

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

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

PROYECTO TÉCNICO

**“SEÑALES ACÚSTICAS Y DE VIBRACIÓN: ESTUDIO COMPARATIVO PARA
LA DETECCIÓN DE SEVERIDAD DE FALLOS EN ENGRANES RECTOS”**

“Acoustic and vibration signals: a comparative study for fault severity detection in spur gears”

AUTOR:

FRANCISCO JOSÉ LOJANO ARMIJOS

TUTOR:

DR. RENÉ VINICIO SÁNCHEZ LOJA

CUENCA – ECUADOR

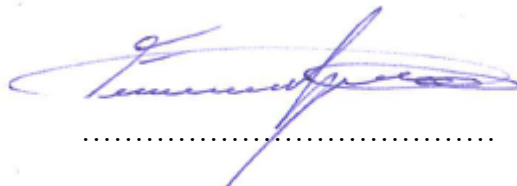
2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Francisco José Lojano Armijos con documento de identificación N° 0104944897 manifiesto mi voluntad, y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: “**SEÑALES ACÚSTICAS Y DE VIBRACIÓN: ESTUDIO COMPARATIVO PARA LA DETECCIÓN DE SEVERIDAD DE FALLOS EN ENGRANES RECTOS**”, 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 el derecho moral de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre de 2019



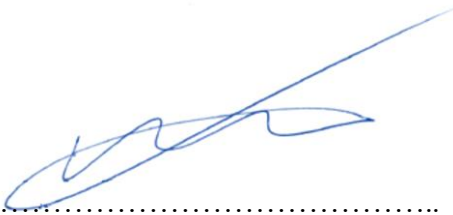
Francisco José Lojano Armijos

C.I.: 0104944897

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “**SEÑALES ACÚSTICAS Y DE VIBRACIÓN: ESTUDIO COMPARATIVO PARA LA DETECCIÓN DE SEVERIDAD DE FALLOS EN ENGRANES RECTOS**”, realizado por Francisco José Lojano Armijos, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre de 2019

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke, positioned above a dotted line.

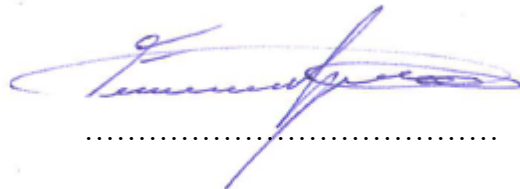
Dr. René Vinicio Sánchez Loja

C.I.: 0103409587

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Francisco José Lojano Armijos con documento de identificación N° 0104944897 autor del trabajo de titulación “**SEÑALES ACÚSTICAS Y DE VIBRACIÓN: ESTUDIO COMPARATIVO PARA LA DETECCIÓN DE SEVERIDAD DE FALLOS EN ENGRANES RECTOS**”, certifico que el total contenido del *Proyecto Técnico* es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, diciembre de 2019



Francisco José Lojano Armijos

C.I.: 0104944897

DEDICATORIA

A mis padres, Heriberto y Judith, por guiarme siempre con el ejemplo y mucha dedicación.

A mi hermano David, por su apoyo incondicional y,

A toda mi familia y amigos que confiaron en mí y me motivaron.

Francisco Lojano

AGRADECIMIENTOS

A mis Padres Heriberto y Judith que me brindaron su apoyo, tiempo y paciencia durante este arduo camino. A mi hermano David que me apoyo en momentos difíciles de mi vida universitaria. En especial a mi madre que inspiro a superar las adversidades de la vida y a nunca rendirse contra el cáncer. Mi agradecimiento a la Virgen de El Cisne la protectora de mi familia y apoyo en momentos difíciles de mi familia. A mi Santo Patrono Don Bosco a quien he consagrado este proyecto de titulación, a todos los santos, mártires y ángeles del cielo que intercedieron para este logro.

Al Ing. Vinicio Sánchez, Diego Cabrera, Jean Carlo y 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 y Mauricio, 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 Franco Cajas, Cristian Torres, Felipe Montalván y Edison Pacheco. Por los buenos, malos e inolvidables momentos que pasamos durante todos estos años.

Francisco Lojano

RESUMEN

En el presente proyecto técnico titulado: “Señales acústicas y de vibración: estudio comparativo para la detección de severidad de fallos en engranes rectos”, se pretende brindar un aporte a la investigación enfocado al diagnóstico de fallos en engranes rectos, aplicando el Mantenimiento Basado en la Condición (MBC), mediante la técnica de Monitoreo de Condición (MC). En este proyecto se utilizaron dos sistemas de monitoreo el de vibración y acústico, se realizó la adquisición de señales acústicas y de vibración en una caja de engranajes, simulando fallos en engranes rectos. Esto con la finalidad de brindar un aporte para el estudio de diagnóstico de fallos en maquinaria rotativa mediante el análisis de señales para el monitoreo de condición. El objetivo de este proyecto es comparar las señales de vibración y las señales acústicas de engranes rectos.

