



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“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”**

*“Acquisition of vibrational and acoustic emissions signals combining faults in rotary
machine and development of practice guides on gears faults detection by acoustic
emission”*

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

Autores:

Christian German Ortiz Farfán
Iván Andrés Pérez Rivera

Tutor del trabajo:

Ing. René Vinicio Sánchez

Cuenca, Octubre 2016

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

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

*“Acquisition of vibrational and acoustic emissions signals combining faults in rotary
machine and development of practice guides on gears faults detection by acoustic
emission”*

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

Autores:

Christian German Ortiz Farfán
cortizf@est.ups.edu.ec
Iván Andrés Pérez Rivera
iperez@est.ups.edu.ec

Tutor del trabajo:

Ing. René Vinicio Sánchez
rsanchezl@ups.edu.ec

Cuenca, Octubre 2016

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Christian German Ortiz Farfán, con documento de identificación N° 0103623096, 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 grado intitulado: “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”, 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.



.....
Nombre: Christian German Ortiz Farfán

Cédula: 0103623096

Fecha: 2016-10-14

Yo Iván Andrés Pérez Rivera, con documento de identificación N° 0704337401, 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 grado intitulado: “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”, 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.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Iván Pérez R', with a large, stylized flourish extending from the end of the signature.

.....
Nombre: Iván Andrés Pérez Rivera

Cédula: 0704337401

Fecha: 2016-10-14

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD

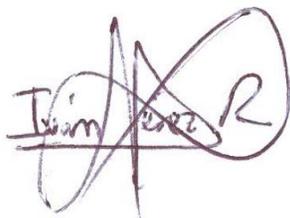
Nosotros, Christian German Ortiz Farfán e Iván Andrés Pérez Rivera declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación profesional y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Nombre: Christian German Ortiz Farfán

Cédula: 0103623096

Fecha: 2016-10-14



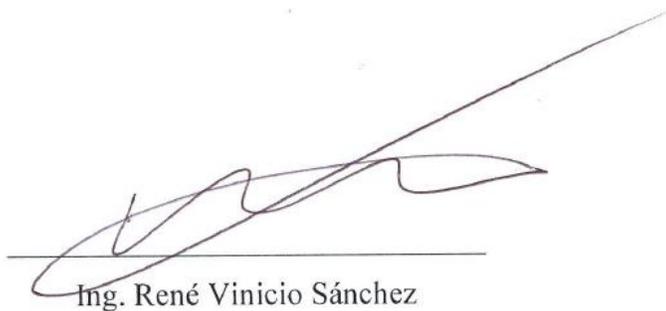
Nombre: Iván Andrés Pérez Rivera

Cédula: 0704337401

Fecha: 2016-10-14

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Que el presente trabajo 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”, realizado por los estudiantes Christian German Ortiz Farfán e Iván Andrés Pérez Rivera, fue dirigido por mi persona.

A handwritten signature in dark ink, appearing to read 'Ing. René Vinicio Sánchez', is written over a horizontal line. The signature is stylized and cursive.

DEDICATORIA

Dedicado para Gabriel que a pesar de no estar conmigo durante este camino, siempre fue una inspiración para seguir el camino que realmente me hace feliz,

A mis padres Norma y Franklin, que con su apoyo incondicional lograron que esta meta sea cumplida,

Christian Ortiz Farfán

DEDICATORIA

Dedicado con amor filial a la Siempre Virgen María autora de mi conversión a Dios,
A mi familia siendo el apoyo más importante a lo largo de mi vida y,
Amistades que me encomendaron en sus oraciones.

Iván Pérez Rivera

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres Norma y Franklin que me brindaron su apoyo, tiempo y paciencia durante este arduo camino. Mis hermanas Priscila y Andrea por las palabras de aliento durante los momentos difícil de mi vida universitaria. Y de manera especial a mis abuelos Martha y Gabriel que con su ejemplo inspiraron mi vida y me brindaron sus sabios consejos durante todos estos años.

Al Ing. Vinicio Sánchez, Diego Cabrera, Mariela Cerrada, Fania Pacheco, Jean Carlo, Pablo, Édison y Andrés, miembros del grupo de investigación GIDTEC, que siempre me impulsaron a dar lo mejor de mí a pesar de las adversidades que se presentaron en el camino, colaborando activamente para que este proyecto de titulación sea una realidad.

A los laboratoristas Carlos, Mauricio y Ana, que siempre me ayudaron a resolver cualquier inconveniente que se presentara durante el desarrollo del proyecto, brindando su amistad y conocimientos.

A mis amigos y compañeros Renato, Lisseth, Cesar, Tito, Makarena, Iván, Cristian y Carlos. Por los buenos, malos e inolvidables momentos que pasamos durante todos estos años.

Christian Ortiz Farfán

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento sincero para la Santísima Trinidad que ha recobrado sentido a mi vida. Dios Padre que me ha regalado la oportunidad de ver su creación, Dios Hijo Jesucristo quien entregó su vida en una cruz por mi salvación y la de mis hermanos, y Dios Espíritu Santo que me ha permitido tener deseos de luchar para la santidad. A mi Madre Santísima, la Virgen María que es la intercesora por excelencia de Nuestro Señor y mediante Ella he logrado cumplir con este objetivo. A mi santo patrono Don Bosco a quien he consagrado esta tesis, a todos los santos, mártires y ángeles del cielo que intercedieron para este logro.

Agradecido totalmente con mi familia que ha sido pilar y sostén para cumplir con esta meta. Mi padre Iván quien ha sido mi ejemplo cumpliendo como cabeza del hogar dignamente, a mi madre Angélica que se ha dedicado en cultivar una familia con buenos valores, mis hermanas María Romina y María José, que son y serán la razón de mi lucha día a día por verlas siempre felices. Mi ñaña Sonia con una fe inmensa buscando el bienestar de sus hijos adoptivos. Rosi y Lucho que continúan conmigo desde mi nacimiento. Tíos, primos, abuelos en especial a mi abuelita Charito que sigue jugando a las escondidas. Toda la familia Cornejo quienes han estado en las buenas y malas.

A la ciudad de Cuenca por su favorable acogida en esta parte del país, a la universidad por la calidad de profesores y compañeros que he ido conociendo a lo largo de la carrera. Al grupo de investigación GIDTEC, un especial reconocimiento, del cual he formado parte hace un año y medio aprovechando todos los recursos, las facilidades y la desinteresada transmisión de conocimientos de nuestro director, tutor, profesor y amigo el Ing. Vinicio Sánchez. A Christian, mi compañero de tesis, por su paciencia y generosidad.

Eternamente agradecido con todos los nombrados, Dios en su misericordia los bendiga infinitamente.

Iván Pérez Rivera

RESUMEN

En el presente proyecto técnico se realiza un levantamiento de señales de vibraciones y de emisiones acústicas en un sistema rotativo, simulando fallos en engranes rectos y helicoidales de una caja de engranajes, también se ha propuesto la construcción de fallos en rodamientos; esto con la finalidad de brindar un aporte en el estudio de detección y diagnóstico de fallos en maquinaria mediante señales de vibraciones mecánicas y emisiones acústicas. De la misma forma, se realiza tres guías de prácticas dirigidas para los estudiantes de pregrado de la carrera de Ingeniería Mecánica interesados en al área de mantenimiento basado en la condición enfocado en la técnica de emisiones acústicas.

El capítulo 1 contiene la introducción del proyecto de grado, el problema y los objetivos planteados. De esta forma se narra sobre la importancia del monitoreo de la condición mediante la adquisición de señales vibracionales y emisiones acústicas para la detección y diagnóstico temprano de fallos en maquinaria rotativa dirigido al campo industrial. Por otro lado, se reconoce los inconvenientes que existe al momento de utilizar elementos como ruedas dentadas y rodamientos en una planta, y lo beneficioso que sería disminuir éste tipo de percance con los estudios que se realiza en el grupo de investigación GIDTEC.

En el capítulo 2 se realiza un marco teórico del proyecto en donde se han destacado temas como fallos en engranes y rodamientos, mantenimiento basado en la condición y emisiones acústicas. Para los fallos en engranes y cojinetes se ha utilizado normas (ISO y ANSI/AGMA) que han permitido realizar una clasificación amplia y general de fallos en los elementos nombrados. Se analiza el concepto y aspectos importantes del mantenimiento basado en la condición de la cual se destaca con mayor información la técnica de emisiones acústicas.

El capítulo 3 describe la configuración del sistema mecánico rotativo a analizar, haciendo una descripción general del banco para el montaje con recomendaciones de ejecución. Se indica la construcción de fallos en los rodamientos y engranes tanto rectos como helicoidales que se utilizan en la maquinaria para el levantamiento de señales de

vibraciones mecánicas y emisiones acústicas. También se ha seguido el formato del plan experimental creado en el grupo de investigación para la realización de la base de datos.

En el capítulo 4 se presenta un análisis para la elaboración y validación de tres guías de prácticas que han sido el resultado del proyecto; en donde se expone el uso, reconocimiento y diferenciación del sensor acústico utilizado para detectar fallos en un sistema rotativo. La evaluación de las guías ha sido realizada por estudiantes de la carrera con lo que se establece un material de apoyo para el mejor entendimiento de estos temas afines al mantenimiento industrial en estudiantes de pregrado. Finalmente, se realiza las conclusiones y recomendaciones del proyecto acordes a los objetivos planteados y una propuesta de trabajos futuros para nuevas investigaciones de GIDTEC.

ABSTRACT

In this technical project is performed a gathering of vibration and acoustic emissions signals in a rotary system, simulating faults on spur and helical gears of gear box. It has also proposed building a faults bearing; this in order to provide a development to the study of detection and diagnosis of faults in machinery through mechanical vibration and acoustic emissions signals. In the same way, three practice guides are designed to undergraduate students of Mechanical Engineering interested in the main area previously mentioned.

Chapter 1 contains the project introduction, the problem and the objectives. Therefore, way it starts with the importance of condition monitoring by acquiring vibrational and acoustic emissions signals for early detection and diagnosis of faults in rotating machinery aimed at the industrial field. On the other hand, it is recognized the disadvantages that exists when using elements such as gears and bearings in a plant, and the benefits obtained since reducing this type of problem with the researches done in the investigation team GIDTEC.

The Chapter 2 is performed by a theoretical framework of the project, where it's been detailed topics such as gears and bearings faults, condition-based maintenance and acoustic emissions. Quality standards as ISO and ANSI/AGMA have been used to qualify in a wide area the mentioned equipment. It analyzes the concept and important aspects of condition-based maintenance, which stands out more information acoustic emission technique.

Chapter 3 describes the configuration of the mechanical rotary system, making an overview of the bank for assembling with implementing recommendations. It has indicated the building bearings and gears faults even in the spurs and the helical ones which are used in machinery for the gathering of the mechanical vibration and acoustic emissions signals. All of this, following, which has been created for the realization of the database by the investigation team.

Chapter 4 presents the analysis for the development and validation of three practices guides that have been the result of the project; where the use, it shows recognition and differentiation of the acoustic sensor used for detecting faults in a rotary system. The

evaluation of these guides has been performed by students of the degree course with what it's been established a support material for better understanding of these related issues in industrial maintenance undergraduate students. Finally, the paper ends with the conclusions and recommendations of the project according to the stated objectives and a suggested future topics and projects for new researches in GIDTEC.

ÍNDICE

Cesión de derechos de autor	II
Certificado de responsabilidad.....	IV
Certificado de dirección del trabajo de titulación.....	V
Dedicatoria.....	VI
Agradecimientos	VIII
Resumen.....	X
Abstract.....	XII
Índice.....	XIV
Índice de figuras.....	XVIII
Índice de tablas	XXI
1 Capítulo 1	1
1.1 Introducción	1
1.2 Problema	2
1.2.1 Antecedentes.....	2
1.2.2 Importancia y alcance.....	3
1.2.3 Delimitación.....	5
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
2 Capítulo 2	6
2.1 Fallos en rodamientos y engranajes.....	6
2.2 Fallos en rodamientos	6
2.2.1 Clasificación de fallos en rodamientos	6
2.2.1.1 Fatiga por contacto (<i>Rolling contact fatigue</i>).....	7

2.2.1.2	Desgaste (<i>Wear</i>)	8
2.2.1.3	Corrosión (<i>Corrosion</i>)	8
2.2.1.4	Erosión eléctrica (<i>Electrical erosion</i>)	9
2.2.1.5	Deformación plástica (<i>Plastic deformation</i>)	10
2.2.1.6	Grietas y fracturas (<i>Fracture and cracking</i>)	11
2.3	Fallos en engranajes	11
2.3.1	Desgaste (<i>Wear</i>)	12
2.3.1.1	Desgaste por Deslizamiento (<i>Sliding wear</i>)	14
2.3.1.2	Corrosión (<i>Corrosion</i>)	14
2.3.2	Gripado (<i>Scuffing</i>)	14
2.3.3	Deformación permanente (<i>Permanent deformation</i>)	15
2.3.4	Fenómenos de fatiga superficial (<i>Surface fatigue phenomena</i>)	16
2.3.4.2	Agrietamiento (<i>Cracking</i>)	18
2.3.4.3	Fractura (<i>Fracture</i>)	19
2.4	Mantenimiento basado en la condición	21
2.4.1	Análisis vibracional	26
2.4.1.1	Normas del análisis vibracional	26
2.4.2	Emisiones Acústica	30
2.4.2.1	Evolución en el estudio de emisiones acústicas	30
2.4.2.2	Propagación de las ondas acústicas	31
2.4.2.3	Tipos de ondas de emisiones acústicas	32
2.4.2.4	Señales de emisión acústica	33
2.4.2.5	Parámetros de señales acústicas	34
2.4.2.6	Equipo de adquisición	35
2.4.2.7	Normas sobre emisiones acústicas	37
2.4.2.8	Aplicaciones	38

2.4.2.9	Detección de fallos en engranes usando emisiones acústicas	39
2.4.2.10	Ventajas y desventajas de la aplicación de emisiones acústicas.....	42
2.4.2.11	Posición de sensor de emisiones acústicas	42
3	Capítulo 3	43
3.1	Selección y caracterización de fallos en engranes	44
3.1.1	Grietas (<i>Crack</i>)	44
3.1.2	Picadura (<i>Pitting</i>)	45
3.1.3	Desgaste abrasivo (<i>Abrasive wear</i>).....	46
3.1.4	Gripado (<i>Scuffing</i>).....	48
3.1.5	Construcción de fallos	49
3.2	Selección y caracterización de fallos en rodamientos.....	54
3.3	Definición del plan experimental	55
3.4	Desmontaje de sistema anterior y limpieza de elementos	56
3.5	Montaje de elementos mecánicos y sensores	58
3.6	Establecimiento de base de datos.....	59
3.6.1	Verificación visual.....	59
3.6.2	Verificación de ruidos extraños	59
3.6.3	Verificación de frecuencias características.....	59
3.6.4	Establecimiento de línea base	62
4	Capítulo 4	63
4.1	Descripción del sistema mecánico rotativo para la guía de prácticas.....	63
4.2	Descripción de sensor de emisiones acústicas.....	64
4.3	Descripción del equipo de procesamiento	65
4.3.1	Preamplificador	65
4.3.2	Tarjeta de adquisición	66
4.3.2.1	Acondicionamiento de Señales	66
4.3.2.2	Convertidor Analógico Digital (ADC).....	66

4.3.2.3	Módulos de adquisición.....	66
4.3.2.4	Chasis.....	68
4.3.3	Programa de adquisición	68
4.3.3.1	Ubicación de archivos recopilados	69
4.3.3.2	Botones de inicio	69
4.3.3.3	Parámetros de prueba.....	70
4.3.3.4	Ventana de señales.....	70
4.3.3.5	Botones de adquisición	71
4.3.3.6	Visualización de estado	71
4.4	Selección de fallos	71
4.4.1	Disposición de fallos en engranes	72
4.5	Guías de prácticas sobre emisiones acústicas.....	72
4.5.1	Consulta bibliográfica sobre emisiones acústicas	74
4.5.2	Requerimientos de guías de prácticas según formato establecido.....	74
4.5.3	Elaboración de guías de prácticas sobre emisiones acústicas.....	75
4.5.4	Revisión de guías de prácticas de emisiones acústicas	75
4.5.5	Ejecución de guías de prácticas de emisiones acústicas	76
4.5.6	Validación de guías de prácticas de emisiones acústicas.....	76
4.5.6.1	Calificación de guías de prácticas de emisiones acústicas	76
4.5.6.2	Resultados de la evaluación de guías de prácticas de emisiones acústicas	77
	Conclusiones.....	78
	Recomendaciones	79
	Trabajos futuros	79
	Referencias bibliográficas.....	81
	Anexos	90
	Anexo A1.....	91

Anexo A2.....	105
Anexo A3.....	112
Anexo B1.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de causas en fallos de rodamiento [1].....	2
Figura 2. Fallos en cajas de engranajes, conforme estudio de BHP Billiton [3]	3
Figura 3. Orden de clasificación de rodamientos y engranajes	6
Figura 4. Fatiga por contacto en rodamiento[13].....	7
Figura 5. Clasificación de fatiga por contacto según ISO 15243	7
Figura 6. Clasificación de desgaste según ISO 15243	8
Figura 7. Rodamiento con desgaste abrasivo en pista interna [13].....	8
Figura 8. Rodamiento con corrosión en pista interna [13].....	8
Figura 9. Clasificación de corrosión según ISO 15243	9
Figura 10. Elementos rodantes con fallo por erosión eléctrica [18]	9
Figura 11. Clasificación de erosión eléctrica según ISO 15243	10
Figura 12. Fallo por fatiga en pista interna y externa de rodamiento [13].....	10
Figura 13. Clasificación de deformación plástica según ISO 15243	10
Figura 14. Fallo por <i>crack</i> en pista interna [13].....	11
Figura 15. Clasificación de fractura según ISO 152434	11
Figura 16. Engranaje con fallo por <i>wear</i> [25].....	12
Figura 17. Clasificación de desgaste según ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010 E-95	13
Figura 18. Clasificación de gripado según ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010 E-95.....	14
Figura 19. Fallo por <i>mild scuffing</i> [34]	14
Figura 20. Clasificación deformaciones permanentes según ISO 10825- ANSI/AGMA 1010 E-95.....	15
Figura 21. Engrane con fallo por <i>plastic deformation</i> [37]	16
Figura 22. Clasificación fatiga superficial según ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010 E-9516	
Figura 23. <i>Pitting</i> inicial [37].....	17
Figura 24. Macro <i>pitting</i>	17

Figura 25. Clasificación de fisuras-grietas según ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010 E-95	18
Figura 26. Fallo por <i>crack</i> en engrane [39].....	19
Figura 27. <i>Fracture</i> [39]	19
Figura 28. Clasificación general en ruedas dentadas	20
Figura 29. Filosofía de técnicas de mantenimiento [5].....	22
Figura 30. Identificación temprana de un fallo en la maquinaria [41].....	23
Figura 31. Optimización del mantenimiento [11].....	23
Figura 32. Fases de un programa de mantenimiento basado en la condición [5]	24
Figura 33. Características de velocidad y aceleración de un objeto que vibra [45].....	26
Figura 34. Normas de vibraciones [46].....	27
Figura 35. Problemas comunes en sistemas rotativos [47]	28
Figura 36. Señal de vibración de una máquina [7]	28
Figura 37. Transformación de una vibración al dominio de frecuencia [42].....	29
Figura 38. Evolución de las emisiones acústicas	31
Figura 39. Morfología de una señal de emisiones acústicas [49]	32
Figura 40. Propagación de onda P de emisión acústica	32
Figura 41. Propagación de onda S de emisión acústica	33
Figura 42. Propagación de onda rayleigh de emisión acústica	33
Figura 43. Señal transitoria [49]	33
Figura 44. Señal continua [49].....	34
Figura 45. Parámetros de señal de EA [56]	34
Figura 46. Equipo utilizado para proceso de EA [49]	35
Figura 47. Resumen de tipos de acoplamiento	36
Figura 48. Sensor tipo <i>airborne</i> [66]	36
Figura 49. Sensor tipo <i>differential</i> [66].....	37
Figura 50. Sensor tipo <i>flat frequency response</i> [66].....	37
Figura 51. Sensor tipo general <i>purpose</i> [66].....	37
Figura 52. Sensor tipo <i>high temperature</i> [66].....	37
Figura 53. Normas ISO emisiones acústicas.....	38
Figura 54. Proceso para aplicación de EA	40

Figura 55. Posición del sensor acústico [72]	42
Figura 56. Banco de vibraciones.....	43
Figura 57. Secuencia para el establecimiento de una base de datos	44
Figura 58. Fallo por <i>crack</i>	45
Figura 59. Fallo por <i>pitting</i>	46
Figura 60. Fallo por <i>abrasive wear</i> [21]	48
Figura 61. Fallo <i>scuffing</i>	49
Figura 62. Construcción de fallos	49
Figura 63. Ubicación de engranes.....	50
Figura 64. Proceso para el desmontaje de banco de vibraciones	57
Figura 65. Montaje de elementos mecánicos	58
Figura 66. Verificación de sistema mecánico rotativo.....	59
Figura 67. Espectro vibracional característico en caja de engranajes en buenas condiciones [86].....	60
Figura 68. FFT de señal de vibración sin aplicación de ventana	61
Figura 69. FFT de señal de vibración con aplicación de ventana.....	61
Figura 70. Pasos para la adquisición de señales [87].....	63
Figura 71. Sensor acústico WD S/N FV52 [88]	64
Figura 72. Soporte magnético MHSTD	65
Figura 73. Preamplificador 0/2/4C [89].....	65
Figura 74. NI 9205 [90]	67
Figura 75. NI 9233 [91]	67
Figura 76. NI 9225 [92]	67
Figura 77. NI 9227 [93]	67
Figura 78. NI 9234 [94]	67
Figura 79. NI 9401 [95]	67
Figura 80. Chasis NI cDAQ-9188 [96].....	68
Figura 81. Programa de adquisición de señales	69
Figura 82. Ubicación de archivos	69
Figura 83. Botones de inicio	69
Figura 84. Parámetros de prueba	70

Figura 85. Ventana de señales	70
Figura 86. Botones de adquisición.....	71
Figura 87. Verificación de estado	71
Figura 88. Disposición de engranes para guía de práctica.....	72
Figura 89. Diagrama de flujo para establecer una guía de práctica [9]	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fallos en rodamientos	7
Tabla 2. Fallos en engranes.....	12
Tabla 3. Clasificación general de fallos en engranes según las normas ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010-E95	20
Tabla 4. Técnicas de mantenimiento basado en la condición.....	25
Tabla 5. Tipos de ondas de emisiones acústicas [55]	32
Tabla 6. Tipos de sensores de emisiones acústicas.....	36
Tabla 7. Uso de emisiones acústicas.....	39
Tabla 8. Señales de vibración y emisión acústica comparativas	41
Tabla 9. Características de un engrane con fallo <i>crack</i>	44
Tabla 10. Características de un engrane con fallo <i>pitting</i>	45
Tabla 11. Características de un engrane con fallo <i>abrasive wear</i>	47
Tabla 12. Características de un engrane con fallo <i>scuffing</i>	48
Tabla 13. Fallos en engranes.....	50
Tabla 14. Fallos en rodamientos	54
Tabla 15. <i>Experimental plan 6</i>	56
Tabla 16. <i>Experimental plan 7</i>	56
Tabla 17. Frecuencias de elementos rotatorios	60
Tabla 18. Resultados de cálculo de frecuencias.....	61
Tabla 19. Características del sensor acústico WD S/N FV52 [88].....	64
Tabla 20. Características del preamplificador 2/4/6 [89].....	66
Tabla 21. Características de módulos instaladas en el Compac DAQ del laboratorio	67
Tabla 22. Fallos para detección por medio de EA	71
Tabla 23. Resumen de revisión bibliográfica	74

CAPÍTULO 1

1.1 Introducción

Las máquinas al igual que los seres humanos requieren diferente tipo de atención a lo largo de su ciclo de vida. Cada persona maneja su propio plan de mantenimiento, sin embargo las máquinas tienen planes cíclicos que a priori no cambian hasta que dejan de funcionar. Por lo que se ha considerado comentar algunas de las estrategias utilizadas para abordar la problemática de operación y mantenimiento de máquinas utilizadas en la industria que ha derivado en la monitorización de fallos.

La monitorización ha sufrido una evolución ayudada por la inserción de la inteligencia artificial durante los últimos años, de esta forma las industrias tienden a ser inspeccionadas en tiempo real buscando ser eficientes a la hora de producir para ofrecer un mejor servicio a su destinatario final. El enfoque está en la actualización y aplicación de nuevas técnicas de mantenimiento para la maquinaria disponible en la planta industrial, pudiendo optimizar un ahorro prudencial de tiempo y dinero.

Una parada inesperada en la planta demanda un gasto significativo para la organización. Por tanto las prioridades de la industria están enfocadas en mantener una producción estable acentuando en el mantenimiento según la condición del equipo. Con máquinas funcionando 24/7 es necesario la aplicación de nuevas técnicas para la detección a tiempo de un fallo no programado. Cabe recalcar que “fallo” es tomado como una alteración en el elemento mecánico mientras opera la máquina normalmente y “falla” es cuando ha dejado de funcionar.

Las vibraciones mecánicas al igual que las emisiones acústicas son técnica que forman parte del proceso y la metodología de monitorización de fallos permitiendo un mantenimiento basado en la condición, dirigido a equipos de alta y mediana criticidad garantizando un mayor impacto de las modificaciones con menores esfuerzos. Estos diagnósticos técnicos son destinados a las causas de fallos más frecuentes de los equipos avalando un cuidado y subsistencia de las máquinas en un periodo más largo de tiempo.

1.2 Problema

1.2.1 Antecedentes

Los elementos mecánicos que generan inconvenientes en mayor porcentaje a la hora de producir en una industria son: engranajes y rodamientos. Son componentes que se encuentran instalados internamente en máquinas rotativas por lo que es difícil la visualización de algún fallo que pueda existir, soportando carga radial como axial. Se puede detectar los fallos en los sistemas rotativos por medio de monitoreo de condición, el cual posee varias técnicas de análisis tales como: mediciones mecánicas, eléctricas, de magnitud, tribológicas y ensayos no destructivos, cada uno de estos campos abarca diferentes técnicas usadas en el mantenimiento basado en la condición [1].

Los rodamientos son elementos mecánicos que ayudan al movimiento rotativo de una máquina y pueden receptor diferentes tipos de daños según el esfuerzo axial y/o radial que realice el sistema, ya sea en pista interna, pista externa, canastilla o elementos rodantes. La mayoría fallos en rodamientos se dan por la lubricación. La Figura 1, muestra porcentualmente las formas más habituales que generan fallos en los rodamientos.



Figura 1. Porcentaje de causas en fallos de rodamiento [1]

Por su parte los engranes son elementos dentados en los cuales las etapas iniciales de fallo son difíciles de detectar y a medida que se propaga causan averías costosas a la maquinaria de la cual forma parte, de ahí la importancia de un diagnóstico rápido y eficaz. Los daños iniciales en el dentado de los engranajes producen señales de vibración de corta duración,

menor que la de un periodo de engrane entre dientes. En estados posteriores estos daños llegan a provocar que la duración de esas señales sea mucho mayor, incluso más que los periodos de engrane. Otros tipos de fallos tales como la excentricidad y el desgaste, pueden llegar a cubrir la mayor parte del periodo de revolución de un engranaje [2].

La Figura 2 muestra que los engranes también se han visto afectados en su gran mayoría por la mala administración de la lubricación.



Figura 2. Fallos en cajas de engranajes, conforme estudio de BHP Billiton [3]

1.2.2 Importancia y alcance

El mantenimiento basado en la condición es una técnica utilizada para conocer el estado en la maquinaria y recomendar acciones preventivas usando información recogida a través de monitoreo de la condición [4]. A nivel industrial es conocido que al aplicarse estas técnicas de monitoreo continuo se reduce las paradas no programadas, manteniendo la maquinaria operando y teniendo una mayor eficacia en la producción [5]. Al tratarse de sistemas cerrados y máquinas grandes es conveniente utilizar esta metodología para la detección temprana de fallos.

La aplicación de este tipo de mantenimiento conlleva dificultades sobre todo cuando a maquinaria rotativa se refiere, puesto que el fallo se detecta en un nivel avanzado. La velocidad, la carga, el tiempo de funcionamiento son factores que contribuyen a sus fallos más comunes: desbalanceo, desalineación, daños en sus componentes, los cuales dependiendo de su severidad generan distintas señales de vibración y emisiones acústicas

[6],[7],[8]. Un diagnóstico temprano utilizando diversas técnicas en máquinas rotativas, como emisiones acústicas o análisis vibracional se hace inminente para conseguir precauciones mientras funcione [9].

Esto genera la necesidad de crear una base de datos que contenga información de señales tanto vibracionales como de emisiones acústicas de los principales fallos de engranes y rodamientos, los cuales permitirán realizar un aporte científico e industrial proyectando dicho estudio para futuros proyectos de investigación en esta área; además se requiere implementar tres guías de práctica usando emisiones acústicas para la detección de fallos en los mismos.

Un limitado conocimiento sobre mantenimiento basado en la condición genera paros no programados, disminuyendo la productividad y aumentando el coste de mantenimiento [10]. El análisis de vibraciones y emisiones acústicas ayudan de manera directa a una detección temprana de fallos en los elementos que componen un sistema rotativo, pudiendo detectarlas cuando las mismas están en un nivel aceptable sin producir daño en los equipos. Para lo cual se requiere conocer patrones característicos de vibración y emisiones acústica con múltiples fallos [9],[11].

Al tratarse de una maquinaria rotativa, se requiere mayor cantidad de sensores que aporten información valde para una correcta detección de fallos. Las técnicas de mantenimiento basado en la condición requieren de una instrumentación adecuada como acelerómetros, tacómetros, sensores acústico que estarán distribuidos en todo el sistema mecánico [2].

La Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, cuenta actualmente con un laboratorio especializado para la adquisición y análisis de señales para mantenimiento basado en la condición con los recursos necesarios para simular diferentes configuraciones en una maquinaria rotativa, permitiendo aportar en los conocimientos del tema del mantenimiento nombrado y apoyando al sector industrial y a los estudiantes de pregrado desarrollarse dentro de este campo.

1.2.3 Delimitación

El banco de pruebas de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, permite realizar diferentes configuraciones de maquinaria rotativa al combinar los diferentes elementos disponibles entre sí, con lo cual se ha logrado realizar simulaciones lo más cercanas posibles a lo que existe hoy en día dentro de las industrias. 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 de la investigación. El Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC), se encargará de dicho análisis y para la realización de futuros proyectos de investigación con miras hacia industrias que deseen implementar un mantenimiento basado en la condición.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Adquirir señales de vibración y emisiones acústicas de fallos en maquinaria rotativa y elaborar guías de práctica sobre detección de fallos en engranajes por medio de emisiones acústicas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Conceptualizar mediante revisión bibliográfica, las técnicas de mantenimiento basado en la condición y caracterizar fallos tanto en engranajes como rodamientos.
- Configurar la maquinaria rotativa para levantar la base de datos; también establecer los fallos en engranajes y rodamientos a simular.
- Tomar datos de señales de vibración y emisiones acústicas para los distintos fallos seleccionados.
- Elaborar y validar tres guías de prácticas para la detección de fallos en engranajes mediante análisis de señales de emisión acústica.

CAPÍTULO 2

2.1 Fallos en rodamientos y engranajes

Para realizar la siguiente investigación de fallos en rodamientos y ruedas dentadas se ha utilizado un orden de clasificación en los cuales constan: categoría, tipo y subtipo de fallos del elemento en estudio. La Figura 3 indica esquemáticamente la forma que se ha tomado para la clasificación que genera las normas a detallar.

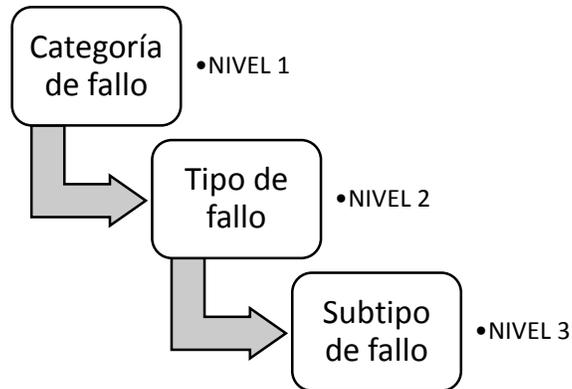


Figura 3. Orden de clasificación de rodamientos y engranajes

2.2 Fallos en rodamientos

Los rodamientos son elementos mecánicos diseñados para soportar esfuerzos, reducir la fricción, servir de apoyo a un eje y transmitir cargas entre los elementos. De tal forma que un fallo en un rodamiento puede generar graves daños a un mecanismo [11]. En términos económicos se reconoce al rodamiento como un elemento cuyo valor no es elevado al comparar con otras piezas en la máquina de la cual hace parte. Sin embargo el tiempo requerido para cambiarlo generando cuantiosas pérdidas económicas [12].

2.2.1 Clasificación de fallos en rodamientos

Varias son las causas por las cuales un rodamiento presenta fallos durante su funcionamiento, como por ejemplo falta de lubricación o desalineamiento en el eje. Su clasificación está dada por la norma ISO 15243, la cual divide a los fallos en seis categorías y 18 tipos de fallos [13]. En la Tabla 1 se nombra las categorías y a su lado entre paréntesis se enumera los tipos de fallos según la norma.

Tabla 1. Fallos en rodamientos

Norma	Categorías de fallos (Tipos)
ISO 15243	<i>Rolling contact fatigue</i> (2)
	<i>Wear</i> (5)
	<i>Corrosion</i> (3)
	<i>Electrical erosion</i> (2)
	<i>Plastic deformation</i> (3)
	<i>Fracture and cracking</i> (3)

2.2.1.1 Fatiga por contacto (*Rolling contact fatigue*)

La fatiga por contacto es uno de los fallos más comunes en los elementos rodantes del rodamientos bajo condiciones normales de carga y velocidad, puesto que durante su funcionamiento se encuentra sometido a un movimiento giratorio constante que provoca su desgaste [14].

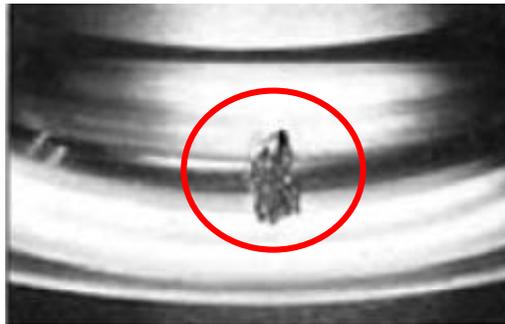


Figura 4. Fatiga por contacto en rodamiento[13]

Su estudio ha tenido un despunte desde 1940, debido al crecimiento de la demanda de rodamientos y la mejora de la teoría de lubricación elastohidrodinámica [15]. Esta categoría a su vez se subdivide en inicios de fatiga en la subsuperficie (*subsurface initiated fatigue*) e inicio de fatiga en la superficie (*surface initiated fatigue*), como se observa en la Figura 5.

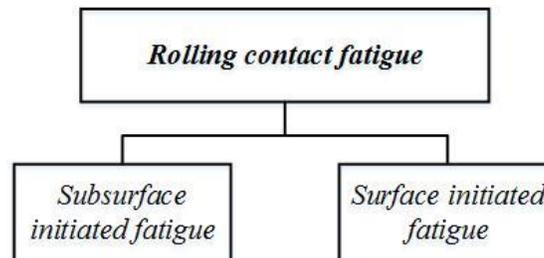


Figura 5. Clasificación de fatiga por contacto según ISO 15243

2.2.1.2 Desgaste (*Wear*)

Es una pérdida de material de cualquiera de las superficies que componen el rodamiento. La norma ISO 15243 reconoce tres tipos de desgaste que son: desgaste abrasivo (*abrasive wear*), desgaste adhesivo (*adhesive wear*) y desgaste por fricción (*fretting wear*), los cuales se presentan en la Figura 6 [13].

