundidad: 0.10 mm Líneas: 2 Porcentaje de Gripado: 40.00 %	
Z1	Z1_2_9	Gripado	Longitud: 4.50 mm Espesor: 4.00 mm Profundidad: 0.10 mm Líneas: 3 Porcentaje de Gripado: 60,00 %	

## CAPÍTULO 3 - EXPERIMENTACIÓN

### 3.1 Montaje de línea base

#### 3.1.1 Banco de vibraciones

El banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana, consta de todos los implementos necesarios para realizar diferentes configuraciones de maquinaria rotativa como: desbalanceo, desalineación y combinaciones de fallos de rodamientos y engranes; con estas configuraciones se logra realizar simulaciones lo más cercanas posibles a las que se presentan en la industria.

El banco se conforma por cinco unidades principales: (i) unidad de mando, (ii) unidad motriz, (iii) unidad de carga, (iv) unidad de sistemas rotativos y (v) unidad de sistema de adquisición de datos, tal como se ilustra en la Figura 50. En [2] se tiene una descripción más detallada del banco de vibraciones.

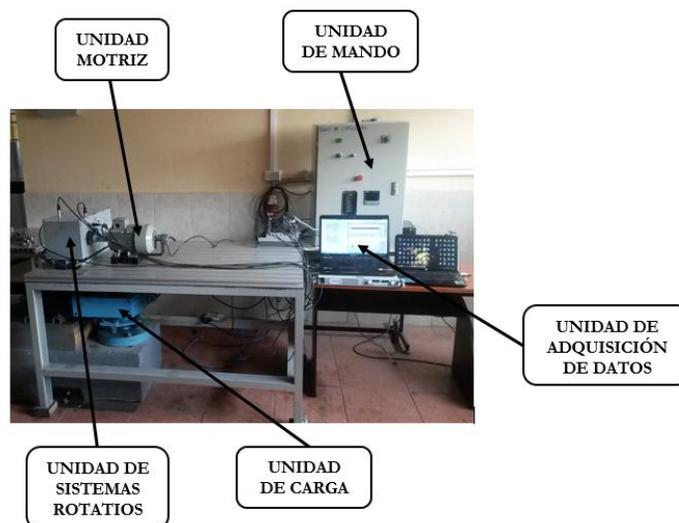


Figura 50. Banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana.

#### 3.1.2 Montaje de elementos mecánicos y sensores

Para realizar el montaje de los elementos mecánicos y los sensores tanto de vibración y de EA, se debe tener una secuencia fija, lo cual permitirá que el sistema no sufra alteraciones durante su funcionamiento. La Figura 51 presenta el procedimiento a seguir para los respectivos montajes.

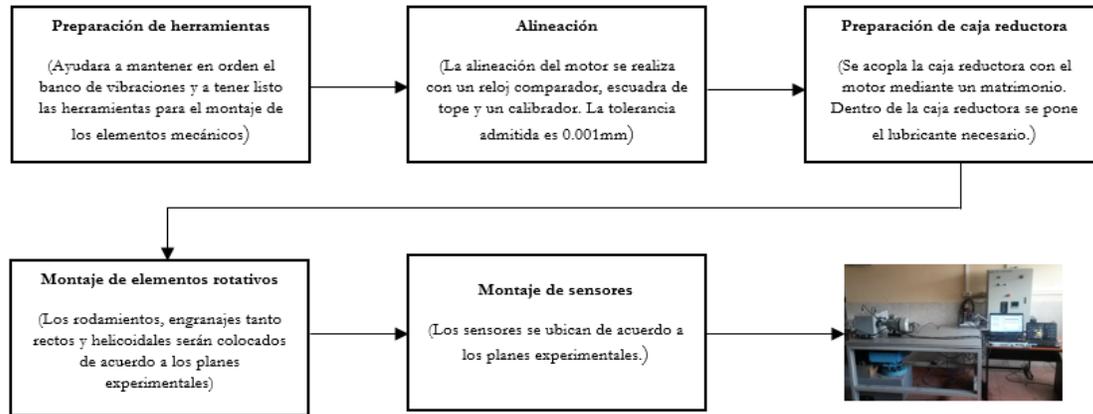


Figura 51. Proceso para el montaje de elementos mecánicos y sensores.

### 3.1.3 Validación de línea base

Una vez que se haya concluido el montaje de los elementos mecánicos y los sensores, se procede a realizar la validación de la línea base. Para esto se procede a seguir los siguientes pasos:

#### 3.1.3.1 Verificación visual

Consiste en observar si hay errores que se han cometido durante el montaje de los elementos mecánicos, es un método muy sencillo, pero no eficaz. Al aplicar este método, sólo se puede comprobar una mala alineación, mal ajuste en los pernos, contaminantes dentro de la caja de engranes, cruce de cables de los sensores, entre otros.

#### 3.1.3.2 Verificación de ruidos extraños

Una vez que se haya comprobado visualmente que el sistema este correcto, se procede a utilizar el sentido auditivo, esto con el fin de verificar que al momento del encendido del motor no se generen ruidos extraños. Para este tipo de verificación, es necesario de una persona experta en el tema y que conozca bien las máquinas utilizadas en el medio.

#### 3.1.3.3 Verificación de frecuencias características

Cuando una caja de engranajes se encuentra en buenas condiciones generan frecuencias características que están determinadas por la relación de transmisión entre piñón-engranaje y velocidad de giro. En la Figura 52 se presenta un espectro característico de vibraciones de una caja de engranajes en buenas condiciones [5].

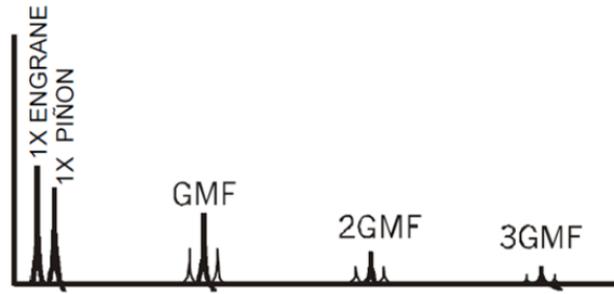


Figura 52. Espectro característico de una caja de engranajes en buenas condiciones [5].

El cálculo de los espectros se presenta en las siguientes ecuaciones:

- Frecuencia de giro

$$F_g = \frac{RPM_{motor}}{60} [Hz] \quad \text{Ecuación 16}$$

- Frecuencia de giro piñón

$$1X \text{ piñón} = F_g [Hz] \quad \text{Ecuación 17}$$

- Frecuencia de giro engrane

$$1X \text{ engrane} = F_g * \frac{Z_1}{Z_2} [Hz] \quad \text{Ecuación 18}$$

- Frecuencia de paso de engranes

$$GMF = F_g * Z_1 \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

$RPM_{motor}$ : Velocidad de giro del motor en rpm

$Z_1$ : Número de dientes del piñón

$Z_2$ : Número de dientes del engrane

### **3.1.4 Establecimiento de la línea base**

Por último, se realiza el establecimiento de la línea base, lo cual consiste en la adquisición de las señales de vibración y EA de la caja engranes en condiciones normales, es decir, con engranes y rodamientos sin fallos. Las señales adquiridas de los diferentes fallos que se configuren en la caja de engranes se comprobarán con esta línea base, lo cual ayudará a poder detectar el cambio que se presenten en estas señales, conforme la severidad del fallo incrementa.

## **3.2 Metodología para el monitoreo de las emisiones acústicas**

Para la adquisición de las señales de EA se presenta la siguiente metodología:

### **3.2.1 Instalación del sensor EA**

Para las pruebas de EA, las ondas generadas se propagan del objeto de prueba hasta el sensor de EA, por tal motivo, estas ondas elásticas deben transmitirse libremente en el espacio que hay entre el sensor y el objeto, además deben producirse sin variaciones durante la medición. A continuación se detallan los principales procedimientos para la instalación del sensor EA [29].