A lo largo de este estudio se cumplieron los siguientes objetivos tratados en cuatro etapas:

En la primera etapa, presenta una introducción al proyecto técnico, el problema, los antecedentes, el alcance y los objetivos planteados para el proyecto. Se justifica también, la importancia del monitoreo de señales acústicas y de vibración para la detección de fallos en engranes rectos.

En la segunda etapa, presenta el marco teórico del proyecto, presentando temas de interés como el mantenimiento basado en la condición, el monitoreo de condición y las principales técnicas como: el monitoreo de vibraciones y acústico. También se presenta las bases teóricas de este estudio.

En la tercera etapa, presenta el desarrollo experimental del proyecto en el que se detalla la metodología empleada para la adquisición de señales acústicas y de vibración, donde se tratan temas como: la instalación de sensores, la configuración del sistema de adquisición, el procedimiento para validar las señales, comparación de severidad de fallo y comparación de señales de vibración y acústicas.

En la cuarta etapa, presenta los resultados adquiridos de las señales de vibración y de acústica, la comparación de severidad en los fallos y la comparación de las dos señales mediante los espectros.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones acorde a los objetivos planteados y una propuesta para trabajos futuros.

ABSTRACT

The present technical project entitled: "Acoustic and vibration signals: a comparative study for fault severity detection in spur gears", this work aims to contribute to research field focused on fault diagnosis in spur gears, applying Condition-Based Maintenance (CBM), using the Condition Monitoring (CM) technique. In this project, two monitoring systems were used: vibration and acoustic. The acquisition of acoustic and vibration signals in a gearbox was carried out, simulating faults in spur gears. This contributes to the study of the fault diagnosis in rotating machinery through the analysis of signals for CM. The objective of this project is to compare the vibration and acoustic signals from spur gears.

Throughout this study, the following objectives were met in four stages:

In the first stage, it presents an introduction to the technical project, the problem, the background, the scope and the objectives propose. It also justifies the importance of monitoring acoustic and vibration signals for fault detection in spur gears.

In the second stage, it introduces the theoretical framework of the project, presenting topics of interest such as condition-based maintenance, condition monitoring and the main techniques such as vibration and acoustic monitoring. The theoretical basis for this study is also presented.

In the third stage, it presents the experimental development of the project in which the methodology used for the acquisition of acoustic and vibration signals is detailed, where topics such as the installation of sensors, the configuration of the acquisition system, the procedure for validating the signals, comparison of fault severity and comparison of vibration and acoustic signals are dealt with.

In the fourth stage, it presents the acquired results of the vibration and acoustic signals, the comparison of faults severity and the comparison of the two signals employing the specters.

Finally, the conclusions and recommendations are presented according to the stated objectives and a proposal for future work.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Cesión de derechos de autor	I
Certificación	II
Declaratoria de responsabilidad.....	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos.....	V
Resumen	VI
Abstract.....	VII
Índice de contenidos	VIII
Índice de figuras	XII
Índice de tablas.....	XVI
1. Tema	1
2. Introducción	1
3. Problema	1
3.1 Antecedentes.....	2
3.2 Importancia y alcance.....	4
3.3 Delimitación.....	5
3.4 Problema General	5
3.5 Problema Específicos.....	5
4. Objetivos	6
4.1 Objetivos generales.....	6
4.2 Objetivos específicos.....	6
5. Marco teórico.....	6
5.1 Mantenimiento basado en la condición	6
5.2 Monitoreo de condición	7
5.3 Monitoreo de vibración	9
5.3.1 Normas para el análisis de vibración.....	11
5.3.2 Defectos mecánicos en sistemas rotativos.....	12
5.3.3 Características de la vibración	13

5.3.3.1	Vibración armónica.....	13
5.3.3.2	Vibración periódica.....	14
5.3.3.3	Vibración aleatoria	15
5.4	Monitoreo acústico	15
5.4.1	Diferencia entre emisión acústica y señal acústica.....	16
5.4.2	Historia del monitoreo acústico.....	17
5.4.3	Ventajas y limitaciones del monitoreo se señales acústicas	19
5.5	Señales acústicas	20
5.5.1	Principio físico de la acústica.....	20
5.5.2	Onda acústica.....	21
5.5.2.1	Definición de onda acústica	21
5.5.2.2	Propagación de la onda acústica	22
5.5.2.3	Velocidad de propagación	22
5.5.2.4	Propiedades de la onda acústica	23
5.5.2.4.1.1	Reflexión acústica	23
5.5.2.4.1.1	Impedancia acústica.....	24
5.5.2.4.1.1	Refracción acústica	25
5.5.2.4.1.1	Interferencia espacial.....	25
5.5.2.4.1.1	Interferencia temporal	26
5.5.2.4.1.1	Difracción	27
5.5.2.5	Ecuación de la onda acústica.....	28
5.5.2.5.1.1	Solución de la onda acústica	29
5.5.2.6	Parámetros de la onda acústica	30
5.5.2.6.1.1	Amplitud	31
5.5.2.6.1.1	Fase o periodo.....	32
5.5.2.6.1.1	Frecuencia	32
5.5.2.6.1.1	Longitud de onda acústica.....	32
5.5.3	Sonido.....	32
5.5.3.1	Definición de sonido	32
5.5.3.2	Características del sonido.....	33
5.5.3.2.1.1	Presión sonora.....	33
5.5.3.2.1.1	Potencia sonora.....	34
5.5.3.2.1.1	Intensidad.....	34
5.5.3.2.1.1	Tono.....	34