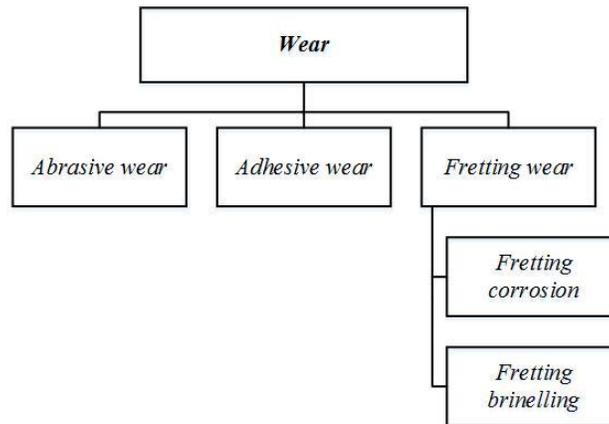


Figura 6. Clasificación de desgaste según ISO 15243

El fallo por desgaste es causado por una mala selección de lubricantes ya sean estos aceites o grasas, que ocasionan un desgaste en los elementos del rodamiento. la presencia de sustancias extrañas como partículas metálicas o polvo de tal forma que acelera este proceso [13],[16],[17].



Figura 7. Rodamiento con desgaste abrasivo en pista interna [13]

2.2.1.3 Corrosión (*Corrosion*)

Desgasta gradualmente las distintas superficies del rodamiento hasta que ya no pueda cumplir con su función, presentando manchas aleatorias como se aprecia en la Figura 8.



Figura 8. Rodamiento con corrosión en pista interna [13]

La corrosión se presenta en la norma ISO 15243, con dos tipos de fallos que son: corrosión por humedad (*moisture corrosion*) y corrosión por fricción (*frictional corrosion*), como se indica en la Figura 9.

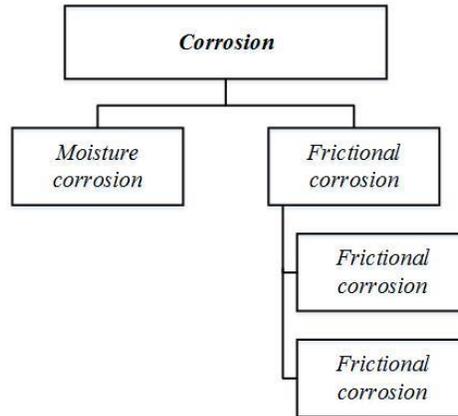


Figura 9. Clasificación de corrosión según ISO 15243

2.2.1.4 Erosión eléctrica (*Electrical erosion*)

Uno de los fallos que se han incrementado notablemente en los últimos años es la erosión eléctrica, el cual es producido por corrientes de baja frecuencia generando un efecto similar al arco eléctrico. Este fallo es producido por los variadores de frecuencia, que a partir de 1990 han tenido un amplio uso y desarrollo a nivel industrial [18]. En la actualidad se busca mitigar este fallo por medio de estudios que analizan las corrientes generadas por el variador de frecuencia [19].

La Figura 10 muestra un rodamiento con fallo por erosión eléctrica, en el cual se encuentra afectada la grasa lubricante, así como sus elementos rodantes.



Figura 10. Elementos rodantes con fallo por erosión eléctrica [18]

Al pasar la corriente por los elementos del rodamiento genera calor y produce corrugaciones en las pistas a más de manchas oscuras en los elementos rodantes acortando

su vida útil [11]. Para la norma ISO 15243, este fallo se subdivide como indica la Figura 11.

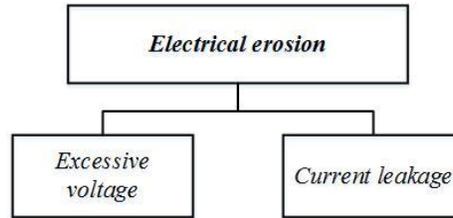


Figura 11. Clasificación de erosión eléctrica según ISO 15243

2.2.1.5 Deformación plástica (*Plastic deformation*)

El fallo por deformación plástica se presenta por lo general una vez superado el ciclo de vida del rodamiento, es decir cuando está próximo a ser reemplazado. Esto no excluye causas anómalas de la maquinaria como son carga extrema, excesiva precarga o cargas axiales, que disminuyen el tiempo de funcionamiento del rodamiento y requieren ser reemplazados para evitar daños en el mecanismo [11].



Figura 12. Fallo por fatiga en pista interna y externa de rodamiento [13]

La norma ISO 15243 subdivide a la deformación plástica en un total de dos tipos de fallos como indica la Figura 13.

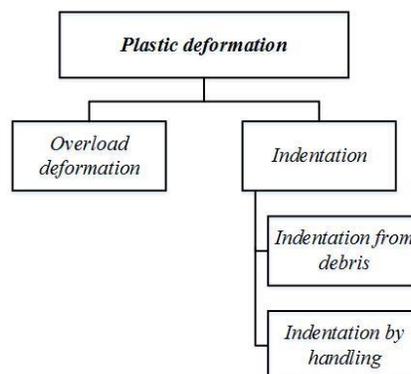


Figura 13. Clasificación de deformación plástica según ISO 15243

2.2.1.6 Grietas y fracturas (*Fracture and cracking*)

Con el avance de la tecnología y procesos de manufactura, se han conseguido nuevos materiales que mejoran las características de los rodamientos. Sin embargo el fallo por grietas sigue presentándose e implica graves daños para el mecanismo [20]. En una primera etapa el fallo se presenta como una grieta en las pistas del rodamiento, la cual es causada por mal montaje del elemento o problemas al retirarlo del eje. En caso de no ser atendido a tiempo el fallo proseguirá a una segunda etapa en la cual se fractura la pista y el rodamiento llega a su fase final de utilidad [11].

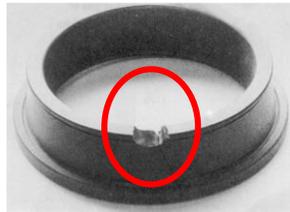


Figura 14. Fallo por *crack* en pista interna [13]

La norma ISO 15243, subdivide a las grietas y fracturas en un total de tres tipos de fallos como indica la Figura 15.

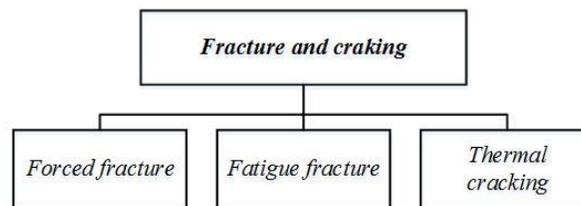


Figura 15. Clasificación de fractura según ISO 152434

2.3 Fallos en engranajes

Los fallos en engranajes se presentan por diversas causas como son la mala lubricación, desalineamiento, fatiga, entre otros. Para su clasificación se cuenta con la norma ANSI/AGMA 1010–E95 y norma ISO 10825 [21],[22].

La norma ISO 10825 (*Gears - Wear and damage to gear teeth - Terminology*) realiza una división y subdivisión de 37 tipos y subtipos de fallos en engranes dispuestos en seis categorías [23], por su parte la norma ANSI/AGMA 1010–E95 (*Standard on Appearance*

of Gear Teeth - Terminology of Wear and Failure) los clasifica en siete categorías con una subdivisión de 36 tipos y subtipos de fallos en los engranes [24].

La Tabla 2 presenta dos normas de clasificación de fallos en engranes y sus respectivas categorías de fallos según las normas ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010-E95, entre paréntesis se expone el número de tipos de fallos presentes en cada categoría.

Tabla 2. Fallos en engranes

Norma	Categoría de fallo (Tipo)
ISO 10825	<i>Indications of surface disturbances</i> (14)
	<i>Scuffing</i> (1)
	<i>Permanent deformations</i> (6)
	<i>Surface fatigue phenomena</i> (6)
	<i>Fissures and cracks</i> (3)
	<i>Tooth breakage</i> (7)
ANSI/AGMA 1010-E95	<i>Wear</i> (10)
	<i>Scuffing</i> (1)
	<i>Plastic deformation</i> (10)
	<i>Contact fatigue</i> (3)
	<i>Cracking</i> (5)
	<i>Fracture</i> (5)
	<i>Bending fatigue</i> (2)

Para diferenciar las dos clasificaciones a lo largo de la explicación de fallos en ruedas dentadas, se ha visto conveniente que la norma ANSI/AGMA 1010-E95 se encierre entre paréntesis para una mejor comprensión y diferenciación.

2.3.1 Desgaste (*Wear*)

Se relaciona al desgaste con desprendimiento o remoción de material en la superficie del engranaje, el cual se da por causas químicas, mecánicas o por la presencia partículas externas en el lubricante [25].

En la Figura 16 se presente un engranaje helicoidal con fallo por desgaste.



Figura 16. Engranaje con fallo por *wear*[25]

Según la norma ANSI/AGMA 1010–E95, el desgaste (*wear*) se divide en adhesión (*adhesion*), abrasión (*abrasion*), pulido (*polishing*), corrosión (*corrosion*), corrosión por fricción (*fretting corrosion*), escalado (*scaling*), cavitación (*cavitation*), erosión (*erosion*), descarga eléctrica (*electrical discharge*), ondulación (*rippling/scratching*). En cuanto a la norma ISO 10825, el fallo es enunciado como indicios de alteraciones en la superficie (*indications of surface disturbances*) y cuenta básicamente con los mismos fallos con otro nombre, aumentando desgaste por interferencia (*interference wear*).

Como resumen de éste fallo, se cuenta con la Figura 17, en la cual se tomó como base la clasificación ISO 10825 agregando entre paréntesis los fallos de la norma ANSI/AGMA 1010-E95.

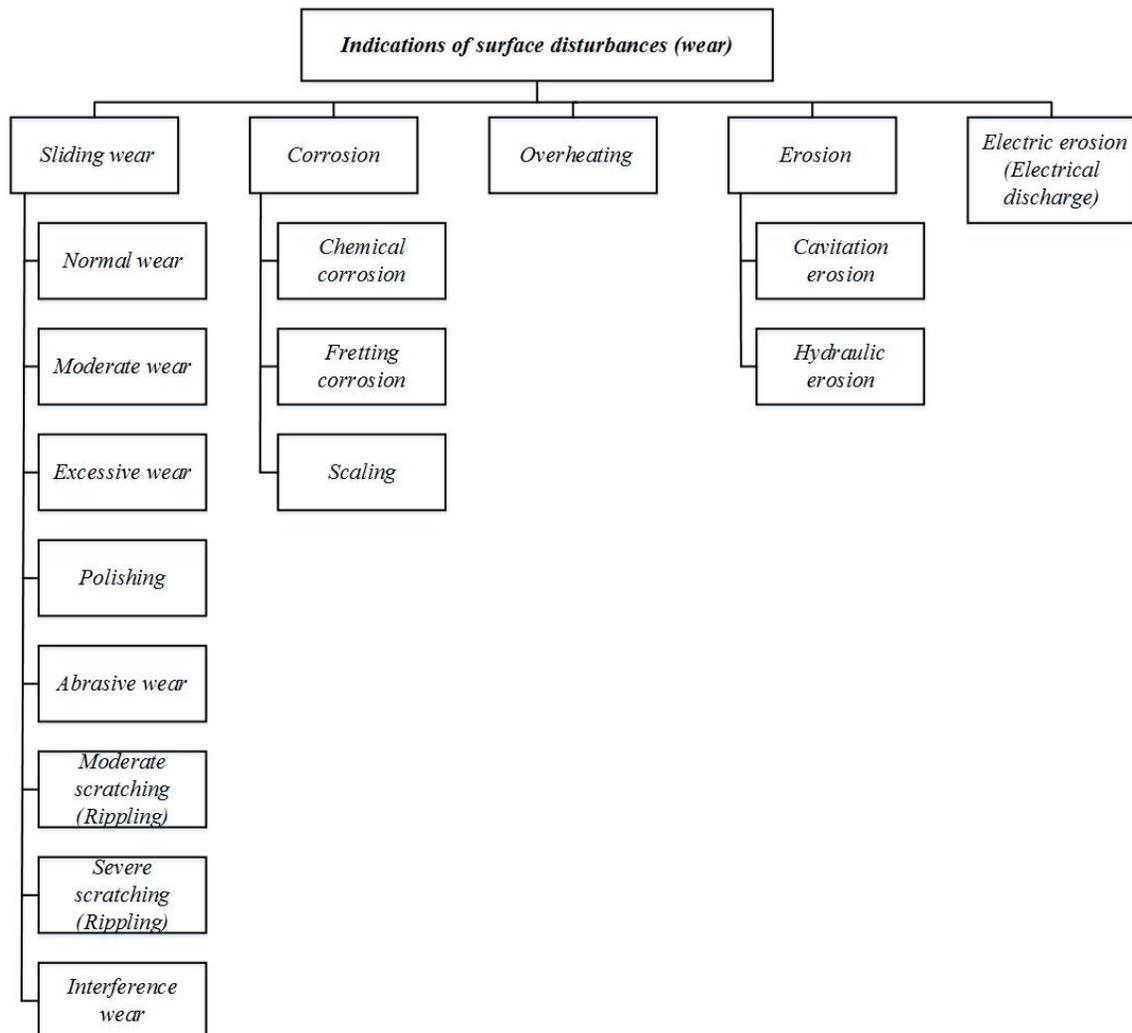


Figura 17. Clasificación de desgaste según ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010 E-95

El desgaste de un engranaje presenta fallos que avanzan con el tiempo de uso llegando a causar graves daños al mecanismo del cual forman parte. Por ende es necesario conocer algunos de sus tipos de fallos más representativos.

2.3.1.1 Desgaste por Deslizamiento (*Sliding wear*)

Este tipo de fallo también se presenta por el contacto del engranaje con partículas duras, usualmente por la contaminación del lubricante con elementos comunes tales como arena, virutas de mecanizado, óxido, salpicaduras de soldadura o desechos del desgaste. De manera general la adhesión puede ser leve o moderada [12], [26],[27],[28],[29],[30],[31].

2.3.1.2 Corrosión (*Corrosion*)

Este tipo de fallo ocurre tras una reacción química o electroquímica entre la superficie del engranaje y el medio ambiente, la cual es causada por agentes externos en el lubricante, es decir la contaminación por agua o ácidos [23],[32],[33].

2.3.2 Gripado (*Scuffing*)

El gripado o rayado es un término usado en las normas ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010 – E95, también conocido como fatiga superficial que ocurre incluso con lubricación adecuada, esto se da en los dientes de los engranajes nuevos. En la Figura 18 se especifica los niveles de daño que causa este daño [34].

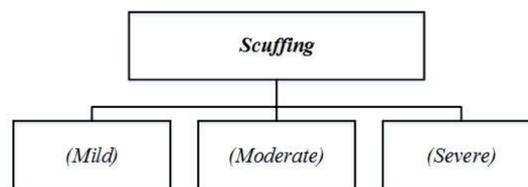


Figura 18. Clasificación de gripado según ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010 E-95

La Figura 19 muestra un engranaje recto con fallo por *scuffing*.



Figura 19. Fallo por *mild scuffing* [34]

2.3.3 Deformación permanente (*Permanent deformation*)

Este daño hace referencia a la deformación existente después de retirada la carga, una vez superando la resistencia última propia del material en el engranaje. En el caso de la norma ISO 10825, este fallo se encuentra en la categoría de deformaciones permanentes, mientras tanto la norma ANSI/AGMA 1010–E95, detalla los siguientes tipos de fallos: muesca (*indentation*), material frío y caliente (*cold y hot flow*), laminación (*rolling*), impacto del diente (*tooth hammer*), ondulación (*rippling*), cresta (*ridging*), rebaba (*burr*), base del diente (*root fillet yielding*), interferencia del diente (*tip-to-root interference*) [25].

La Figura 20 muestra un compendio de las dos normas.

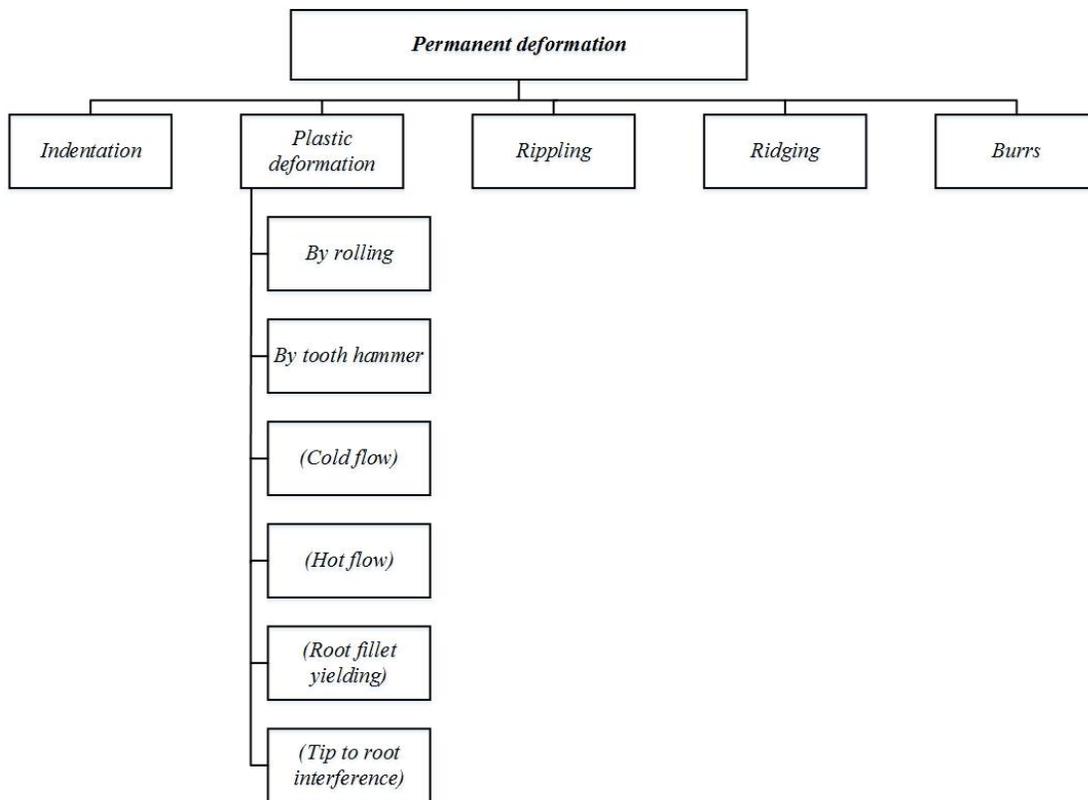


Figura 20. Clasificación deformaciones permanentes según ISO 10825- ANSI/AGMA 1010 E-95

Un fallo a considerar dentro de deformaciones permanente, es la deformación elástica, la cual ocurre cuando el esfuerzo excede el límite de fluencia [35],[36], los subtipos de fallos más importantes en esta categoría son:

- Fluido Frío (*Cold flow*)
- Fluido Caliente (*Hot flow*)
- Por Laminación (*By rolling*)

La Figura 21 muestra un engranaje recto con una deformación permanente a causa de un fallo por *cold flow*.

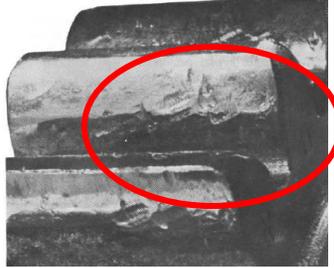


Figura 21. Engranaje con fallo por *plastic deformation* [37]

2.3.4 Fenómenos de fatiga superficial (*Surface fatigue phenomena*)

La norma ISO 10825, establece a esta categoría de fallo como fenómenos de fatiga en la superficie y divide a su vez en cuatro tipos de fallos; mientras que la norma ANSI/AGMA 1010–E95, agrupa estas en: Picaduras (*pitting*), micropicaduras (*micropitting*), otros casos de fatiga (*subcase fatigue*). A modo de resumen se presenta la Figura 22.

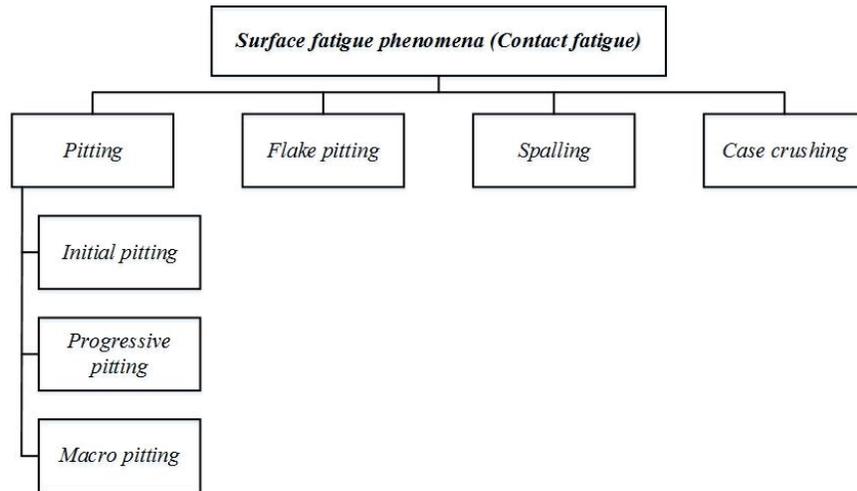


Figura 22. Clasificación fatiga superficial según ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010 E-95

Uno de los principales tipos fallos de esta categoría es *pitting*, el cual tiene una forma de fatiga superficial que puede ocurrir poco después de comenzar la operación y pueden tener de tres subtipos de fallos: inicial, destructiva, normal.

La picadura inicial es causada por áreas locales de alta tensión debido a superficies irregulares sobre el diente del engranaje, como se muestra en la Figura 23. Generalmente es más prominente en engranajes endurecidos [38].

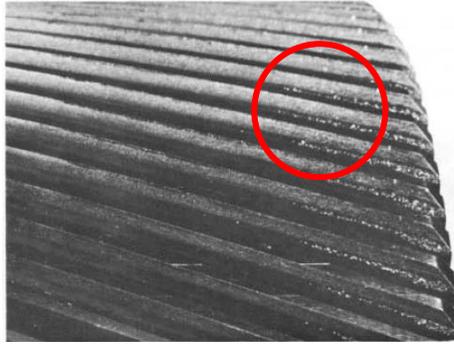


Figura 23. *Pitting* inicial [37]

En cambio, la picadura destructiva o progresiva por el contrario comienza generalmente por debajo de la línea de paso, en la porción dedendum de los dientes y progresivamente los aumentos en el tamaño y número de pozos hasta que se destruye la superficie, como se indica en la Figura 24.

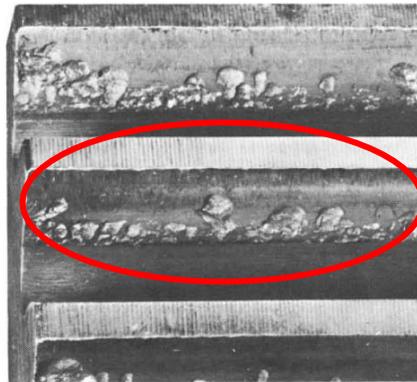


Figura 24. Macro *pitting*

2.3.4.1.1 Fisuras y grietas (*Fissures and cracks*)

La norma ANSI/AGMA 1010-E95 separa en tres tipos de fallos distintos: las grietas, las fisuras y fallos que terminan en rotura de los dientes. Las cuales cuenta con sus correspondientes subtipos de fallos. Sin embargo la norma ISO 10825 toma en cuenta el hecho de que una grieta es la primera etapa de una fisura y por tanto están dentro de la misma categoría.

La Figura 25 muestra los distintos tipos y subtipos de fallos de esta categoría.

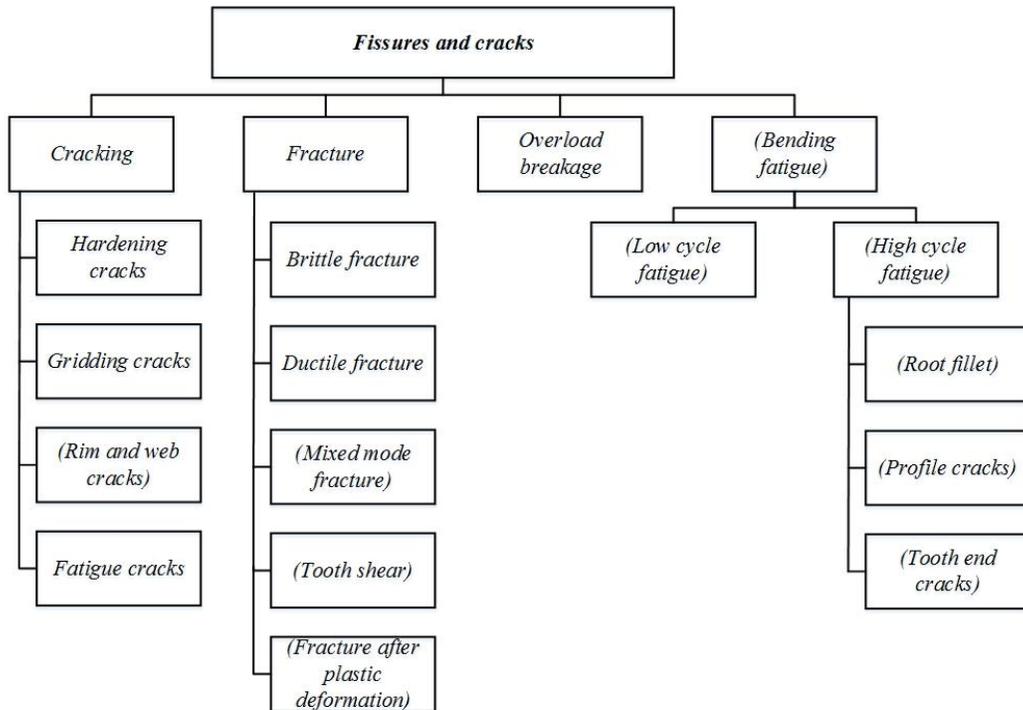


Figura 25. Clasificación de fisuras-grietas según ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010 E-95

2.3.4.2 Agrietamiento (*Cracking*)

Las grietas pueden surgir en cualquier parte del engranaje debido a las altas tensiones mecánicas y/o temperaturas, también por los defectos del material en lo que se refiere a la tecnología de fabricación del mismo [25]. De igual forma existen normas que clasifican este daño, en donde la norma ISO 10825 une “agrietamiento y fractura”; en cambio la norma ANSI/AGMA 1010–E95 realiza un detalle más específico y solo se enfoca en daños con agrietamientos, estudiando los siguientes subtipos de fallos: temple (*hardening cracks*), esmerilado (*grinding*), borde rueda y disco (*wheel rim and disc*), límite de la capa endurecida (*boundary of the hardened layer*), fatiga (*fatigue*).

Las grietas se pueden dar por un mal tratamiento térmico en el cual existe un exceso de tensiones internas que provocan el fallo. Otra causa es el daño causado por el funcionamiento, el cual se presenta por un exceso de velocidad en la labor de los engranajes o un insuficiente suministro de lubricación [25],[39].

La Figura 26 muestra un engrane recto con fallo por *crack*.

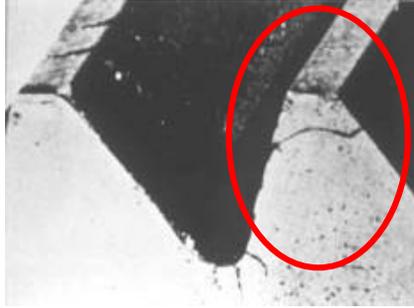


Figura 26. Fallo por *crack* en engrane [39]

2.3.4.3 Fractura (*Fracture*)

Estos tipos de fallos están incluidos en las normas ANSI/AGMA 1010–E95 e ISO 10825. En la primera norma se analizan en la categoría de fractura en sus diversos modos que incluyen: fractura frágil, fractura dúctil, fractura de tipo mixta, diente cizallado y fractura después de la deformación plástica. En la segunda norma se encuentran en el modo de fallo de diente roto, con las siguientes divisiones: rotura por sobrecarga que comprende los tipos de rotura frágil, rotura dúctil, rotura semi-frágil; diente cizallado, seguida de rotura después de la deformación plástica (fractura manchada), finalmente rotura por fatiga que comprende las clasificaciones de fatiga por flexión y rotura del diente [25].

Cuando el diente de un engranaje está sobrecargado, porque no está diseñado adecuadamente o porque la carga local es muy alta es posible que falle por deformación plástica o fractura. Si se fractura, el fallo puede ser una fractura dúctil precedida por una deformación plástica apreciable, una fractura frágil con una deformación plástica previa o un modo mixto de fractura con ambas características: dúctiles y frágiles [32].

La Figura 27 muestra un engrane recto con fallo por *fracture*.

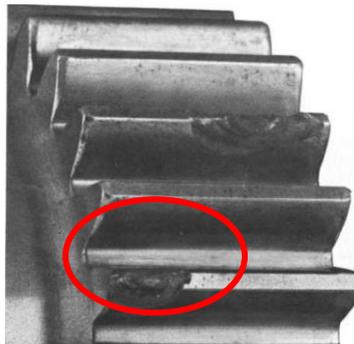


Figura 27. *Fracture* [39]

Después de haber detallado las dos normas en estudio de fallos en engranes, se hará un análisis para integrar todos los fallos en una sola clasificación, tomando como referencia la norma ISO 10825 la cual será complementada con la norma ANSI/AGMA 1010–E95, tal como ilustra la Figura 28.



Figura 28. Clasificación general en ruedas dentadas

Luego del estudio de las normas ANSI/AGMA 1010-E95 e ISO 10825 se presenta la Tabla 3, con la clasificación de fallos según las normas indicadas.

Tabla 3. Clasificación general de fallos en engranes según las normas ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010-E95

Categoría	Tipo	Subtipo
<i>Indications of surface disturbances (Wear)</i>	<i>Sliding wear</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Normal wear</i> - <i>Moderate wear</i> - <i>Excessive wear</i> - <i>Polishing</i> - <i>Abrasive wear</i> - <i>Moderate scratching (Rippling)</i> - <i>Interference wear</i>
	<i>Corrosion</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Chemical corrosion</i> - <i>Fretting corrosion</i> - <i>Scaling</i>
	<i>Overheating</i>	
	<i>Erosion</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Cavitation erosion</i> - <i>Hydraulic erosion</i>
	<i>Electric erosion (Electrical discharge)</i>	
<i>Scuffing</i>	<i>Mild scuffing</i>	
	<i>Moderate scuffing</i>	
	<i>Severe scuffing</i>	

<i>Permanent deformation</i>	<i>Indentation</i>	
	<i>Plastic deformation</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>By rolling</i> - <i>By tooth hammer</i> - <i>(Cold flow)</i> - <i>(Hot flow)</i> - <i>Root fillet yielding</i> - <i>Tip to root interference</i>
	<i>Rippling</i>	
	<i>Ridging</i>	
	<i>Burrs</i>	
<i>Surface fatigue phenomena (Contact fatigue)</i>	<i>Pitting</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Initial pitting</i> - <i>Progressive pitting</i> - <i>Macro pitting</i>
	<i>Flake pitting</i>	
	<i>Spalling</i>	
	<i>Case crushing</i>	
<i>Fissures and cracks</i>	<i>Cracking</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Hardening cracks</i> - <i>Gridding cracks</i> - <i>(Rim and web cracks)</i> - <i>Fatigue cracks</i>
	<i>Fracture</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>(Brittle fracture)</i> - <i>(Ductile fracture)</i> - <i>(Mixed mode fracture)</i> - <i>(Tooth shear)</i> - <i>(Fracture after plastic deformation)</i>
	<i>Overload breakage</i>	
	<i>(Bending fatigue)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - <i>(Low cycle fatigue)</i> - <i>(High cycle fatigue)</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>(Root fillet)</i> • <i>(Profile cracks)</i> • <i>(Tooth end cracks)</i>

2.4 Mantenimiento basado en la condición

El mantenimiento basado en la condición (*Condition-Based Maintenance, CBM*) es el mejoramiento continuo logrado a través de su filosofía que se basa en garantizar la vida útil del equipo y sus componentes mediante la monitorización de las condiciones o estado de los diferentes elementos de una máquina o equipo para decidir el momento óptimo para realizar las tareas de mantenimiento [40].

Para la clasificación de las técnicas de mantenimiento se opta por separarlo en dos categorías que son reactivo y proactivo [5]. El reactivo revisa la máquina en el momento

que ésta dejó de funcionar presentando un problema para la producción ya que no existe una planificación. Por su parte el mantenimiento proactivo es una técnica de mantenimiento programada realizada bajo un plan de acción cada cierto periodo para verificar el diagnóstico de las máquinas.

En la Figura 29 se detalla la clasificación de mantenimiento.

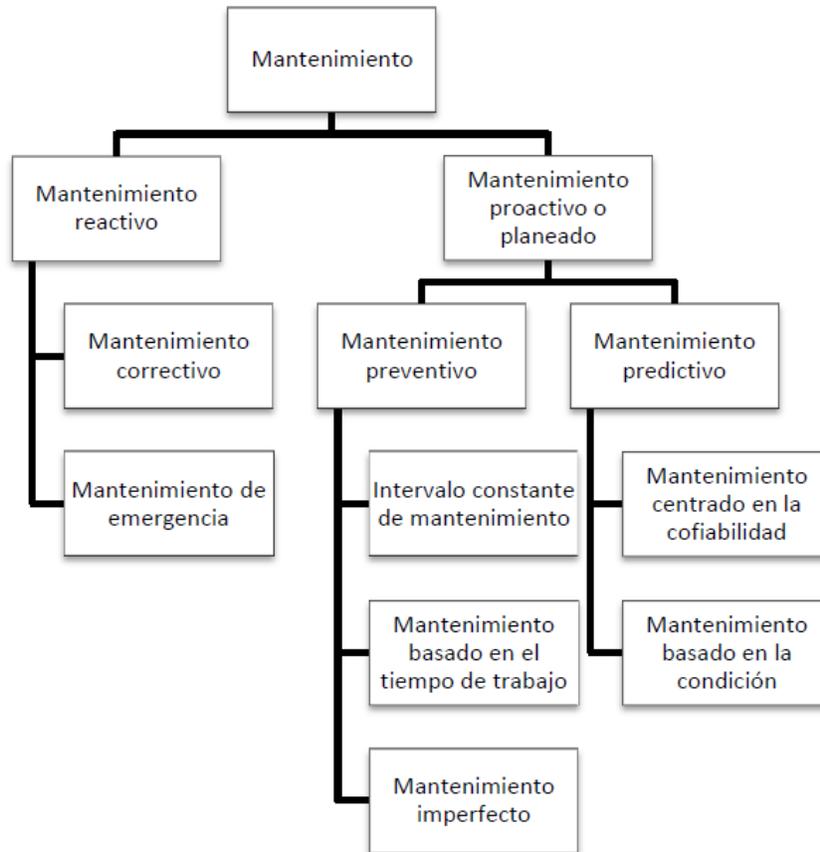


Figura 29. Filosofía de técnicas de mantenimiento [5]

Aplicando efectivamente un programa de mantenimiento basado en la condición, asegura reducción de costos y minimizar paradas innecesarias para la línea de producción, generando mayor producción y estabilidad en la industria [5]. Según la Figura 30, se puede observar la aplicación de técnica de mantenimiento nombrada al momento de diagnosticar un fallo respecto al tiempo.