#### **3.2.1.1 Selección de la posición del sensor EA**

Para seleccionar la posición del sensor EA se debe tener en cuenta la ubicación, trayectoria, el modo de propagación de las ondas, estado de la superficie instalada y la atenuación esperada de las ondas de EA. En el caso de utilizar varios sensores, las posiciones en las que se instalan estos sensores se seleccionan de forma que se obtenga una precisión suficiente de la ubicación de la fuente, teniendo en cuenta la disposición y los intervalos de todos los sensores que se colocaran [29].

#### **3.2.1.2 Pretratamiento de la superficie donde se instalará el sensor EA**

Antes de la instalación de un sensor EA, se debe examinar el estado de la superficie donde se lo va a ubicar, para evitar que cualquier anomalía en la superficie pueda interferir con la

detección de las señales de EA. Si éste es el caso, la superficie debe ser tratada según sea necesario, de acuerdo con los procedimientos que se detallan a continuación [29]:

- i. **Desprendimiento de la superficie revestida:** los desprendimientos que se presenten en una superficie reducen el área de contacto del sensor, haciendo que éste presente menor sensibilidad. Para evitar se debe eliminar los desprendimientos con papel lija.
- ii. **Superficie contaminada con óxido o aceite:** si la superficie de contacto presenta residuos de óxido o aceite, la adhesión del sensor se ve comprometida, lo que resulta en una reducción de la sensibilidad. El óxido se debe eliminar con un papel lija mientras, el aceite se debe limpiar con un disolvente adecuado.

Cuando un sensor se fija con un adhesivo, la superficie debe estar completamente lisa sin ningún tipo de agente que afecte su sensibilidad a la hora de detectar las señales [29].

### 3.2.1.3 Instalación mecánica del sensor EA

Existen dos métodos generales para instalar un sensor de EA, un método muy sencillo es fijar el sensor con adhesivo o acoplador; el otro método es utilizar un porta sensor, el cual se adhiere a la superficie por medio de una base magnética.

En la Figura 53 se presenta el sensor WD S/N FV52 de *PHYSICAL ACOUSTICS* que se encuentra dentro de un soporte magnético MHSTD. Para tener una mejor adhesión del sensor se utiliza también un acoplador de cinta adhesiva a doble cara.



Figura 53. Sensor WD S/N FV52 en un soporte magnético MHSTD.

### 3.2.1.4 Conexión del sensor EA

En la Figura 54 se muestra un esquema de la conexión del sensor EA, los cables conectan la unidad principal del sensor y los otros dispositivos tales como el preamplificador, tarjetas de adquisición de datos y el computador.

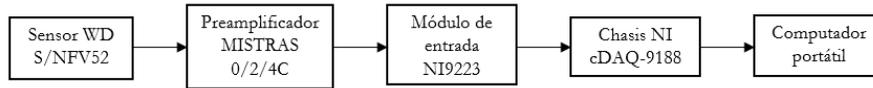


Figura 54. Conexión del sensor WD S/N FV52.

Cada sensor de EA se conecta a un preamplificador 0/2/4C que se presenta en la Figura 55, de las salidas del preamplificador se conectan a un módulo de entrada NI-9223, este módulo se acopla a un chasis NI C-DAQ-9188 y finalmente se conecta hacia un computador portátil mediante Ethernet.



Figura 55. Preamplificadores 0/2/4C.

## 3.2.2 Control de la sensibilidad del sensor EA

Después de que se haya realizado la instalación del sensor EA y sus dispositivos, se procede a comprobar su sensibilidad para la ubicación final en la caja de engranajes.

### 3.2.2.1 Revisión del estado general de la conexión

Para comprobar que toda la línea del sensor se ha instalado correctamente, se golpea ligeramente un objeto de prueba, o se generan señales de EA artificiales con un generador de pulsos, comprobando así que las señales están siendo tomadas por el sensor de manera correcta. Si el canal no da respuesta, se deben comprobar los valores ajustados del dispositivo EA, el estado de la instalación del sensor, las conexiones de los cables de señal y del preamplificador, y el posible fallo de los dispositivos individuales [29].

### 3.2.2.2 Posicionamiento del sensor EA en la caja de engranajes

La ubicación del sensor de EA se realizó mediante un proceso de calibración. El documento generado se titula “Metodología para determinar la posición del sensor EA”, el cual se encuentra disponible en el GIDTEC. La ubicación del sensor será en las partes laterales de la caja de engranajes tal como se muestra en la Figura 56.

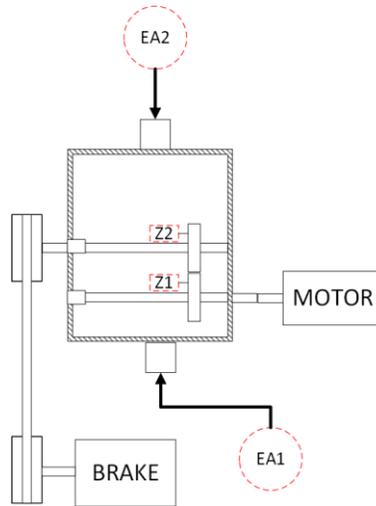


Figura 56. Ubicación de los sensores EA en la caja de engranajes.

### 3.2.3 Programa de adquisición de datos

El GIDTEC cuenta con su propio software para adquirir señales de vibración y EA, el cual fue desarrollado en LabView, en la Figura 57 se presenta la interfaz del programa.

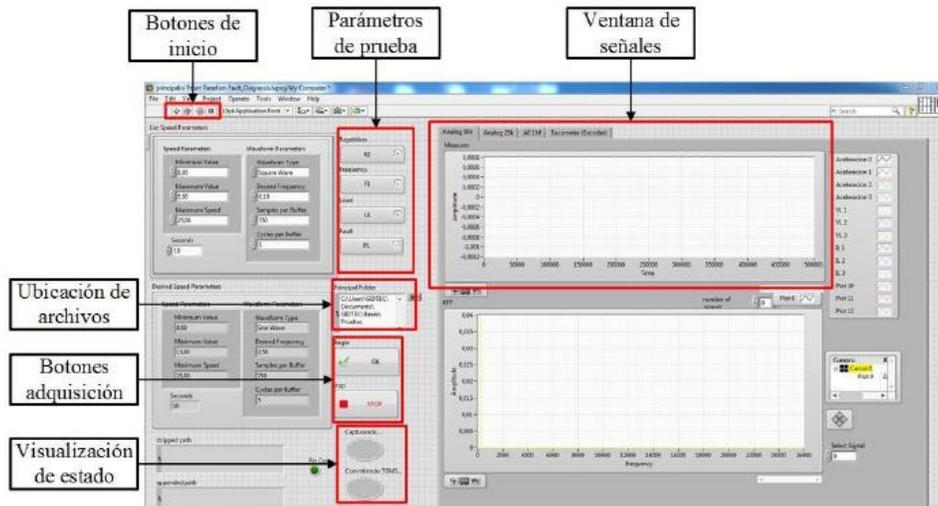


Figura 57. Interfaz del programa vibraciones.

En los botones de inicio se pueden ejecutar, pausar, actualizar y detener el programa. En los parámetros de prueba se tienen la combinación característica de cada señal, como la repetición, frecuencia, carga y fallo. La repetición es las veces que se repite el mismo fallo con las mismas características (carga y frecuencia), la frecuencia es la velocidad del eje, y la carga; es la carga total en el freno magnético y los fallos son los estados del engrane.

#### **3.2.4 Severidad de los fallos mediante señales de vibración y EA**

Para el diagnóstico de la severidad de los fallos en engranes se efectuó mediante el comportamiento de la frecuencia de engranaje conocida en inglés como “*Gear Mesh Frequency, (GMF)*”, que se puede calcular mediante la Ecuación 19.