5.5.3.3	Unidades	35
5.5.4	Ruido	36
5.5.4.1	Definición de ruido.....	36
5.5.4.2	Tipos de ruido y su medición.....	36
5.6	Hardware de adquisición de señales acústicas.....	39
5.6.1	Transductor acústico.....	39
5.6.1.1.1.1	Principio de funcionamiento del micrófono electroacústico	40
5.6.2	Tipos de micrófonos.....	40
5.6.2.1	Micrófono de condensador	41
5.6.3	Patrones de captación de los micrófonos	42
5.6.4	Sistema integrado de micrófono y preamplificador PCB HT378B02.....	43
5.6.5	Módulo de adquisición National Instruments NI-9234	44
5.6.6	Chasis de módulos National Instruments NI compactDAQ-9188.....	46
5.7	Análisis gráfico de señales en el dominio del tiempo	46
5.8	Análisis gráfico de señales en el dominio de la frecuencia.....	46
5.8.1	Transformada rápida de Fourier.....	47
5.8.2	Análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia	49
5.9	Firma de vibración.....	50
5.9.1	Frecuencias generadas por una caja de engranajes	50
5.10	Fallos en engranajes.....	51
5.10.1	Caracterización de fallos en engranajes.....	53
5.10.1.1	Fallo de picadura	53
5.10.1.2	Fallo de rotura de diente	56
6.	Experimentación	58
6.1	Metodología para la adquisición de señales de vibración y acústica.....	58
6.1.1	Banco de pruebas experimentales	58
6.1.2	Montaje de sensores y elementos mecánicos en buen estado	58
6.2	Descripción del funcionamiento del banco.....	59
6.2.1	Engranajes rectos	61
6.3	Instalación de acelerómetros.....	61
6.3.1	Ubicación de los acelerómetros	62
6.3.2	Conexión de los acelerómetros.....	62
6.4	Instalación de los micrófonos.....	63
6.4.1	Revisión bibliográfica de la ubicación del micrófono	63

6.4.2	Ubicación de los micrófonos.....	66
6.4.3	Conexión de los micrófonos	66
6.5	Programa de adquisición de datos.....	67
6.6	Establecimiento de la línea base	67
6.7	Validación de la línea base.....	67
6.7.1	Verificación visual	68
6.7.2	Verificación de ruidos extraños	68
6.7.3	Verificación de frecuencias características	68
6.8	Plan experimental.....	69
6.9	Metodología de validación de la línea base.....	71
6.10	Validación de las repeticiones	74
6.11	Selección de sensores	75
6.11.1	Selección del sensor de vibración	75
6.11.2	Selección del sensor acústico	76
6.12	Comparación de severidad	76
6.12.1	Comparación de severidad de vibración.....	77
6.12.2	Comparación de severidad en acústica.....	79
6.13	Metodología de comparación de señales entre vibración y acústica	81
7.	Resultados	83
7.1	Resultados de validación de señales de la línea base.....	83
7.1.1	Gráficos de las señales de vibración y acústica.....	83
7.2	Resultados de la validación de repeticiones en los fallos	84
7.3	Resultado de selección de acelerómetro	86
7.4	Resultado de la selección del micrófono.....	88
7.5	Resultados comparativos de las señales de vibración y acústica	88
7.5.1	Resultado de fallo de picadura	88
7.5.2	Resultados de fallo de rotura de diente.....	98
8.	Conclusiones	109
9.	Recomendaciones.....	109
10.	Trabajos futuros.....	110
11.	Referencias bibliográficas.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pasos de mantenimiento basado en la condición [Fuente: Autor].	7
Figura 2. Estrategia de mantenimiento [23].	9
Figura 3. Representación básica de la vibración en el tiempo [24].	10
Figura 4. Desplazamiento en función del tiempo [Fuente: Autor].	11
Figura 5. Señal de vibración de una máquina [Fuente: Autor].	11
Figura 6. Problemas comunes en máquinas rotativas [24].	13
Figura 7. Generación de una vibración armónica [33].	14
Figura 8. Vibración periódica [Fuente: Autor].	15
Figura 9. Espectro de vibración aleatorio de una maquina [35].	15
Figura 10. Ubicación típica de sensores de emisiones acústicas y señales acústicas en cajas de engranes [Fuente: Autor].	17
Figura 11. Puntos importantes en la historia del monitoreo acústico [11].	18
Figura 12. Espectro acústico [Fuente: Autor].	20
Figura 13. Esquema de generación de la onda acústica en una superficie oscilante [51].	21
Figura 14. Ondas longitudinales y transversales [52].	22
Figura 15. Reflexiones acústicas en distintas superficies [11].	24
Figura 16. Refracción de onda acústica [52].	25
Figura 17. Dos ondas que atraviesan una a otra y que presentan interferencia: a) destructiva y b) constructiva [52].	26
Figura 18. Golpeteo de ondas con frecuencias ligeramente diferentes [52].	27
Figura 19. Difracción acústica; formación de sombras acústicas [54].	27
Figura 20. Difracción acústica sobre diferentes superficies [54].	27
Figura 21. Un tubo de sección constante en dos instantes de tiempo diferentes [56].	28
Figura 22. Ejemplo de ondas planas [58].	29
Figura 23. Parámetros de señal acústica [50].	31