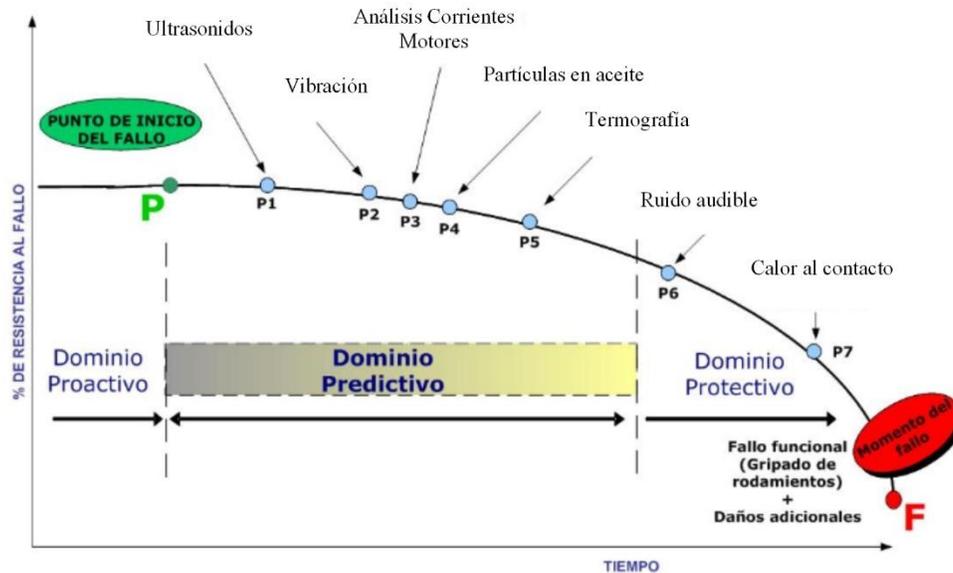


Figura 30. Identificación temprana de un fallo en la maquinaria [41]

El mantenimiento basado en la condición, usa herramientas y técnicas capaces de detectar el deterioro a través de un cambio de parámetros en el monitoreo de la condición de una o varias variables que se estén analizando [41]. El tipo de equipo o equipos a monitorearse requerirán la instalación de una o varias técnicas para su inspección. En la Figura 31 se puede apreciar la implementación de un programa del mantenimiento basado en la condición generando una mayor disponibilidad y bajo costo de reparación.

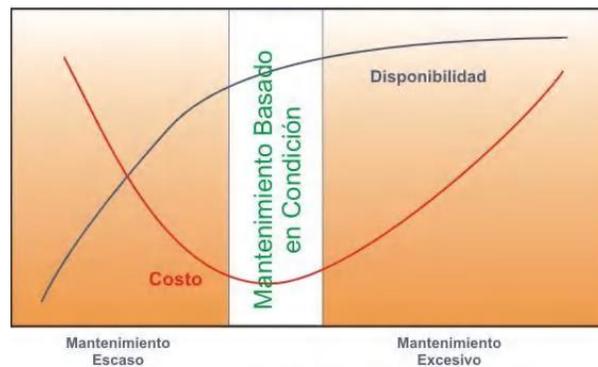


Figura 31. Optimización del mantenimiento [11]

Para la evaluación y diagnóstico de los equipos, es importante el conocimiento de la máquina, el historial de mantenimiento y aspectos referentes a ella; es decir una caracterización de la misma [42]. Solo los equipos más críticos, en los cuales generan mayor impacto, justificarán la implementación de técnicas de monitoreo costosas [11]. Una

vez reconocida la maquinaria y su ambiente de trabajo se seguirán las siguientes fases, las cuales se indican en la Figura 32 que ayuda a llevar un proceso adecuado para llegar al objetivo.

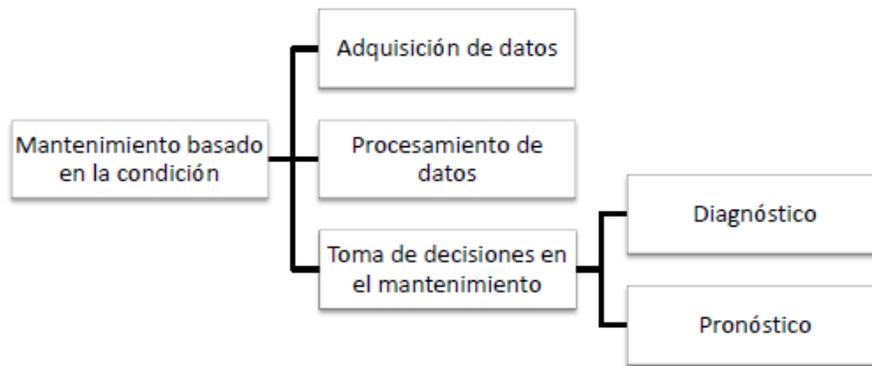


Figura 32. Fases de un programa de mantenimiento basado en la condición [5]

Podemos observar en la figura anterior, que el mantenimiento basado en la condición exige un programa por el cual se puede encaminar el proyecto: Adquisición de datos, procesamiento de datos, toma de decisiones en el mantenimiento pudiendo ser de diagnóstico o pronóstico. Son etapas que se deben cumplir para la detección de fallos a tiempo en la maquinaria según su condición.

La adquisición de la base de datos es la recolección de señales atrapadas por los sensores o instrumentos utilizados en la máquina, estos puntos de análisis se obtendrán a partir de un estudio riguroso de la misma. Se dará por medio de un programa informático en donde se almacenarán valores recogidos en las revisiones rutinarias; se deberá obtener una línea base en primera instancia, siendo útil para tener una referencia en su estado normal.

El procesamiento de datos es la manipulación de las señales obtenidas, esto es para tener una mejor lectura de las gráficas según el analista requiera indagar, dependerá de la máquina como de la señal obtenida. No es lo mismo trabajar con señales acústicas o señales vibracionales, entonces cada proceso de datos es un arreglo o extracción de las características de la señal para su análisis respectivo.

La toma de decisiones se hará relacionando a dos posibles variantes para analizar los equipos, diagnóstico y/o pronóstico de fallos. “El diagnóstico es el análisis posterior de

eventos y el pronóstico es un análisis anterior al evento, siendo este último el más eficiente. En un programa CBM se puede utilizar uno de ellos o ambos” [5].

Una herramienta para la organización del programa de mantenimiento basado en la condición es el uso de la norma ISO 17359. Esta norma es útil para obtener información detallada acerca del estudio de la máquina mediante pasos minuciosos. Se trata de una información más certera y real de lo que se requiere. También proporciona datos fundamentales de criticidad del equipo, como para saber si la maquina necesita este tipo de mantenimiento [43].

La característica fundamental del CBM es un método utilizado para reducir la incertidumbre de las actividades de mantenimiento y recomienda acciones de mantenimiento basadas en la información recogida a través de monitorización” [5]. Se encarga de controlar y monitorear las máquinas en línea, tomando datos. Algunas de las técnicas usadas para la aplicación del mantenimiento basado en la condición se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Técnicas de mantenimiento basado en la condición

Técnica de monitoreo de la condición	Descripción
Análisis vibracional	Consiste en la recopilación de datos por medio de acelerómetros, tras el cual se realizara un análisis de las frecuencias características para determinar un fallo [1],[9],[44].
Termografía	Capta señales que muestran la temperatura de puntos críticos establecidos en una máquina, los cuales varían en forma perceptible indicando la presencia de un fallo [9].
Emisiones acústicas	Convierte ondas mecánicas en señales eléctricas para el estudio de cambios en los materiales, lo cual permite establecer la presencia de fallos en un mecanismo [9].

2.4.1 Análisis vibracional

“La vibración es el movimiento oscilante de una máquina o elemento de ella en cualquier dirección del espacio con respecto a un punto de referencia”. Por otra parte la norma ISO 2041:1990 dice que, “vibración es toda variación en el tiempo de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico, cuando esta magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio o de referencia” [42].

La señal de vibración cuenta con características de: frecuencia, desplazamiento, velocidad y aceleración. La frecuencia es el número de ciclos completos en un periodo de tiempo, cada frecuencia de vibración dará el tipo de problema. La amplitud indica la gravedad del problema, siendo una característica que sondea la condición de la máquina. La velocidad dará a conocer la severidad de la vibración y la aceleración se relaciona con la fuerza que provoca la vibración. Tanto la velocidad como la aceleración están relacionadas con el desplazamiento y la frecuencia, tal como se muestra en la Figura 33 [45].

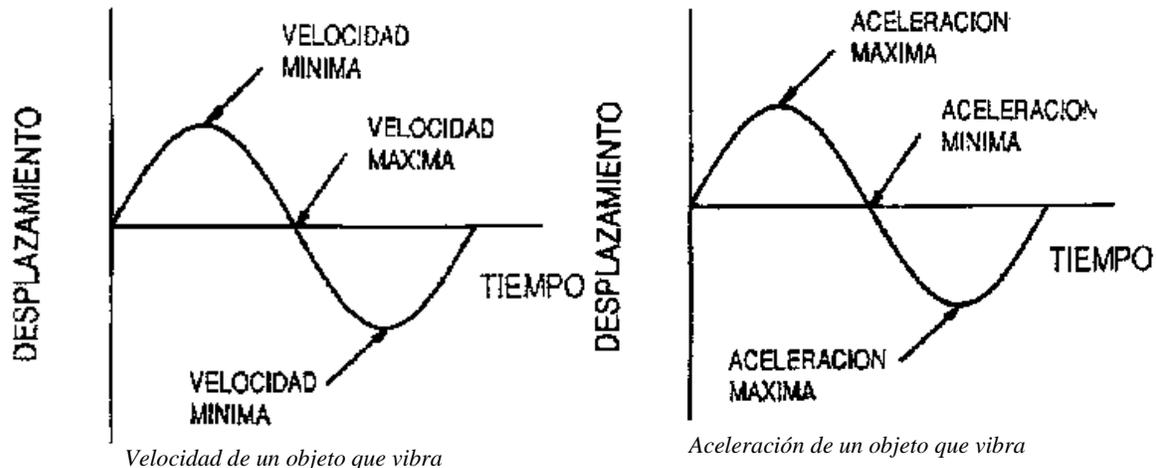


Figura 33. Características de velocidad y aceleración de un objeto que vibra [45]

2.4.1.1 Normas del análisis vibracional

El análisis de vibraciones es una herramienta de monitoreo capaz de detectar fallos en maquinaria, se requiere conocer las normas que rigen su utilización en distintas situaciones para su correcta aplicación. De esta manera la Figura 34 presenta las principales.

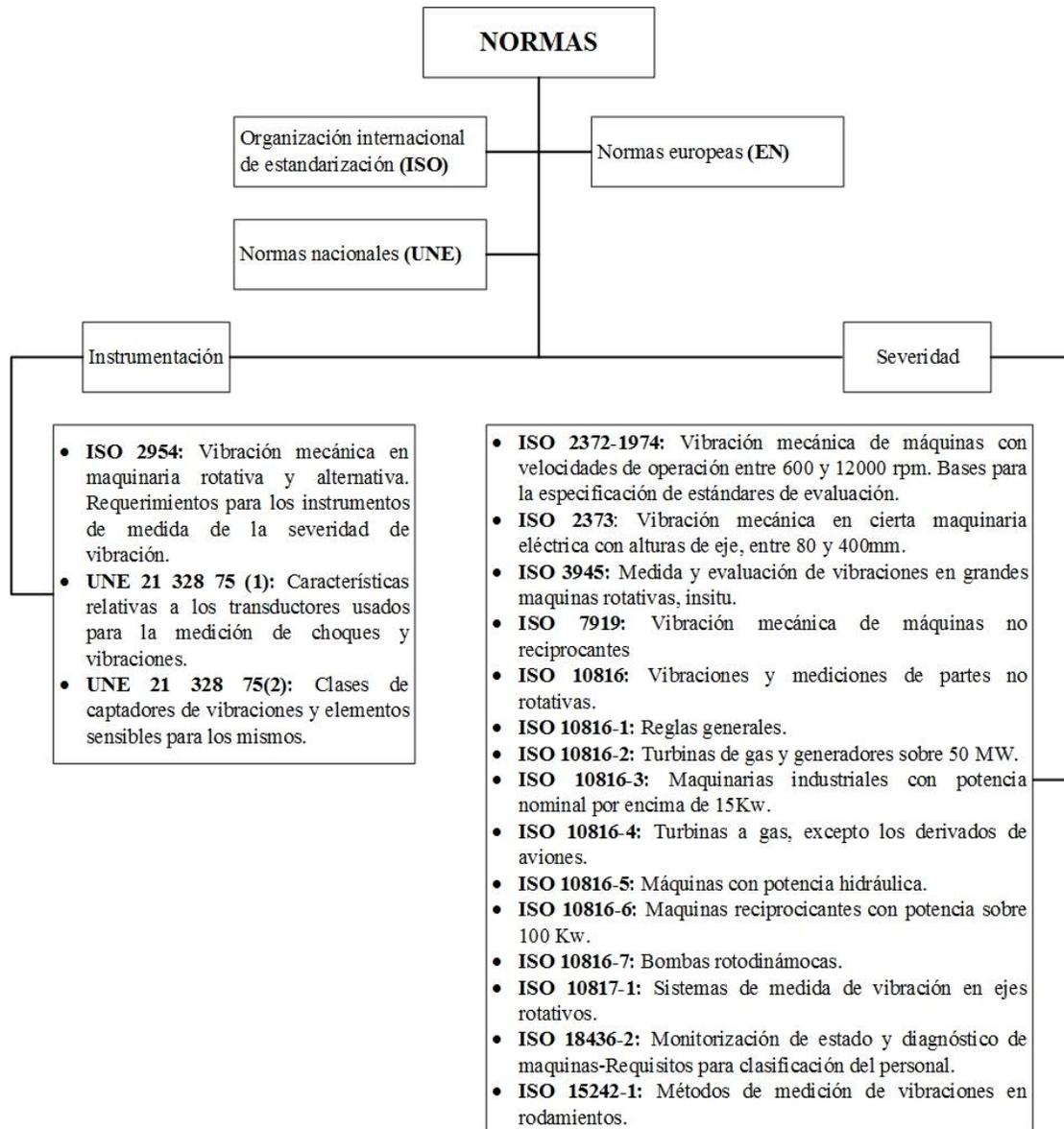


Figura 34. Normas de vibraciones [46]

El análisis de vibraciones ayuda a la determinación de un fallo existente en la máquina a diagnosticar y sus tendencias que está comprendido en el campo de las mediciones mecánicas. Con el programa de mantenimiento basado en la condición se espera identificar los principales problemas mecánicos que causan las vibraciones mediante las frecuencias de fallo. La ventaja del análisis vibracional respecto a otras técnicas, es que se puede evaluar la máquina en funcionamiento, evitando la pérdida de producción que genera un paro en la planta. En la Figura 35, se presentan los problemas más comunes en un sistema mecánico rotativo [46].



Figura 35. Problemas comunes en sistemas rotativos [47]

Las máquinas están formadas por un conjunto de componentes y trabajan en grupo para conseguir su función, por tanto las vibraciones presentes en éstas son la suma de todas las señales de vibración de las piezas del conjunto. Todas las máquinas generan vibración como parte normal de su actividad, sin embargo cuando existe algún fallo sus características de vibración varían. En la Figura 36, se mostrará la señal de vibración generada en una máquina cualquiera [42].

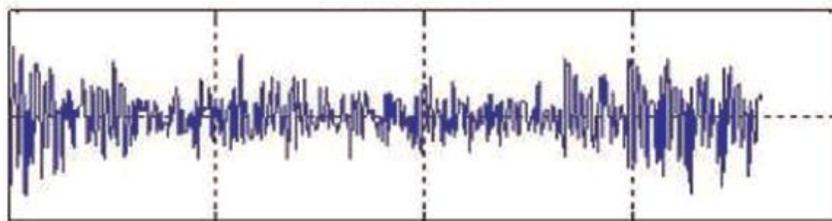


Figura 36. Señal de vibración de una máquina [7]

Al ser estas señales de vibración complejas, es necesario convertirlas en señales más sencillas y didácticas para su análisis e interpretación. Existe numerosas técnicas de procesamiento disponibles para la transformación del dominio de análisis, pudiéndose clasificar en análisis en el dominio del tiempo, de la frecuencia y del tiempo-frecuencia [5]. Un ejemplo es la Transformada Rápida de Fourier (*fast fourier transform*, FFT), capturando la señal de tiempo, las transforma en señales sinusoidales y las conduce al

dominio de la frecuencia. En la Figura 37, se observa el proceso ilustrado anteriormente dicho.

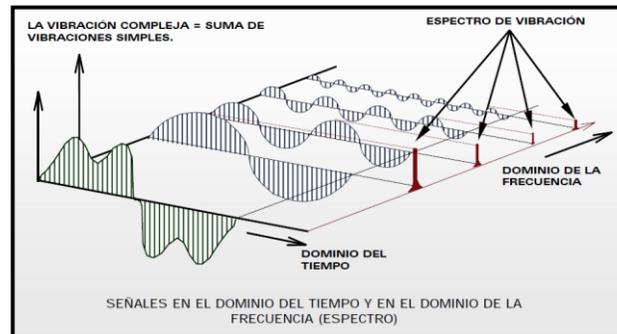


Figura 37. Transformación de una vibración al dominio de frecuencia [42]

El análisis de datos consta de dos etapas: adquisición e interpretación de datos obtenidos en los puntos definidos de medición de vibración en la máquina. Para la adquisición de datos se debe seguir un proceso que se dará en base a la caracterización de la máquina a inspeccionar, en donde se evaluarán sus funciones, lo que se quiere analizar, los instrumentos a utilizar, su posición y dirección [45].

En el caso de la interpretación de datos se tendrá en cuenta una base de datos, donde sean fiables los valores ya que será el punto de referencia para atender cualquier desventualidad. Para este aspecto se analizará la frecuencia, el tiempo y según sean las características de la máquina se analizará también, el desplazamiento, velocidad y aceleración. En el caso que se trate de un sistema mecánico rotativo, se utiliza para un mejor estudio el parámetro de velocidad [42]. Los históricos en los puntos analizados son fundamentales ya que tendríamos una base de datos de la cual se pueda partir, teniendo referencias de un funcionamiento con normalidad.

Para el caso de los rodamientos se toma en cuenta su importancia en las máquinas industriales, por presentar los mayores problemas. En cambio las ruedas dentadas estarán sujetas al sistema rotativo por lo que se verá aún más necesario la adaptación del análisis de vibración en conjunto. Existe diferentes fallos, como por ejemplo: lubricación inadecuada, error de montaje, defectos de fabricación, desalineación, etc.

Por lo tanto la adaptación de los instrumentos para el análisis de vibraciones es capaz de encontrar fallos en máquinas anticipándose a la avería. La desaparición de fallos repentinos es la gran ventaja de este tipo de mantenimiento [45].

2.4.2 Emisiones Acústica

La técnica de emisiones acústicas (EA) describe las ondas resultantes de la rápida liberación de energía debido a cambios de la estructura de un material, dando como resultado ráfagas transitorias en las cuales se identifica el principio y el final. Este fenómeno mecánico se presenta en periodos de tiempo entre microsegundo a milisegundos [11],[48].

De forma matemática se define a la onda de emisión acústica como la suma de la presión acústica instantánea en las coordenadas espaciales y en el tiempo, como se indica en la (Ecuación 1 [9], [49]).

$$\frac{\delta^2 p}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 p}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 p}{\delta z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 p}{\delta t^2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

p : Presión acústica instantánea.

c : Velocidad del sonido

t : Tiempo

2.4.2.1 Evolución en el estudio de emisiones acústicas

Como antecedente histórico se conoce que los primeros estudios sobre los fenómenos de emisión acústica se atribuyen a Estados Unidos 1948, mientras que Káiser en 1950 fue el primero quien utilizó una instrumentación electrónica para registrar los sonidos audibles producidos por los metales durante su deformación. Aportando con trabajos sobre mecánica de las fracturas en material con y sin grietas. Se han comprobado que cuando se somete a esfuerzos una probeta con grietas, la deformación plástica que da lugar a una EA se inicia precisamente en los extremos de la grieta y en puntos de la concentración de grietas. También se ha aplicado esta técnica para investigar el crecimiento de las grietas, tal como ocurre durante un proceso de fragilidad por hidrógeno, de agrietamiento por corrosión bajo tensiones o de fatiga a bajos ciclos [49],[50].

La Figura 38 muestra los inicios y evolución que se ha dado en el estudio de emisiones acústicas según bibliografía consultada [49], [51],[52],[53].

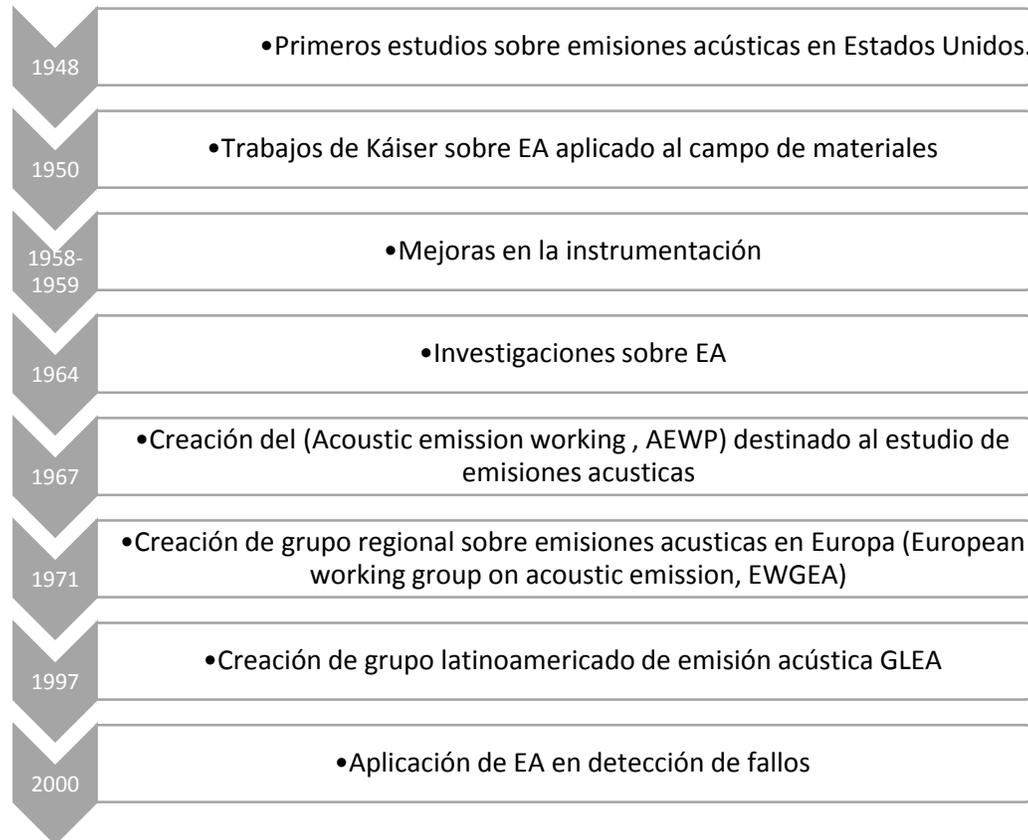


Figura 38. Evolución de las emisiones acústicas

2.4.2.2 Propagación de las ondas acústicas

Dependiendo de la geometría de la estructura, la energía acústica se realiza por ondas de volumen y/o las ondas de superficie [48], generalmente están comprendidas entre 100 y 1000 kHz, las frecuencias menores a 20 kHz son conocidas como infrasónicas y entran en la cobertura de la audición humana, en cambio cuando son mayores a 20 kHz son llamadas ultrasónicas, las cuales son generadas por delfines o murciélagos; para el caso de detección de fallos en elementos mecánicos. Las grietas por ejemplo, están por encima de 100 kHz.

Para registrar un evento de emisiones acústicas se los puede almacenar en forma de ondas, las cuales pertenecen al dominio del tiempo. En la práctica esta forma de onda posee gran

cantidad de datos que resultan difícil de interpretar, por tanto se procede a un análisis espectral en el dominio de la frecuencia. Para lo cual se realiza una FFT de las señales. En la Figura 39 se observa la morfología de una señal de EA típica, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

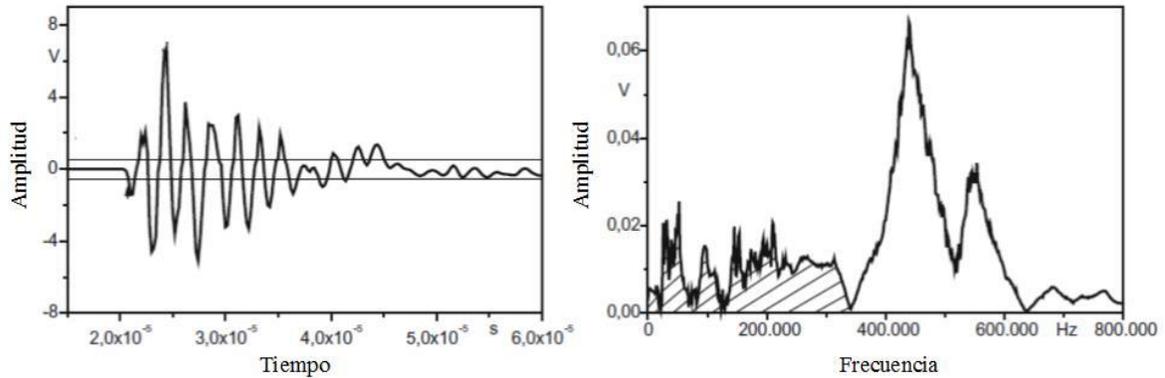


Figura 39. Morfología de una señal de emisiones acústicas [49]

2.4.2.3 Tipos de ondas de emisiones acústicas

Existen tres tipos de ondas que se pueden presentar en un material, cada una de las cuales cuenta con características específicas tanto en dirección del movimiento como en su velocidad de propagación. La Tabla 5 presenta un resumen de las características principales de las ondas [9],[49],[54].

Tabla 5. Tipos de ondas de emisiones acústicas [55]

Tipo de onda	Dirección del movimiento	Características	Velocidad de propagación
Onda P	Paralela a la dirección de propagación	<ul style="list-style-type: none"> • Generado por tensiones normales • Puede propagarse en cualquier medio 	<p>(Ecuación 2)</p> $V_p = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$



Figura 40. Propagación de onda P de emisión acústica

Onda S	Perpendicular a la dirección de propagación	<ul style="list-style-type: none"> • Tensiones tangenciales • Se propaga solo en medios rígidos 	<p>(Ecuación 3)</p> $V_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ 
--------	---	---	---

Figura 41. Propagación de onda S de emisión acústica

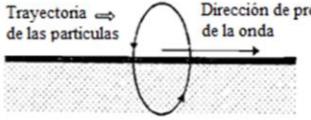
Onda Rayleigh	Elíptico retrógrado	<ul style="list-style-type: none"> • Se propaga a lo largo de la superficie de un sólido 	<p>(Ecuación 4)</p> $V_R = \frac{0,87 + 1,12\nu}{1 + \nu} V_S$ 
---------------	---------------------	---	--

Figura 42. Propagación de onda rayleigh de emisión acústica

Donde:
 ν : Coeficiente de Poisson
 ρ : Densidad
 G : Módulo de elasticidad

2.4.2.4 Señales de emisión acústica

Normalmente las señales en EA pueden clasificarse por: señal transitoria (*bursts*) y señal continua. La primera es una señal que tiene puntos definidos claramente de principio a fin del ruido que provoca un defecto, como se indica en la Figura 43.

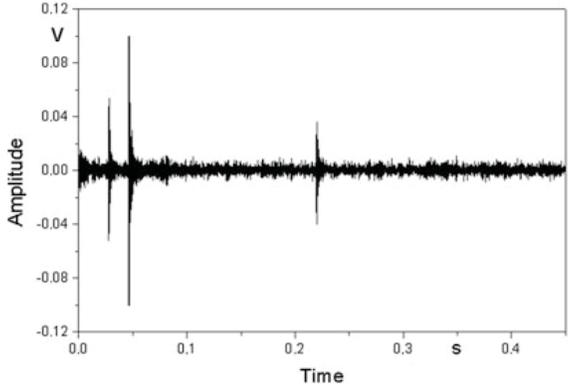


Figura 43. Señal transitoria [49]

Una señal continua por su parte cuenta con amplitudes variadas y frecuencias, que prosiguen a través del tiempo como se muestra en la Figura 44 [49].

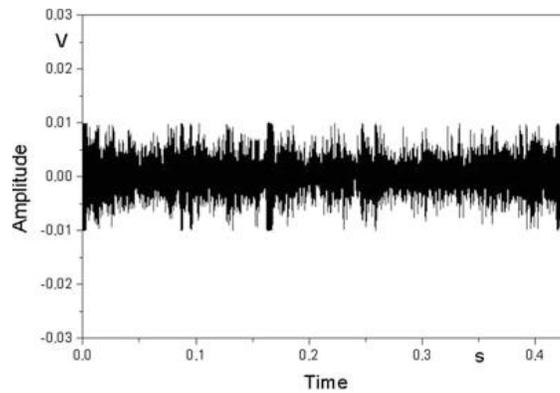


Figura 44. Señal continua [49]

2.4.2.5 Parámetros de señales acústicas

Los datos sobre la forma de onda, pueden ser usados para sacar información sobre la fuente, tal como su actividad e intensidad. Una señal típica es usada en la Figura 45, para identificar los parámetros de una señal de EA [49],[56].

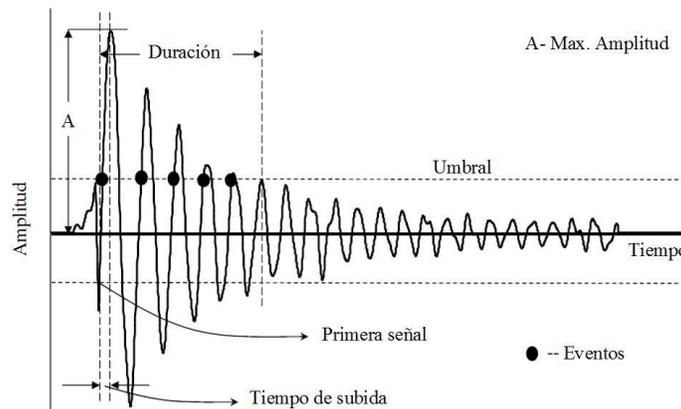


Figura 45. Parámetros de señal de EA [56]

Amplitud (A): Se la define como la tensión de pico de una onda, la cual es medida en decibelios (dB).

Tiempo de llegada: Tiempo absoluto en el cual aparece la primera señal de descubrimiento de fallo.

Tiempo de subida: Es el tiempo que tarda la onda en alcanzar su valor máximo tomando como inicio el primer cruce con el umbral.

Duración: Es el tiempo existente entre el primer y último cruce de la onda con el umbral.

Energía: Área bajo la curva generada por la envolvente de la señal de tiempo.

Eventos: Numero de pulsos emitidos por el circuito de medición cuando la señal es mayor que el umbral.

Frecuencia pico: Valor máximo que alcanza la onda de emisión acústica.

2.4.2.6 Equipo de adquisición

Para la adquisición de la señal acústica existe un procesamiento de la señal antes de ser almacenada en el ordenador, luego de lo cual se realizará una descomposición espectral basada en el algoritmo de la FFT. La cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestras condicionan el rango de frecuencia. El uso de la FFT permite el procesamiento de una señal en forma digital, que dentro del campo investigativo conlleva a reconocer y clasificar patrones en las señales acústicas [9].

En la Figura 46 se muestra un proceso de emisión acústico, para la obtención de señales.

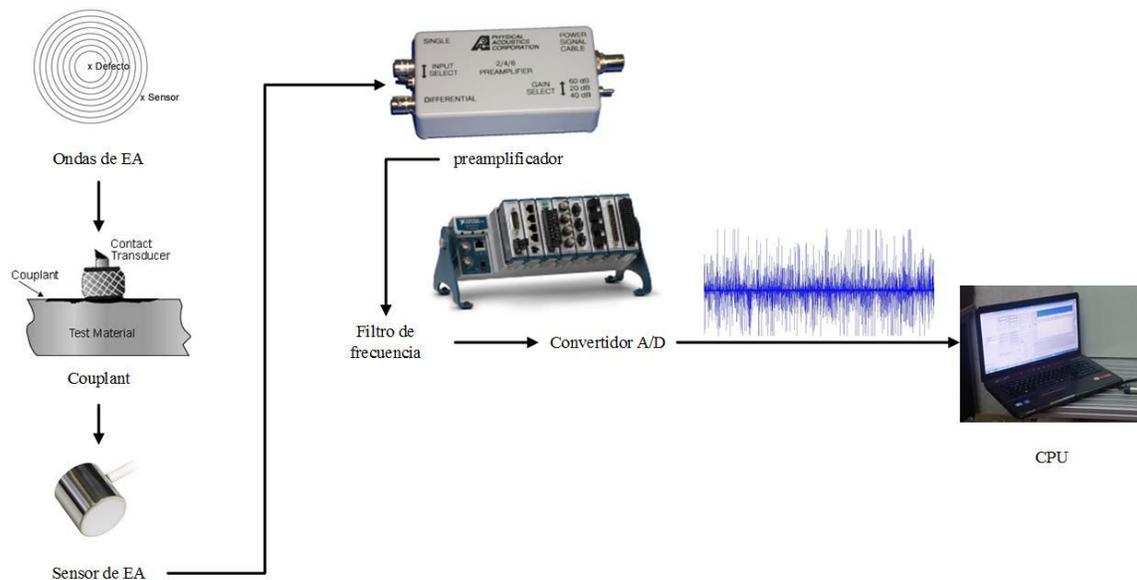


Figura 46. Equipo utilizado para proceso de EA [49]

Couplant: Al momento del montaje de un sensor de emisión acústica, es importante asegurar un contacto adecuado entre el sensor y la superficie de prueba. Las opciones usadas de acoplamiento son silicona, petróleo o termoplástico adhesivo. Dependiendo sobre todo de la superficie de trabajo [49].

La Figura 47 presenta un resumen de los métodos usados en el acoplamiento de sensores de emisión acústica.

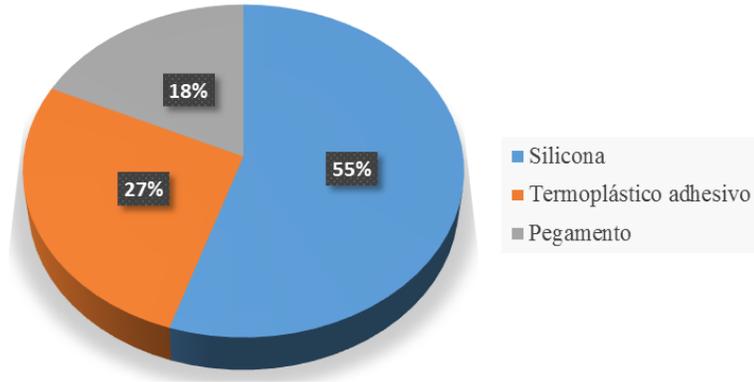


Figura 47. Resumen de tipos de acoplamiento

El *couplant* por silicona y pegamento representan las opciones de mayor difusión sobre todo en aplicaciones en las que se requiere que el sensor EA permanezca en la misma posición durante largo tiempo. Por su parte el termoplástico adhesivo es de fácil desmontaje y gran utilidad para aplicaciones investigativa en las cuales la posición del sensor cambiara constantemente [57],[58],[59], [60],[61],[62],[63],[64],[65].

Sensores: Son los encargados de convertir las ondas mecánicas procedentes del sistema en señales eléctricas. Dependiendo las condiciones y características del lugar de trabajo se define el sensor utilizado.

En la Tabla 6 se presenta sensores acústicos *PHYSICAL ACOUSTICS* [66], los cuales permiten captar ondas de emisión acústica de alta frecuencia por su alta sensibilidad.

Tabla 6. Tipos de sensores de emisiones acústicas

Tipo de sensor	Descripción	Imagen
Aeroelevado (<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.	

Figura 48. Sensor tipo *airborne* [66]

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	

Figura 49. Sensor tipo *differential* [66]

Figura 50. Sensor tipo *flat*

Figura 51. Sensor tipo *general purpose* [66]

Figura 52. Sensor tipo *high temperature* [66]

Preamplificador: Es el encargado de reducir ruido eléctrico, convirtiendo la señal en formas de onda utilizables.

Filtro de frecuencia: Elimina frecuencias no deseadas las cuales son producidas por ruido.

Convertidor A/D: Cumple la función de convertir señales analógicas en digitales para que puedan ser interpretadas por el ordenador.