En las señales de emisión acústica que se presentan en la Figura 58 para fallos de grietas y en la Figura 60 para fallos de gripado, la identificación de la GMF se vuelve complejo, debido a que los armónicos se encuentran en toda la señal, es decir se tiene mayor información la cual no puede ser interpretada con facilidad de forma visual por una persona; por lo que se requiere el uso de indicadores de condición y/o técnicas de inteligencia artificial para el diagnóstico adecuado con señales de emisión acústica. Una vez identificada la GMF de forma visual se puede observar como esta va incrementando conforme la severidad del fallo avanza. Por lo cual mediante las señales de emisión acústica es posible identificar los diferentes niveles severidad de un fallo, pero no se puede identificar qué tipo de fallo se está presentando.

En las señales de vibración que se presentan en la Figura 60 para fallo de grieta y en la Figura 61 para fallo de gripado, se puede identificar la GMF sin dificultad debido a que esta se encuentra en el mismo rango de frecuencia y está acompañada de bandas laterales a la frecuencia de giro del motor. La información que presentan las señales de vibración en el dominio de la frecuencia para los dos fallos seleccionados es poca en comparación a las señales de EA. Mediante las señales de vibración resulta complejo identificar la severidad de un fallo debido a que, la amplitud de la GMF varía de forma no uniforme para ambos fallos seleccionados.

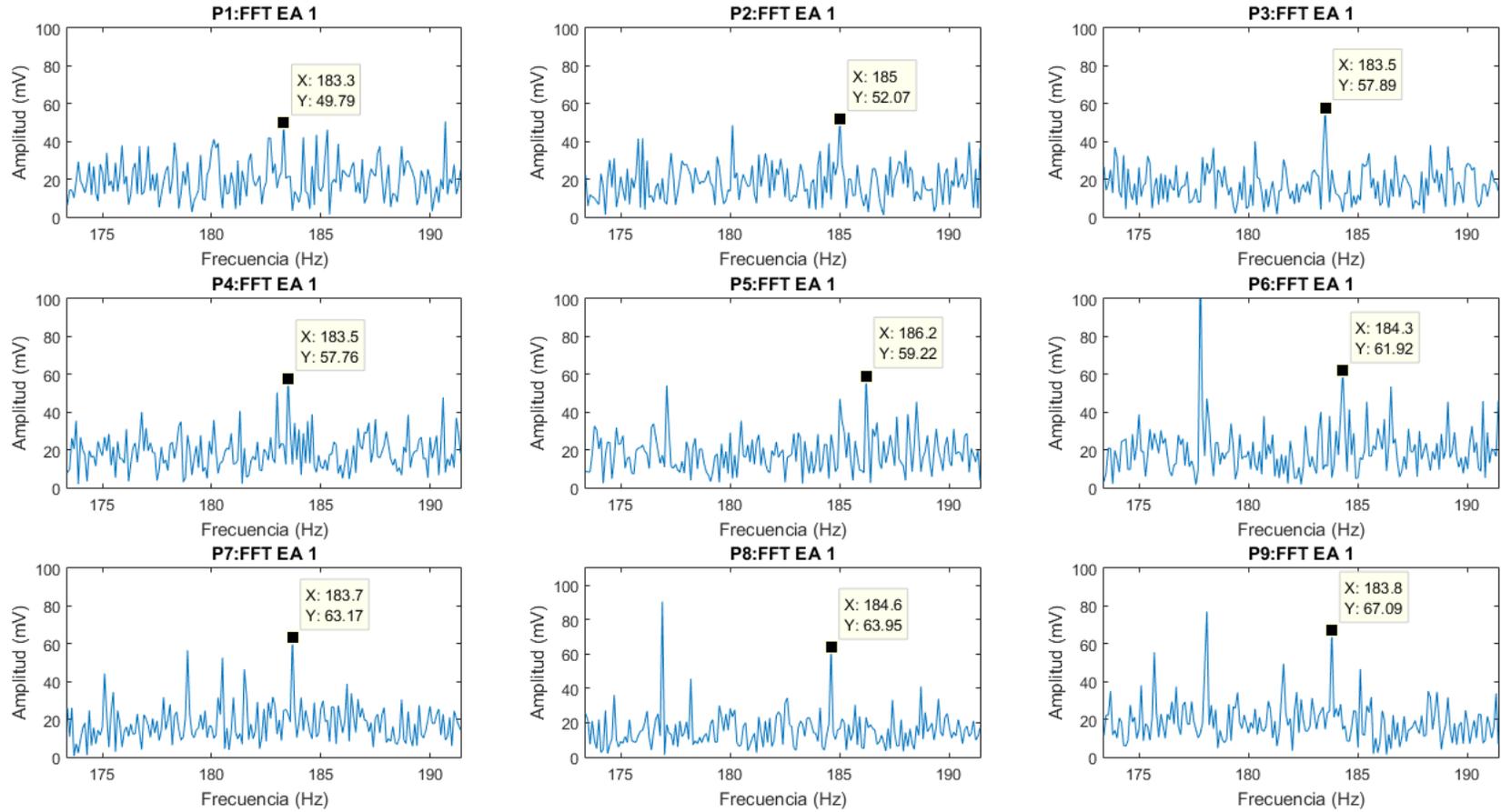


Figura 58. Señales EA para severidad de fallo por grietas.

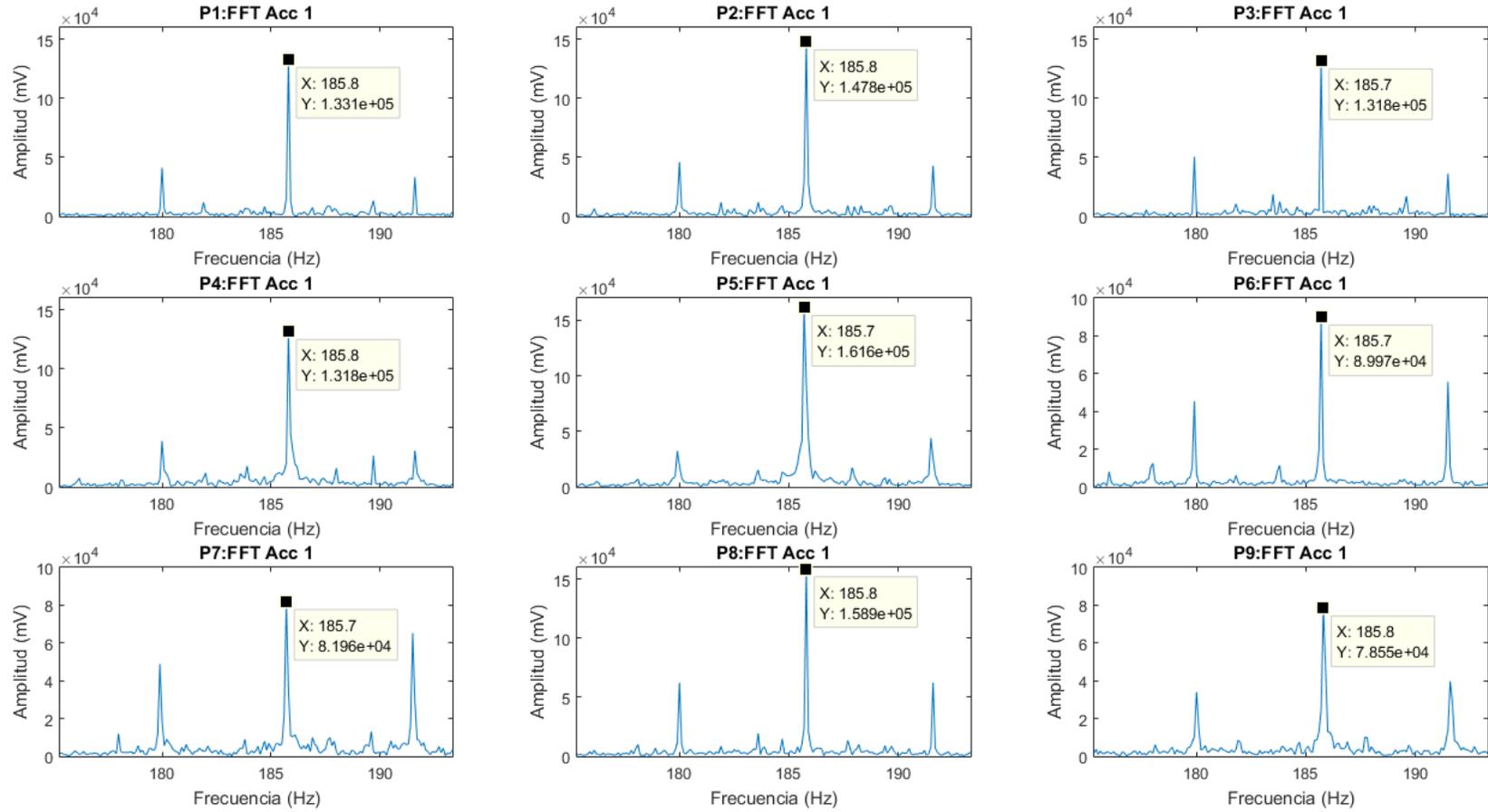


Figura 59. Señales de vibración para severidad de fallo por grieta.