Figura 24. Dos ondas con igual frecuencia y forma de onda, pero con diferente amplitud. (a) Pequeña amplitud. (b) Gran amplitud [59].	31
Figura 25. Ciclo de onda sinusoidal [62].	32
Figura 26. Variaciones de presión de una onda acústica alrededor de la presión atmosférica [65].	33
Figura 27. Esquema general de los módulos usados habitualmente en la adquisición de señales acústicas [11].	39
Figura 28. Relación entre la entrada y la salida de una onda acústica en un micrófono capacitivo [11].	40
Figura 29. Tipos de micrófonos según sus criterios de clasificación más importantes [11].	41
Figura 30. Esquema de los elementos esenciales de un micrófono de condensador [68].	42
Figura 31. Sistema integrado de micrófono y preamplificador PCB HT378B02 [73].	43
Figura 32. Módulo dinámico de adquisición de señales de voltaje NI 9234 [75].	45
Figura 33. Chasis de módulos de adquisición de señales NI compactDAQ-9188 [76].	46
Figura 34. Transformada discreta de Fourier [Fuente: Autor].	48
Figura 35. Representación gráfica de una señal discreta en el tiempo [83].	49
Figura 36. Señales en el dominio del tiempo (Onda) y en el dominio de la frecuencia (Espectro) [80].	49
Figura 37. Espectro característico de un engranaje en buen estado [80], [85].	51
Figura 38. Clasificación de los modos de fallas en engranajes según la norma ISO 10825:1995 [88].	52
Figura 39. Clasificación de fatiga en la superficie del diente según la norma ISO 10825 [92].	54
Figura 40. Clasificación de fallo rotura de diente según la norma ISO 10825 [92].	56
Figura 41. Banco de vibraciones de la UPS. [Fuente: Autor].	58
Figura 42. Proceso para el montaje de sensores y elementos mecánicos [Fuente: Autor].	59
Figura 43. Configuración de la caja de cambios y de los elementos mecánicos adicionales [Fuente: Autor].	60

Figura 44. Engranaje de piñón [Fuente: Autor].	61
Figura 45. Ubicación de los acelerómetros en la caja de engranajes [Fuente: Autor].	62
Figura 46. Esquema de la conexión real del sistema de adquisición de señales de vibración para la experimentación [Fuente: Autor].	62
Figura 47. Ubicación real de los micrófonos en el experimento [Fuente: Autor].	66
Figura 48. Esquema de la conexión real del sistema de adquisición de señales acústicas para la experimentación [Fuente: Autor].	66
Figura 49. Interfaz del programa vibraciones y acústica [Fuente: Autor].	67
Figura 50. Espectro característico de la caja de engranajes en buenas condiciones [Fuente: Autor].	68
Figura 51. Configuración del chasis [Fuente: Autor].	70
Figura 52. Configuración de la caja de engranajes para la adquisición de datos [Fuente: Autor].	70
Figura 53. Foto real de la ubicación de los sensores [Fuente: Autor].	71
Figura 54. Validación de señales adquiridas [Fuente: Autor].	72
Figura 55. Proceso de verificación [Fuente: Autor].	73
Figura 56. Validación de las repeticiones [Fuente: Autor].	74
Figura 57. Selección del sensor de vibración [Fuente: Autor].	75
Figura 58. Selección del sensor acústico [Fuente: Autor].	76
Figura 59. Comparación de severidad en vibración [Fuente: Autor].	77
Figura 60. Proceso de comparación de vibración [Fuente: Autor].	78
Figura 61. Comparación de severidad en acústica [Fuente: Autor].	79
Figura 62. Proceso de comparación de acústica [Fuente: Autor].	80
Figura 63. Señal normal y anormal [Fuente: Autor].	82
Figura 64. Señales de 4 acelerómetros de vibración [Fuente: Autor].	83
Figura 65. Señales de 2 micrófonos de acústica [Fuente: Autor].	84
Figura 66. Gráfica de resultados de las repeticiones de fallo de picadura [Fuente: Autor].	85