2.4.2.7 Normas sobre emisiones acústicas

Para un efectivo análisis de emisiones acústicas se requiere las diferentes normas sobre emisiones acústicas tanto en la parte instrumental como de severidad, las cuales se muestran en la Figura 53.

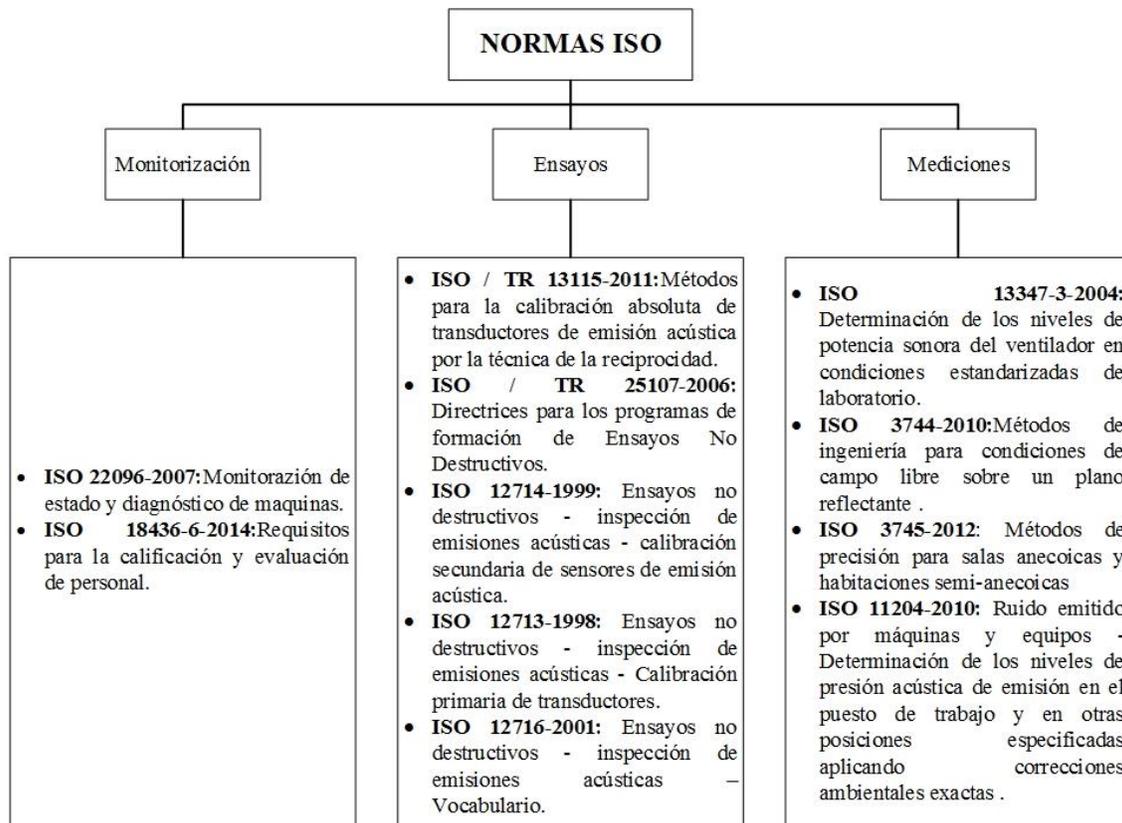


Figura 53. Normas ISO emisiones acústicas

2.4.2.8 Aplicaciones

La técnica de EA puede aplicarse en varios casos como son: ensayos no destructivos, inspección de estructuras, estudios de evaluación de estructura, pruebas de carga, estudio de corrosión, pruebas de materiales avanzadas, control de calidad de producción, detección de fallos incipientes por fatiga en componentes estructurales de aeronaves, control de agrietamiento de la soldaduras durante el proceso de enfriamiento, estudios del comportamiento de los materiales a altas temperaturas, entre otros [49].

Todo análisis tiene su complejidad, en este caso la señal de tiempo representa de forma visual el valor simultáneo del movimiento y es el producto de la suma de todos los componentes de frecuencia individuales [9]. Para el diagnóstico de errores con la señal en el dominio del tiempo, los métodos estadísticos se aplican invariablemente. Los parámetros estadísticos más comunes son: la raíz cuadrada media (RMS), el factor de cresta (CF), el valor pico (PK), asimetría (SK), kurtosis (KT), espectro de la entropía (EN) y la función de densidad de probabilidad (PDF) [67].

Las técnicas de emisiones acústicas están presentes dentro de gran parte de la industria, aportando de manera significativa al monitoreo constante de equipos que requieren un control mientras se encuentran funcionando. La Tabla 7 presenta algunas de las aplicaciones características de las emisiones acústicas [54],[68].

Tabla 7. Uso de emisiones acústicas

Máquina	Deterioro en rodamientos	Roces en junta mecánica	Desgaste	Contaminación en lubricante	Desalineación severa	Fallos en montaje	Fugas
Bomba
Caja de engranes
Motor eléctrico	
Turbina de vapor
Turbina de gas
Generador eléctrico	.			.		.	
Motor a diésel			.				.
Ventiladores
Compresores

2.4.2.9 Detección de fallos en engranes usando emisiones acústicas

Los fallos en engranes representan paradas inesperadas en la producción generando cuantiosas pérdidas, por lo cual existen diversas técnicas de monitoreo continuo para solucionar este inconveniente. El análisis vibracional es la técnica de mantenimiento de mayor desarrollo en este sector, sin embargo el análisis de emisión acústica empieza a ganar terreno en los últimos años.

Las emisiones acústicas en maquinarias rotativas se las define como ondas elásticas que son generadas al interactuar dos medios en movimiento, es decir un par de engranes. Las principales ventajas que presenta son la detección de fallos más pequeños que los

detectables por medio de vibración y el uso de un solo sensor puesto que es una técnica no direccional.

El principal inconveniente que se presenta al aplicar EA para la detección de fallos, es el ruido que se genera durante las pruebas. Sin embargo con el avance en el uso de materiales aislante y la evolución de los sensores se ha logrado establecer a las emisiones acústicas como una técnica en el diagnóstico de fallos en engranes [69],[70],[71]. Para implementar un monitoreo de la condición utilizando emisiones acústicas se realiza el procedimiento descrito en la Figura 54 [9],[68].

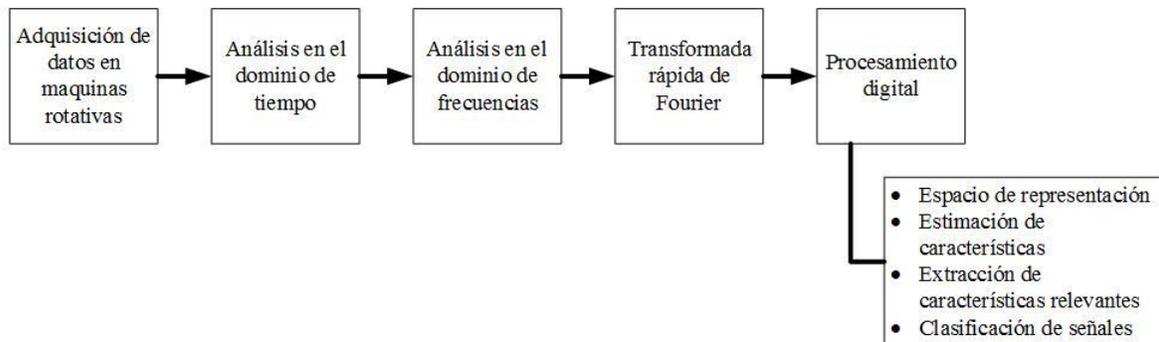
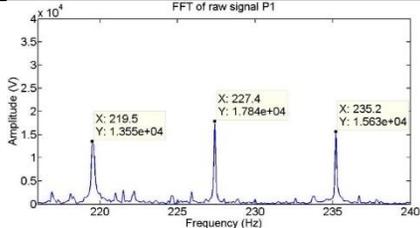
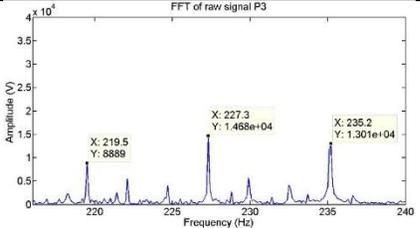
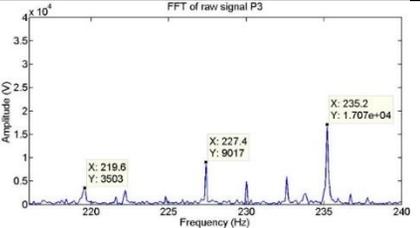
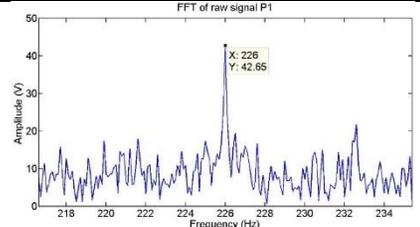
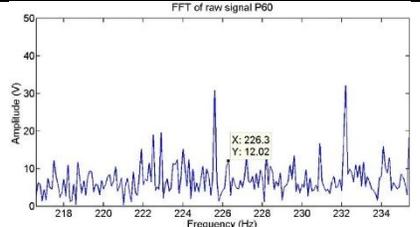
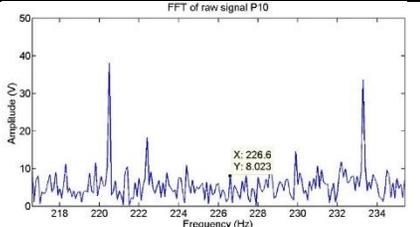
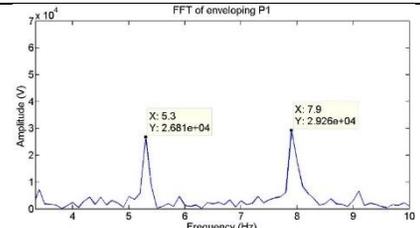
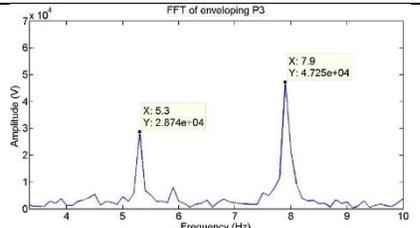
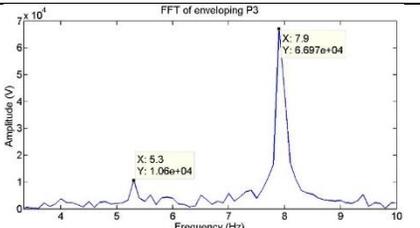


Figura 54. Proceso para aplicación de EA

En la Tabla 8 se muestra señales de vibración en conjunto con ondas de emisión acústica, adquiridas con fallo por *tooth breakage*. Lo cual permitirá apreciar el cambio en sus espectros a medida que el fallo progresa.

Tabla 8. Señales de vibración y emisión acústica comparativas

	Good condition	Tooth breakage 50%	Tooth breakage 100%																								
Engrane																											
Variación de GMF a medida que el fallo avanza	 <p>FFT of raw signal P1</p> <table border="1"> <tr><th>Frequency (Hz)</th><th>Amplitude (V)</th></tr> <tr><td>219.5</td><td>1.355e+04</td></tr> <tr><td>227.4</td><td>1.784e+04</td></tr> <tr><td>235.2</td><td>1.563e+04</td></tr> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	219.5	1.355e+04	227.4	1.784e+04	235.2	1.563e+04	 <p>FFT of raw signal P3</p> <table border="1"> <tr><th>Frequency (Hz)</th><th>Amplitude (V)</th></tr> <tr><td>219.5</td><td>8889</td></tr> <tr><td>227.3</td><td>1.488e+04</td></tr> <tr><td>235.2</td><td>1.301e+04</td></tr> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	219.5	8889	227.3	1.488e+04	235.2	1.301e+04	 <p>FFT of raw signal P3</p> <table border="1"> <tr><th>Frequency (Hz)</th><th>Amplitude (V)</th></tr> <tr><td>219.6</td><td>3503</td></tr> <tr><td>227.4</td><td>9017</td></tr> <tr><td>235.2</td><td>1.707e+04</td></tr> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	219.6	3503	227.4	9017	235.2	1.707e+04
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																										
219.5	1.355e+04																										
227.4	1.784e+04																										
235.2	1.563e+04																										
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																										
219.5	8889																										
227.3	1.488e+04																										
235.2	1.301e+04																										
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																										
219.6	3503																										
227.4	9017																										
235.2	1.707e+04																										
Señal de emisión acústica para los distintos niveles de fallo	 <p>FFT of raw signal P1</p> <table border="1"> <tr><th>Frequency (Hz)</th><th>Amplitude (V)</th></tr> <tr><td>226</td><td>42.65</td></tr> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	226	42.65	 <p>FFT of raw signal P60</p> <table border="1"> <tr><th>Frequency (Hz)</th><th>Amplitude (V)</th></tr> <tr><td>226.3</td><td>12.02</td></tr> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	226.3	12.02	 <p>FFT of raw signal P10</p> <table border="1"> <tr><th>Frequency (Hz)</th><th>Amplitude (V)</th></tr> <tr><td>226.6</td><td>8.023</td></tr> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	226.6	8.023												
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																										
226	42.65																										
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																										
226.3	12.02																										
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																										
226.6	8.023																										
Variación de espectro de vibración de engranes	 <p>FFT of enveloping P1</p> <table border="1"> <tr><th>Frequency (Hz)</th><th>Amplitude (V)</th></tr> <tr><td>5.3</td><td>2.681e-04</td></tr> <tr><td>7.9</td><td>2.926e+04</td></tr> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	5.3	2.681e-04	7.9	2.926e+04	 <p>FFT of enveloping P3</p> <table border="1"> <tr><th>Frequency (Hz)</th><th>Amplitude (V)</th></tr> <tr><td>5.3</td><td>2.674e-04</td></tr> <tr><td>7.9</td><td>4.725e+04</td></tr> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	5.3	2.674e-04	7.9	4.725e+04	 <p>FFT of enveloping P3</p> <table border="1"> <tr><th>Frequency (Hz)</th><th>Amplitude (V)</th></tr> <tr><td>5.3</td><td>1.06e+04</td></tr> <tr><td>7.9</td><td>6.697e+04</td></tr> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	5.3	1.06e+04	7.9	6.697e+04						
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																										
5.3	2.681e-04																										
7.9	2.926e+04																										
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																										
5.3	2.674e-04																										
7.9	4.725e+04																										
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																										
5.3	1.06e+04																										
7.9	6.697e+04																										

2.4.2.10 Ventajas y desventajas de la aplicación de emisiones acústicas

Las siguientes ventajas sobre otras técnicas de monitoreo son:

- Técnica no invasiva que supervisa la respuesta dinámica a la carga aplicada o el medio ambiente aplicado.
- Permite la vigilancia global de toda la estructura y es capaz de localizar un defecto de crecimiento en la estructura con uso de sensores.
- Ofrece una monitorización dinámica en tiempo real.
- Permite seguir la evolución en tiempo real de un defecto hasta que representa un peligro para el proceso productivo.

En cuanto a las desventajas se tiene:

- Dificultad de aislar un medio por el ruido proveniente del exterior
- Personal capacitado
- Costos elevados de equipos
- Compleja interpretación de resultados

2.4.2.11 Posición de sensor de emisiones acústicas

La posición y localización de la fuente suele resultar una difícil determinación. La distancia entre defecto y sensores es igual al tiempo de llegada multiplicado por la velocidad de la señal. La onda de EA se distribuye en círculos concéntricos llegando en tiempos distintos tal como se muestra en la Figura 55. Existe la localización puntual y zonal, la primera es utilizada en laboratorios y la otra se aplica con éxito en industria. De esta forma se detalla que la puntual es más precisa y menos realista, lo contrario a la zonal [72].

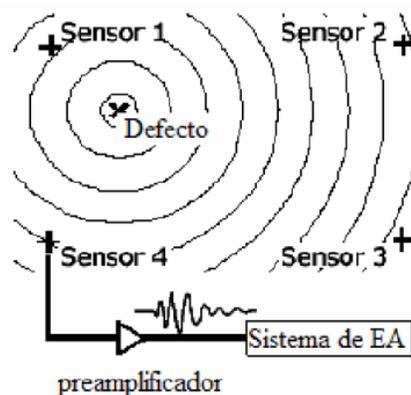


Figura 55. Posición del sensor acústico [72]

CAPÍTULO 3

El banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca contiene un sistema mecánico rotativo [46], que ha sido analizado, diseñado e implementado por investigadores, docentes y estudiantes del Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales GIDTEC. Se ha visto necesario la simulación de diversos fallos en el sistema como desalineación, desbalanceo de ejes, rodamientos y engranes en malas condiciones permitiendo el uso de acelerómetros, encoders, torquimetro, micrófonos, sensor de emisión acústica. Con la finalidad de establecer bases de datos [1], [9], [44] que serán usadas para el diagnóstico de fallos por medio del procesamiento de señales [6], [7].

El banco está dispuesto de tal manera que se puedan utilizar distintas configuraciones con varios elementos mecánicos e instrumentación necesaria dependiendo el plan experimental que se desarrolle. Para el armado del sistema se considera diversos aspectos tales como: alineación de ejes, alineación de poleas, paralelismo entre bases, lubricantes utilizados, estabilidad del banco, entre otros; puesto que un fallo no controlado genera que la experimentación no brinde resultados confiables [12], [73].

En la Figura 56 se muestra el banco de vibraciones mecánicas utilizado en el laboratorio y los elementos que lo componen.

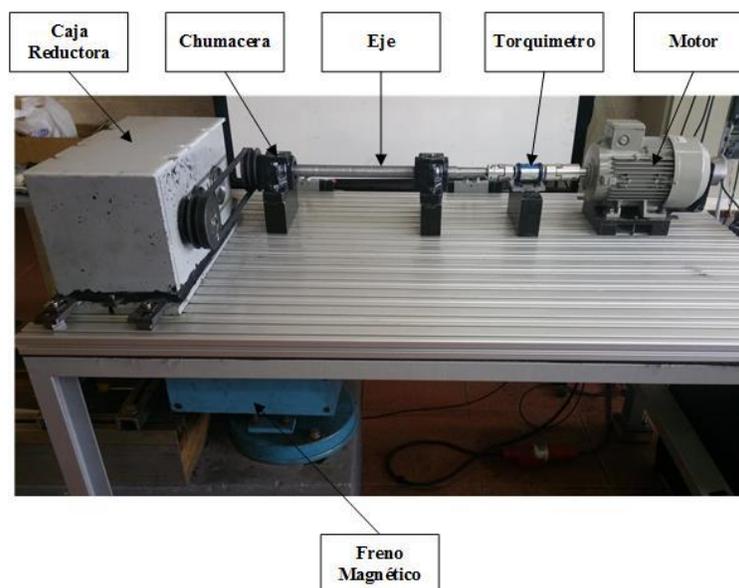


Figura 56. Banco de vibraciones

Para la adquisición de la base de datos se requiere seguir una secuencia de pasos que garantizaran que los datos obtenidos sean fiables y puedan ser usados para el diagnóstico de fallos.

La Figura 57 presenta los pasos secuenciales para establecer una base de datos.

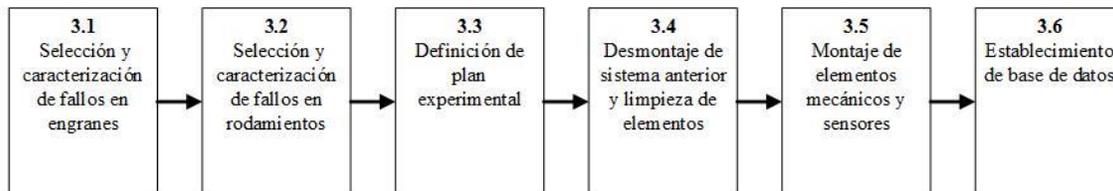


Figura 57. Secuencia para el establecimiento de una base de datos

3.1 Selección y caracterización de fallos en engranes

3.1.1 Grietas (*Crack*)

El fallo más serio que se puede presentar en un engranaje es *crack*, dada su dificultad para ser detectado usando un análisis tiempo frecuencia, sobre todo cuando éste se encuentra en una etapa inicial. Este fallo empieza a modo de una pequeña grieta en la raíz del diente y se propaga hasta romperlo. Es frecuente que se de en un solo diente del engrane [74], [75] [76], [77].

La Tabla 9 presenta un resumen de las características que presenta un engrane con crack, [1], [78].

Tabla 9. Características de un engrane con fallo *crack*

Categoría de fallo	<i>fissures and cracks (ISO 10825)</i>
Tipo del fallo	<i>Crack</i>
Causas	Defectos de fabricación como inclusiones de gas en el material. Tratamientos térmicos inadecuados. Altas tensiones de trabajo.
Localización	Raíz del diente. Paralelas al diámetro de paso.
Evolución	Comienza a partir de una pequeña grieta en la base del diente, la cual se expande de manera longitudinal hacia sus extremos, pudiendo causar la rotura del diente.

Particularidades	La lubricación no garantiza la ausencia de este fallo. Puede causar rotura.
Soluciones	Aumentar la capa de endurecimiento efectivo. Variar el diseño. Aumentar la dureza del material.
Imagen	

Figura 58. Fallo por crack

3.1.2 Picadura (*Pitting*)

El excesivo desgaste así como superficie de los dientes con inicio de picaduras en engranajes que forman parte de cajas reductoras es un problema que se presenta con normalidad en estos sistemas. Al aumento de potencia y velocidades más altas, los fallos de fatiga y de desgaste de engranajes son las principales preocupaciones en aplicaciones aeroespaciales. Aunque las inspecciones visuales periódicas y mantenimiento preventivo pueden ayudar a reducir la tasa de fracaso de estos sistemas, el costo y el tiempo de inactividad con este tipo de programas son ineficaces y antieconómicas. Este tipo de fallo se presenta en parte de los dientes o en la totalidad de ellos puesto que es causado por la lubricación [79],[80],[81].

La Tabla 10 presenta un resumen de las características que presenta un engrane con *pitting* [1],[34],[37],[82].

Tabla 10. Características de un engrane con fallo <i>pitting</i>	
Categoría de fallo	<i>Surface fatigue phenomena (ISO 10825)</i>
Tipo del fallo	<i>Progressive pitting</i>
Causas	Tensiones (hertziana, cizallamiento) repetidas más allá del límite de resistencia del material. Sobrecarga de superficies. Deformación de película lubricante.

	Inicialmente bajo el dedendum.
Localización	En etapas avanzadas se presenta de manera aleatoria sobre la cara del diente.
Dimensiones	Diámetros considerables mayor a 0.25mm
Evolución	El engrane durante un mal funcionamiento origina esfuerzos sobre el flanco de los dientes que provocaran desprendimiento de material formando agujeros por debajo del dedendum, a medida que el fallo avanza los agujeros se presentan en todo el diente, incluso llegando a originar grieta por fatiga.
Particularidades	Forma de punta de flecha. Aumenta el tamaño del agujero con el tiempo. Causa ruido considerable.
Soluciones	Mantener la carga por debajo del límite de resistencia del material. Aumentar la dureza del material. Aumento de dureza del miembro de accionamiento.

Imagen



Figura 59. Fallo por *pitting*

3.1.3 Desgaste abrasivo (*Abrasive wear*)

La causa principal son defectos en el lubricante, el cual puede contener partículas extrañas o no ser el indicado para el sistema. Lubricación efectiva de los sistemas de engranajes es fundamental ya que evita el contacto directo de los dientes, reduce los niveles de fricción y vibración, elimina el calor generado y protege los engranajes de la corrosión [83],[84].

La Tabla 11 presenta un resumen de las características de un engrane con *abrasive wear*, [27],[34],[37],[82].

Tabla 11. Características de un engrane con fallo *abrasive wear*

Categoría de fallo	<i>Indications of surface disturbances (ISO 10825)</i>
Tipo del fallo	<i>Abrasive wear</i>
Causas	<p>Superficies de los dientes endurecidos después de cortar tienen superficies rugosas que pueden desgastar los dientes más suaves durante el funcionamiento.</p> <p>Aumento de temperatura que provoca una rotura de lubricación.</p> <p>Contaminación del lubricante con partículas duras.</p>
Localización	Superficie activa del diente
Dimensiones	Dependerá de las partículas abrasivas
Evolución	El aceite contaminado gasta los dientes del engrane formando marcas en los dientes, las cuales se hacen más notorias a medida que avanza el fallo.
Particularidades	<p>Líneas cortas como arañazos.</p> <p>Marcas radiales de rasgado o surcos.</p> <p>Zonas planas y gastadas que interrumpen el perfil del diente.</p>
Soluciones	<p>Eliminación de los contaminantes</p> <p>Usar distintos materiales para cada uno de los componentes.</p> <p>Engranes endurecidos en su superficie.</p> <p>Mantener sellos de aceite herméticos.</p> <p>Lubricantes de alta viscosidad.</p> <p>Cambiar el aceite periódicamente</p>
Imagen	

3.1.4 Gripado (*Scuffing*)

La eliminación y/o deformación plástica de las superficies de los dientes en contacto. En algunos casos, las grietas por fatiga superficial se producen en las regiones deformadas plásticamente bajo estrés de excesivo contacto y estos también pueden ser causados por *scuffing* o desgaste fracaso. Una vez iniciada la propagación de grietas se acelera por el efecto de lubricante de engranajes y fuerza de tracción tangencial.

En caso de severidad en desgaste se utiliza distinto tamaño de partículas para simular el fallo, el cual se produce en todos los dientes del engranaje dado que en el uso cotidiano de engranes se presenta de esa manera [85].

La Tabla 12 presenta un resumen de las características de un engrane con *scuffing* [34].

Tabla 12. Características de un engrane con fallo *scuffing*

Categoría de fallo	<i>Scuffing (ISO 10825)</i>
Tipo del fallo	<i>Scuffing</i>
Causas	Unión de dientes a alta presión. Velocidades elevadas. Crestas en los dientes que provocan líneas tras elevar la temperatura. Mala lubricación.
Localización	Zonas de atascamiento en la superficie del diente
Evolución	En su etapa inicial presenta pequeñas grietas paralelas al eje que se van propagando hasta ser notorias en etapas avanzadas.
Particularidades	Se puede presentar con picaduras serias. Se presenta como raspones.
Soluciones	Utilizar lubricantes que soporten más carga, velocidad y condiciones de alta temperatura. Agregar aditivos.

Imagen

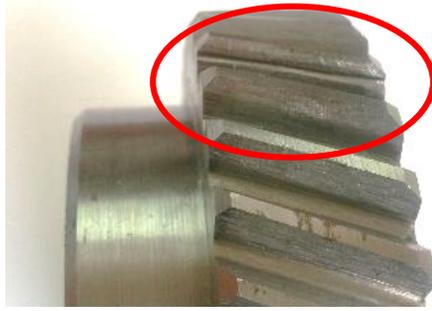
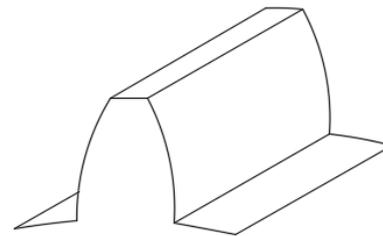
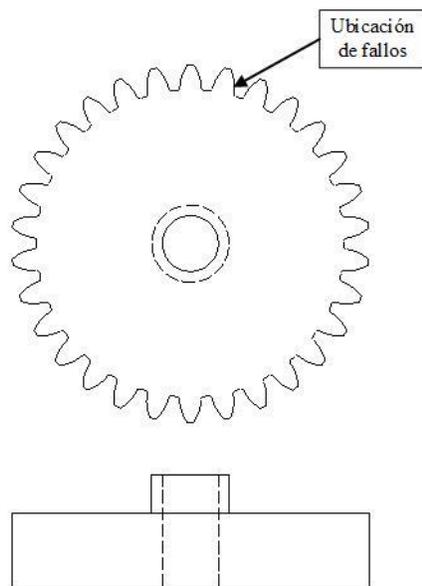


Figura 61. Fallo *scuffing*

3.1.5 Construcción de fallos

Para la construcción de los fallos se tomará el engrane como indica la Figura 62a. Tomando en cuenta la cara derecha del diente, Figura 62b.



b. Vista de diente para construcción de fallos

a. Posición de engranes para construcción de fallos

Figura 62. Construcción de fallos

Para el montaje de fallos se considera dos etapas en la caja de engranes como se muestra en la Figura 63.

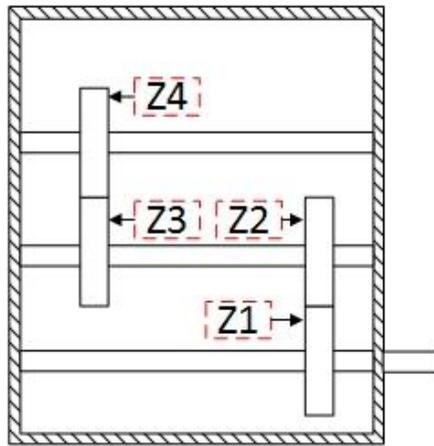
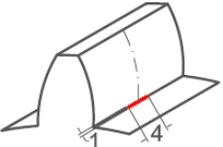
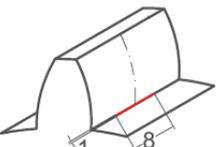
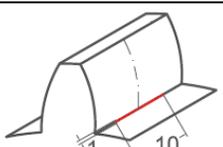
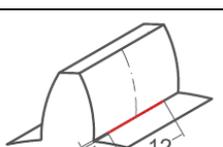
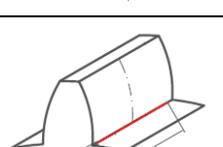
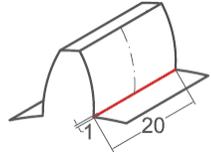
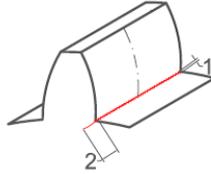
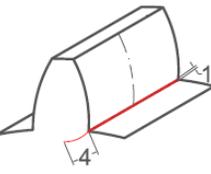
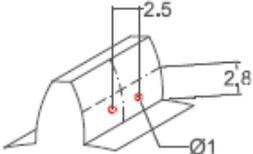
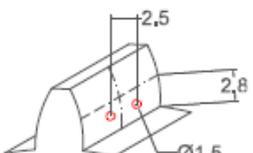
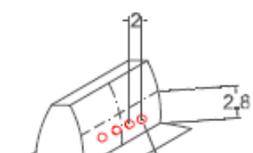
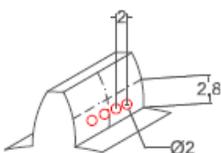
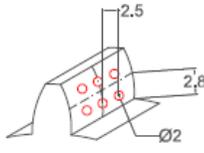


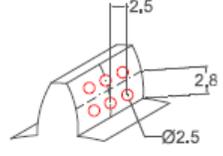
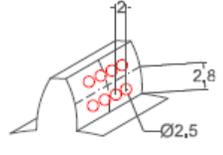
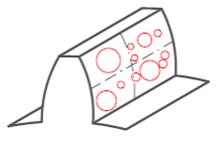
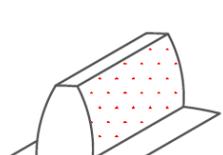
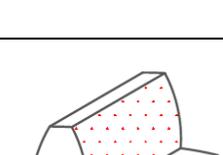
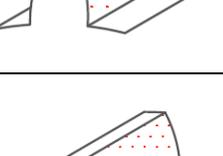
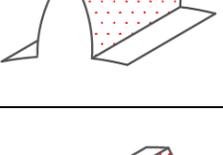
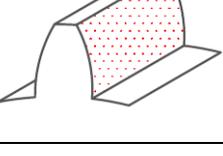
Figura 63. Ubicación de engranes

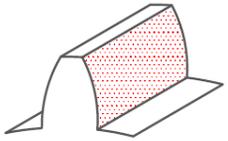
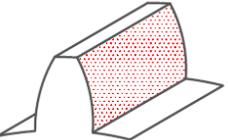
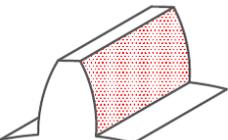
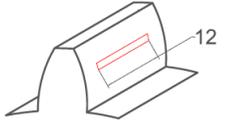
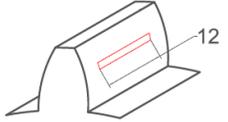
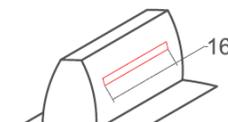
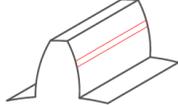
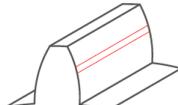
La Tabla 13 contiene los fallos a simular en los engranes. Existen ocho grados de severidad para cada fallo, utilizando un total de nueve engranes ya que se parte con uno en buenas condiciones que será cementado.