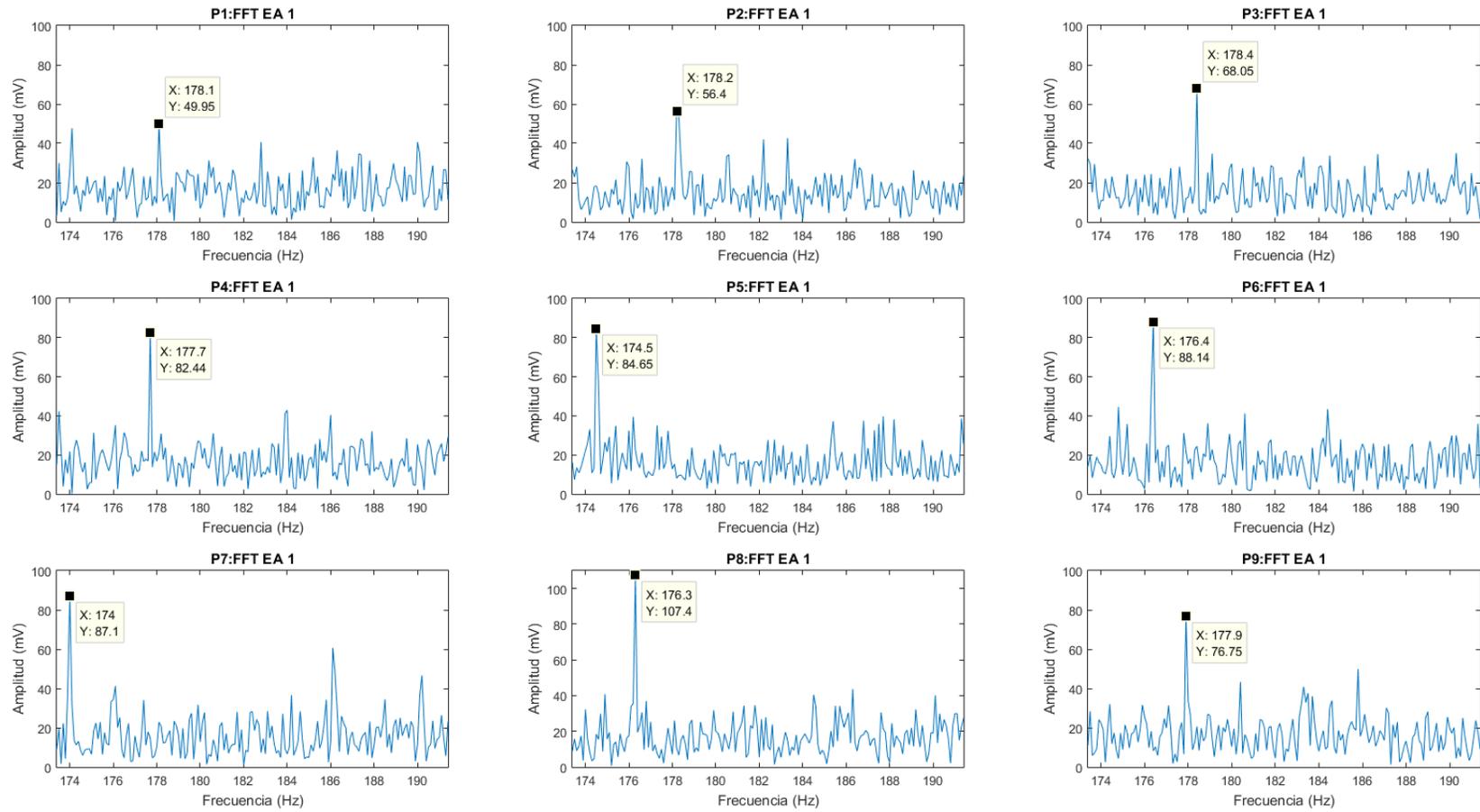


Figura 60. Señales EA para severidad de fallo por gripado.

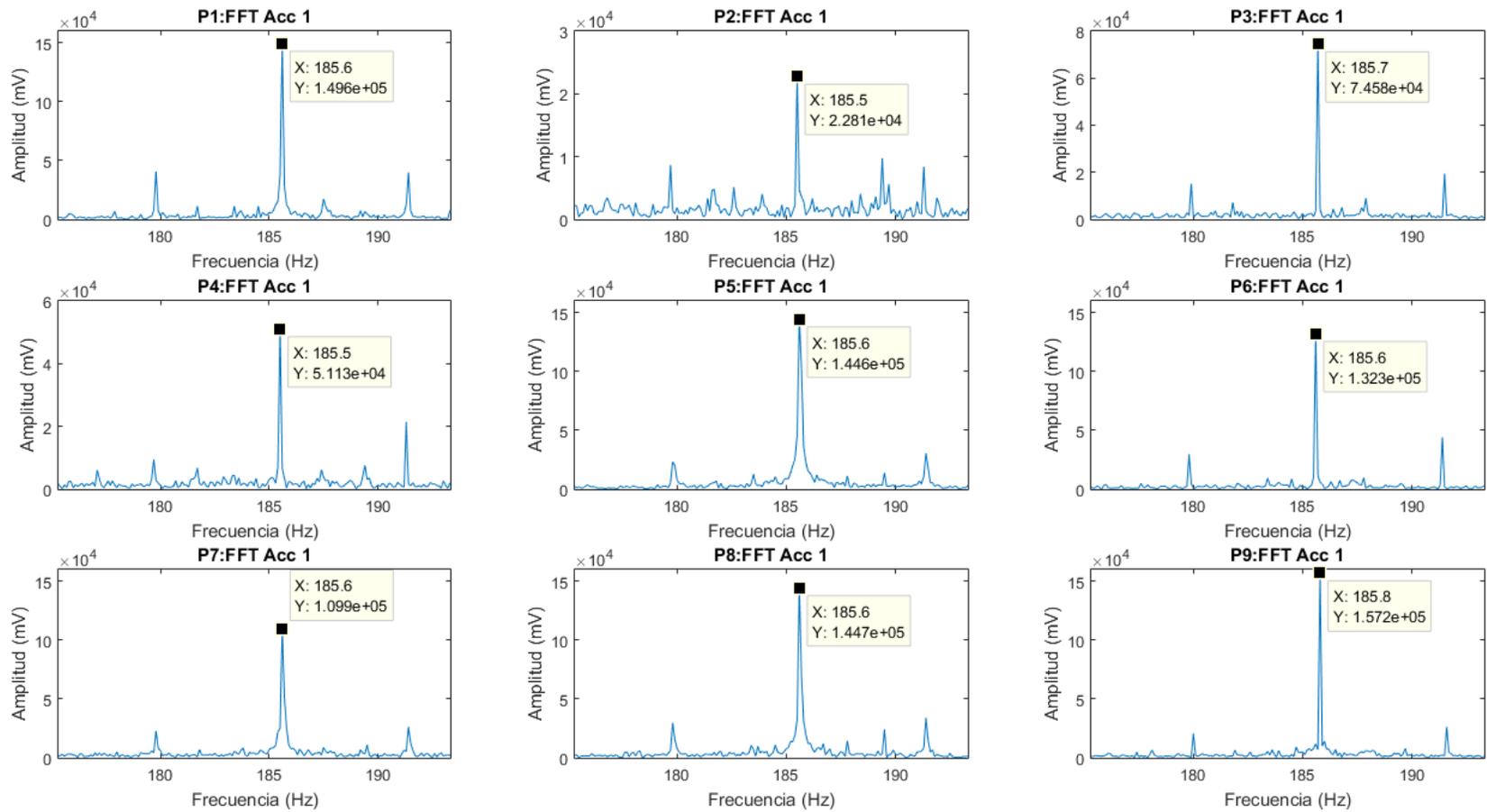


Figura 61. Señales de vibración para severidad de fallo por gripado.