Figura 67. Gráfica de resultados de las repeticiones de fallo rotura de diente [Fuente: Autor].	86
Figura 68. Comparación de los espectros de acelerómetros 1 y 2 [Fuente: Autor].	86
Figura 69. Comparación de los espectros de acelerómetros 3 y 4 [Fuente: Autor].	87
Figura 70. Comparación de los espectros de acelerómetros 1 y 3 [Fuente: Autor].	87
Figura 71. Comparación de los espectros de micrófonos 1 y 2 [Fuente: Autor].	88
Figura 72. Resultados de las preguntas 1,2,5,7 del fallo de picadura [Fuente: Autor].	96
Figura 73. Resultado de la pregunta 3 del fallo de picadura [Fuente: Autor].	96
Figura 74. Resultado de la pregunta 4 de fallo de picadura [Fuente: Autor].	97
Figura 75. Resultado de la pregunta 6 de fallo de picadura [Fuente: Autor].	97
Figura 76. Resultados de la pregunta 8 de fallo de picadura [Fuente: Autor].	98
Figura 77. Resultados de las preguntas 1,2,5,7 del fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].	106
Figura 78. Resultado de la pregunta 3 de fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].	106
Figura 79. Resultado de la pregunta 4 de fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].	107
Figura 80. Resultado de la pregunta 6 de fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].	107
Figura 81. Resultado de la pregunta 8 de fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proyecto de titulación culminados y en desarrollo en el GIDTEC [Fuente: Autor]....	2
Tabla 2. Normas de instrumentación y severidad [28–32].....	11
Tabla 3. Diferencia entre emisión acústica y señales acústicas [11].....	17
Tabla 4. Velocidad de propagación de sólidos, líquidos y gaseosos [53].....	23
Tabla 5. Características físicas de algunos fluidos [54].....	24
Tabla 6. Clasificación de tonos de acuerdo con el rango de frecuencias de ondas sonoras [61].	35
Tabla 7. Tipos de ruido y su medición; las características del ruido se clasifican de acuerdo con la forma en que varían con el tiempo [68].....	38
Tabla 8. Clasificación de los micrófonos según su patrón de captación y sus principales características [71-72].	42
Tabla 9. Especificaciones técnicas del micrófono capacitivo PCB 337B02 [73].....	43
Tabla 10. Especificaciones técnicas del preamplificador PCB HT426E01 [74].	44
Tabla 11. Especificaciones técnicas del módulo de adquisición de señales NI-9234 [75].....	45
Tabla 12. Normas y clasificación de fallos en engranajes [9]	53
Tabla 13. Niveles de severidad de picadura en el engrane [1], [10].....	55
Tabla 14. Niveles de Severidad de rotura de diente en el engrane [1], [10].....	57
Tabla 15. Especificación del equipo mecánico utilizado en el equipo de ensayo [Fuente: Autor].	60
Tabla 16. Características de los engranajes rectos [Fuente: Autor].....	61
Tabla 17. Ubicación de los micrófonos en trabajos [Fuente: Autor].....	64
Tabla 18. Proceso comparativo de espectros de las señales [Fuente: Autor].....	81
Tabla 19. Datos para las respuestas de las preguntas [Fuente: Autor].	82
Tabla 20. Resultados nominales y reales [Fuente: Autor].....	83
Tabla 21. Datos de las repeticiones del fallo de picadura [Fuente: Autor].	84
Tabla 22. Datos de las repeticiones del fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].....	85

Tabla 23. Resultados de fallo de picadura [Fuente: Autor].	89
Tabla 24. Preguntas y datos de respuestas para fallo de picadura [Fuente: Autor].	95
Tabla 25. Resultados de las preguntas para fallo de picadura [Fuente: Autor].	95
Tabla 26. Resultados de fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].	99
Tabla 27. Preguntas y datos de respuestas de fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].	105
Tabla 28. Resultados de las preguntas del fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].	105

1. Tema

Señales acústicas y de vibración: estudio comparativo para la detección de severidad de fallos en engranes rectos.

2. Introducción

Los equipos mecánicos necesitan mantenimiento durante su funcionamiento, por ende, hay planes de mantenimiento preventivos y correctivos. Un tipo de mantenimiento empleado en la industria es el mantenimiento basado en la condición, el cual es una estrategia que decide o recomienda acciones de mantenimiento, utilizando la información recopilada a través del monitoreo de condiciones. El monitoreo de la condición ha ido evolucionado con nuevas técnicas para detectar fallos en maquinaria rotativa, una de ellas y la más utilizada es el monitoreo de vibraciones, esta técnica debido a su alta confiabilidad en detectar fallos en engranes y rodamientos ha sido muy bien aceptada en la industria.