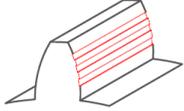
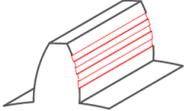
Tabla 13. Fallos en engranes

Fallo	Ubicación	Descripción	Código	Figura
Crack	Z1	Crack en la raíz del diente, centrado con respecto a la cara. – Profundidad: 1mm – Ancho: 1mm – Longitud: 4mm	Z1_4_1	
Crack	Z1	Crack en la raíz del diente, centrado con respecto a la cara. – Profundidad: 1mm – Ancho: 1mm – Longitud: 8mm	Z1_4_2	
Crack	Z1	Crack en la raíz del diente, centrado con respecto a la cara. – Profundidad: 1mm – Ancho: 1mm – Longitud: 10mm	Z1_4_3	
Crack	Z1	Crack en la raíz del diente, centrado con respecto a la cara. – Profundidad: 1mm – Ancho: 1mm – Longitud: 12mm	Z1_4_4	
Crack	Z1	Crack en la raíz del diente, centrado con respecto a la cara. – Profundidad: 1mm – Ancho: 1mm – Longitud: 16mm	Z1_4_5	

<i>Crack</i>	Z1	<p><i>Crack</i> en la raíz del diente, centrado con respecto a la cara.</p> <ul style="list-style-type: none"> – Profundidad: 1mm – Ancho: 1mm – Longitud: 20mm 	Z1_4_6	
<i>Crack</i>	Z1	<p><i>Crack</i> en la raíz del diente, centrado con respecto a la cara.</p> <ul style="list-style-type: none"> – Profundidad: (2mm) – Ancho: 1mm(1.5mm) – A lo largo de todo el diente – Angulo de 45 	Z1_4_7	
<i>Crack</i>	Z1	<p><i>Crack</i> en la raíz del diente, centrado con respecto a la cara.</p> <ul style="list-style-type: none"> – Profundidad: (4mm) – Ancho: 1mm(1.5mm) – A lo largo de todo el diente – Angulo de 45 	Z1_4_8	
<i>Pitting</i>	Z1	<p><i>Pitting</i> en un 20% de los dientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> – 6 Dientes – 2 Marcas de <i>pitting</i> – Profundidad de 1mm – Diámetro de 1mm – Por debajo del diámetro de paso 	Z1_3_1	
<i>Pitting</i>	Z1	<p><i>Pitting</i> en un 20% de los dientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> – 6 Dientes – 2 Marcas de <i>pitting</i> – Profundidad de 1.5mm – Diámetro de 1.5mm – Por debajo del diámetro de paso 	Z1_3_2	
<i>Pitting</i>	Z1	<p><i>Pitting</i> en un 20% de los dientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> – 6 Dientes – 4 Marcas de <i>pitting</i> – Profundidad de 1.5mm – Diámetro de 1.5mm – Por debajo del diámetro de paso 	Z1_3_3	
<i>Pitting</i>	Z1	<p><i>Pitting</i> en un 20% de los dientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> – 6 Dientes – 4 Marcas de <i>pitting</i> – Profundidad de 2mm – Diámetro de 2mm 	Z1_3_4	
<i>Pitting</i>	Z1	<p><i>Pitting</i> en un 20% de los dientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> – 6 Dientes – 6 Marcas de <i>pitting</i> – Profundidad de 2mm – Diámetro de 2mm 	Z1_3_5	

<i>Pitting</i>	Z1	<p><i>Pitting</i> en un 20% de los dientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> – 6 Dientes – 6 Marcas de <i>pitting</i> – Profundidad de 2.5mm – Diámetro de 2.5mm 	Z1_3_6	
<i>Pitting</i>	Z1	<p><i>Pitting</i> en un 20% de los dientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> – 6 Dientes – 8 Marcas de <i>pitting</i> – Profundidad de 2.5mm – Diámetro 2.5mm 	Z1_3_7	
<i>Pitting</i>	Z1	<p><i>Pitting</i> en un 20% de los dientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> – 6 Dientes – Marcas irregulares de <i>pitting</i> – Profundidad variable – Diámetro irregular 	Z1_3_8	
<i>Wear</i>	Z2	<p>Fallo en cara frontal de diente en un 15% de los dientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> – 6 dientes – Puntos aleatorios – 10% del diente con marcas – Profundidad 0.1mm 	Z2_2_1	
<i>Wear</i>	Z2	<p>Fallo en cara frontal de diente en un 15% de los dientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> – 6 dientes – Puntos aleatorios – 20% del diente con marcas – Profundidad 0.1mm 	Z2_2_2	
<i>Wear</i>	Z2	<p>Fallo en cara frontal de diente en un 15% de los dientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> – 6 dientes – Puntos aleatorios – 30% del diente con marcas – Profundidad 0.1mm 	Z2_2_3	
<i>Wear</i>	Z2	<p>Fallo en cara frontal de diente en un 15% de los dientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> – 6 dientes – Puntos aleatorios – 40% del diente con marcas – Profundidad 0.1mm 	Z2_2_4	
<i>Wear</i>	Z2	<p>Fallo en cara frontal de diente en un 15% de los dientes.</p> <ul style="list-style-type: none"> – 6 dientes – Puntos aleatorios – 50% del diente con marcas – Profundidad 0.1mm 	Z2_2_5	

<i>Wear</i>	Z2	Fallo en cara frontal de diente en un 15% de los dientes. <ul style="list-style-type: none"> - 6 dientes - Puntos aleatorios - 60% del diente con marcas - Profundidad 0.1mm 	Z2_2_6	
<i>Wear</i>	Z2	Fallo en cara frontal de diente en un 15% de los dientes. <ul style="list-style-type: none"> - 6 dientes - Puntos aleatorios - 70% del diente con marcas - Profundidad 0.1mm 	Z2_2_7	
<i>Wear</i>	Z2	Fallo en cara frontal de diente en un 15% de los dientes. <ul style="list-style-type: none"> - 6 dientes - Puntos aleatorios - 80% del diente con marcas - Profundidad 0.1mm 	Z2_2_8	
<i>Scuffing</i>	Z3	A lo largo del diente <ul style="list-style-type: none"> - Una línea - Profundidad 0.25mm - Ancho 1mm - Longitud 12mm 	Z3_5_1	
<i>Scuffing</i>	Z3	A lo largo del diente <ul style="list-style-type: none"> - Una línea - Profundidad 0.5mm - Ancho 1mm - Longitud 12mm 	Z3_5_2	
<i>Scuffing</i>	Z3	A lo largo del diente <ul style="list-style-type: none"> - Una línea - Profundidad 0.25mm - Ancho 1mm - Longitud 16mm 	Z3_5_3	
<i>Scuffing</i>	Z3	A lo largo del diente <ul style="list-style-type: none"> - Una línea - Profundidad 0.5mm - Ancho 1mm - Longitud 16mm 	Z3_5_4	
<i>Scuffing</i>	Z3	A lo largo de todo un diente <ul style="list-style-type: none"> - Una línea - Profundidad 0.25mm - Ancho 1mm 	Z3_5_5	
<i>Scuffing</i>	Z3	A lo largo de todo un diente <ul style="list-style-type: none"> - Una línea - Profundidad 0.5mm - Ancho 1mm 	Z3_5_6	

<i>Scuffing</i>	Z3	A lo largo de todo un diente – Tres líneas – Profundidad 0.25mm – Ancho 1mm	Z3_5_7	
<i>Scuffing</i>	Z3	A lo largo de todo un diente – Tres líneas – Profundidad 0.5mm – Ancho 1mm	Z3_5_8	

3.2 Selección y caracterización de fallos en rodamientos

Para los rodamientos se han considerado severidad en fallos presentes en pista interna, pista externa y elemento rodante los cuales se resumen en la Tabla 14.

Tabla 14. Fallos en rodamientos

Fallo	Descripción	Figura
Pista interna (<i>Inner race</i>)	– Diámetro: 0.5mm – Profundidad: 0.3mm – Longitud: 7mm	
	– Diámetro: 0.9mm – Profundidad: 0.3mm – Longitud: 7mm	
	– Diámetro: 1.3mm – Profundidad: 0.3mm – Longitud: 7mm	
Pista externa (<i>Outer race</i>)	– Diámetro: 0.5mm – Profundidad: 0.3mm – Longitud: 7mm	
	– Diámetro: 0.9mm – Profundidad: 0.3mm – Longitud: 7mm	
	– Diámetro: 1.3mm – Profundidad: 0.3mm – Longitud: 7mm	
Elemento rodante (<i>Rolling elements</i>)	Buenas condiciones – Peso: 2.70563gr – Diámetro: 8.65mm	
	– Diámetro: 1mm – Profundidad: 0.5mm – Peso: 2.70103gr	

	<ul style="list-style-type: none"> - Diámetro: 0.9mm - Profundidad: 0.5mm - Peso: 2.70250gr 	
	<ul style="list-style-type: none"> - Diámetro: 0.5mm - Profundidad: 0.5mm - Peso: 2.70300gr 	
	<ul style="list-style-type: none"> - Diámetro: 1mm - Profundidad: 0.3mm - Peso: 2.70327gr 	
	<ul style="list-style-type: none"> - Diámetro: 0.9mm - Profundidad: 0.3mm - Peso: 2.70347gr 	
	<ul style="list-style-type: none"> - Diámetro: 0.8mm - Profundidad: 0.3mm - Peso: 2.70353gr 	
	<ul style="list-style-type: none"> - Diámetro: 0.7mm - Profundidad: 0.3mm - Peso: 2.70360gr 	
	<ul style="list-style-type: none"> - Diámetro: 0.6mm - Profundidad: 0.3mm - Peso: 2.70417gr 	
	<ul style="list-style-type: none"> - Diámetro: 0.6mm - Profundidad: 0.1mm - Peso: 2.70460gr 	
	<ul style="list-style-type: none"> - Diámetro: 0.6mm - Profundidad: 0.1mm - Peso: 2.70473gr 	

3.3 Definición del plan experimental

El plan experimental define los parámetros bajo los cuales se realizará la experimentación, así como la posición y frecuencia de muestreo que se tendrá en cada una de las pruebas programadas. Para mantener un orden y permitir que el plan experimental pueda ser replicado en futuras ocasiones se utiliza el formato establecido en el Grupo de Investigación GIDTEC.

Se ha visto conveniente plantear tres bases de datos que cumplan con *multi-fault* en rodamiento, *multi-fault* en engranes.

- Base 1 **BEARING SEVERITY**: Considera severidad tanto en pistas como elementos rodantes y al utilizar tres tipos de fallos diferentes se lo considera también como un estudio de *multi-fault*.

En la Tabla 15 se presenta los fallos en rodamientos para el desarrollo del plan experimental.

Tabla 15. *Experimental plan 6*

Tipo de fallo en rodamiento	Grados de severidad
<i>No fault</i>	1
<i>Inner race</i>	3
<i>Outer race</i>	3
<i>Rolling element</i>	10
TOTAL DE PRUEBAS	17

- Base 2 **MULTI-FAULT GEAR SEVERITY**: Considera cuatro fallos en engranes, a más de 9 grados de severidad en ellos, partiendo de un engrane en buenas condiciones como grado uno de severidad, para cumplir con lo consultado en bibliografía y tener un número impar de pruebas. De esta forma se tendrá una base de datos de *multi-fault* y severidad de fallos.

En la Tabla 16 se presenta los fallos en rodamientos para el desarrollo del plan experimental.

Tabla 16. *Experimental plan 7*

Tipo de fallo en engranes	Grados de severidad
<i>Wear</i>	9
<i>Pitting</i>	9
<i>Scuffing</i>	9
<i>Crack</i>	9
TOTAL DE PRUEBAS	33

3.4 Desmontaje de sistema anterior y limpieza de elementos

Para iniciar la adquisición de una base de datos trae implícitos requerimientos previos que corresponden a desmontar, limpiar, lubricar y guardar cada elemento mecánico y electrónico presente en el banco de vibraciones, esto con la finalidad de cuidar los

componentes usados e iniciar con el montaje de un nuevo sistema. El procedimiento se presenta en la Figura 64.

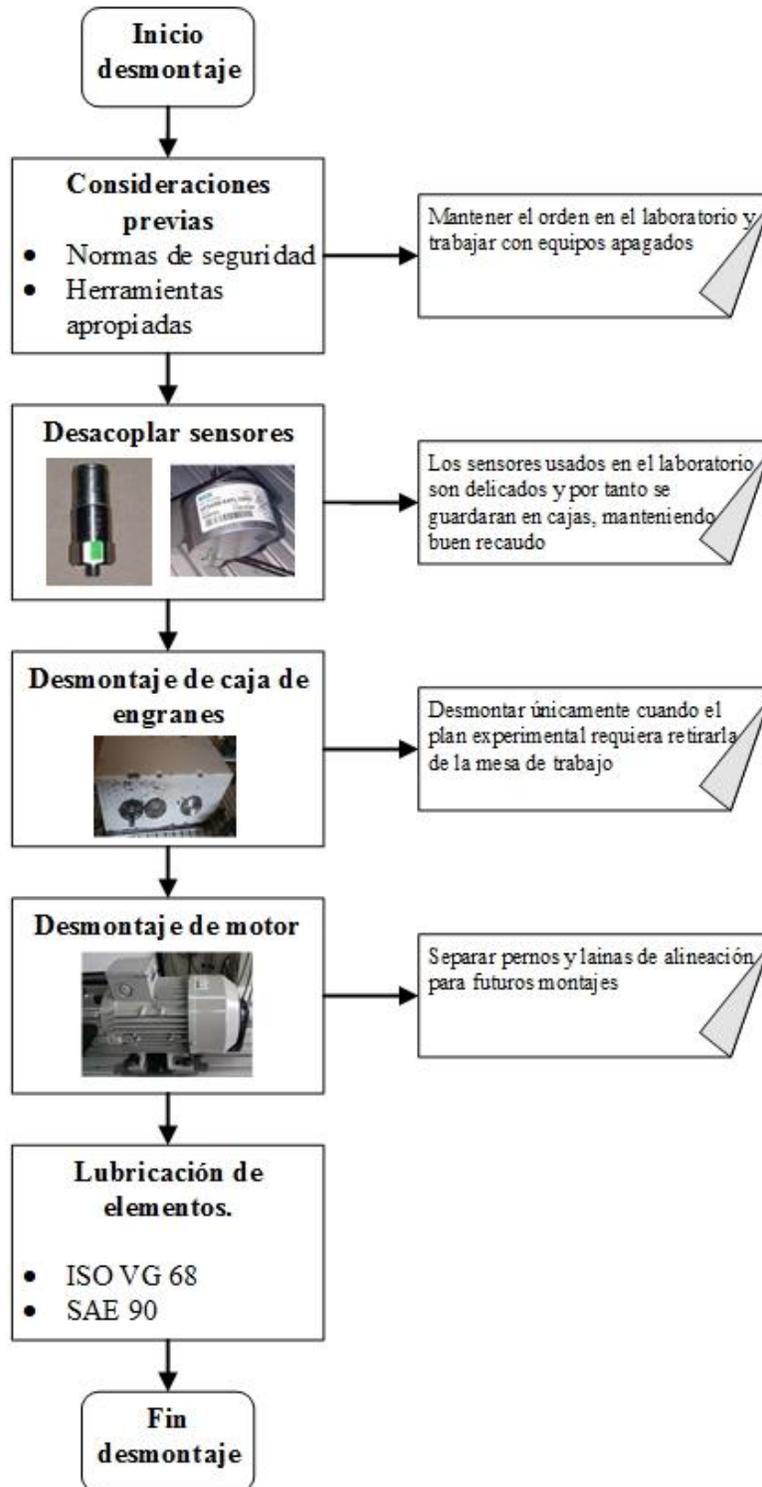


Figura 64. Proceso para el desmontaje de banco de vibraciones

3.5 Montaje de elementos mecánicos y sensores

Para el montaje del banco de vibraciones se recomienda seguir una secuencia de pasos que aseguran que el sistema no sufrirá variaciones durante su funcionamiento. Se requiere de las siguientes herramientas para iniciar con el proceso:

- Juego de llaves allen milimétricas y en pulgadas
- Juego de llaves de boca
- Martillo de goma
- Desarmador plano y estrella
- Escuadra de tope y escuadra de filo
- Reloj comparador
- Calibrador

En la Figura 65 se presenta el proceso de montaje del sistema mecánico rotativo.

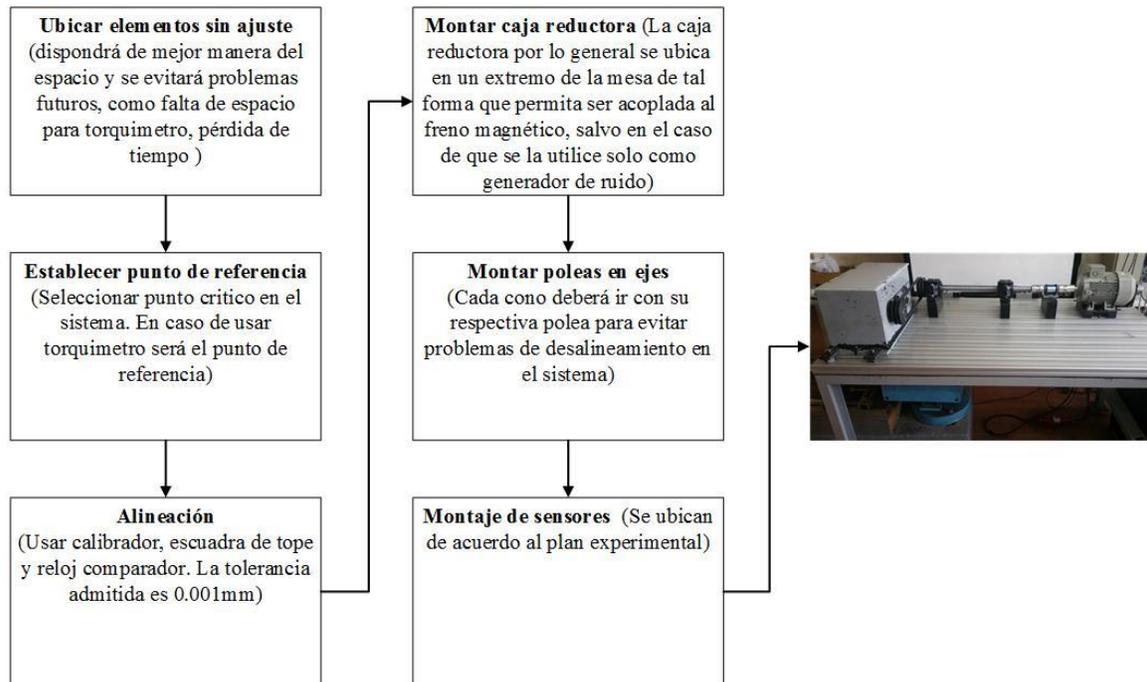


Figura 65. Montaje de elementos mecánicos

3.6 Establecimiento de base de datos

Una vez realizado el montaje de elementos mecánicos y sensores, se procede a realizar el establecimiento de la base de datos. Para lo cual se realiza una verificación previa de todo el sistema siguiendo los pasos establecidos en la Figura 66.

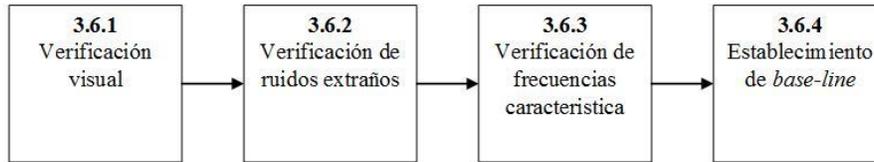


Figura 66. Verificación de sistema mecánico rotativo

3.6.1 Verificación visual

La verificación visual consiste en observar los errores cometidos a simple vista. Es una herramienta sencilla pero no eficaz usada en primera instancia, ya que ésta podrá valorar al sistema de forma general pero no particular. Por medio de éste método se podrá notar la falta exagerada de alineación, ausencia de material, malos ajustes de pernos, suciedad y cables que afecten al sistema a la hora de encenderlo, entre otros.

3.6.2 Verificación de ruidos extraños

Una vez comprobado físicamente al sistema mecánico instalado, se debe encender con las precauciones del caso. Esto se realiza de una forma práctica y manual para eliminar cualquier aspecto anormal que se haya detectado mediante la verificación visual. Para esta verificación se debe contar con una persona que conozca las máquinas utilizadas en el sistema o de alguna forma con un experto en la rama ya que puede haber problemas al ser una máquina rotativa de laboratorio, es decir a escala pequeña.

El sentido auditivo puede encontrar problemas que a simple vista no se alcanza a distinguir, muchos de estos casos son complicaciones internas de los equipos instalados por ejemplo el funcionamiento interno del motor o rodamientos en las chumaceras.

3.6.3 Verificación de frecuencias características

Durante el funcionamiento en buenas condiciones de una caja de engranajes, se generan frecuencias características que están determinadas por la relación de transmisión entre

piñón-engrane y la velocidad de giro. En la Figura 67 se presenta un espectro de vibraciones característico de una caja en buenas condiciones.

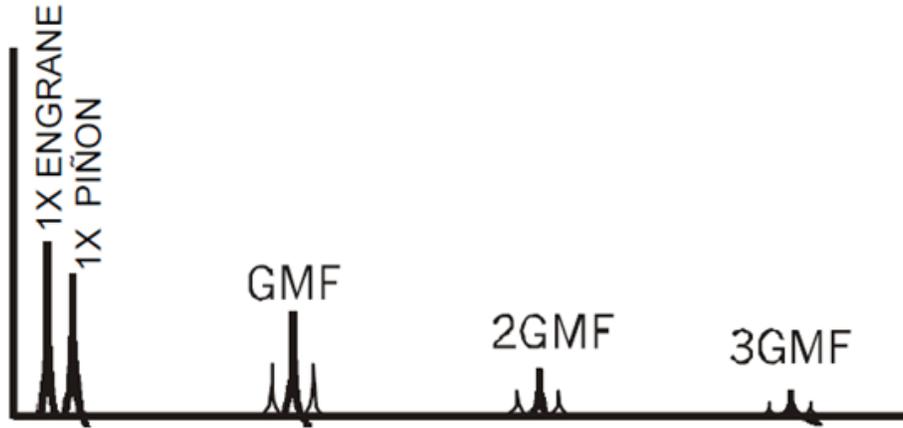


Figura 67. Espectro vibracional característico en caja de engranajes en buenas condiciones [86]

Estos espectros se calculan mediante las ecuaciones de la Tabla 17.

Tabla 17. Frecuencias de elementos rotatorios

Descripción	Ecuación
Frecuencia de giro	$F_g = \frac{RPM_{motor}}{60} [Hz]$
Frecuencia de giro piñón	$1X \text{ piñón} = F_g [Hz]$
Frecuencia de giro engrane	$1X \text{ engrane} = F_g \frac{Z_1}{Z_2} [Hz]$
Frecuencia de paso de engranes	$GMF = F_g \cdot Z_1$

Donde,

RPM_{motor} : Velocidad de giro de motor en RPM

Z_1 : Numero de dientes del piñón

Z_2 : Numero de dientes del engrane

Para la verificación se procede a calcular las frecuencias que tendrán los elementos rotatorios en buenas condiciones a velocidad de 454 [RPM], por medio de las ecuaciones expuestas en la Tabla 17.

La Tabla 18 presenta los resultados obtenidos del cálculo de frecuencias características

Tabla 18. Resultados de cálculo de frecuencias

Frecuencia	Frecuencia [Hz]
Giro	$F_g = 7.5$
Giro piñón	$1X \text{ piñón} = 7.5$
Giro engrane	$1X \text{ engrane} = 5$
Paso de engranes	$GMF = 227$

La validación de la línea base consiste en verificar que el espectro de vibraciones mostrado en la Figura 68, presente una frecuencia en $GMF = 227$ [Hz] y dos bandas laterales de amplitudes similares entre sí, con una distancia similar a la frecuencia de giro del piñón 7.5 [Hz].

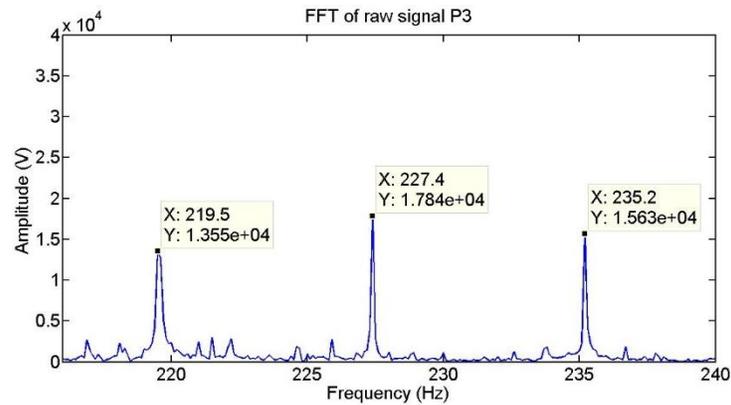


Figura 68. FFT de señal de vibración sin aplicación de ventana

Una vez comprobado que la GMF se encuentra en la frecuencia calculada y sus bandas laterales son de amplitudes similares. Analizamos las frecuencias de engrane y piñón que se indican en la Figura 69, las cuales deberán ser aproximadas a las calculadas a mas de contar con amplitudes parecidas.

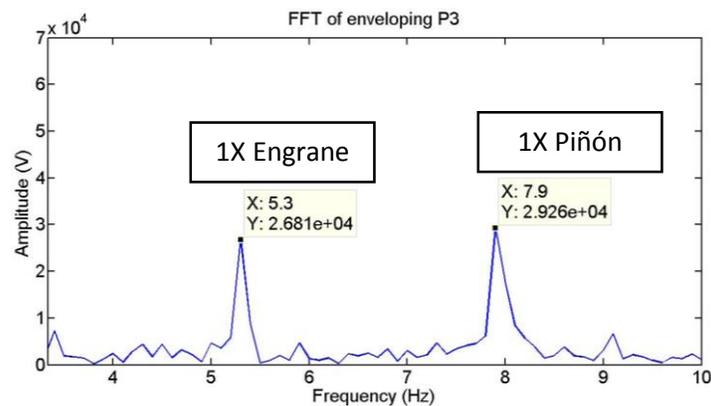


Figura 69. FFT de señal de vibración con aplicación de ventana

Con la comprobación realizada de GMF y frecuencias de piñón-engrane se puede empezar con el levantamiento de datos.

3.6.4 Establecimiento de línea base

Finalmente el establecimiento de la base de datos, es la adquisición de señales según los parámetros que se hayan escogido en el plan experimental. La base de datos será necesario para comparar resultados con diferentes fallos que se proponen en el sistema, buscando de esta forma modelos que consigan la detección a tiempo del desperfecto de una máquina.

CAPÍTULO 4

El capítulo que se describe a continuación tiene como objetivo elaborar tres guías de prácticas para la detección de fallos en engranajes a través del análisis de emisiones acústicas para sistemas rotativos.

Mediante las guías de prácticas se pretende que los estudiantes de pregrado fortalezcan conocimientos sobre el tema a través de actividades prácticas, además dar a conocer a los estudiantes la importancia del mantenimiento basado en la condición dentro del campo industrial.

4.1 Descripción del sistema mecánico rotativo para la guía de prácticas

El sistema mecánico rotativo con el que se cuenta en el laboratorio de vibraciones de Ingeniería Mecánica ha sido diseñado y construido por el grupo GIDTEC con el fin de contribuir a la investigación en el campo de mantenimiento basado en la condición, la inversión se ha enfocado en la adquisición de sensores de tal forma que se analicen señales de vibración mecánica, emisiones acústicas y termografía infrarroja. En la Figura 56 muestra el sistema mecánico rotativo completo y armado que se utilizará para la realización de las guías de práctica.

La Figura 70 es una imagen que ilustra el montaje para uso de sensor, DAQ y PC para la adquisición de señales acústicas en la práctica.



Figura 70. Pasos para la adquisición de señales [87]

4.2 Descripción de sensor de emisiones acústicas

El sensor de tipo diferencial de alta sensibilidad WD S/N FV52 de PHYSICAL ACOUSTICS, proporciona una adecuada respuesta de frecuencia en el rango de 100 a 900 kHz, siendo propicio para la detección de fallos, al eliminar el ruido y brindando una respuesta EA de alta fidelidad. Por medio de una identificación de la fuente que cuenta con dos cables de señal que alimentan a un preamplificador diferencial dando como resultado una señal con ruido más bajo.



Figura 71. Sensor acústico WD S/N FV52 [88]

A más de la detección de fallos el sensor es adecuado para el diagnóstico estructural en tanques de almacenamiento, tuberías, entre otras aplicaciones. En la Tabla 19 se presenta las características del sensor WD S/N FV52.

Tabla 19. Características del sensor acústico WD S/N FV52 [88]

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
Couplant recomendado	Pegamento epoxy
Certificado de calibración	NIST

Para la sujeción del sensor en la máquina que se ha de monitorizar se cuenta con un soporte magnético *MHSTD PHYSICAL ACOUSTICS*, que se muestra en la Figura 72.

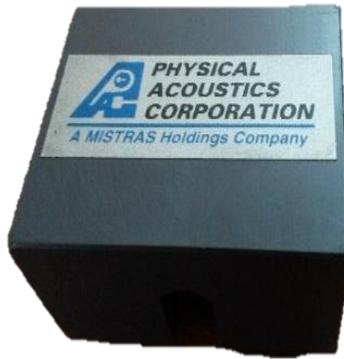


Figura 72. Soporte magnético MHSTD

4.3 Descripción del equipo de procesamiento

Para el procesamiento de ondas EA se utilizan diferentes instrumentos por los cuales pasará la información y se registrará en la computadora por medio de un software. A continuación se describe cada uno de los elementos que se utiliza para generar la toma de datos.

4.3.1 Preamplificador

El preamplificador 0/2/4C está diseñado para soportar todos los sensores EA *PHYSICAL ACOUSTICS* con alimentación suministrada a través de una entrada BNC, al cual se le suministra 20/0/40 dB de ganancia que se seleccionable manualmente y opera con un único sensor de *single* o *differential* [89]. La Figura 73 muestra la forma física del preamplificador.



Figura 73. Preamplificador 0/2/4C [89]

La Tabla 20 expone sus características más importantes. La conexión del sensor WD S/N FV52 se realiza en el puerto de nombre DIFFERENTIAL.

Tabla 20. Características del preamplificador 2/4/6 [89]

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

4.3.2 Tarjeta de adquisición

La plataforma Compac DAQ funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que una PC pueda interpretarlas. Los tres componentes claves son el circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de datos [87].

4.3.2.1 Acondicionamiento de Señales

Las señales que reciben los sensores pueden ser ruidosas para medirse directamente. El circuito de acondicionamiento de señales manipula una señal de tal forma que la vuelve apropiada para la entrada del ADC. Este circuito puede incluir amplificación, atenuación, filtrado y aislamiento [87].

4.3.2.2 Convertidor Analógico Digital (ADC)

Las señales analógicas que proporcionan los sensores deben ser digitalizadas. El proceso de conversión se lo realiza en un ADC, que proporciona una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo. Estas muestras son transferidas a una PC a través de un bus de datos, donde la señal original es reconstruida a partir de las muestras tomadas en el software [87].

4.3.2.3 Módulos de adquisición

En la Tabla 21 se nombra cada una de las tarjetas de adquisición que se encuentran instaladas en el grupo de investigación GIDTEC, con sus respectivas características e imagen de su forma física [90],[91],[92],[93],[94],[95].

Tabla 21. Características de módulos instaladas en el Compac DAQ del laboratorio

Nombre	Descripción	Imagen
NI 9205	Marca: NI Modelo: NI9205 N° Canales: 32 Resolución: 16 bits Frecuencia muestreo: 250KS/s Entrada: analógica Voltaje entrada: 200mv-10v	 Figura 74. NI 9205 [90]
NI 9223	Marca: NI Modelo: NI9233 N° Canales: 4 Resolución: 16 bits Frecuencia muestreo: 1MS/s Entrada: analógica simultanea Voltaje entrada: +-10V	 Figura 75. NI 9233 [91]
NI 9225	Marca: NI Modelo: NI9225 N° Canales: 3 Resolución: 24 bits Frecuencia muestreo: 50KS/s Entrada: analógica simultanea Voltaje entrada: 300Vrms	 Figura 76. NI 9225 [92]
NI 9227	Marca: NI Modelo: NI9227 N° Canales: 4 Resolución: 24 bits Frecuencia muestreo: 50KS/s Entrada: corriente simultanea Corriente entrada: 5Arms	 Figura 77. NI 9227 [93]
NI 9234	Marca: NI Modelo: NI9234 N° Canales: 4, 24 bits Resolución: 24 bits Frecuencia muestreo: 51.2KS/s Entrada: Analógica IEPE y AC/DC voltaje entrada: +-5v	 Figura 78. NI 9234 [94]
NI 9401	Marca: NI Modelo: NI9401 Modulo: Bidireccional E/S N° Canales: 8, E/S Velocidad: 100ns Voltaje: 5V/TTL	 Figura 79. NI 9401 [95]

4.3.2.4 Chasis

El NI cDAQ-9188 es un chasis de 8 ranuras diseñado para adquirir datos de medidas mixtas. Una sola NI CompactDAQ chasis puede medir hasta 256 canales de señales de sensores, analógicas I/O, digitales I/O y contadores/temporizadores con una comunicación Ethernet a una PC o portátil, entregando datos de alta velocidad y facilidad de uso.

Los módulos utilizables incluyen termocuplas, RTDs, calibradores de tensión, carga y transductores de presión, celdas de torque, acelerómetros, medidores de flujo y micrófonos. Además, con el software controlador NI-DAQmx se puede registrar los datos de los experimentos realizados en el laboratorio o desplegar un sistema de prueba distribuido a través de entornos de programación como NI LabView.

En la Figura 80 se aprecia el dispositivo físico nombrado [96].



Figura 80. Chasis NI cDAQ-9188 [96]

4.3.3 Programa de adquisición

El programa usado en la adquisición de datos es “*Fault diagnostic*” desarrollado en LabView por el grupo de investigación GIDTEC.

En la Figura 81 se muestra el programa usado para la adquisición de señales.

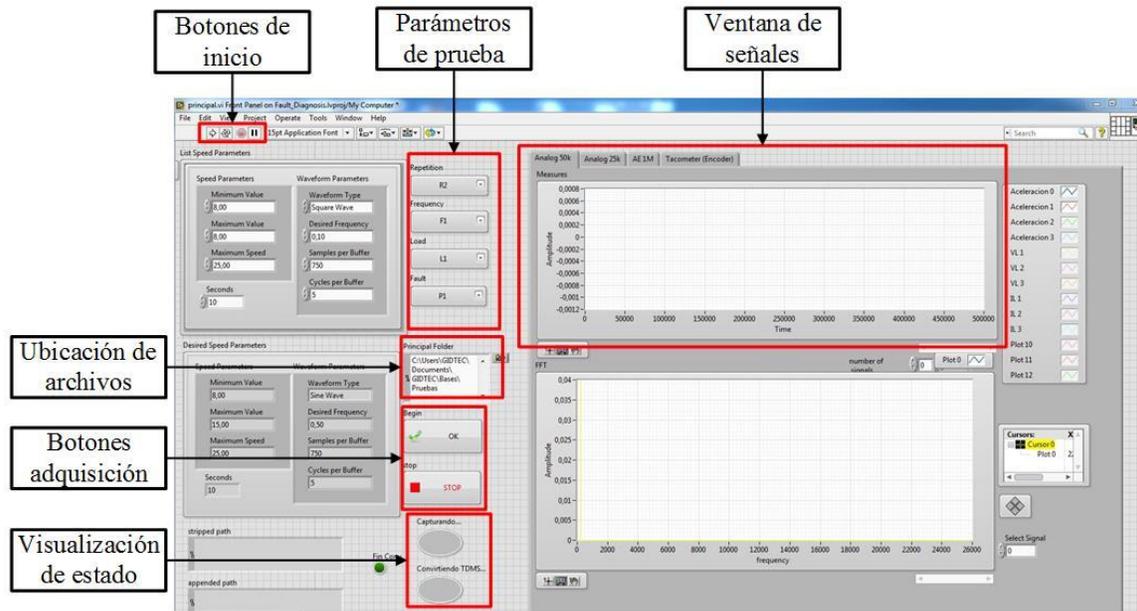


Figura 81. Programa de adquisición de señales

4.3.3.1 Ubicación de archivos recopilados

En esta ventana que se muestra en la Figura 82, el programa permite determinar la dirección de la carpeta en la cual se guardará los datos de las señales adquiridas en el banco de vibraciones.

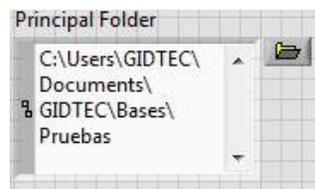


Figura 82. Ubicación de archivos

4.3.3.2 Botones de inicio

Los botones que se indican en la Figura 83, permiten ejecutar, refrescar, detener y pausar el programa. Una vez pulsado el botón ejecutar, no se podrá realizar cambios en la dirección de guardado de las señales.

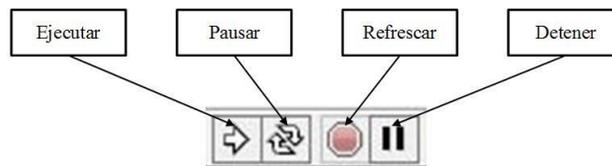


Figura 83. Botones de inicio

4.3.3.3 Parámetros de prueba

El programa permite realizar varias repeticiones (*Repetition*) para una prueba, a más de variar parámetros como frecuencia (*Frequency*), carga (*Load*) y fallo (*Fault*) en estudio. Para la cual se cuenta con listas desplegables, dentro de las cuales se varían los parámetros mencionados.

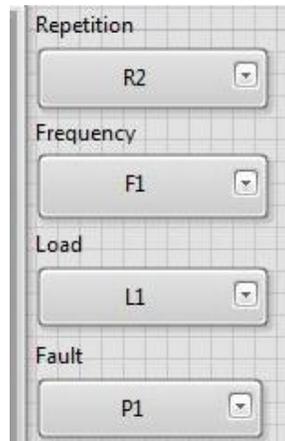


Figura 84. Parámetros de prueba

4.3.3.4 Ventana de señales

Las señales adquiridas están agrupadas según su velocidad de muestreo, en la Figura 85 se presenta las distintas pestañas que agrupan a los diversos sensores. En esta ventana también se presenta una gráfica de la señal.