### 3.3 Planes experimentales

Los planes experimentales se desarrollaron en un banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, el movimiento se genera por un motor marca Siemens modelo 1LA7 096-6YA60 de 2hp; el movimiento que se transmite hacia el eje de entrada de la caja de engranajes es mediante un acople flexible. En el eje de salida de la caja de engranajes se ubica una polea que transmite el movimiento al freno magnético Rosati de 883 kW mediante una banda flexible, lo cual permite simular la aplicación de cargas. La carga del freno es controlada por una fuente de voltaje de corriente continua TDK-Lambda, GEN 100-15-is510. La velocidad de giro del motor se controla por medio de un variador de frecuencia Danfoss VLT 1.5 kW. Para la adquisición de datos se emplearon tres acelerómetros, dos sensores de emisión acústica, tres pinzas de corriente, dos micrófonos y un encoder; las señales serán adquiridas por diferentes tarjetas de adquisición de datos las cuales están montadas en un chasis NI cDAQ-9188 de *National Instruments* a través de un computador portátil ASUS ROG GL752VW-DH74.

La caja de engranajes que se muestra en la Figura 62, se puede configurar para desarrollar pruebas en una o dos etapas, se pueden montar engranes de dientes rectos o helicoidales, también es posible simular fallos de desalineación en el eje del engrane Z2 y fallos en el rodamiento del mismo eje. Los engranes son construidos de acero E410, el número de dientes para el piñón y el engrane es de  $Z1=32$  y  $Z2=48$  respectivamente. El espesor de los dientes es 20 mm, módulo de 2.25 y ángulo de presión  $\theta=20^\circ$ . La lubricación utilizada para la caja de engranajes fue Gulf HARMONY A W ISO VG 68. La localización de los fallos fue en el engrane Z1, cada fallo tiene una condición normal P1 y nueve niveles de severidad P2 a P10. Cada fallo y su severidad tienen una nomenclatura ( $Z\#\_#\_L$ ), donde los dos primeros términos ( $Z\#$ ), corresponden al engrane Z1 o Z2; el segundo término ( $\#$ ), corresponde al tipo de fallo, gripado ( $\_2$ ), y agrietamiento ( $\_4$ ); el tercer término ( $\_L$ ) corresponde a los nueve niveles de severidad (1 a 9). El banco de vibraciones se puede configurar también para monitorear fallos en rodamientos. Se utilizaron rodamientos SKF 1207 EKTN9/C3, estos se ubicarán en chumaceras SKF SNL 507-607. La posición del fallo en la pista externa fue a las 6 en punto.

La duración de la adquisición de cada muestra fue de 10 segundos, el número de repeticiones por cada prueba bajo las mismas condiciones de carga y velocidad fue de diez (R1, R2, R3, ..., R10). La frecuencia de rotación del motor fue de 6Hz (F1), 12Hz (F2) y 16Hz (F3) finalmente las cargas aplicadas fueron de 0V (L1), 10V (L2) y 20V (L3).

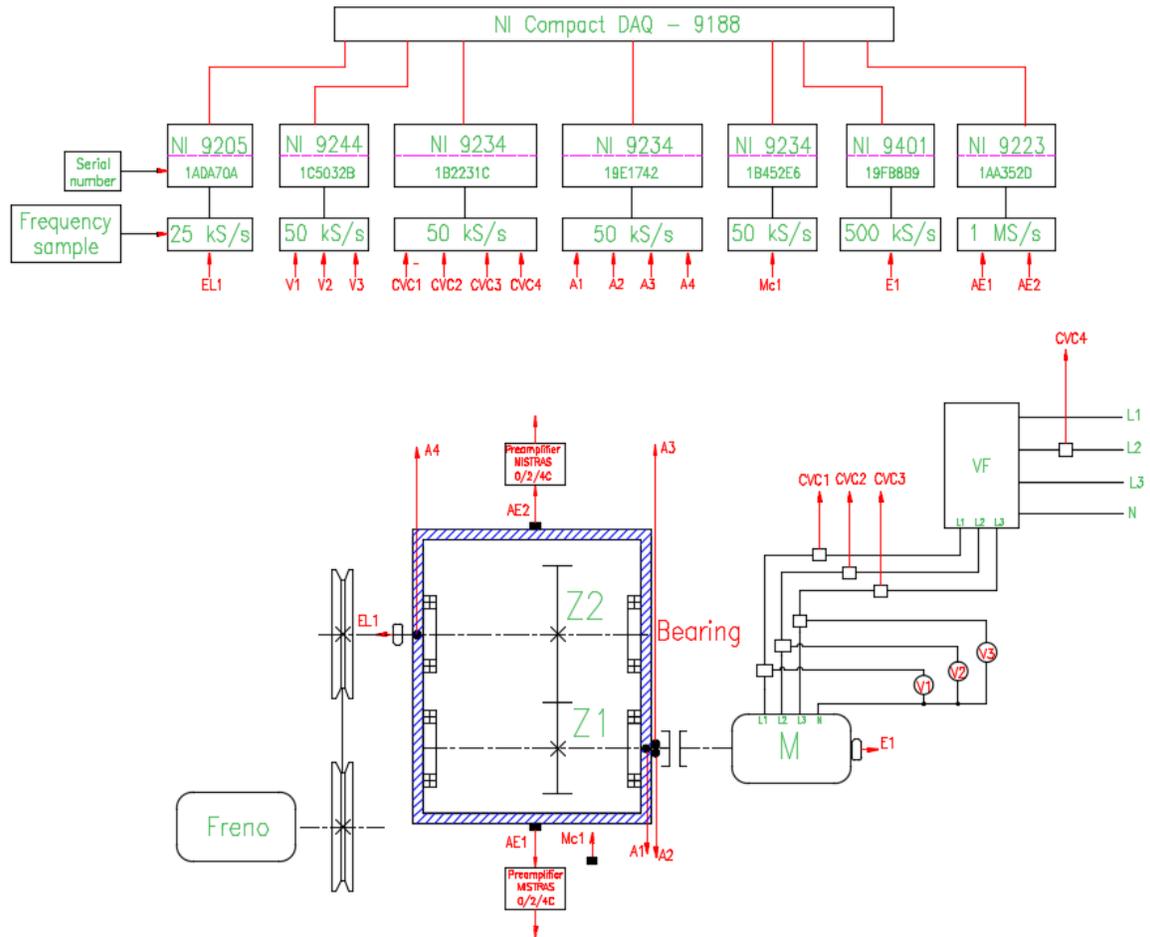


Figura 62. Configuración de la caja de engranes para la adquisición de datos.

Se generaron cinco planes experimentales de severidad para engranes y rodamientos, los cuales se encuentran disponibles en el GIDTEC; estos definen todos los parámetros para realizar la experimentación, con el fin de que puedan ser replicados en futuras ocasiones. El plan experimental tiene un formato establecido en el GIDTEC. El plan experimental uno considera el fallo de grietas en el diente del engrane, consta de diez niveles de severidad incluyendo el engrane en buenas condiciones.