Es importante considerar que las maquinas operan en todo momento lo que es indispensable aplicar técnicas nuevas para la detección de fallos no programados. Es importante aclarar que dentro del mantenimiento basado en la condición el “fallo” es considerado como una alteración del elemento mecánico, pero la máquina puede seguir operando normalmente y la “falla” es cuando la máquina presenta una avería y no puede seguir operando. El “engrane” es un solo elemento de rueda dentada mientras que “engranes” es el conjunto de piñón-engrane [1].

El monitoreo acústico de máquinas ha recibido muy poca atención, esto se debe probablemente a la percepción del monitoreo acústico aerotransportado de una máquina es ruidoso y complejo cuando se encuentra en un entorno industrial. Es muy probable que la señal acústica se contamine en ese entorno [2]. El análisis acústico y de vibraciones ayudan a la detección de fallos en máquinas, pudiendo identificarlos cuando están en un nivel aceptable sin producir daño en los equipos. Para lo cual se requiere conocer patrones característicos de acústica y de vibración con diferentes niveles de severidad de fallos. Además, al tratarse de equipos mecánicos, se requiere mayor cantidad de sensores que aporten información valde para una correcta detección de fallos. Las técnicas de MC requieren de recursos como acelerómetro, tacómetro, sensor acústico, entre otros distribuidos en todo el sistema mecánico [3].

3. Problema

3.1 Antecedentes

El Mantenimiento Basado en la Condición (MBC) es un método utilizado para conocer el estado de 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 operativa la maquinaria el mayor tiempo posible, de tal forma que el costo de operación disminuye. Por otro lado, la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, cuenta con un laboratorio de análisis de vibraciones, donde el Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC) realiza investigaciones sobre MBC en maquinaria industrial.

En el laboratorio antes mencionado y con soporte del GIDTEC se han realizado proyectos de titulación para el grado de Ingeniero Mecánico. En la Tabla 1 se presenta de manera resumida los proyectos de titulación culminados y en desarrollo, donde los trabajos se centran en la adquisición de señales de vibración, emisión acústica para el diagnóstico de fallos en maquinaria industrial.

Tabla 1. Proyecto de titulación culminados y en desarrollo en el GIDTEC [Fuente: Autor].

Autor (Año)[Ref.]	Título	Descripción	Señales adquiridas	Mecanismos estudiados
Caranguí (2014)[5]	“Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas de una caja reductora combinando fallos de rodamientos y engranajes rectos para fines investigativos en la Universidad Politécnica Salesiana”	Se levantó bases de datos con un total de 60 combinaciones diferentes acaparando fallos en engranajes rectos, rodamientos rígidos de bolas y combinando fallos en ambos elementos.	Vibración mecánica.	Engranajes. Rodamientos.
Nivelo y Romero (2014)[6]	“Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas para sistemas mecánicos con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en rodamientos”	Se adquirió señales de vibración de un sistema mecánico rotativo completo, simulando fallos en rodamientos y engranajes con perturbaciones en los ejes de transmisión. Además, se elaboró una guía de prácticas para la detección de fallos en rodamientos.	Vibración mecánica.	Engranajes.
Guiracocha (2015)[7]	“Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones acústicas e imágenes termográficas infrarrojas para un sistema mecánico rotativo con la	Se adquirió señales de emisión acústica, vibración mecánica e imágenes termográficas sobre un sistema mecánico rotativo.	Vibración mecánica. Emisión acústica.	Sistema mecánico rotativo. Engranajes.

Autor (Año)[Ref.]	Título	Descripción	Señales adquiridas	Mecanismos estudiados
	combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en engranajes”		Imágenes termográficas	Rodamientos.
Muñoz y Vera (2015)[8]	“Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas y acústicas de un sistema mecánico rotativo con la combinación de fallos de rodamientos y engranajes helicoidales y elaboración de guía de practica para desbalanceo estático”	Se adquirió señales de vibración mecánica y emisión acústica en un sistema mecánico rotativo, simulando fallos en rodamientos y engranes helicoidales en una caja de engranajes.	Vibración mecánica. Emisión acústica.	Engranajes. Rodamientos.
Ortiz y Pérez (2016)[9]	“Adquisición de señales vibracionales y emisiones acústicas combinando fallos en maquinaria rotativa y elaboración de guías de práctica sobre detección de fallos en engranajes por medio de emisiones acústicas”	Se analizó la comparación de las señales de emisiones acústicas y señales de vibración adquiridas en un sistema mecánico rotativo con diferentes configuraciones y construcciones de fallos en rodamientos y engranes.	Vibración mecánica. Emisión acústica.	Engranajes. Rodamientos.
Pacheco E. (2018)[1]	“Adquisición de señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de severidad de fallos en maquinaria rotativa”	Se establece una base de datos de severidad de fallos en engranajes y rodamientos, por medio de la adquisición de señales de vibración y emisión acústica.	Vibración mecánica. Emisión Acústica.	Engranajes. Rodamientos.
Chingal D. (2018)[10]	“Adquisición de señales de corriente del motor de inducción combinando fallos en la maquinaria rotativa y elaboración de una guía de práctica sobre detección de fallos por medio del AFCM”	Se adquieren señales de corriente en el motor de inducción, para la detección de fallos de engranajes por medio del análisis de firma de corriente del motor.	Vibración mecánica. Corriente.	Engranajes. Motor de inducción.
Cajas y Torres (2018)[11]	“Adquisición de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor recíprocante de doble etapa”	Se establece una base de datos de señales acústicas y vibración de fallos del sistema mecánico del compresor.	Vibración Mecánica. Acústica.	Compresor Recíprocante.
Calderón y Montalván (2019)[12]	“Adquisición de señales acústicas y vibracionales para el diagnóstico de fallos en una bomba centrífuga multietapa de eje vertical”	Se establece una base de datos de señales acústicas y vibración de fallos del sistema mecánico de la bomba centrífuga.	Vibración Mecánica Acústica	Bomba Centrífuga Multietapa Vertical.