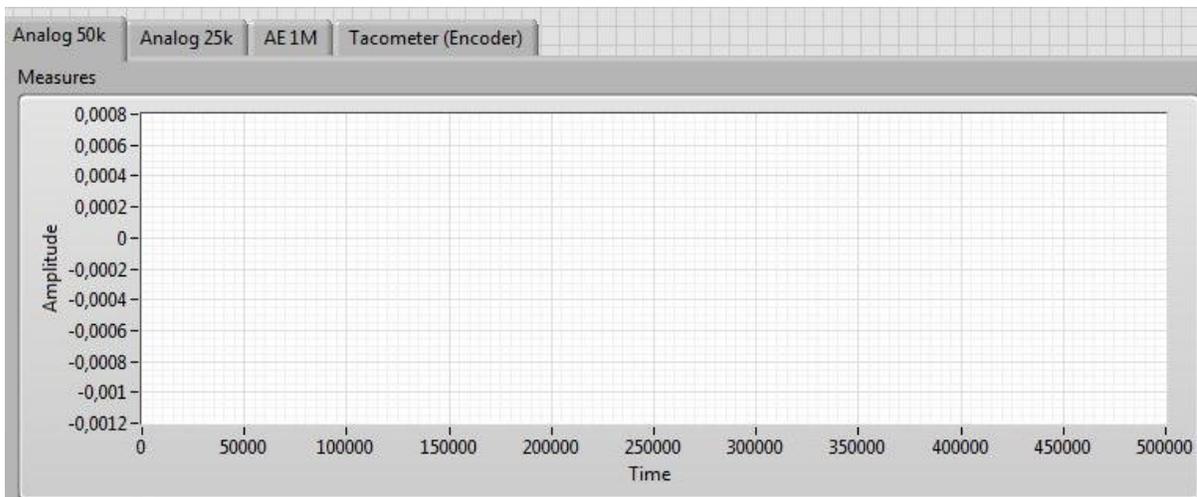


Figura 85. Ventana de señales

4.3.3.5 Botones de adquisición

Para la toma de datos se pulsa el botón “OK” el cual dará la orden de muestreo, misma que puede ser detenida con el botón “STOP”.



Figura 86. Botones de adquisición

4.3.3.6 Visualización de estado

En esta sección del programa se cuenta con etiquetas, que indican si el programa se encuentra: adquiriendo datos o procesando señales.



Figura 87. Verificación de estado

4.4 Selección de fallos

Actualmente la detección de fallos por medio de emisiones acústicas se encuentra en proceso de estudio, requiriendo el uso simultaneo de análisis vibracional. Por tanto se simularán fallos por *Tooth breakage* con diferentes grados de severidad de tal forma que se permita la verificación de manera visual el cambio existente tanto en los espectros vibracionales como de emisiones acústicas.

La Tabla 22 presenta los fallos que se usaran en las guías de prácticas.

Tabla 22. Fallos para detección por medio de EA



4.4.1 Disposición de fallos en engranes

Para el montaje de fallos se considera una sola etapa en la caja de engranes como se muestra en la Figura 88. En piñón estará representado por Z1 y será el poseedor de los diversos fallos, mientras que Z2 será en engrane sin fallos durante la ejecución de la práctica.

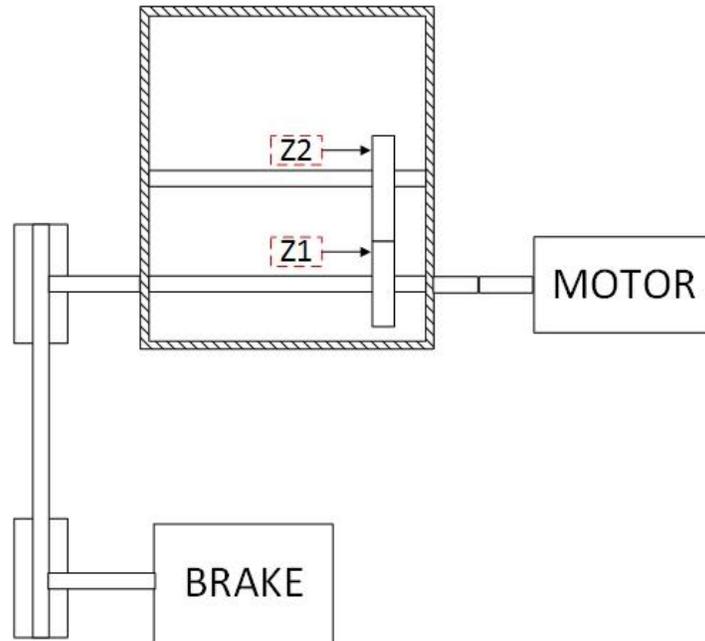


Figura 88. Disposición de engranes para guía de práctica

4.5 Guías de prácticas sobre emisiones acústicas

La elaboración de una guía de prácticas no es tarea sencilla, puesto que requiere cumplir con formatos establecidos en la Universidad Politécnica Salesiana, así como aportar de manera significativa al estudiante fortaleciendo sus conocimientos sobre el manejo y detección de fallos usando un sensor de emisiones acústicas. Por este motivo la Figura 89 muestra el procedimiento que se llevara a cabo para establecer dos guías de prácticas.

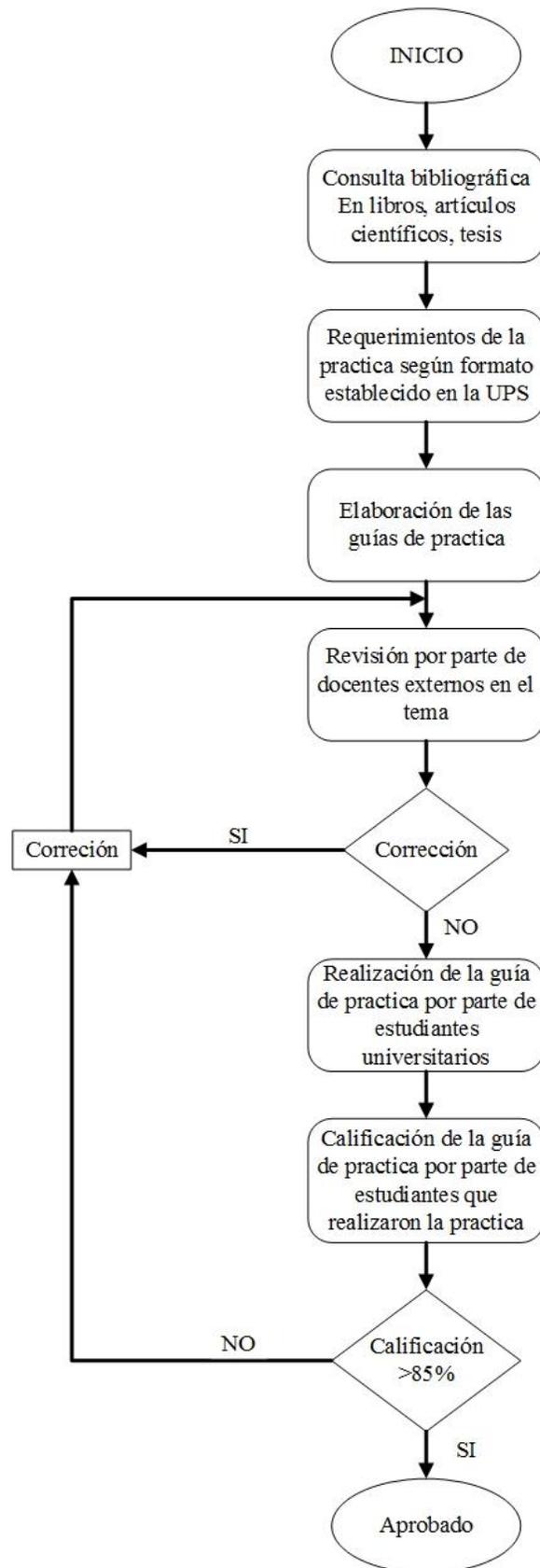


Figura 89. Diagrama de flujo para establecer una guía de práctica [9]

4.5.1 Consulta bibliográfica sobre emisiones acústicas

La detección de fallos por medio de emisiones acústicas, es una técnica de monitoreo que se encuentra en desarrollo, la cual ha tenido un acelerado crecimiento en la última década. Para la elaboración de las guías de práctica es necesaria la consulta tanto en libros, documento, artículos científicos y tesis que abordan el tema de manera clara y explicativa.

La Tabla 23 presenta un resumen de la revisión bibliográfica.

Tabla 23. Resumen de revisión bibliográfica

Bibliografía	Emisión acústica	Detección de fallos en engranes por medio de emisión acústica
Libros	[97],[98]	
Documentos	[49]	[72]
Artículos científicos	[58],[63],[64],[57],[99],[51],[100]	[51],[70],[53],[71]
Normas		[68],[43]
Tesis	[54] [56]	[9],[44]

Como se aprecia en la Tabla 23, la mayor parte de la información que se posee sobre el tema se encuentra en artículos científicos sobre todo en cuanto a la detección de fallos, esto se debe a las emisiones acústicas no han tenido aun un desarrollo notable en este campo [71],[99].

4.5.2 Requerimientos de guías de prácticas según formato establecido

En base a la consulta de trabajos previos sobre la elaboración de guías de práctica [1], [9],[44], se requiere cumplir con los siguientes puntos:

- Tema
- Presentación de la práctica
- Requisitos, precauciones y evaluación
- Objetivos
- Equipos, instrumentación y software
- Exposición
- Proceso y procedimientos
- Conclusiones y recomendaciones
- Referencias
- Glosario

4.5.3 Elaboración de guías de prácticas sobre emisiones acústicas

Como ha sido mencionado las emisiones acústicas presentan grandes facilidades para la detección de fallos en engranes, sin embargo su estudio se encuentra en desarrollo. Por tanto con la elaboración de tres guías de práctica sobre el tema se pretende incentivar a los estudiantes a la investigación sobre EA, las cuales tienen un gran futuro dentro del mantenimiento basado en la condición.

Las prácticas planteadas de emisiones acústicas son las siguientes:

- Práctica 1- **USO DE SENSOR DE EMISIONES ACÚSTICAS WD SENSOR**, tiene por objeto conocer el uso, aplicación y montaje que se requiere para usar el sensor de emisiones acústicas para la detección de fallos en una caja de engranes. La guía de práctica se presenta en el Anexo A1.
- Práctica 2- **DETERMINACIÓN DE POSICIÓN DEL SENSOR DE EMISIONES ACÚSTICAS WD S/N FV52**, tiene por objeto apreciar el cambio en la FFT de la señal de EA al variar la posición y establecer la posición idónea para la detección de fallos. La guía de práctica se presenta en el Anexo A2.
- Práctica 3- **DETECCIÓN DE PATRONES DE FALLO EN ENGRANAJES POR MEDIO DE EMISIONES ACÚSTICAS**, tiene por objeto reconocer una onda de emisión acústica en buenas condiciones y compararla con la resultante al usar engranes con fallas controladas. La guía de práctica se presenta en el Anexo A3.

4.5.4 Revisión de guías de prácticas de emisiones acústicas

Para las revisiones de las guías de práctica intervinieron integrantes de GIDTEC, el Ing. René Vinicio Sánchez, director del grupo de investigación, Ing. Diego Cabrera, encargado de la parte electrónica junto a sus colaboradores Ing. Jean Carlo Macancela y Ing. Pablo Lucero quienes aportaron con sugerencias a más de recomendaciones en la parte narrativa y estructural, tales como:

- Corrección en la presentación de la práctica.
- Corrección en los objetivos.
- Corrección de la exposición de las guías de práctica.
- Corrección en el procedimiento de las guías de práctica.

4.5.5 Ejecución de guías de prácticas de emisiones acústicas

Las guías de prácticas fueron realizadas por 30 estudiantes de Ingeniería Mecánica que cursan el quinto ciclo o son superiores al mismo de la Universidad Politécnica Salesiana, ejecutando las prácticas 1, 2, 3.

La realización de las guías de prácticas inicialmente ha presentado correcciones que fueron realizadas de acuerdo a las recomendaciones expuestas por los ejecutantes. Entre las correcciones y recomendaciones se tiene:

- Mejorar el encabezado de las guías de prácticas con formato adecuado.
- Corregir la estructura del procedimiento de las guías de prácticas.
- Corregir faltas ortográficas y mejorar redacción para profundizar.
- Resumir el marco teórico que se expone en las guías de práctica.
- Agregar pasos necesarios en el procedimiento debido a que las personas no tienen el conocimiento completo del tema.

4.5.6 Validación de guías de prácticas de emisiones acústicas

Para la validación se realizó las prácticas propuestas, en los laboratorios de análisis vibracional de la Universidad Politécnica Salesiana, con la colaboración de laboratoristas y 30 alumnos pertenecientes a la carrera de Ingeniería Mecánica.

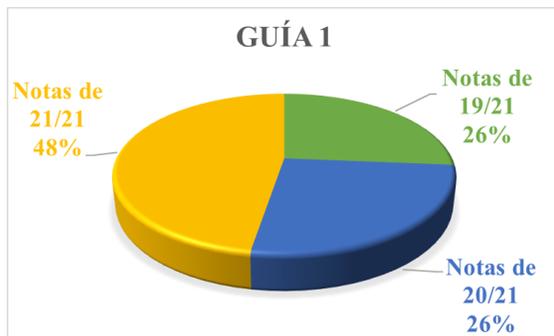
4.5.6.1 Calificación de guías de prácticas de emisiones acústicas

Para el proceso de calificación se partió del formato “Ficha de valoración de guías de práctica” propuesto por [1], en el cual se evalúa cuatro aspectos sobre las guías, que son:

- Logros de aprendizaje
- Estructura básica
- Estrategia metodológica
- Materiales educativos

El resultado de la evaluación se califica sobre 21 puntos, requiriendo un mínimo de 85% de la nota máxima para la aprobación de la guía de práctica. La evaluación realizada por cada estudiante se encuentra en el Anexo C1.

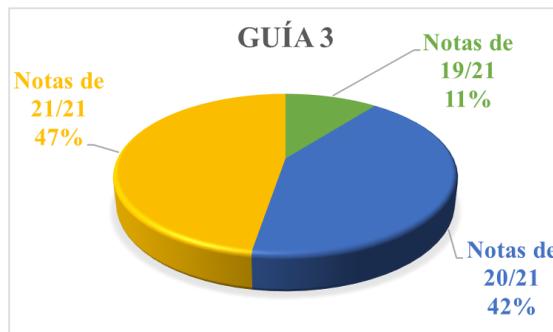
4.5.6.2 Resultados de la evaluación de guías de prácticas de emisiones acústicas



Numero de personas encuestadas: 30
Calificación promedio: 20.33



Numero de personas encuestadas: 30
Calificación promedio: 20.46



Numero de personas encuestadas: 30
Calificación promedio: 20.43

En promedio las notas obtenidas en las tres practicas propuestas sobre emisiones acústicas es superior a los 20 puntos. De esta manera bajo el criterio establecido en [1], las guías de prácticas quedan validadas y disponibles para la realización en los laboratorios de análisis vibracional de la Universidad Politécnica Salesiana.

CONCLUSIONES

- Tras el estudio realizado, se cuenta con dos bases de datos que considera grados de severidad en rodamientos y engranajes que han sido adquiridas con múltiples sensores, lo cual representa un valioso aporte al análisis de señales vibracionales y emisiones acústicas en maquinaria rotativa. De la misma manera se cuenta con tres guías de práctica que explican de manera detallada el uso y funcionamiento del sensor de emisiones acústicas DW sensor, para ser usado por estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica y personas interesadas en el mantenimiento basado en la condición.
- El estudio bibliográfica en este proyecto técnico permitió desarrollar un campo amplio para el análisis de fallos en elementos mecánicos mediante técnicas de mantenimiento basado en la condición, además que encamina una vía saludable en la que se ha venido destacando a lo largo de la existencia del grupo de investigación GIDTEC, con temas como: termografía, vibraciones mecánicas y actualmente mediante emisiones acústicas aportando con conceptos teóricos que involucran y profundizan en el aprendizaje del mismo.
- La configuración del sistema rotativo aplicado en el proyecto se ha realizado mediante un estudio riguroso de fallos en las ruedas dentadas sustentadas en las normas ISO 10825 y ANSI/AGMA 1010-E95. Con lo que se ha podido establecer los fallos más comunes en las máquinas, tanto en los engranes como en los rodamientos, vale recalcar que se ha hecho hincapié en el proceso del daño hasta que el elemento mecánico se haya dañado por completo considerándolo como una severidad porcentual.
- Para la recolección de datos se ha considerado establecer un sistema con fallos de severidad y combinados llamados también *multi-fault*. Con esta consigna se ha procedido con la primera base de datos generando una configuración con grados de severidad porcentual en los engranajes de la caja reductora; la segunda, se ha realizados fallos en los rodamientos.
- Las guías de prácticas establecidas en este proyecto técnico se han enfocado en el estudio de emisiones acústicas, desarrollando sistemáticamente cada una de ellas para llegar a detectar patrones de fallos en una caja de engranajes. La propuesta ha

sido de crear tres prácticas de laboratorio que abra un panorama de nuevos conocimientos y retos al estudiante de pregrado, así como al personal de industria. Con esto se logra conocer, localizar y diferenciar dos importantes técnicas que se utilizan en el monitoreo basado en la condición de un equipo rotativo: vibraciones mecánicas y emisiones acústicas.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de diferentes *couplants* para el sensor acústico sustentados en el contenido del trabajo con el objetivo de diferenciar la forma en que afectaría esta característica en la señal.
- Existe una gama amplia de fallos para engranes y rodamientos que se pueden seguir realizando según convenga, de esta manera aumentar la base de datos teniendo en cuenta el tiempo de montaje y desmontaje del sistema. Además de proponer el uso de más sensores sobre el mismo.
- La sensibilidad de los sensores acústicos es elevada por ser una técnica de mayor precisión que la vibracional por lo que se recomienda la limpieza de los elementos a utilizar y el cambio de aceite de la caja de engranajes constantemente, ya que esto genera cambios visibles en la señal obtenida.

TRABAJOS FUTUROS

- Profundizar el estudio de rodamientos estableciendo una clasificación de los distintos fallos en la cual se tome como referencia la norma ISO 15243 y las distintas clasificaciones planteadas por fabricantes. Realizar un estudio sobre los fallos comunes a nivel industrial en rodamientos y un estudio bibliográfico sobre trabajos previos en este campo.
- Implementar planes experimentales y sus respectivas bases de datos sobre *mult-fault mixed* en caja de engranes, considerando fallos en rodamientos y engranes de la caja de engranajes, que permita avanzar con el estudio sobre detección de fallos por medio de señales de emisión acústica.

- Utilizar análisis vibracional y emisiones acústicas en compresores para el diagnóstico de la condición de los elementos que lo componen.
- Realizar un estudio sobre el uso de dos tipos de engranes en cajas de engranajes, el cual permita establecer un plan experimental para la detección de fallos por medio de señales de condición.
- Establecer bases de datos sobre prognosis, en las cuales se considere fallos iniciales y su avance al encontrarse en funcionamiento continuo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Niveló, D. Romero, y R. V. Sánchez, «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», Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca [Ecuador], 2014.
- [2] P. N. Saavedra, «La medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación», *Fac. Ing.-Univ. Concepc. Chile*, 2011.
- [3] «Mezcla de lubricantes: Garantía de problemas», *Noria Latín América*. [En línea]. Disponible en: <http://noria.mx/lublearn/mezcla-de-lubricantes-garantia-de-problemas/>. [Accedido: 03-oct-2016].
- [4] A. 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, oct. 2006.
- [5] V. Sanchez, «Diagnóstico de fallos en engranajes basado en el análisis de señales de vibración empleando una red neuronal perceptrón multicapa con retropropagación del error», Trabajo de master, Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2012.
- [6] C. Li, V. Sanchez, G. Zurita, M. Cerrada Lozada, y D. Cabrera, «Rolling element bearing defect detection using the generalized synchrosqueezing transform guided by time–frequency ridge enhancement», *ISA Trans.*, vol. 60, pp. 274-284, ene. 2016.
- [7] M. Cerrada, G. Zurita, D. Cabrera, R.-V. Sánchez, M. Artés, y C. Li, «Fault diagnosis in spur gears based on genetic algorithm and random forest», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 70–71, pp. 87-103, mar. 2016.
- [8] A. Aherwar, «An investigation on gearbox fault detection using vibration analysis techniques: A review», *Aust. J. Mech. Eng.*, vol. 10, n.º 2, pp. 169–183, 2012.
- [9] R. Guiracocha y R. Sánchez Loja, «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», Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca [Ecuador], 2015.

- [10] A. Mellado, «Responsabilidades de una estrategia de mantenimiento basado en la condición en el plan del mantenimiento», *Ing. Ind. Edificios*, n.º 286, pp. 24–29, jul. 2015.
- [11] R. Rodríguez, A. Fernández, y J. Barros, «Estudio de fallas comunes en rodamientos rígidos de una hilera de bolas mediante análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia», Trabajo de grado, Universidad Austral de Chile, Valdivia [Chile], 2002.
- [12] J. Gonzáles, *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*, 2da ed. FC Editorial, 2005.
- [13] *Rolling bearings — Damage and failures — Terms, characteristics and causes*, vol. ISO 15243. 1997.
- [14] S. Stewart y R. Ahmed, «Rolling contact fatigue of surface coatings—a review», *Wear*, vol. 253, n.º 11, pp. 1132–1144, 2002.
- [15] F. Sadeghi, B. Jalalahmadi, T. S. Slack, N. Raje, y N. K. Arakere, «A review of rolling contact fatigue», *J. Tribol.*, vol. 131, n.º 4, p. 41403, 2009.
- [16] S. Muzakkir, H. Hirani, G. Thakre, y M. Tyagi, «Tribological failure analysis of journal bearings used in sugar mills», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 18, n.º 8, pp. 2093–2103, dic. 2011.
- [17] R. Dwyer, «Predicting the abrasive wear of ball bearings by lubricant debris», *Wear*, vol. 233, pp. 692–701, 1999.
- [18] S. Humbert, «Detection of electrical discharges in bearings», *SKF Maintenance Products*, 2008.
- [19] D. Hyypio, «Mitigation of bearing electro-erosion of inverter-fed motors through passive common mode voltage suppression», presentado en IAS Annual Meeting, 2003, pp. 875–882.
- [20] Y. Sun, A. Bloyce, y T. Bell, «Finite element analysis of plastic deformation of various TiN coating/substrate systems under normal contact with a rigid sphere», *Thin Solid Films*, vol. 271, n.º 1, pp. 122–131, 1995.
- [21] R. Errichello, «How to analyze gear failures», *Practical Failure Analysis*, vol. 2, n.º 6, pp. 8–16, 2002.

- [22] J. R. Davis, *Gear Materials, Properties, and Manufacture*. ASM International, 2005.
- [23] *Gears -Wear and damage to gear teeth -Terminology*, vol. ISO 10825. 1995.
- [24] *Appearance of Gear Teeth Terminology of Wear and Failure*, vol. ANSI/AGMA 1010-E95. 2000.
- [25] V. Starzhinskii, Y. Soliterman, A. Goman, y S. Osipenko, «Forms of damage to gear wheels: Typology and recommendations on prevention», vol. 29, n.º 5, pp. 340–353, oct. 2008.
- [26] B. Bhushan, *Modern Tribology Handbook, Two Volume Set*. CRC Press, 2000.
- [27] E. Iturbide y A. Ramírez, «Fundamentos de desgaste por deslizamiento», Trabajo de grado, Universidad Veracruzana, Veracruz [México], 2012.
- [28] W. Gutiérrez, J. Olaya, y M. Torres, «Construcción de un equipo para desgaste abrasivo según norma ASTM G–65», *Sci. Tech.*, vol. 20, n.º 3, 2015.
- [29] I. Hutchings, *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*, 2da ed. Edward Arnold, 1992.
- [30] J. Cepeda, «Influencia de la microestructura en el comportamiento a desgaste abrasivo evaluado bajo norma ASTM G 65 de depósitos de soldadura antidesgaste aplicados sobre sustratos de acero de baja aleación y bajo carbono», Trabajo de grado, Universidad Nacional de Colombia, Medellín [Colombia], 2011.
- [31] R. Martins, N. Cardoso, y J. Seabra, «Influence of lubricant type in gear scuffing», *Ind. Lubr. Tribol.*, vol. 60, n.º 6, pp. 299–308, 2008.
- [32] L. WANG, J. FEI, y W. XIN, «Stress Corrosion Fracture and Its Precautions on Landing Gear of Airplane», *Hot Work. Technol.*, vol. 4, p. 60, 2011.
- [33] S. Das, P. Munda, S. Chowdhury, G. Das, y R. Singh, «Effect of microstructures on corrosion and erosion of an alloy steel gear pump», *Eng. Fail. Anal.*, vol. 40, pp. 89-96, may 2014.
- [34] B. Höhn y K. Michaelis, «Influence of oil temperature on gear failures», *Tribol. Int.*, vol. 37, n.º 2, pp. 103-109, feb. 2004.
- [35] C. Hu, Y. Zhang, Z. Zhao, S. Li, y Y. Zhi, «Plastic Deformation Characteristics of 20CrMnTiH Gear Steel under High Temperature», *J. Shanghai Jiaotong Univ.*, vol. 10, p. 17, 2012.

- [36] M. Bryant, H. Evans, y R. Snidle, «Plastic deformation in rough surface line contacts a finite element study», *Tribol. Int.*, vol. 46, n.º 1, pp. 269-278, feb. 2012.
- [37] E. Shipley, *Gear Failures: how to recognize them, what causes them, how to avoid them*. 1967.
- [38] B. Eftekharnjad y D. Mba, «Monitoring Natural Pitting Progress on Helical Gear Mesh Using Acoustic Emission and Vibration», *Strain*, vol. 47, pp. 299-310, Diciembre 2011.
- [39] S. Podrug, S. Glodež, y D. Jelaska, «Numerical Modelling of Crack Growth in a Gear Tooth Root», *Stroj. Vestn. – J. Mech. Eng.*, vol. 7-8, n.º 57, pp. 579-586, ago. 2011.
- [40] L. Sánchez y V. García, «Desarrollo y aplicación del diagnóstico y pronóstico técnico al mantenimiento de los sistemas centralizados de aire acondicionado», *Ing. Mecánica*, vol. 4, n.º 4, pp. 71–77, 2012.
- [41] J. Santos, O. Medina, M. Strefezza, y L. Contreras, «Diseño de un modelo de mantenimiento basado en monitoreo del medio ambiente en sistemas de depuración de humos en sidor», *Rev. Fac. Ing. Univ. Cent. Venezuela*, vol. 22, n.º 4, pp. 45–57, 2007.
- [42] W. Olarte, M. Arbeláez, y B. Zabaleta, «Análisis de vibraciones: una herramienta clave en el mantenimiento predictivo», *Sci. Tech.*, vol. 2, n.º 45, 2010.
- [43] *Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines*, vol. ISO 17359. 2010.
- [44] C. Muñoz, Á. Vera, y R. Sánchez, «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», Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca [Ecuador], 2015.
- [45] F. Torres, J. Royo, y G. Rabanaque, «Análisis de vibraciones e interpretación de datos», *DIDYF Univ. Zaragoza Esp.*, 2000.
- [46] J. Jara, J. Sinchi, y R. Sánchez, «Diseño y construcción de un banco didáctico para la medición de vibraciones mecánicas en los Laboratorios de Instrumentación de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca», Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca [Ecuador], 2012.

- [47] G. White, *Introducción al Análisis de Vibraciones*. Azima DLI.
- [48] Horst Czichos, *Handbook of technical diagnostics*. New York: Springer, 2012.
- [49] A. Sidorova, «Aplicación del método de la emisión acústica en la monitorización de las estructuras de hormigón», 2010.
- [50] S. Prieto, «Análisis de fatiga de rodamientos mediante el uso de vibraciones y ultrasonidos», Trabajo de grado, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia [España], 2014.
- [51] T. Loutas, G. Sotiriades, I. Kalaitzoglou, y V. Kostopoulos, «Condition monitoring of a single-stage gearbox with artificially induced gear cracks utilizing on-line vibration and acoustic emission measurements», *Appl. Acoust.*, vol. 70, n.º 9, pp. 1148–1159, 2009.
- [52] D. Mba y R. Rao, «Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating Machines; Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines and Rotating Structures.», 2006.
- [53] C. Tan y D. Mba, «Identification of the acoustic emission source during a comparative study on diagnosis of a spur gearbox», *Tribol. Int.*, vol. 38, n.º 5, pp. 469–480, 2005.
- [54] G. Iñiguez, «Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural», PhD, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid [España], 2007.
- [55] Z. Ramón, «Posgrado en ciencias de la tierra centro de geociencias». UNAM.
- [56] S. Degala, «Acoustic emission monitoring of reinforced concrete systems retrofitted with CFRP», Trabajo de master, University of Pittsburgh, Pittsburgh [United States], 2008.
- [57] A. Choudhury y N. Tandon, «Application of acoustic emission technique for the detection of defects in rolling element bearings», *Tribol. Int.*, vol. 33, n.º 1, pp. 39–45, 2000.
- [58] C. Scruby y H. Wadley, «A calibrated capacitance transducer for the detection of acoustic emission», *Appl. Phys.*, vol. 11, n.º 11, p. 1487, 1978.
- [59] A. Beattie y others, «Acoustic emission monitoring of a wind turbine blade during a fatigue test», en *1997 AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 1997, pp. 239–248.

- [60] J. Park *et al.*, «Self-sensing and dispersive evaluation of single carbon fiber/carbon nanotube (CNT)-epoxy composites using electro-micromechanical technique and nondestructive acoustic emission», *Compos. Part B Eng.*, vol. 39, n.º 7, pp. 1170–1182, 2008.
- [61] H. Bar, M. Bhat, y C. Murthy, «Parametric analysis of acoustic emission signals for evaluating damage in composites using a PVDF film sensor», *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 24, n.º 4, pp. 121–134, 2005.
- [62] X. Wang, C. Zhu, H. Mao, y Z. Huang, «Wavelet packet analysis for the propagation of acoustic emission signals across turbine runners», *NDT E Int.*, vol. 42, n.º 1, pp. 42–46, 2009.
- [63] T. Ohira y Y. Pao, «Microcrack initiation and acoustic emission during fracture toughness tests of A533B steel», *Metall. Trans. A*, vol. 17, n.º 5, pp. 843–852, 1986.
- [64] A. Roques, M. Browne, J. Thompson, C. Rowland, y A. Taylor, «Investigation of fatigue crack growth in acrylic bone cement using the acoustic emission technique», *Biomaterials*, vol. 25, n.º 5, pp. 769–778, 2004.
- [65] D. Kohn, P. Ducheyne, y J. Awerbuch, «Acoustic emission during fatigue of Ti-6Al-4V: Incipient fatigue crack detection limits and generalized data analysis methodology», *J. Mater. Sci.*, vol. 27, n.º 12, pp. 3133–3142, 1992.
- [66] «Types of acoustic emission sensors», *Physical Acoustics*. [En línea]. Disponible en: <http://www.physicalacoustics.com/>. [Accedido: 11-ago-2016].
- [67] P. Raharjo, «An Investigation of Surface Vibration, Airbourne Sound and Acoustic Emission Characteristics of a Journal Bearing for Early Fault Detection and Diagnosis», PhD, University of Huddersfield, West Yorkshire [England], 2013.
- [68] *Condition monitoring and diagnostics of machines — Acoustic emission*, vol. ISO 220966. 2006.
- [69] J. Michaels, T. Michaels, y W. Sachse, «Applications of deconvolution to acoustic emission signal analysis», *Mater. Eval.*, vol. 39, n.º 11, pp. 1032–1036, 1981.
- [70] D. Gu, J. kim, Y. An, y B. Choi, «Detection of faults in gearboxes using acoustic emission signal», *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 25, n.º 5, pp. 1279–1286, ago. 2011.
- [71] C. 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.

- [72] P. Closa, «Las emisiones acústicas y su aplicación al mantenimiento predictivo», 2014.
- [73] A. González, P. Cervantes, y J. Brú, *Mantenimiento mecánico de máquinas*, 2da ed. Publicacions de la Universitat Jaume I, 2007.
- [74] T. Kidar, M. Thomas, M. Badaqui, y R. Guilbault, «Control of phases by esprit and wise methods for the early detection of gear cracks», abr. 2014.
- [75] L. Nacib, K. Pekpe, y S. Sakhara, «Detecting gear tooth cracks using cepstral analysis in gearbox of helicopters», 1963.
- [76] Y. Lei y M. 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, jul. 2009.
- [77] S. Ai, H. Li, y L. Fu, «Gear Fault Diagnosis Based on EMD and AR Spectrum Analysis», 2009, pp. 673-676.
- [78] M. Rackov y S. Kuzmanović, «Analysis of the most common failures of gears in universal gear reducers», *J Eng Ann Fac Eng Hunedoara*, vol. 7, pp. 67–74, 2009.
- [79] F. Choy, V. Polyshchuk, J. Zakrajsek, R. Handschuh, y D. Townsend, «Analysis of the effects of surface pitting and wear on the vibration of a gear transmission system», *Tribol. Int.*, vol. 29, n.º 1, pp. 77–83, 1996.
- [80] S. Li y A. Kahraman, «Micro-pitting fatigue lives of lubricated point contacts: Experiments and model validation», *Int. J. Fatigue*, vol. 48, pp. 9–18, 2013.
- [81] Z. Cheng, N. Hu, F. Gu, y G. Qin, «Pitting damage levels estimation for planetary gear sets based on model simulation and grey relational analysis», *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, vol. 35, n.º 3, pp. 403–417, 2011.
- [82] «Failure analysis Gears-shafts-bearings-seals», *Rexnord*, 1978. [En línea]. Disponible en: http://www.rexnord.com/ContentItems/TechLibrary/Documents/108-010_Failure-Analysis-Gears,-Shafts,-Bearings,. [Accedido: 14-ago-2016].
- [83] I. Yesilyurt, F. Gu, y A. Ball, «Gear tooth stiffness reduction measurement using modal analysis and its use in wear fault severity assessment of spur gears», *NDT E Int.*, vol. 36, n.º 5, pp. 357-372, jul. 2003.

- [84] Z. Peng y N. Kessissoglou, «An integrated approach to fault diagnosis of machinery using wear debris and vibration analysis», *Wear*, vol. 255, n.º 7-12, pp. 1221-1232, ago. 2003.
- [85] S. Ebersbach, Z. Peng, y N. Kessissoglou, «The investigation of the condition and faults of a spur gearbox using vibration and wear debris analysis techniques», *Wear*, vol. 260, n.º 1-2, pp. 16-24, ene. 2006.
- [86] *Vibration diagnostic handbook*, 1ra ed. Techical associates of charlotte p.c., California, 2016.
- [87] «Adquisición de datos», *National instrument*, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>. [Accedido: 14-ago-2016].
- [88] *Wideband Differential Sensor*, 1ra ed. Physical Acoustics Corporation., Princeton Junction, NJ, 2011.
- [89] *2-4-6 Preamplifier*, 1ra ed. Physical Acoustics Corporation., Princeton Junction, NJ, 2011.
- [90] *Operating instructions and specifications NI 9205*, 1ra ed. National Instruments., Austin,TX, 2008.
- [91] *Operating instructions and specifications NI 9222/9223*, 1ra ed. National Instruments., Austin,TX, 2014.
- [92] *NI 9225*, 1ra ed. National Instruments., Austin,TX, 2014.
- [93] *NI 9227*, 1ra ed. National Instruments., Austin,TX, 2014.
- [94] *Datasheet NI 9234*, 1ra ed. National Instruments., Austin,TX, 2015.
- [95] *Datasheet NI 9401*, 1ra ed. National Instruments., Austin,TX, 2015.
- [96] *NI compactDAQ ethernet data acquisition system*, 1ra ed. National Instruments., Austin,TX, 2014.
- [97] S. Vahaviolos, *Acoustic Emission: Standards and Technology Update*. ASTM International, 1999.
- [98] R. Liptai, *Acoustic Emission*. ASTM International, 1972.
- [99] N. Casey y P. Laura, «A review of the acoustic-emission monitoring of wire rope», *Ocean Eng.*, vol. 24, n.º 10, pp. 935-947, nov. 1997.

[100] E. Serrano, «Introducción a la transformada wavelet y sus aplicaciones al procesamiento de señales de emisión acústica», *Esc. Cienc. Technol. Nac. Gen. San Martín*, 2000.

ANEXOS

Anexo A1

USO DE SENSOR DE EMISIONES ACÚSTICA WD S/N FV52

Christian Ortiz, Iván Pérez, egresados de la carrera de Ingeniería Mecánica

Correo electrónico: cortizf@est.ups.edu.ec y iperez@est.ups.edu.ec

Asignatura: _____, Cuenca – Ecuador, Fecha de realización: 29-08-2016

1. Presentación de la práctica

En la presente práctica se adquirirá señales de emisión acústica en una caja de engranajes con la finalidad de comprender el funcionamiento del sensor WD S/N FV52.