El plan experimental dos representa el fallo de gripado en la cara del diente del engrane, consta de diez niveles de severidad incluyendo el engrane en buenas condiciones. El plan experimental tres considera los dos fallos: grietas y gripado; de esta forma se inicia teniendo una base de datos donde se combinan los fallos en engranes. En el cuarto plan experimental se presenta la severidad en rodamientos, se consideran los fallos en pista interna y externa con tres niveles de severidad de cada uno, para los elementos rodantes se tienen seis niveles de severidad; a esta base de datos se la puede definir como fallos múltiples o también conocido en inglés como *multi-fault*, debido a que combina tres fallos diferentes. El plan experimental cinco tiene una combinación de la severidad de fallos en engranes y rodamientos.

## CONCLUSIONES

- Mediante el estudio bibliográfico se detalló a profundidad el estudio de las emisiones acústicas aplicadas a la maquinaria rotativa, donde se resalta la importancia y la efectividad de esta técnica para detectar los fallos incipientes en comparación con las señales de vibración.
- En este proyecto técnico se aporta con cinco bases de datos con señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de severidad de fallos en engranes y rodamientos. Los fallos seleccionados para engranes fueron grietas y gripado; mientras que para los rodamientos los fallos fueron en pista interna, pista externa y elemento rodante. Se desarrollaron nueve niveles de severidad porcentual para engranes: cinco leves, dos moderados y dos severos; para los rodamientos se presentó tres niveles de severidad para pista interna y externa y seis niveles de severidad para el elemento rodante.
- Mediante las señales de vibración se logró detectar fallos en engranes con facilidad mediante la frecuencia del engranaje, pero resulta complicado determinar el nivel de severidad; mientras que con las señales de emisión acústica resulta complejo identificar el tipo de fallo en el engrane, pero con esta técnica se puede determinar la severidad de los fallos.
- El monitoreo de las señales de emisión acústica es ideal para determinar la severidad de fallos por medio de técnicas de inteligencia artificial; debido a que la señal tiene mayor información que la vibración.

## **RECOMENDACIONES**

- Antes de instalar el sensor de emisión acústica es importante verificar que la superficie donde se lo ubicará este completamente limpia ya que esto puede afectar al momento de la adquisición de las señales, además se recomienda el uso de acopladores con el fin de asegurar la fijación del sensor en la caja de engranajes.
- Evitar que los cables de los sensores de vibración y emisión acústica se crucen entre ellos o con los cables del motor, debido a que se puede presentar ruido eléctrico en la señal.
- El aceite de la caja de engranajes tendrá que ser cambiado después de finalizar la adquisición de datos de cada plan experimental, esto con el fin de evitar cambios que se pueden generar en las señales debido al aceite contaminado.

## **TRABAJOS FUTUROS**

- Profundizar el estudio del análisis de vibraciones y emisión acústica para severidad de fallos en engranes de dientes helicoidales.
- Generar bases de datos utilizando señales de vibración y emisión acústica en compresores y bombas hidráulicas.
- Establecer bases de datos con señales de emisión acústica y determinar la severidad de fallos en engranes y rodamientos utilizando indicadores de condición en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Vintimilla y M. Rene, «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», B.S. thesis, 2014.
- [2] N. Jara, S. Vinicio, y D. J. Romero Rodríguez, «Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas para sistemas mecánicos rotativos con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en rodamientos», B.S. thesis, 2014.
- [3] G. Guiracocha y R. Andrés, «Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones acústicas e imágenes termográficas infrarrojas para un sistema mecánico rotativo con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en engranajes», B.S. thesis, 2015.
- [4] C. E. Muñoz Zumba, V. Rodas, y Á. Genaro, «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», B.S. thesis, 2015.
- [5] C. G. Ortiz Farfán y I. A. Pérez Rivera, «Adquisición de señales vibracionales y emisiones acústicas combinando fallos en maquinaria rotativa y elaboración de guías de práctica sobre detección de fallos en engranajes por medio de emisiones acústicas», B.S. thesis, 2016.
- [6] A. K. Jardine, D. Lin, y D. Banjevic, «A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 20, n.º 7, pp. 1483–1510, 2006.
- [7] S. Alaswad y Y. Xiang, «A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system», *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 157, pp. 54–63, 2017.
- [8] D. Galar, A. Thaduri, M. Catelani, y L. Ciani, «Context awareness for maintenance decision making: A diagnosis and prognosis approach», *Measurement*, vol. 67, pp. 137–150, 2015.
- [9] R. C. M. Yam, P. W. Tse, L. Li, y P. Tu, «Intelligent predictive decision support system for condition-based maintenance», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 17, n.º 5, pp. 383–391, 2001.
- [10] F. Jiang, W. Li, Z. Wang, y Z. Zhu, «Fault severity estimation of rotating machinery based on residual signals», *Adv. Mech. Eng.*, vol. 4, p. 518468, 2012.
- [11] A. Sharma, M. Amarnath, y P. K. Kankar, «Feature extraction and fault severity classification in ball bearings», *J. Vib. Control*, vol. 22, n.º 1, pp. 176–192, 2016.
- [12] Y. H. Ali, R. A. Rahman, y R. I. R. Hamzah, «Acoustic emission signal analysis and artificial intelligence techniques in machine condition monitoring and fault diagnosis: a review», *J. Teknol.*, vol. 69, n.º 2, pp. 121–126, 2014.
- [13] T. Toutountzakis y D. Mba, «Observations of acoustic emission activity during gear defect diagnosis», *NDT E Int.*, vol. 36, n.º 7, pp. 471–477, 2003.
- [14] J. Yoon y D. He, «Planetary gearbox fault diagnostic method using acoustic emission sensors», *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 9, n.º 8, pp. 936–944, 2015.
- [15] C. Scheer, W. Reimche, y F.-W. Bach, «Early fault detection at gear units by acoustic emission and wavelet analysis», *J Acoust Emiss*, vol. 25, pp. 331–340, 2007.
- [16] J.-H. Shin y H.-B. Jun, «On condition based maintenance policy», *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 2, n.º 2, pp. 119–127, abr. 2015.

- [17] V. Sánchez, «Diagnóstico de fallos en engranajes basado en el análisis de señales de vibración empleando una red neuronal perceptrón multicapa con retropropagación del error», *Trab. Master Univ. Nac. Educ. Distancia*, 2012.
- [18] H.-E. Kim, «Machine prognostics based on health state probability estimation», Queensland University of Technology, 2010.
- [19] B. K. N. Rao, *Handbook of condition monitoring*. Elsevier, 1996.
- [20] R. Bogue, «Sensors for condition monitoring: A review of technologies and applications», *Sens. Rev.*, vol. 33, n.º 4, pp. 295–299, 2013.
- [21] P. Večeř, M. Kreidl, y R. Šmíd, «Condition indicators for gearbox condition monitoring systems», *Acta Polytech.*, vol. 45, n.º 6, 2005.
- [22] V. Sharma y A. Parey, «Frequency domain averaging based experimental evaluation of gear fault without tachometer for fluctuating speed conditions», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 85, pp. 278–295, 2017.
- [23] S. Devendiran y K. Manivannan, «Vibration Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies For Bearing and Gear Components-A Review», *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 11, n.º 6, pp. 3966–3975, 2016.
- [24] A. R. Mohanty, *Machinery condition monitoring: Principles and practices*. CRC Press, 2014.
- [25] Y.-H. Pao, R. R. Gajewski, y A. N. Ceranoglu, «Acoustic emission and transient waves in an elastic plate», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 65, n.º 1, pp. 96–105, 1979.
- [26] D. Mba y R. B. Rao, «Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating Machines; Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines and Rotating Structures.», 2006.
- [27] V. M. Baranov, E. M. Kudryavtsev, G. A. Sarychev, y V. M. Schavelin, *Acoustic emission in friction*, vol. 53. Elsevier, 2011.
- [28] W. Sikorski, *Acoustic emission, 398 pp.*, *InTech*. 2012.
- [29] T. J. S. for Non-Destructive, *Practical Acoustic Emission Testing*. Springer, 2016.
- [30] J. Naumann, «Acoustic Emission Monitoring of Wind Turbine Bearings», University of Sheffield, 2016.
- [31] M. A. Hamel, «Condition Monitoring of Helical Gears Using Acoustic Emission (AE) Technology», Cranfield University, 2013.
- [32] T. F. Drouillard, «A history of acoustic emission», *J. Acoust. Emiss.*, vol. 14, n.º 1, pp. 1–34, 1996.
- [33] A. G. Molina, E. M. González, y AEND, *Emisión Acústica. Niveles I y II*. FEMETAL, 2015.
- [34] A. Purarjomandlangrudi y G. Nourbakhsh, «Acoustic emission condition monitoring: an application for wind turbine fault detection», *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 2, n.º 5, pp. 907–918, 2013.
- [35] M. A. Hamel, «Condition Monitoring of Helical Gears Using Acoustic Emission (AE) Technology», 2013.
- [36] P. Closa González, «Las emisiones acústicas y su aplicación al mantenimiento predictivo», 2014.
- [37] A. Sidorova, «Aplicación del método de la emisión acústica en la monitorización de las estructuras de hormigón», Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [38] J. L. Ferrando Chacon, «Fault detection in rotating machinery using acoustic emission», Brunel University London, 2015.
- [39] C. U. Grosse y M. Ohtsu, *Acoustic emission testing*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [40] S. Degala, «Acoustic emission monitoring of reinforced concrete systems retrofitted with CFRP», University of Pittsburgh, 2008.
- [41] P. Theobald, B. Zeqiri, y J. Avison, «Couplants and their influence on AE sensor sensitivity», *J. Acoust. Emiss.*, vol. 26, pp. 91–97, 2008.