Sin embargo, hay dos proyectos en los que se adquieren señales acústicas; el primero se desarrolló en un compresor recíprocante por Franco Cajas y Cristian Torres [11], el segundo se está desarrollando en una bomba centrífuga por Juan Calderón y Felipe Montalván.

Además, en ninguno de estos proyectos se ha trabajado con un estudio comparativo de señales acústicas y de vibración en engranes.

3.2 Importancia y alcance

El MBC es un programa que usa la información que se obtiene a través del Monitoreo de la Condición (MC), el cual consiste en tres pasos principales; adquisición de datos, procesamiento de datos y toma de decisiones de mantenimiento [13]. Un sistema en donde se puede emplear el MBC es una caja de engranajes, ya que, en estos sistemas los problemas más comunes que se presentan son el envejecimiento y el deterioro. Además, la velocidad, la carga y el tiempo de funcionamiento; son factores que contribuyen a generar fallos en los engranes [3], [14]. Es por lo que el MC se centra en detectar los fallos en los elementos antes de que ocurra una falla en el equipo [15].

Si el MBC se establece correctamente se puede reducir significativamente el costo de tareas innecesarias y riesgos asociados al Mantenimiento Preventivo (MP), además de, contribuir a la productividad [2], [4], [16]. Se ha verificado que mediante un MC que tenga como parámetros a las señales de vibración, señales acústicas, emisión acústica y corriente, se puede lograr un diagnóstico temprano para disminuir paradas no programadas [7].

El MC que emplea señales de vibración utiliza sensores denominados acelerómetros, que deben estar en contacto con la máquina, sin embargo, pueden presentar dificultades debido a que también captan señales de vibración de otros componentes o equipos adyacentes. Mientras que, para las señales acústicas se utilizan sensores denominados micrófonos que pueden estar ubicados cerca de la máquina, sin contacto con la misma, también hay dificultades ya que captan señales acústicas externas mezclándose con la señal original o las señales inminentes de la máquina.

Esto genera la necesidad de establecer una base de datos que contenga información de señales acústicas y de vibración de fallos en engranes rectos, así mismo permita realizar un estudio comparativo de dichas señales, lo cual puede ser un aporte al campo industrial. Las cajas de engranajes son un ejemplo de máquina donde se emplea el MC en la actualidad, ya que estas desempeñan un papel crucial en la industria porque a partir de ellas se realiza la transmisión de movimiento a una gran parte de máquinas rotativas. Es así, que el objetivo del MC en la caja de engranajes es llegar a obtener un diagnóstico de fallos, es decir, lograr detectar, identificar y localizar el fallo en su etapa inicial a través de la adquisición y procesamiento de las señales de MC. Por lo general, para el MC en cajas de engranajes se

emplea señales de vibración. En la etapa de adquisición de estas señales se presentan situaciones complejas como el difícil acceso y la colocación de acelerómetros, por motivos como la falta de espacio y las elevadas temperaturas de operación. Por lo contrario, con un MC acústico se logra superar los dichos inconvenientes presentados por el MC de vibración, ya que los micrófonos no deben estar en contacto directo con la superficie de la caja de engranajes.

En el procesamiento de las señales acústicas y de vibración se obtienen ondas senoidales en el dominio de tiempo, para obtener un mejor análisis gráfico se convierten al dominio de la frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT) a espectros. En el trabajo de Christian Ortiz e Iván Pérez [9], se caracterizaron los fallos de picadura (*pitting*) y la rotura de diente (*tooth breakage*). Los cuales se atribuyen a la deficiencia del material, desgaste con el transcurrir de las horas de funcionamiento, funcionamiento defectuoso, defecto de montaje y mala lubricación siendo estas las más principales.