2. Requisitos y precauciones

Para realizar de manera satisfactoria esta práctica es requisito poseer los conocimientos básicos sobre emisiones acústicas y montaje de sensores en maquinaria rotativa, por lo tanto es preciso realizar una lectura de los siguientes textos:

- Características básicas de las emisiones acústicas: [1] pág. 1-10,17-19
- Análisis por medio de emisiones acústicas: [2] pág. 7-14
- Limitaciones del uso de emisiones acústicas: [3]

El estudiante debe considerar antes de desarrollar la práctica los siguientes puntos:

- Verificar que el banco de vibraciones no se encuentre en funcionamiento al momento de iniciar la práctica
- Tener supervisión del personal de los laboratorios durante el desarrollo
- Respetar las normas de seguridad del laboratorio

3. Objetivos

- Conocer un sensor de EA
- Colocar adecuadamente un sensor de emisión acústica en una caja de engranajes
- Aprender la diferencia entre una señal con motor encendido y apagado
- Comprobar el funcionamiento del software de adquisición de datos

4. Equipos, instrumentos y software

Tabla 1. Equipos, instrumentos y software

Descripción	Marca	Serie
Sensor EA	Physical Acoustics Corporation	WD S/N FV52
Acelerómetro	IMI	603C01
Laptop	Toshiba	Qosmio
Software	Labview	Fault diagnostic

5. Normas de seguridad

- Para la ejecución de la práctica, es de carácter obligatorio el uso de mandil y gafas
- No tocar la maquinaria rotativa mientras se encuentre en movimiento

6. Exposición

6.1 Descripción del sensor WD S/N FV52

El sensor diferencial de alta sensibilidad *WD S/N FV52* de *PHYSICAL ACOUSTICS*, que adquiere dos señales de emisión acústica y realiza una resta diferencial entre las misma da respuesta de frecuencia en el rango de 100 a 900 kHz, siendo propicio para la detección de fallos, al eliminar el ruido y brindando una respuesta EA de alta fidelidad. Por medio de una identificación de la fuente que cuenta con dos cables de señal que alimentan a un preamplificador diferencial dando como resultado una señal con ruido más bajo.



Figura 1. Sensor acústico WD S/N FV52

A más de la detección de fallos el sensor es adecuado para el diagnóstico estructural en tanques de almacenamiento, tuberías, entre otros. En la Tabla 2 se presenta las características del sensor WD WD S/N FV52.

Tabla 2. Características del sensor acústico WD [4]

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
Couplant recomendado	Pegamento epoxy
Certificado de calibración	NIST

Para la sujeción del sensor en la máquina a monitorizar se cuenta con un soporte magnético MHSTD *PHYSICAL ACOUSTICS*, que se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Soporte magnético MHSTD

6.2 Descripción de preamplificador

El preamplificador 0/2/4C está diseñado para soportar todos los sensores EA *PHYSICAL ACOUSTICS* con alimentación BNC, al cual se le suministra 20/0/40 dB de ganancia que se seleccionable manualmente. Puede trabajar con un sensor a la vez, ya sea diferencial o de entrada simple, para su selección se usa el selector de entrada *single* o *differential* [5]. En la Figura 3 muestra la forma física del preamplificador.



Figura 3. Preamplificador 0/2/4C [5]

La Tabla 3 expone sus características más importantes. La conexión del sensor WD S/N FV52 se realiza en el puerto de nombre DIFFERENTIAL.

Tabla 3. Características del preamplificador 2/4/6 [5]

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

6.3 Acondicionamiento de Señales

Las señales que reciben los sensores pueden ser ruidosas para medirse directamente. El circuito de acondicionamiento de señales manipula una señal de tal forma que la vuelve apropiada para la entrada del ADC. Este circuito puede incluir amplificación, atenuación, filtrado y aislamiento.

6.4 Convertidor Analógico Digital (ADC)

Las señales analógicas que proporcionan los sensores deben ser digitalizadas. El proceso de conversión se lo realiza en un ADC, que proporciona una representación digital de una señal analógica en un instante de tiempo. Estas muestras son transferidas a una PC a través de un bus de datos, donde la señal original es reconstruida a partir de las muestras tomadas en el software [2].

6.5 Módulos de adquisición

En la Tabla 4 se nombra las tarjetas de adquisición requeridas para el desarrollo de la presente práctica.

Tabla 4. Características de tarjetas DAQ para detección de fallos por medio de EA

Nombre	Descripción	Imagen
NI 9223 (Sensor EA)	Marca: NI Modelo: NI9233 N° Canales: 4 Resolución: 16 bits Frecuencia muestreo: 1MS/s Entrada: analógica simultanea Voltaje entrada: +-10V	 Figura 4. NI 9233
NI 9234 (Acelerómetro)	Marca: NI Modelo: NI9234 N° Canales: 4 Resolución: 24 bits Frecuencia muestreo: 51.2KS/s Entrada: Analógica IEPE y AC/DC Voltaje entrada: +-5v	 Figura 5. NI 9234

6.5.1 Descripción de chasis

El NI cDAQ-9188 es un chasis de 8 ranuras diseñado para adquirir datos de medidas mixtas. Una sola NI CompactDAQ chasis puede medir hasta 256 canales de señales de sensores, analógicas I/O, digitales I/O y contadores/temporizadores con una comunicación Ethernet a una PC o portátil, entregando datos de alta velocidad y facilidad de uso. Se puede registrar los datos de los experimentos realizados en el laboratorio o desplegar un sistema de prueba distribuido a través de entornos de programación como NI LabView.

En la Figura 6 se aprecia el dispositivo físico nombrado.



Figura 6. Chasis NI cDAQ-9188

6.6 Descripción del programa de adquisición

El programa usado en la adquisición de datos es “Fault diagnostic” desarrollado en LabView por el grupo de investigación GIDTEC.

En la Figura 7 se muestra el programa usado para la adquisición de señales.

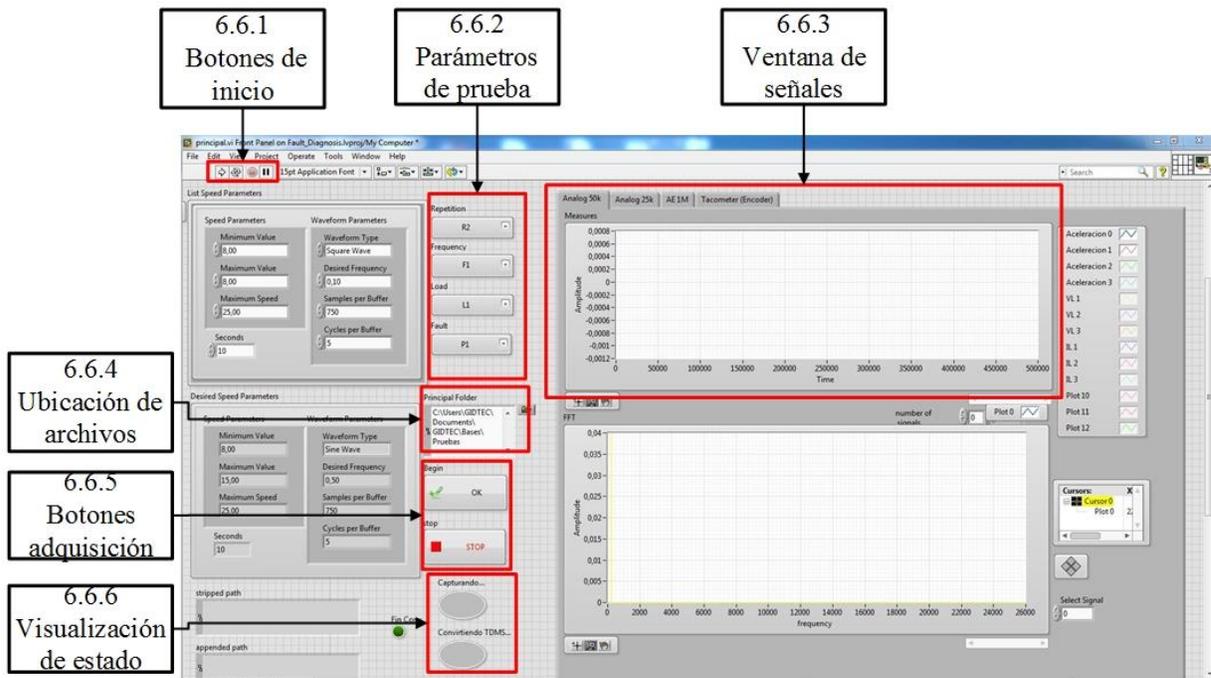


Figura 7. Programa de adquisición de señales

6.6.1 Botones de inicio

Los botones que se indican en la Figura 8, permiten ejecutar, pausar, detener y pausar el programa. Una vez pulsado el botón ejecutar, no se podrá realizar cambios en la dirección de guardado de las señales.

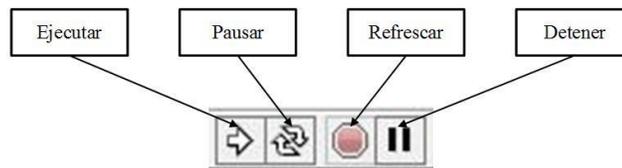


Figura 8. Botones de inicio

6.6.2 Parámetros de prueba

El programa permite realizar varias repeticiones (*Repetition*) para una prueba, a más de variar parámetros como frecuencia (*Frequency*), carga (*Load*) y fallo (*Fault*) en estudio. Para la cual se cuenta con listas desplegables, dentro de las cuales se varían los parámetros mencionados.

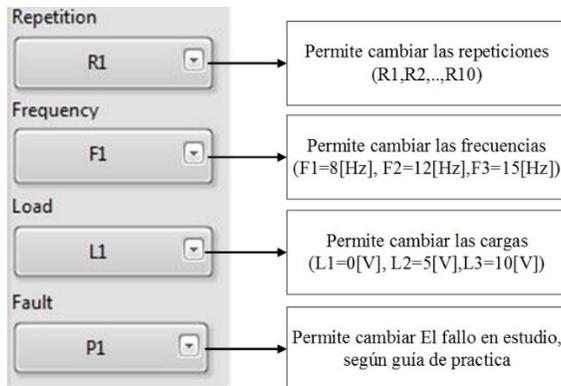


Figura 9. Parámetros de prueba

6.6.3 Ventana de señales

Las señales adquiridas están agrupadas según su velocidad de muestreo, en la Figura 10 se presenta las distintas pestañas que agrupan a los diversos sensores. En esta ventana también se presenta una gráfica de la señal.

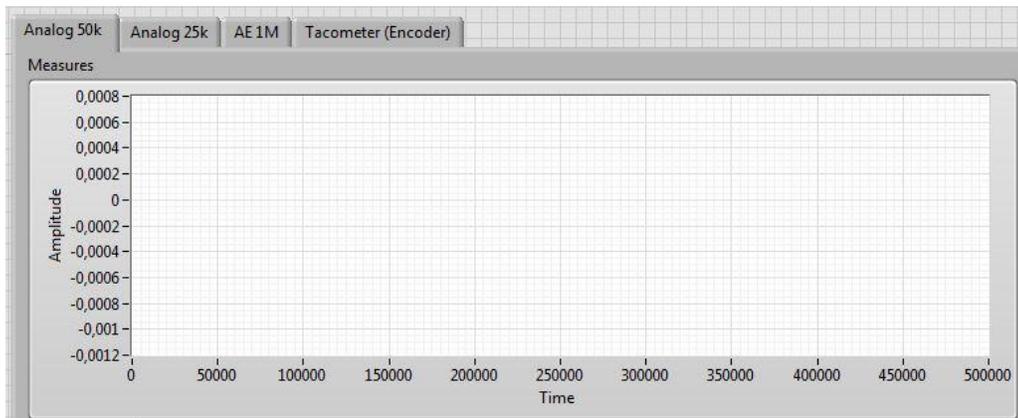


Figura 10. Ventana de señales

6.6.4 Ubicación de archivos

En esta ventana (Figura 11) el programa permite determinar la dirección de la carpeta en la cual se guardara los datos de las señales adquiridas en el banco de vibraciones.

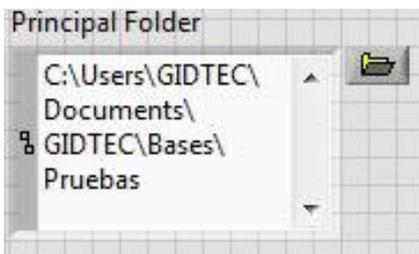


Figura 11. Ubicación de archivos

6.6.5 Botones de adquisición

Para la toma de datos se pulsa el botón “OK” el cual dará la orden de muestreo, misma que puede ser detenida con el botón “STOP”.



Figura 12. Botones de adquisición

6.6.6 Visualización de estado

En esta sección del programa se cuenta con etiquetas, que indican si el programa se encuentra: adquiriendo datos o procesando señales.



Figura 13. Verificación de estado

6.7 Fundamentos de emisiones acústicas

6.7.1 Emisión acústica

Las emisiones acústicas en maquinarias rotativas se las define como ondas elásticas que se genera al interactuar dos medios en movimiento, es decir un par de engranes. Las principales ventajas que presenta son la detección de fallos más pequeños que los detectables por medio de vibración y requieren el uso de un solo sensor puesto que es una técnica no direccional. Dependiendo la forma en la cual se propagan las ondas, estas se dividen en onda P, onda S y onda Rayleigh. Tabla 5 presenta un resumen de las características principales de las ondas [1], [3].

Tabla 5. Tipos de ondas de emisiones acústicas

Tipo de onda	Dirección del movimiento	Características
Onda P	Paralela a la dirección de propagación	<ul style="list-style-type: none">• Generado por tensiones normales• Puede propagarse en cualquier medio

Onda S	Perpendicular a la dirección de propagación	<ul style="list-style-type: none"> • Tensiones tangenciales • Se propaga solo en medios rígidos
Onda Rayleigh	Elíptico retrógrado	<ul style="list-style-type: none"> • Se propaga a lo largo de la superficie de un sólido

6.7.2 Evolución en el estudio de emisiones acústicas

La Figura 14 muestra los inicios y evolución que se ha dado en el estudio de emisiones acústicas según bibliografía consultada.

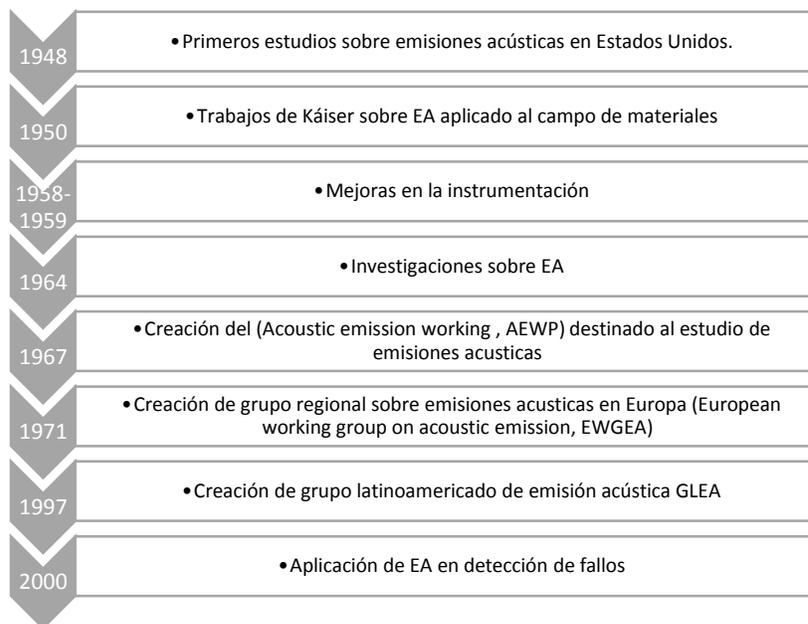


Figura 14. Evolución de las emisiones acústicas

6.7.3 Parámetros de señales acústicas

En la Figura 15 se presenta los parámetros de ondas de emisión acústica.

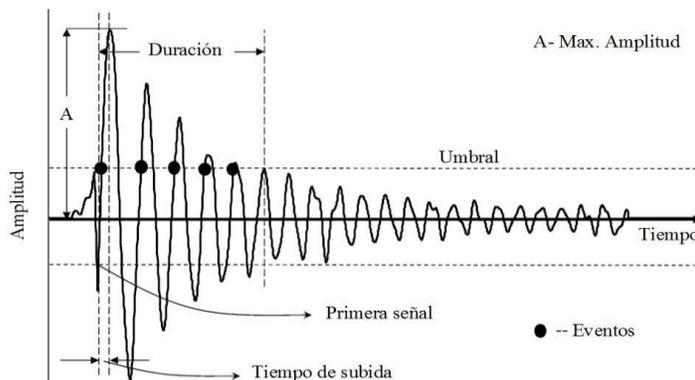


Figura 15. Parámetros de señal de EA [7]

- **Amplitud (A):** Se la define como la tensión de pico de una onda, la cual es medida en decibelios (dB)
- **Tiempo de llegada:** Tiempo absoluto en el cual aparece la primera señal de descubrimiento de fallo
- **Tiempo de subida:** Es el tiempo que tarda la onda en alcanzar su valor máximo tomando como inicio el primer cruce con el umbral
- **Duración:** Es el tiempo existente entre el primer y último cruce de la onda con el umbral
- **Energía:** Área bajo la curva genera por la envolvente de la señal de tiempo
- **Eventos:** Numero de pulsos emitidos por el circuito de medición cuando la señal es mayor que el umbral
- **Frecuencia pico:** Valor máximo que alcanza la onda de emisión acústica

6.7.4 Equipo de adquisición

A continuación, en la Figura 16 se muestra un proceso de emisiones acústicas, para la obtención de señales.

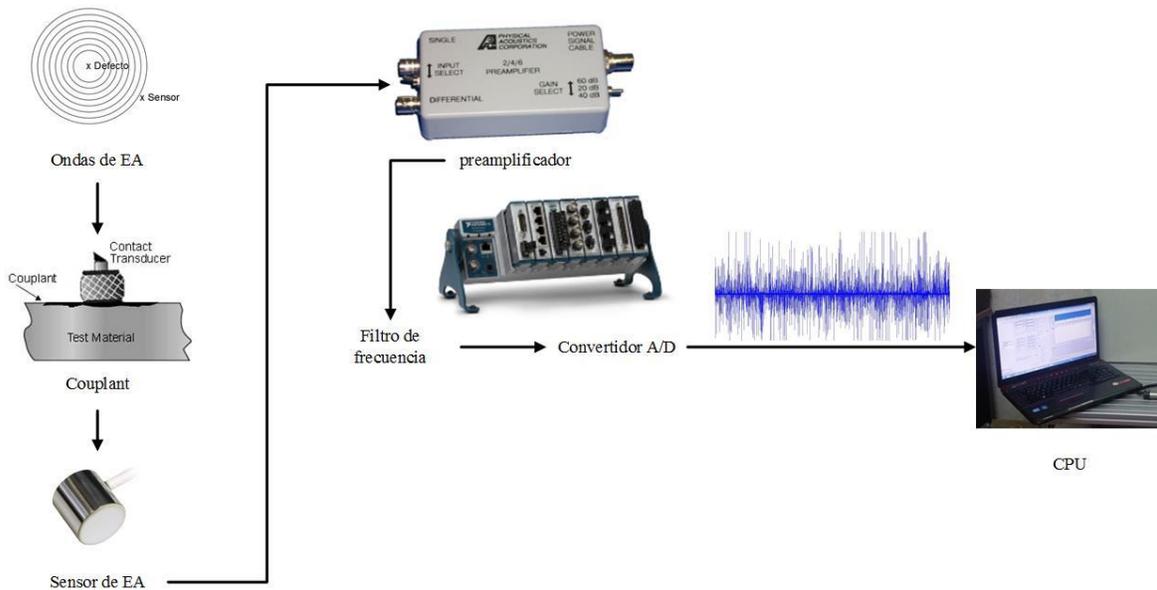


Figura 16. Equipo utilizado para proceso de EA

- **Couplant:** Al momento del montaje de un sensor de emisión acústica, es importante asegurar un contacto adecuado entre el sensor y la superficie de prueba. Las opciones usadas de acoplamiento son silicona, petróleo o termoplástico adhesivo, dependiendo sobre todo de la superficie de trabajo [8]
- **Sensores:** Son los encargados de convertir las ondas mecánicas procedentes del sistema en señales eléctricas. Dependiendo las condiciones y características del lugar de trabajo se define el sensor utilizado
- **Preamplificador:** Es el encargado de reducir ruido eléctrico, convirtiendo la señal en formas de onda utilizables
- **Filtro de frecuencia:** Elimina frecuencias no deseadas las cuales son producidas por ruido
- **Convertidor A/D:** Cumple la función de convertir señales analógicas en digitales para que puedan ser interpretadas por el ordenador

7. Proceso y procedimiento

7.1 Proceso



Figura 17. Procesos para el uso del sensor WD SENSOR

7.2 Procedimiento

7.2.1 Acoplamiento de sensor a caja de engranajes

1. Colorar cinta doble cara en sensor y acoplarlo como se indica en la Figura 18



Figura 18. Sensor WD S/N FV52 con cinta doble cara

2. Posicionamos el sensor WD S/N FV52 en soporte magnético Figura 2
3. Retirar desprendible de cinta doble cara y colocar en caja de engranes (Figura 19)
4. Conectar cable de salida del sensor WD S/N FV52 a puerto de entrada DIFFERENTIAL (Figura 3)
5. Posicionar selector de entrada en DIFFERENTIAL y seleccionar una ganancia de 40dB en preamplificador (Figura 3)
6. Conectar la salida SIGNAL CABLE a entrada 0 del módulo NI 9233
7. Conectar la salida POWER a fuente de voltaje 24V
8. Montar acelerómetro en la posición indicada en la Figura 19

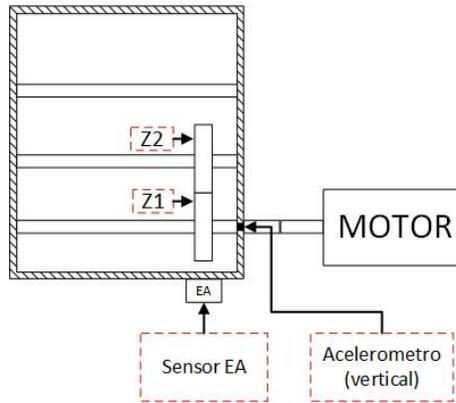


Figura 19. Montaje de acelerómetro

9. Conectar cable A1 en acelerómetro y en tarjeta NI 9234
10. Revisar que los cables de sensores no interfieran con el funcionamiento del motor

7.2.2 Adquisición de datos con motor apagado

1. Encender computador portátil
2. Clic en “INICIO”, buscar “Fault_Diagnosis” y seleccionar “principal”
3. En la casilla ubicación de archivos (Figura 11) se escribe “C:\Users\PUBLIC\Documents\Practica1\” más la fecha en la cual se realice la práctica
4. Se modifica los parámetros según Figura 20

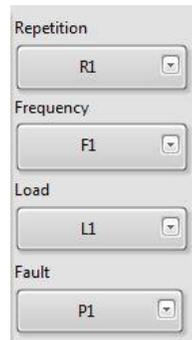


Figura 20. Parámetros de prueba motor apagado

5. Pulsar en [] para iniciar el programa
6. Pulsar botón [] y esperar a que el programa presente las señales obtenidas
7. En la ventana de selección de señales, se escoge AE 1M
8. Observamos que la señal obtenida sea similar a la presentada en la Figura 21

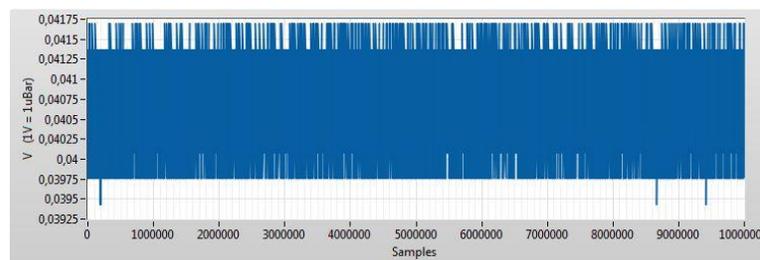


Figura 21. Señal de EA con motor apagado

7.2.3 Puesta en marcha del sistema

1. Encender la unidad de control eléctrico mostrado en la Figura 22
2. Verificar que el variador de frecuencia DANFOSS mantenga encendida la luz de “OFF”
[🔘]
3. Encender variador de frecuencia pulsando el botón hand on [🔘]



Figura 22. Unidad de control eléctrico del banco de pruebas.

7.2.4 Adquisición de datos con motor encendido

1. Se modifica los parámetros según Figura 23

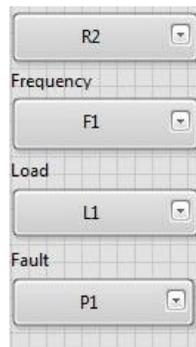


Figura 23 Parámetros de prueba motor encendido

2. Se pulsa en [🔘] para iniciar el programa
3. Se pulsa botón [🔘] y esperar a que el programa presente las señales obtenidas
4. En la ventana de selección de señales, se escoge AE 1M
5. Se observa que la señal obtenida sea similar a la presentada en la Figura 24
6. En la Tabla 6 describa las diferencias y similitudes encontradas en las dos señales optenidas

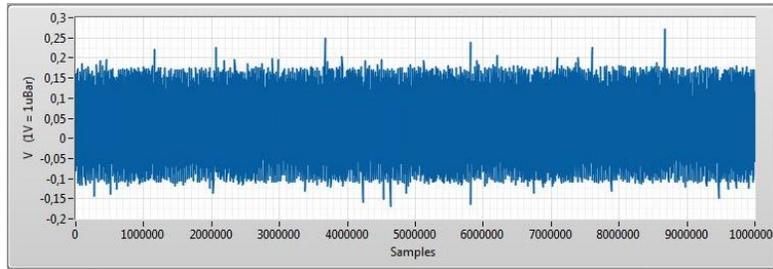


Figura 24. Señal de EA con motor encendido

Tabla 6. Análisis de diferencias y similitudes

	Diferencias	Similitudes
Motor apagado		
Motor encendido		

8. Conclusiones y recomendaciones

Referencias

- [1] R. Guiracocha y R. Sánchez Loja, «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», Grado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca [Ecuador], 2015.
- [2] *Condition monitoring and diagnostics of machines — Acoustic emission*, vol. ISO 220966. 2006.
- [3] 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.
- [4] *Wideband Differential Sensor*, 1ra ed. Physical Acoustics Corporation., Princeton Junction, NJ, 2011.

- [5] *2-4-6 Preamplifier*, 1ra ed. Physical Acoustics Corporation., Princeton Junction, NJ, 2011.
- [6] J. Michaels, T. Michaels, y W. Sachse, «Applications of deconvolution to acoustic emission signal analysis», *Mater. Eval.*, vol. 39, n.º 11, pp. 1032–1036, 1981.
- [7] S. Degala, «Acoustic emission monitoring of reinforced concrete systems retrofitted with CFRP», Master, University of Pittsburgh, Pittsburgh [United States], 2008.
- [8] A. Sidorova, «Aplicación del método de la emisión acústica en la monitorización de las estructuras de hormigón», 2010.

Anexo A2

DETERMINACIÓN DE POSICIÓN DEL SENSOR DE EMISIONES ACÚSTICA WD S/N FV52

Christian Ortiz, Iván Pérez, egresados de la carrera de Ingeniería Mecánica

Correo electrónico: cortizf@est.ups.edu.ec y iperez@est.ups.edu.ec

Asignatura: _____, Cuenca – Ecuador, Fecha de realización: 29-08-2016

1. Presentación de la práctica

En la presente práctica se determinará la posición adecuada del sensor WD S/N FV52 para la detección de fallos en una caja de engranajes.

2. Requisitos y precauciones

Previo a la realización de esta práctica se deberá de haber cumplido con la práctica 1: “USO DE SENSOR DE EMISIONES ACÚSTICA WD S/N FV52”.

Para realizar de manera satisfactoria esta práctica es necesario poseer los conocimientos básicos sobre emisiones acústicas y montaje de sensores en maquinaria rotativa, por lo tanto es necesario realizar una lectura de los siguientes textos:

- Características básicas de las emisiones acústicas: [1] pág. 1-10,17-19
- Norma para el análisis por medio de emisiones acústicas: [2] pág. 7-14

El estudiante debe considerar antes de desarrollar la práctica los siguientes puntos:

- Verificar que el banco de vibraciones no se encuentre en funcionamiento al momento de iniciar la práctica
- Tener supervisión del personal de los laboratorios durante el desarrollo
- Respetar las normas de seguridad del laboratorio

3. Objetivos

- Calcular las frecuencias características de una caja de engranajes
- Adquirir señales de emisión acústica en diversos puntos de una caja de engranajes
- Determinar la posición óptima para el sensor de emisiones acústicas

4. Equipos, instrumentos y software

Tabla 1. Tabla de equipos, instrumentos y software

Descripción	Marca	Serie
Sensor EA	Physical Acoustics Corporation	WD S/N FV52
Acelerómetro	IMI	603C01
Laptop	Toshiba	Qosmio
Software	Labview	Fault diagnostic

5. Normas de seguridad

- Para la ejecución de la práctica es de carácter obligatorio el uso de mandil y gafas

6. Exposición

6.1 Frecuencias características de caja de engranajes

Durante el funcionamiento en buenas condiciones de una caja de engranajes, se generan frecuencias características que están determinadas por la relación de transición entre piñón-engrane y la velocidad de giro. En la Figura 1 se presenta un espectro de vibraciones característico de una caja en buenas condiciones.

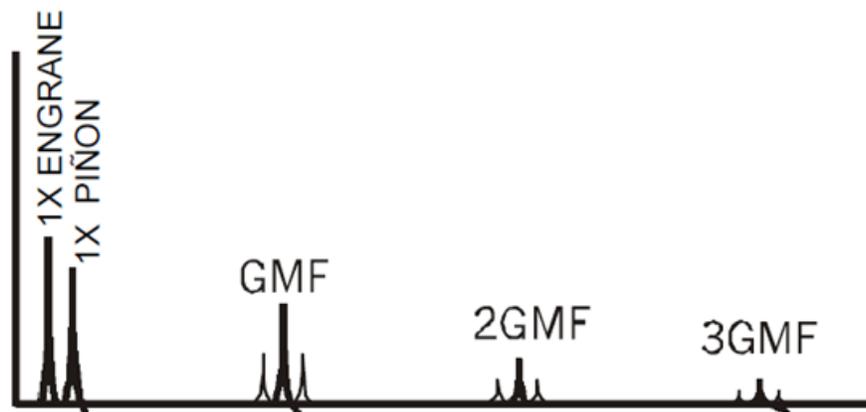


Figura 1. Espectro de vibraciones característico en caja de engranajes en buenas condiciones [3]

Estos espectros se calculan mediante las ecuaciones de la Tabla 2.

Tabla 2. Frecuencias de elementos rotatorios

Descripción	Ecuación
Frecuencia de giro	$F_g = \frac{RPM_{motor}}{60} [Hz]$
Frecuencia de giro piñón	$1X \text{ piñón} = F_g [Hz]$
Frecuencia de giro engrane	$1X \text{ engrane} = F_g \frac{Z_1}{Z_2} [Hz]$
Frecuencia de paso de engranes	$GMF = F_g \cdot Z_1$

Donde,

RPM_{motor} : Velocidad de giro de motor en RPM

Z_1 : Numero de dientes del piñón

Z_2 : Numero de dientes del engrane

6.2 Posición de sensor EA

Además, la posición y localización de la fuente suele resultar una difícil determinación. La distancia entre defecto y sensores es igual al tiempo de llegada multiplicado por la velocidad de la señal. La onda de EA se distribuye en círculos concéntricos llegando en tiempos distintos tal como se muestra en la Figura 2. Existe la localización puntual y zonal, la primera es utilizada en laboratorios y la otra se aplica con éxito en industria. De esta forma se detalla que la puntual es más precisa y menos realista, lo contrario a la zonal [4].

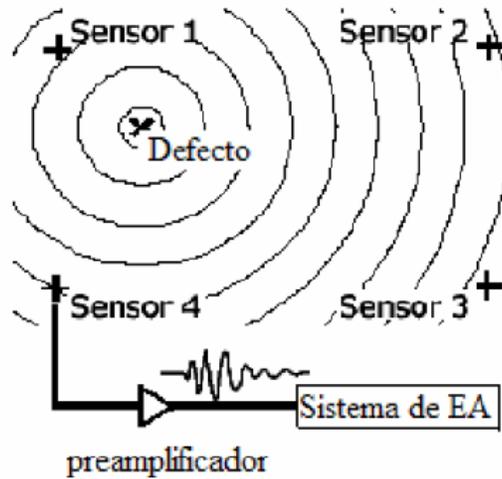


Figura 2. Posición del sensor acústico [4]

6.3 Disposición del banco de vibraciones

Para el desarrollo de la práctica se toma en consideración una caja reductora con solo su primera etapa en funcionamiento, como se presenta en la Figura 3.