- [42] D. Zurita Millán, «Estudio y desarrollo de un sistema de detección de fallos en actuadores electromecánicos mediante el análisis de emisiones acústicas.», Universitat Politècnica de Catalunya.
- [43] C. B. Scruby y H. N. G. Wadley, «A calibrated capacitance transducer for the detection of acoustic emission», *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 11, n.º 11, p. 1487, 1978.
- [44] «Physical Acoustics - World Leader in Acoustic Emission Equipment - Innovative AE Systems since 1968». [En línea]. Disponible en: <http://www.physicalacoustics.com/>. [Accedido: 20-dic-2017].
- [45] «2/4/6 - Switch Selectable Gain Single Ended and Differential Preamplifier», *Acoustic Emission Systems and NDT Products by PHYSICAL ACOUSTICS*. [En línea]. Disponible en: <http://www.physicalacoustics.com/by-product/2-4-6/>. [Accedido: 21-dic-2017].
- [46] M. G. Sause, «Investigation of pencil-lead breaks as acoustic emission sources.», *J. Acoust. Emiss.*, vol. 29, 2011.
- [47] M. Elforjani, D. Mba, A. Muhammad, y A. Sire, «Condition monitoring of worm gears», *Appl. Acoust.*, vol. 73, n.º 8, pp. 859–863, 2012.
- [48] M. Elforjani y D. Mba, «Monitoring the onset and propagation of natural degradation process in a slow speed rolling element bearing with acoustic emission», *J. Vib. Acoust.*, vol. 130, n.º 4, p. 041013, 2008.
- [49] T. Boczar y M. Lorenc, «Determining the repeatability of acoustic emission generated by the hsu-nielsen calibrating source», *Mol. Quantum Acoust.*, vol. 25, n.º 177-191, p. 46, 2004.
- [50] R. T. Committee, «Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete», *Mater. Struct.*, vol. 43, n.º 9, pp. 1183–1186, 2010.
- [51] T. Boczar y M. Lorenc, «Time-frequency analysis of the calibrating signals generated in the Hsu–Nielsen system», *Phys. Chem. Solid State*, vol. 7, n.º 3, pp. 585–588, 2006.
- [52] C. K. Tan y D. Mba, «Limitation of acoustic emission for identifying seeded defects in gearboxes», *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 24, n.º 1, pp. 11–28, 2005.
- [53] T. Toutountzakis, C. K. Tan, y D. Mba, «Application of acoustic emission to seeded gear fault detection», *NDT E Int.*, vol. 38, n.º 1, pp. 27–36, 2005.
- [54] L. Gao, F. Zai, S. Su, H. Wang, P. Chen, y L. Liu, «Study and application of acoustic emission testing in fault diagnosis of low-speed heavy-duty gears», *Sensors*, vol. 11, n.º 1, pp. 599–611, 2011.
- [55] T. Holroyd, «Condition monitoring of very slowly rotating machinery using AE techniques», en *14th International congress on Condition monitoring and Diagnostic engineering management (COMADEM'2001)*, 2001, pp. 50004–4.
- [56] B. Lu, Y. Li, X. Wu, y Z. Yang, «A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis», en *Power Electronics and Machines in Wind Applications, 2009. PEMWA 2009. IEEE*, 2009, pp. 1–7.
- [57] N. Tandon y A. Choudhury, «A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings», *Tribol. Int.*, vol. 32, n.º 8, pp. 469–480, 1999.
- [58] *Rolling bearings - Damage and failures - Terms, characteristics and causes*, vol. ISO 15243. 2017.
- [59] J. R. Stack, T. G. Habetler, y R. G. Harley, «Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines», *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, n.º 3, pp. 735–739, 2004.
- [60] M. Cerrada *et al.*, «A review on data-driven fault severity assessment in rolling bearings», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 99, pp. 169–196, 2018.
- [61] B. Dolenc, P. Bošković, y \DJani Juričić, «Distributed bearing fault diagnosis based on vibration analysis», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 66, pp. 521–532, 2016.

- [62] S. Sheng, L. Zhang, y R. X. Gao, «A systematic sensor-placement strategy for enhanced defect detection in rolling bearings», *IEEE Sens. J.*, vol. 6, n.º 5, pp. 1346–1354, 2006.
- [63] W. A. Smith y R. B. Randall, «Rolling element bearing diagnostics using the Case Western Reserve University data: A benchmark study», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 64, pp. 100–131, 2015.
- [64] R. B. Randall y J. Antoni, «Rolling element bearing diagnostics—a tutorial», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 25, n.º 2, pp. 485–520, 2011.
- [65] W. Kruger, «Detectando fallas en rodamientos utilizando métodos de prueba eléctricos y mecánicos de vibración». 2009.
- [66] E. Estupiñan y P. Saavedra, «Técnicas de diagnóstico para el análisis de vibraciones de rodamientos», *Univ. Concepc. Chile*, 2008.
- [67] R. Yan y R. X. Gao, «Approximate entropy as a diagnostic tool for machine health monitoring», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, n.º 2, pp. 824–839, 2007.
- [68] *Rodamientos*, vol. Grupo SKF. 2015.
- [69] SA, *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*. Enero, 2005.
- [70] J. C. Garcia-Prada, C. Castejon, y O. J. Lara, «Incipient bearing fault diagnosis using DWT for feature extraction», en *12th IFToMM World Congress*, 2007.
- [71] K. M. Bhavaraju, P. K. Kankar, S. C. Sharma, y S. P. Harsha, «A comparative study on bearings faults classification by artificial neural networks and self-organizing maps using wavelets», *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, n.º 5, pp. 1001–1008, 2010.
- [72] Y. Yang, D. Yu, y J. Cheng, «A fault diagnosis approach for roller bearing based on IMF envelope spectrum and SVM», *Measurement*, vol. 40, n.º 9, pp. 943–950, 2007.
- [73] G. Urquizo Calderon, «Análisis de vibraciones para detección temprana de fallas en cojinetes de tipo anti-fricción», B.S. thesis, 1991.
- [74] Z. Liu, H. Cao, X. Chen, Z. He, y Z. Shen, «Multi-fault classification based on wavelet SVM with PSO algorithm to analyze vibration signals from rolling element bearings», *Neurocomputing*, vol. 99, pp. 399–410, 2013.
- [75] A. Widodo *et al.*, «Fault diagnosis of low speed bearing based on relevance vector machine and support vector machine», *Expert Syst. Appl.*, vol. 36, n.º 3, pp. 7252–7261, 2009.
- [76] F. Chen, B. Tang, y R. Chen, «A novel fault diagnosis model for gearbox based on wavelet support vector machine with immune genetic algorithm», *Measurement*, vol. 46, n.º 1, pp. 220–232, 2013.
- [77] R. Rubini y U. Meneghetti, «Application of the envelope and wavelet transform analyses for the diagnosis of incipient faults in ball bearings», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 15, n.º 2, pp. 287–302, 2001.
- [78] A. Rezaei, A. Dadouche, V. Wickramasinghe, y W. Dmochowski, «A comparison study between acoustic sensors for bearing fault detection under different speed and load using a variety of signal processing techniques», *Tribol. Trans.*, vol. 54, n.º 2, pp. 179–186, 2011.
- [79] H. Shao, H. Jiang, F. Wang, y Y. Wang, «Rolling bearing fault diagnosis using adaptive deep belief network with dual-tree complex wavelet packet», *ISA Trans.*, vol. 69, pp. 187–201, 2017.
- [80] Y. Lei y M. J. Zuo, «Gear crack level identification based on weighted K nearest neighbor classification algorithm», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 23, n.º 5, pp. 1535–1547, 2009.
- [81] V. E. Starzhinskii, Y. L. Soliterman, A. M. Goman, y S. A. Osipenko, «Forms of damage to gear wheels: Typology and recommendations on prevention», *J. Frict. Wear*, vol. 29, n.º 5, pp. 340–353, 2008.
- [82] X. Liang, M. J. Zuo, y M. R. Hoseini, «Vibration signal modeling of a planetary gear set for tooth crack detection», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 48, pp. 185–200, 2015.