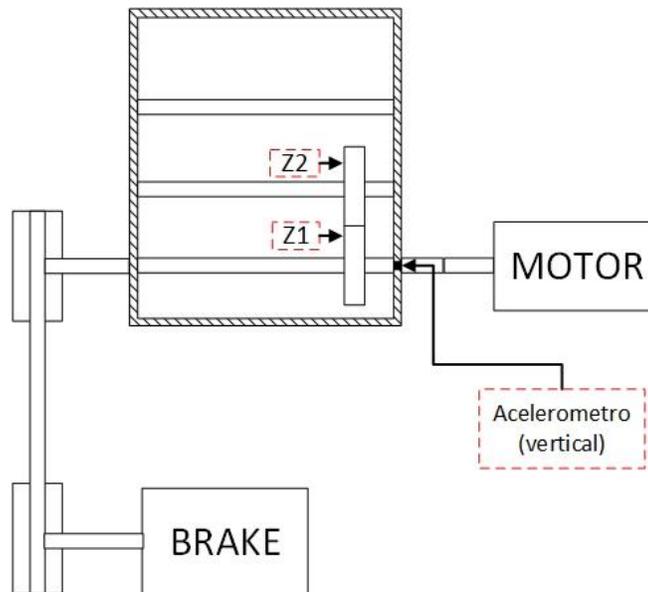


Figura 3. Disposición de banco para práctica

6.4 Proceso

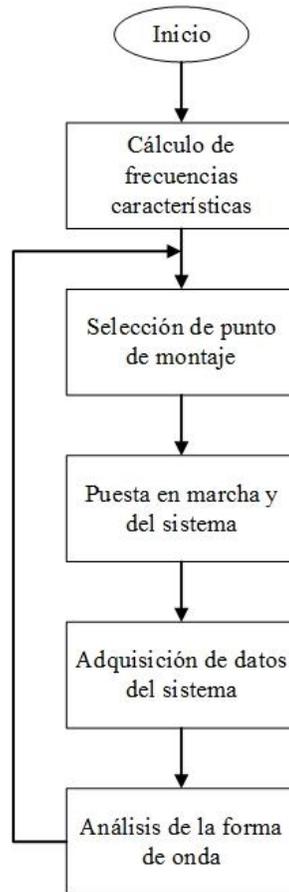


Figura 4. Procesos para el uso del sensor WD SENSOR

6.5 Procedimiento

6.5.1 Cálculo de frecuencias características

1. Llenar los valores de la Tabla 3

Tabla 3. Datos para cálculo de frecuencias características

Velocidad de giro de motor [RPM]	$RPM_{motor} =$	
Numero de dientes del piñón	$Z_1 =$	
Numero de dientes del engrane	$Z_2 =$	

2. Resolver las ecuaciones de la Tabla 2 y llenar los valores de la Tabla 4

Tabla 4. Resultados de cálculo de frecuencias

Parámetro	Valor	
Frecuencia de giro	$F_a =$	[Hz]
Frecuencia piñón	$1X \text{ piñón} =$	[Hz]
Frecuencia engrane	$1X \text{ engrane} =$	[Hz]
Frecuencia de paso de engranes	$GMF =$	[Hz]

6.5.2 Selección del punto de montaje

1. Realizar el montaje del sensor en el punto uno. Una vez obtenidas las gráficas de las funciones, proseguir con los puntos de montaje 2 y 3

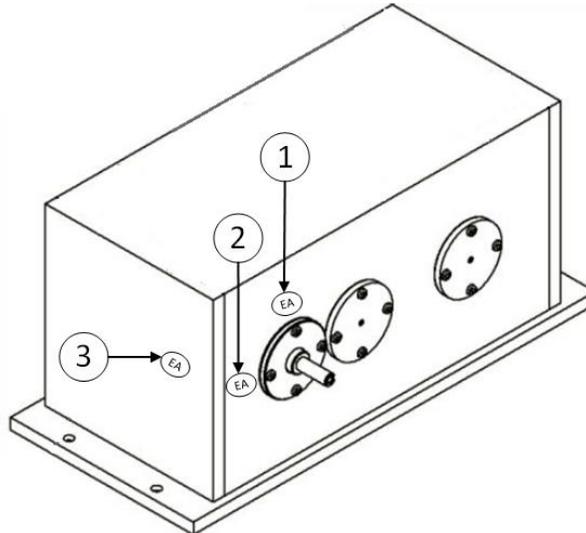


Figura 5. Puntos de montaje de sensor EA

6.5.3 Puesta en marcha del sistema

1. Verificar que no existan cables u objetos que interfieran con el funcionamiento del sistema
2. Verificar que tarjetas de adquisición se encuentren conectadas
3. Montar sensor de emisiones acústicas
4. Montar acelerómetro
5. Abrir programa “Fault Diagnosis”
6. En la casilla de dirección escribimos “C:\Users\PUBLIC\Documents\Practica2\” más la fecha en la cual se realice la práctica
7. Encender la unidad de control eléctrico de banco de vibraciones

6.5.4 Adquisición de datos del sistema

1. Modificar los parámetros según la Tabla 5

Tabla 5. Parámetros de pruebas

Posición 1	Posición 2	Posición 3
Repetition R1	Repetition R2	Repetition R3
Frequency F1	Frequency F1	Frequency F1
Load L1	Load L1	Load L1
Fault P1	Fault P1	Fault P1
R1F1L1P1	R2F1L1P1	R3F1L1P1

2. Clic en [] para iniciar el programa
3. Pulsar botón [] y esperar a que el programa presente las señales obtenidas

6.5.5 Análisis de forma de onda

1. Clic en “Inicio”, buscar “Matlab”
2. En la barra de selección de carpetas poner “C:\Users\Christian\Desktop\SignalCheck”
3. Entrar en el script “vibración”
4. En load (Figura 6) reemplazar número de práctica, fecha, numero de fallo “P” y parámetros de prueba

```

%Initial settings
clc;clear all;close all;
frequency=8; %motor spin frequency
z1=30; %drive gear teeth
z2=45; %driven gear teeth
load 'C:\Users\GIDTEC\Documents\GIDTEC\Practica(\#)\(fecha)\P(\#)\(Parametros).mat' %Load data

```

Figura 6. Programa de procesamiento de datos Matlab

5. Ejecutar el programa
6. Observando las gráficas llenar la Tabla 6. En caso de no existir valores dejar en blanco el espacio correspondiente
7. Seleccionar como punto óptimo de instalación de sensor de EA al cual de valores similares a los obtenidos con la señal de vibraciones

Tabla 6. Valores obtenidos de señales de vibración

	GMF FFT vibración	GMF FFT EA
Posición 1 [Hz]		
Posición 2 [Hz]		
Posición 3 [Hz]		

7. Conclusiones y recomendaciones

Referencias

- [1] R. Guiracocha y R. Sánchez Loja, «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», Grado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca [Ecuador], 2015.
- [2] *Condition monitoring and diagnostics of machines — Acoustic emission*, vol. ISO 220966. 2006.
- [3] *Charlotte*, 1ra ed. National Instruments., Austin, TX, 2014.
- [4] P. Closa, «Las emisiones acústicas y su aplicación al mantenimiento predictivo», 2014.

Anexo A3

DETECCIÓN DE PATRONES DE FALLO EN ENGRANAJES POR MEDIO DE EMISIONES ACÚSTICAS

Christian Ortiz, Iván Pérez, egresados de la carrera de Ingeniería Mecánica

Correo electrónico: cortizf@est.ups.edu.ec y iperez@est.ups.edu.ec

Asignatura: [Análisis de vibraciones](#), Cuenca – Ecuador, Fecha de realización: 29-08-2016

1. Presentación de la práctica

En la presente practica se revisara la detección de fallos en engranes mediante el análisis de señales de emisiones acústicas resultantes del uso del sensor WD S/N FV52 y el software labview para la adquisición de datos.

2. Requisitos y precauciones

Previo a la realización de esta práctica se deberá haber cumplido con las prácticas: “USO DE SENSOR DE EMISIONES ACÚSTICA WD S/N FV52”, “DETERMINACIÓN DE POSICIÓN DEL SENSOR DE EMISIONES ACÚSTICA WD S/N FV52” y se recomienda realizar la práctica:” DETECCIÓN DE FALLOS EN CAJA DE ENGRANAJES MEDIANTE SEÑALES DE VIBRACIONES MECÁNICAS”.

Para realizar de manera satisfactoria esta práctica es necesario poseer los conocimientos básicos sobre emisiones acústicas y montaje de sensores en maquinaria rotativa, por lo tanto se es necesario realizar una lectura de los siguientes textos:

- Características básicas de las emisiones acústicas: [1] pág. 1-10,17-19
- Norma para el análisis por medio de emisiones acústicas: [2] pág. 7-14
- Limitaciones del uso de emisiones acústicas: [3]
- Aplicación de emisiones acústicas a la detección de fallos: [4]

3. Objetivos

- Adquirir señales de emisión acústica de engranes con fallo y en buenas condiciones
- Reconocer engranes en buen estado y con fallo por medio de emisiones acústicas
- Comparar el espectro de un engrane con fallo y uno en buenas condiciones

4. Equipos, instrumentos y software

Tabla 1. Tabla de equipos, instrumentos y software

Descripción	Marca	Serie
Sensor EA	Physical Acoustics Corporation	WD S/N FV52
Acelerómetro	IMI	603C01
Laptop	Toshiba	Qosmio
Software	Labview	Fault diagnostic

5. Normas de seguridad

- Para la ejecución de la práctica, es de carácter obligatorio el uso de mandil y gafas

6. Exposición

6.1 Caja de engranes

La caja de engranajes es un elemento de transmisión que cuenta en con dos etapas (Figura 1), para su funcionamiento se puede optar por usar una sola etapa o acoplar cuatro engranes para tener una relación de transmisión diferente.

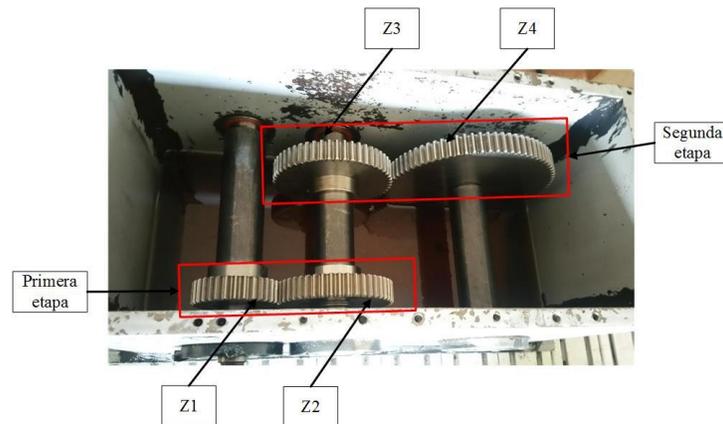


Figura 1. Posición de engranes

En la Figura 2 se observa sus componentes principales



Figura 2. Principales elementos de Caja Reductora

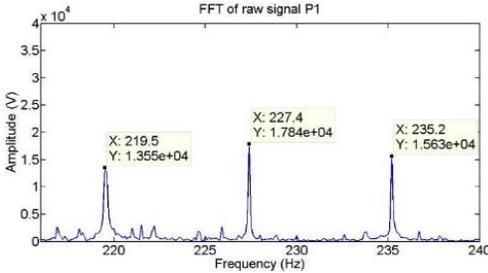
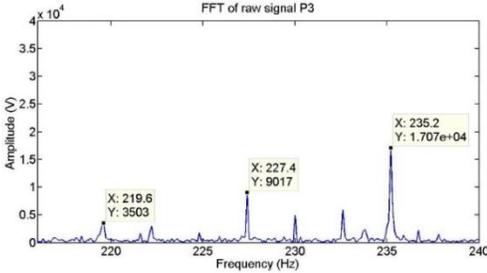
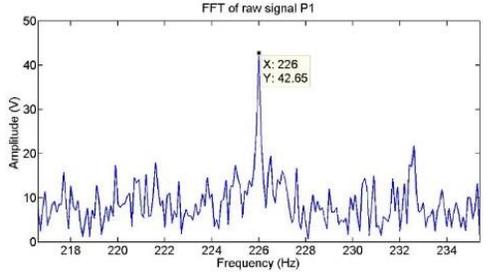
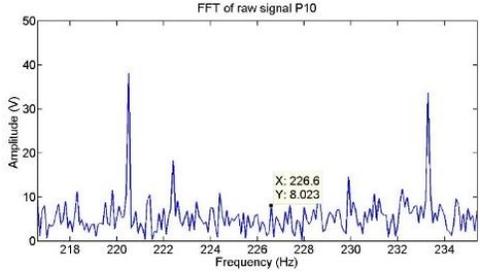
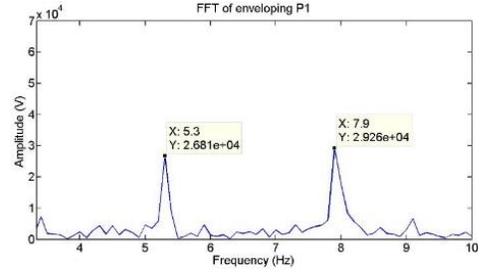
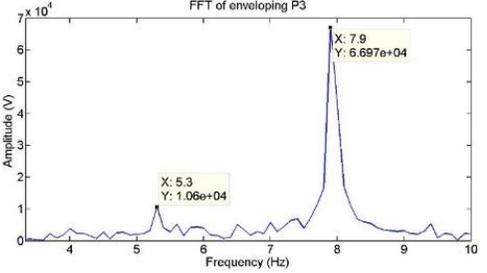
6.2 Detección de fallos en caja de engranes usando emisiones acústicas

El principal inconveniente que se presenta al aplicar EA para la detección de fallos, es el ruido que se genera durante las pruebas. Sin embargo con el avance en el uso de materiales aislante y la evolución de los sensores se ha logrado establecer a las emisiones acústicas como una técnica en el diagnóstico de fallos en engranes. Actualmente se realiza estudios sobre emisiones acústicas en conjunto con un análisis vibracional, con lo cual se posee una referencia sobre el estado del elemento en estudio [3].

Para la detección de fallos se procese con la adquisición de datos, los cuales provienen de un sensor de emisiones acústicas y un acelerómetro que recolectaran datos en el dominio del tiempo. El análisis en primera instancia consiste en una inspección visual de los datos graficados tanto de señales de emisión acústica como vibratoriales, por lo cual es necesario pasar al dominio de la frecuencia mediante la transformada rápida de Fourier.

En la Tabla 2 presenta los espectros de vibración y emisiones acústicas de un engrane en buenas condiciones y con fallo por *Tooth breakage*.

Tabla 2. Fallos para guías de práctica

	Good condition	Tooth breakage 100%																
Imagen																		
Espectro de vibración GMF	 <table border="1"> <caption>Peak Data for Good Condition GMF</caption> <thead> <tr> <th>Frequency (Hz)</th> <th>Amplitude (V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>219.5</td> <td>1.355e+04</td> </tr> <tr> <td>227.4</td> <td>1.784e+04</td> </tr> <tr> <td>235.2</td> <td>1.563e+04</td> </tr> </tbody> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	219.5	1.355e+04	227.4	1.784e+04	235.2	1.563e+04	 <table border="1"> <caption>Peak Data for 100% Tooth Breakage GMF</caption> <thead> <tr> <th>Frequency (Hz)</th> <th>Amplitude (V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>219.6</td> <td>3503</td> </tr> <tr> <td>227.4</td> <td>9017</td> </tr> <tr> <td>235.2</td> <td>1.707e+04</td> </tr> </tbody> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	219.6	3503	227.4	9017	235.2	1.707e+04
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																	
219.5	1.355e+04																	
227.4	1.784e+04																	
235.2	1.563e+04																	
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																	
219.6	3503																	
227.4	9017																	
235.2	1.707e+04																	
Señal de emisión acustica	 <table border="1"> <caption>Peak Data for Good Condition Acoustic</caption> <thead> <tr> <th>Frequency (Hz)</th> <th>Amplitude (V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>226</td> <td>42.65</td> </tr> </tbody> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	226	42.65	 <table border="1"> <caption>Peak Data for 100% Tooth Breakage Acoustic</caption> <thead> <tr> <th>Frequency (Hz)</th> <th>Amplitude (V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>226.6</td> <td>8.023</td> </tr> </tbody> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	226.6	8.023								
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																	
226	42.65																	
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																	
226.6	8.023																	
Espectro de vibración frecuencia de engranes	 <table border="1"> <caption>Peak Data for Good Condition Envelope</caption> <thead> <tr> <th>Frequency (Hz)</th> <th>Amplitude (V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5.3</td> <td>2.681e+04</td> </tr> <tr> <td>7.9</td> <td>2.926e+04</td> </tr> </tbody> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	5.3	2.681e+04	7.9	2.926e+04	 <table border="1"> <caption>Peak Data for 100% Tooth Breakage Envelope</caption> <thead> <tr> <th>Frequency (Hz)</th> <th>Amplitude (V)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>5.3</td> <td>1.06e+04</td> </tr> <tr> <td>7.9</td> <td>6.697e+04</td> </tr> </tbody> </table>	Frequency (Hz)	Amplitude (V)	5.3	1.06e+04	7.9	6.697e+04				
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																	
5.3	2.681e+04																	
7.9	2.926e+04																	
Frequency (Hz)	Amplitude (V)																	
5.3	1.06e+04																	
7.9	6.697e+04																	

La inspección visual consiste en comparar los espectros obtenidos durante el desarrollo de la práctica con los presentados en la Tabla 2. Un análisis posterior que se realiza para la detección de fallos es el procesamiento digital de señales, el cual por su complejidad no se utiliza para la presente guía de práctica.

En la Figura 3 se muestra el resumen del proceso para detección de fallos por medio de emisiones acústicas.

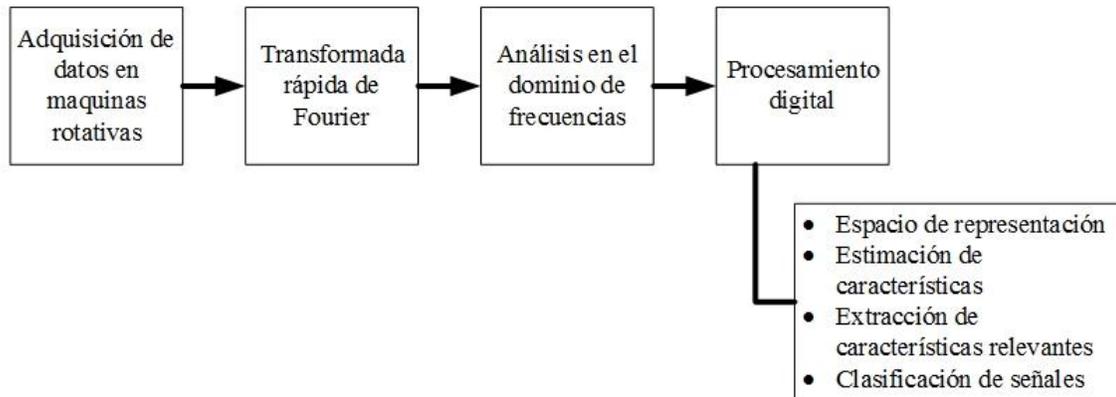


Figura 3. Proceso para aplicación de EA

6.3 Disposición de fallos en engranes

Para el montaje de fallos se considera una sola etapa en la caja de engranes como se muestra en la Figura 4. En piñón estará representado por Z1 y será el poseedor de los diversos fallos, mientras que Z2 será en engrane sin fallos durante la ejecución de la práctica.

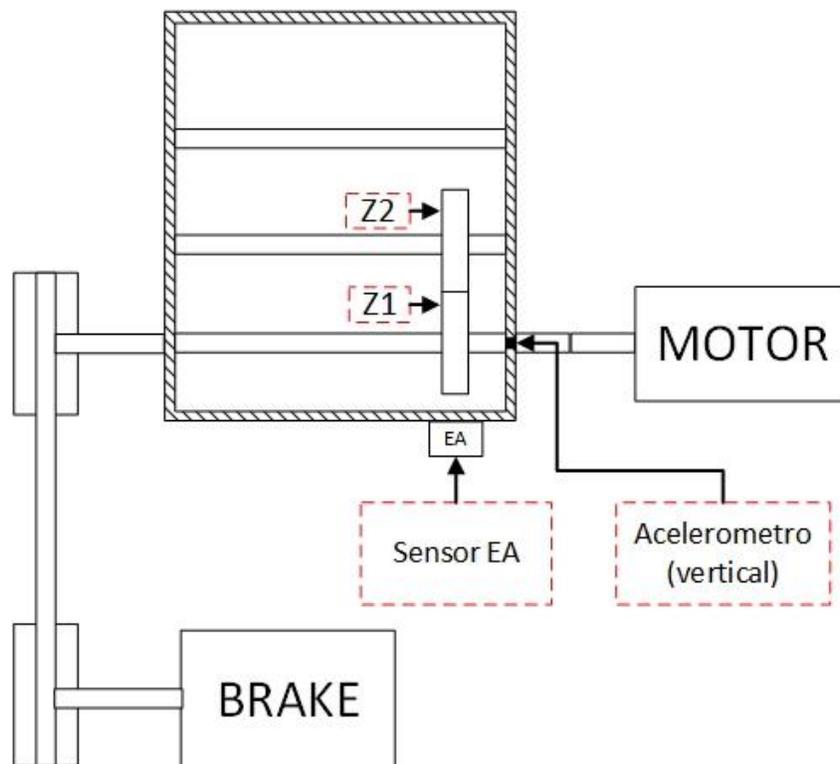


Figura 4. Disposición de engranes para guía de práctica

7. Proceso y procedimiento

7.1 Proceso

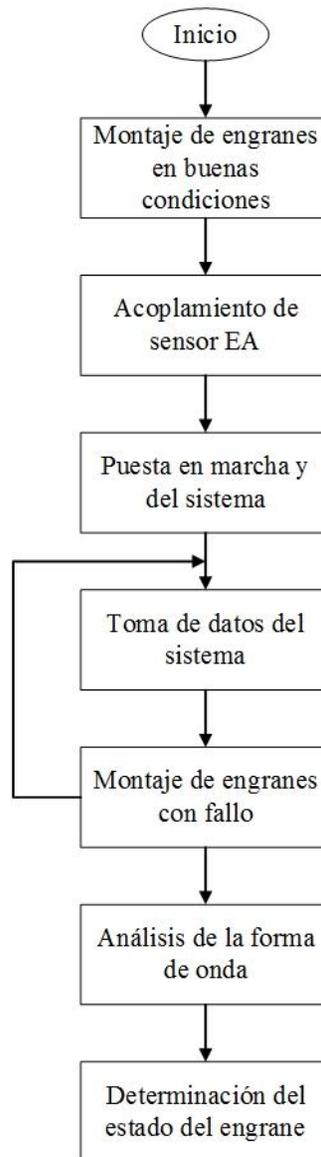


Figura 5. Procesos para el uso del sensor WD SENSOR

7.2 Procedimiento

7.2.1 Montaje de engranes en buenas condiciones

1. Desmontar la banda que conecta la salida de la caja con el freno, mostrado en la Figura 6, con la ayuda de un desarmador que será usado de palanca
2. Usar una llave allen 6 para destapar la caja de engranaje, retirando los pernos de sujeción
3. Desmontar los ejes de la caja de engranaje, quitando las tapas de los rodamientos
4. Colocar los engranajes en buenas condiciones en sus respectivos puntos de fijación en cada eje respectivo como se muestra en la Figura 1
5. Montar los ejes en la caja de engranajes, ubicando las tapas de los rodamientos

6. Colocar banda entre las salidas de la caja de engranajes y el freno de forma alineada, ayúdese de una regla metálica para la alineación
7. Tapar caja de engranajes y asegurar con los pernos de sujeción

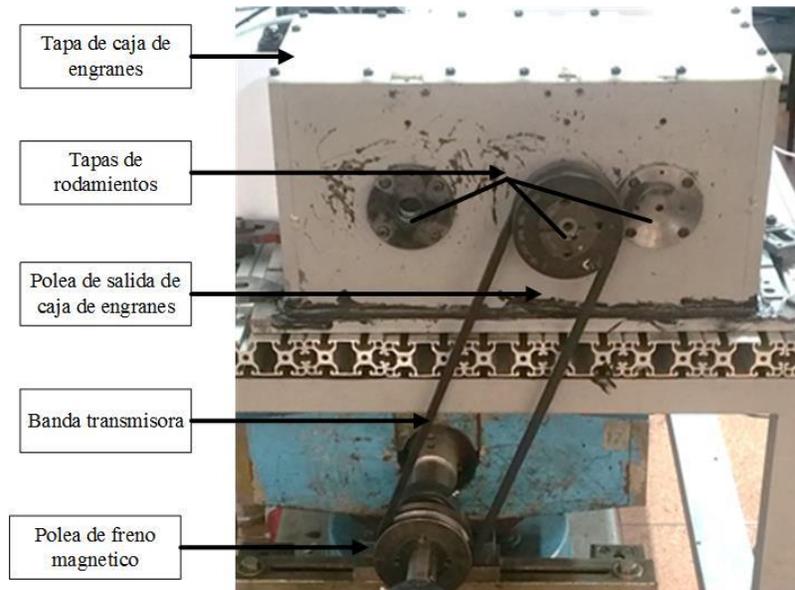


Figura 6. Sistema de transmisión de carga al sistema de caja de engranajes.

7.2.2 Acoplamiento de sensor a caja de engranajes

1. Colorar cinta doble cara en el sensor como se indica en la Figura 7

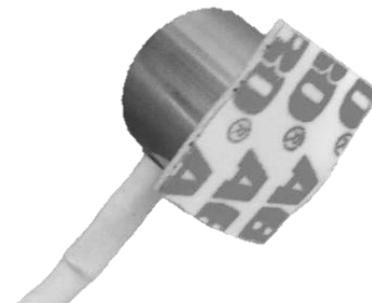


Figura 7. Sensor WD S/N FV52 con cinta doble cara

2. Posicionamos el sensor WD S/N FV52 en soporte magnético Figura 7



Figura 8. Soporte magnético MHSTD

3. Retirar desprendible de cinta doble cara y colocar en caja de engranajes Figura 4
4. Conectar cable de salida del sensor WD S/N FV52 a puerto de entrada DIFFERENTIAL Figura 9
5. Posicionar selector de entrada en DIFFERENTIAL y seleccionar una ganancia de 40dB en preamplificador Figura 9
6. Conectar la salida SIGNAL CABLE a entrada 0 del módulo NI 9233
7. Conectar la salida POWER a fuente de voltaje 24V
8. Montar acelerómetro en la posición indicada en la Figura 4
9. Conectar cable A1 en acelerómetro y en tarjeta NI 9234
10. Revisar que los cables de sensores no interfieran con el funcionamiento del motor



Figura 9. Preamplificador 2/4/6 [5]

7.2.3 Puesta en marcha del sistema

1. Encender computador portátil
2. Clic en “INICIO”, buscar “Fault_Diagnosis”
3. En la casilla de dirección escribimos “C:\Users\PUBLIC\Documents\Practica3\” más la fecha en la cual se realice la práctica

7.2.4 Toma de datos

1. Modificamos los parámetros según la Tabla 3 parámetros de prueba

Tabla 3. Parámetros de pruebas

Sin fallo	Tooth breakage 100%
Repetition <input type="text" value="R1"/>	Repetition <input type="text" value="R1"/>
Frequency <input type="text" value="F1"/>	Frequency <input type="text" value="F1"/>
Load <input type="text" value="L1"/>	Load <input type="text" value="L1"/>
Fault <input type="text" value="P1"/>	Fault <input type="text" value="P10"/>
R1F1L1P1	R1F1L1P10

2. Encender variador de frecuencia pulsando el botón hand on [🔌]
3. Clic en [➡] para iniciar el programa
4. Pulsamos botón [✅] y esperamos a que el programa presente las señales obtenidas

7.2.5 Análisis de forma de onda

1. Clic en “Inicio”, buscar “Matlab”
2. En la barra de selección de carpetas poner “C:\Users\Christian\Desktop\SignalCheck”
3. Entrar en el script “vibración”
4. En load (Figura 10) reemplazar número de práctica, fecha, numero de fallo “P” y parámetros de prueba

```

%Initial settings
clc;clear all;close all;
frequency=8; %motor spin frequency
z1=30; %drive gear teeth
z2=45; %driven gear teeth
load 'C:\Users\GIDTEC\Documents\GIDTEC\Practica(#)\(fecha)\P(#)\(Parametros).mat' %Load data

```

Figura 10. Programa de procesamiento de datos Matlab

5. Ejecutar el programa
6. En Tabla 4 columna “*Good condition*” graficar los espectros de vibración correspondientes al engrane en buenas condiciones
7. En Tabla 4 columna “*Tooth breakage 100%*” graficar los espectros de vibración correspondientes al engrane con 100% *Tooth breakage* condiciones

7.2.6 Montaje de engranes con fallo

8. Desmontar la banda que conecta la salida de la caja con el freno, mostrado en la Figura 6, con la ayuda de un desarmador que será usado de palanca
9. Usar una llave allen 6 para destapar la caja de engranaje, retirando los pernos de sujeción
10. Desmontar los ejes de la caja de engranaje, quitando las tapas de los rodamientos
11. Seleccionar engrane con diente roto 50% y posteriormente roto 100%
12. Colocar los engranajes en buenas condiciones en sus respectivos puntos de fijación en cada eje respectivo como se muestra en la Figura 1
13. Montar los ejes en la caja de engranajes, ubicando las tapas de los rodamientos
14. Colocar banda entre las salidas de la caja de engranajes y el freno de forma alineada, ayúdese de una regla metálica para la alineación
15. Tapar caja de engranajes y asegurar con los pernos de sujeción
16. Repetir nuevamente desde el punto 7.2.4

Tabla 4. Engrane en condiciones normales

	Good condition	Tooth breakage 100%
Espectro de vibración GMF		
Señal de emisión acústica		
Espectro de vibración frecuencia de engranes		

8. Conclusiones y recomendaciones

Referencias

- [1] R. Guiracocha y R. Sánchez Loja, «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», Grado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca [Ecuador], 2015.
- [2] *Condition monitoring and diagnostics of machines — Acoustic emission*, vol. ISO 220966. 2006.

- [3] 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.
- [4] C. Tan y D. Mba, «Identification of the acoustic emission source during a comparative study on diagnosis of a spur gearbox», *Tribol. Int.*, vol. 38, n.º 5, pp. 469–480, 2005.
- [5] *2-4-6 Preamplifier*, 1ra ed. Physical Acoustics Corporation., Princeton Junction, NJ, 2011.

Anexo B1

	Nombre	Fecha	Ciclo	Carrera	Guía de práctica #	Calificación
1	Juan Mogrovejo	12-09-16	5	Ingeniería Mecánica	1	21/21
2	Andrés Vintimilla	12-09-16	5	Ingeniería Mecánica	1	20/21
3	Jorge Tapia	12-09-16	5	Ingeniería Mecánica	1	20/21
4	Francisco Lojano	13-09-16	9	Ingeniería Mecánica	1	19/21
5	Mateo Flores	13-09-16	7	Ingeniería Mecánica	1	21/21
6	Eduardo Arce	13-09-16	7	Ingeniería Mecánica	1	19/21
7	Gustavo Pacheco	13-09-16	7	Ingeniería Mecánica	1	20/21
8	Pedro Abad	13-09-16	5	Ingeniería Mecánica	1	21/21
9	Edison bonete	13-09-16	7	Ingeniería Mecánica	1	19/21
10	Carlos Beltran	14-09-16	7	Ingeniería Mecánica	1	19/21
11	Cristian Torres	14-09-16	9	Ingeniería Mecánica	1	21/21
12	Pablo arias	14-09-16	5	Ingeniería Mecánica	1	21/21
13	Mickel Ochoa	15-09-16	5	Ingeniería Mecánica	1	21/21
14	Andrés Vacacela	15-09-16	7	Ingeniería Mecánica	1	20/21
15	Ana Calle	15-09-16	5	Ingeniería Mecánica	1	19/21
16	Macarena Serrano	15-09-16	5	Ingeniería Mecánica	1	20/21
17	Boris Tacuri	15-09-16	5	Ingeniería Mecánica	1	21/21
18	Christian Castillo	16-09-16	9	Ingeniería Mecánica	1	21/21
19	David Montero	16-09-16	9	Ingeniería Mecánica	1	21/21
20	Wilmer Cáceres	19-09-16	7	Ingeniería Mecánica	1	21/21
21	Juan Plaza	19-09-16	9	Ingeniería Mecánica	1	21/21
22	José Lozano	19-09-16	7	Ingeniería Mecánica	1	21/21
23	Guido Quintuña	23-09-16	7	Ingeniería Mecánica	1	21/21
24	Édgar Odilón García	26-09-16	9	Ingeniería Mecánica	1	21/21
25	Franco Cajas	30-09-16	9	Ingeniería Mecánica	1	19/21
26	Juan Aguirre	30-09-16	9	Ingeniería Mecánica	1	20/21
27	Cesar Naula	30-09-16	7	Ingeniería Mecánica	1	20/21
28	Franklin Calderon	30-09-16	9	Ingeniería Mecánica	1	21/21
29	Alexander Canga	30-09-16	7	Ingeniería Mecánica	1	21/21
30	Andres Herrera	30-09-16	9	Ingeniería Mecánica	1	20/21

	Nombre	Fecha	Ciclo	Carrera	Guía de práctica #	Calificación
1	Juan Mogrovejo	12-09-16	5	Ingeniería Mecánica	2	21/21
2	Andrés Vintimilla	12-09-16	5	Ingeniería Mecánica	2	21/21
3	Jorge Tapia	12-09-16	5	Ingeniería Mecánica	2	20/21
4	Francisco Lojano	13-09-16	9	Ingeniería Mecánica	2	19/21
5	Mateo Flores	13-09-16	7	Ingeniería Mecánica	2	21/21
6	Eduardo Arce	13-09-16	7	Ingeniería Mecánica	2	19/21
7	Gustavo Pacheco	13-09-16	7	Ingeniería Mecánica	2	20/21
8	Pedro Abad	13-09-16	5	Ingeniería Mecánica	2	21/21
9	Edison bonete	13-09-16	7	Ingeniería Mecánica	2	19/21
10	Carlos Beltran	14-09-16	7	Ingeniería Mecánica	2	19/21
11	Cristian Torres	14-09-16	9	Ingeniería Mecánica	2	21/21
12	Pablo arias	14-09-16	5	Ingeniería Mecánica	2	21/21
13	Mickel Ochoa	15-09-16	5	Ingeniería Mecánica	2	21/21
14	Andrés Vacacela	15-09-16	7	Ingeniería Mecánica	2	20/21
15	Ana Calle	15-09-16	5	Ingeniería Mecánica	2	21/21
16	Macarena Serranc	15-09-16	5	Ingeniería Mecánica	2	20/21
17	Boris Tacuri	15-09-16	5	Ingeniería Mecánica	2	21/21
18	Christian Castillo	16-09-16	9	Ingeniería Mecánica	2	21/21
19	David Montero	16-09-16	9	Ingeniería Mecánica	2	21/21
20	Wilmer Cáceres	19-09-16	7	Ingeniería Mecánica	2	21/21
21	Juan Plaza	19-09-16	9	Ingeniería Mecánica	2	21/21
22	José Lozano	19-09-16	7	Ingeniería Mecánica	2	21/21
23	Guido Quintuña	23-09-16	7	Ingeniería Mecánica	2	21/21
24	Édgar Odilón Garc	26-09-16	9	Ingeniería Mecánica	2	21/21
25	Franco Cajas	30-09-16	9	Ingeniería Mecánica	2	19/21
26	Juan Aguirre	30-09-16	9	Ingeniería Mecánica	2	20/21
27	Cesar Naula	30-09-16	7	Ingeniería Mecánica	2	20/21
28	Franklin Calderon	30-09-16	9	Ingeniería Mecánica	2	21/21
29	Alexander Canga	30-09-16	7	Ingeniería Mecánica	2	21/21
30	Andres Herrera	30-09-16	9	Ingeniería Mecánica	2	21/21

	Nombre	Fecha	Ciclo	Carrera	Guía de práctica #	Calificación
1	Juan Mogrovejo	12-09-16	5	Ingeniería Mecánica	3	21/21
2	Andrés Vintimilla	12-09-16	5	Ingeniería Mecánica	3	21/21
3	Jorge Tapia	12-09-16	5	Ingeniería Mecánica	3	20/21
4	Francisco Lojano	13-09-16	9	Ingeniería Mecánica	3	19/21
5	Mateo Flores	13-09-16	7	Ingeniería Mecánica	3	21/21
6	Eduardo Arce	13-09-16	7	Ingeniería Mecánica	3	20/21
7	Gustavo Pacheco	13-09-16	7	Ingeniería Mecánica	3	20/21
8	Pedro Abad	13-09-16	5	Ingeniería Mecánica	3	20/21
9	Edison bonete	13-09-16	7	Ingeniería Mecánica	3	19/21
10	Carlos Beltran	14-09-16	7	Ingeniería Mecánica	3	20/21
11	Cristian Torres	14-09-16	9	Ingeniería Mecánica	3	21/21
12	Pablo arias	14-09-16	5	Ingeniería Mecánica	3	21/21
13	Mickel Ochoa	15-09-16	5	Ingeniería Mecánica	3	21/21
14	Andrés Vacacela	15-09-16	7	Ingeniería Mecánica	3	20/21
15	Ana Calle	15-09-16	5	Ingeniería Mecánica	3	20/21
16	Macarena Serranc	15-09-16	5	Ingeniería Mecánica	3	20/21
17	Boris Tacuri	15-09-16	5	Ingeniería Mecánica	3	21/21
18	Christian Castillo	16-09-16	9	Ingeniería Mecánica	3	21/21
19	David Montero	16-09-16	9	Ingeniería Mecánica	3	21/21
20	Wilmer Cáceres	19-09-16	7	Ingeniería Mecánica	3	21/21
21	Juan Plaza	19-09-16	9	Ingeniería Mecánica	3	21/21
22	José Lozano	19-09-16	7	Ingeniería Mecánica	3	21/21
23	Guido Quintuña	23-09-16	7	Ingeniería Mecánica	3	21/21
24	Édgar Odilón Garc	26-09-16	9	Ingeniería Mecánica	3	21/21
25	Franco Cajas	30-09-16	9	Ingeniería Mecánica	3	19/21
26	Juan Aguirre	30-09-16	9	Ingeniería Mecánica	3	20/21
27	Cesar Naula	30-09-16	7	Ingeniería Mecánica	3	20/21
28	Franklin Calderon	30-09-16	9	Ingeniería Mecánica	3	21/21
29	Alexander Canga	30-09-16	7	Ingeniería Mecánica	3	21/21
30	Andres Herrera	30-09-16	9	Ingeniería Mecánica	3	20/21