- [83] F. Chaari, T. Fakhfakh, y M. Haddar, «Analytical modelling of spur gear tooth crack and influence on gearmesh stiffness», *Eur. J. Mech.-ASolids*, vol. 28, n.º 3, pp. 461–468, 2009.
- [84] R. Errichello, «Gear Bending Fatigue Failure and Bending Life Analysis», en *Encyclopedia of Tribology*, Springer, 2013, pp. 1467–1468.
- [85] B. Errichello y J. Muller, «How to analyze gear failures», *Machinery Lubrication*. [En línea]. Disponible en: /Read/150/gear-failures. [Accedido: 26-dic-2017].
- [86] Rexnord, «Failure analysis gears-shafts-bearings-seals». 1978.
- [87] O. D. Mohammed, M. Rantatalo, y J.-O. Aidanpää, «Dynamic modelling of a one-stage spur gear system and vibration-based tooth crack detection analysis», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 54, pp. 293–305, 2015.
- [88] H. J. Decker, «Crack detection for aerospace quality spur gears», 2002.
- [89] X. Zhang *et al.*, «Experimental and numerical investigation of fatigue crack growth in the cracked gear tooth», *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 40, n.º 7, pp. 1037–1047, 2017.
- [90] D. G. Lewicki y R. Ballarini, «Gear crack propagation investigations», *Lubr. Sci.*, vol. 5, n.º 2, pp. 157–172, 1998.
- [91] D. Wang, K.-L. Tsui, P. W. Tse, y M. J. Zuo, «Principal components of superhigh-dimensional statistical features and support vector machine for improving identification accuracies of different gear crack levels under different working conditions», *Shock Vib.*, vol. 2015, 2015.
- [92] Z. Li, X. Yan, Y. Jiang, L. Qin, y J. Wu, «A new data mining approach for gear crack level identification based on manifold learning», *Mechanics*, vol. 18, n.º 1, pp. 29–34, 2012.
- [93] N. Ahamed, Y. Pandya, y A. Parey, «Spur gear tooth root crack detection using time synchronous averaging under fluctuating speed», *Measurement*, vol. 52, pp. 1–11, 2014.
- [94] F. A. Andrade, I. Esat, y M. N. M. Badi, «A new approach to time-domain vibration condition monitoring: gear tooth fatigue crack detection and identification by the Kolmogorov–Smirnov test», *J. Sound Vib.*, vol. 240, n.º 5, pp. 909–919, 2001.
- [95] S. Biswal, J. D. George, y G. R. Sabareesh, «Fault size estimation using vibration signatures in a wind turbine test-rig», *Procedia Eng.*, vol. 144, pp. 305–311, 2016.
- [96] H. Ma, X. Pang, R. Feng, R. Song, y B. Wen, «Fault features analysis of cracked gear considering the effects of the extended tooth contact», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 48, pp. 105–120, 2015.
- [97] S. P. Nigam, «A study on gearbox noise with induced tooth defects», 2015.
- [98] S. Ebersbach, Z. Peng, y N. J. Kessissoglou, «The investigation of the condition and faults of a spur gearbox using vibration and wear debris analysis techniques», *Wear*, vol. 260, n.º 1, pp. 16–24, 2006.
- [99] J. J. Liou, «A theoretical and experimental investigation of roller and gear scuffing», The Ohio State University, 2010.
- [100] M. A. Klein, «An experimental investigation of materials and surface treatments on gear contact fatigue life», The Ohio State University, 2009.
- [101] B.-R. Höhn y K. Michaelis, «Influence of oil temperature on gear failures», *Tribol. Int.*, vol. 37, n.º 2, pp. 103–109, 2004.
- [102] A. Dyson, «Scuffing-a review», *Tribol. Int.*, vol. 8, n.º 2, pp. 77–87, 1975.
- [103] *Effect of lubrication on gear surface distress*, vol. AGMA 925-A03. 2003.
- [104] S. Galindo López, I. Mecánico, y S. G. López, «Diseño y análisis de resistencia de materiales en engranajes cónicos espirales e hipoidales», B.S. thesis, Universidad EAFIT, 2009.
- [105] P. J. Blau, *ASM Handbook, Volume 18-Friction, Lubrication, and Wear Technology*. ASM international, 1992.

- [106] E. Conrado, B. R. Höhn, K. Michaelis, y M. Klein, «Influence of oil supply on the scuffing load-carrying capacity of hypoid gears», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 221, n.º 8, pp. 851–858, 2007.
- [107] J. Castro y J. Seabra, «Global and local analysis of gear scuffing tests using a mixed film lubrication model», *Tribol. Int.*, vol. 41, n.º 4, pp. 244–255, 2008.
- [108] H. E. G. Powrie, R. J. K. Wood, T. J. Harvey, y S. Morris, «Re-analysis of electrostatic wear-site sensor data from FZG gear scuffing tests», *Wear*, vol. 1, p. S2, 2001.
- [109] M. Kalin y J. Vižintin, «The tribological performance of DLC-coated gears lubricated with biodegradable oil in various pinion/gear material combinations», *Wear*, vol. 259, n.º 7, pp. 1270–1280, 2005.
- [110] B.-R. Höhn, K. Michaelis, y H.-P. Otto, «Influence of immersion depth of dip lubricated gears on power loss, bulk temperature and scuffing load carrying capacity», *Int. J. Mech. Mater. Des.*, vol. 4, n.º 2, pp. 145–156, 2008.
- [111] R. W. Snidle, H. P. Evans, M. P. Alanou, y M. J. Holmes, «Understanding scuffing and micropitting of gears», University of Wales Coll of Cardiff (United Kingdom) School of Engineering, 2004.
- [112] R. Michalczewski, M. Kalbarczyk, W. Tuszynski, y M. Szczerek, «The scuffing resistance of WC/C coated spiral bevel gears», en *Key Engineering Materials*, 2014, vol. 604, pp. 36–40.
- [113] G. Niemann, H. Rettig, y G. Lechner, «Scuffing tests on gear oils in the FZG apparatus», *Asle Trans.*, vol. 4, n.º 1, pp. 71–86, 1961.
- [114] R. M. Abraham, «An Experimental Study of Scuffing Performance of a Helical Gear Pair Subjected to Different Lubrication Methods», The Ohio State University, 2014.
- [115] J. W. Brenneman, «An Experimental Study on the Scuffing Performance of High-Power Spur Gears at Elevated Oil Temperatures», The Ohio State University, 2013.