3.3 Delimitación

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

3.4 Problema General

- ¿Es posible comparar señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de severidad de fallos en una caja de engranajes rectos?

3.5 Problema Específicos

- ¿Cuáles son las técnicas de monitoreo de la condición en señales acústicas en cajas de engranajes rectos?

- ¿Está en condiciones adecuadas la caja de engranajes y el equipo de adquisición de datos para el levantamiento de señales acústicas y de vibración?
- ¿Es posible adquirir datos de señales acústicas y de vibración con nueve niveles de severidad de los fallos de picadura y rotura de diente en engranes rectos?
- ¿Es posible comparar las señales acústicas y de vibración adquiridas para la detección de fallos mediante la Transformada Rápida de Fourier?

4. Objetivos

4.1 Objetivos generales

Realizar un estudio comparativo de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de los distintos niveles de severidad de fallos en engranes rectos.

4.2 Objetivos específicos

- Conceptualizar las técnicas de monitoreo de la condición que emplean señales acústicas en cajas de engranajes.
- Configurar la caja de engranajes y el equipo de adquisición de datos para el levantamiento de señales acústicas y de vibración.
- Adquirir señales acústicas y de vibración con tres niveles de severidad de los fallos de picadura y rotura de diente en engranes rectos.
- Comparar las señales acústicas y de vibración adquiridas para la detección de fallos mediante la Transformada Rápida de Fourier.

5. Marco teórico

5.1 Mantenimiento basado en la condición

El diagnóstico y la detección de problemas de una máquina en funcionamiento es el método más conveniente, en el que se puede detectar los problemas anticipadamente cuando los efectos que causan el fallo son incipientes y no afectan al funcionamiento del equipo, lo que permite diagnosticar el problema de funcionamiento [17]. Con lo dicho anteriormente el Mantenimiento Basado en la Condición (MBC) es un programa de mantenimiento basado en la recopilación de datos mediante el Monitoreo de Condición (MC) de la máquina [18]. Consiste en cinco pasos principales como se observa en la Figura 1.

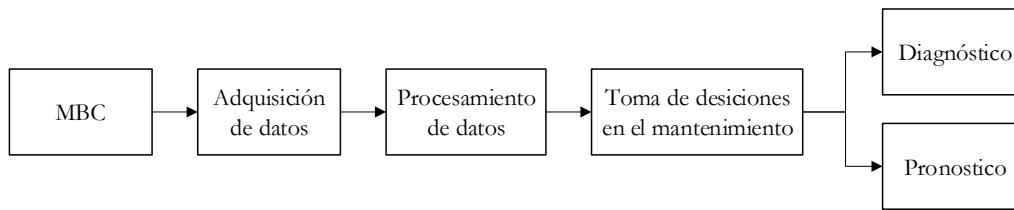


Figura 1. Pasos de mantenimiento basado en la condición [Fuente: Autor].

La adquisición de datos es un paso fundamental en el monitoreo de condición de la máquina para los diagnósticos y el pronóstico de fallos. En el procesamiento de información obtenida se maneja y se analiza para una mejor comprensión e interpretación de datos. Por consiguiente, se recomienda tomar decisiones para las acciones de mantenimiento basadas en los resultados de diagnóstico y pronóstico de fallos que son importantes en el MBC [13]. La información debe ser disponible y manejable lo que permite construir reglas de diagnóstico, además establecer niveles de alarmas cuando se presenten condiciones de fallo. El programa trata de la detección, aislamiento e identificación de fallos cuando se produzcan.

El MBC se ha introducido tanto que es una forma eficiente de asegurar un nivel satisfactorio de la máquina durante su vida útil. Con el rápido avance en la tecnología, las industrias se han vuelto más complejas, al tiempo que se requiere mayor calidad y fiabilidad en sus productos, con lo cual el costo de mantenimiento es cada vez mayor. Las industrias están empleando enfoques de mantenimiento más eficientes como el MBC para manejar las situaciones en las máquinas, en la cual, si se maneja correctamente se podría reducir los costos de mantenimiento y horas de paradas programadas [4].

El objetivo del MBC es conocer la condición de la máquina, por lo tanto, se pueda determinar su operación de manera segura, eficiente y con economía. Esta estrategia asume que hay características medibles y observables que son indicadores de la condición de la máquina. Se puede clasificar los beneficios del MBC en:

- Detectar condiciones que pueden ser causa de falla (proactiva).
- Detectar problemas en la máquina (predictiva).
- Evitar fallos catastróficos (predictiva).
- Diagnóstico de la causa de la falla (proactiva).
- Pronóstico de utilidad (predictiva).

La toma de decisiones a tiempo permite evitar que el fallo se presente (proactivo) o eliminar la posibilidad de un fallo catastrófico (predictivo) [19].

5.2 Monitoreo de condición

El Monitoreo de Condición (MC) es un componente esencial para poder efectuar un programa de mantenimiento efectivo en combinación con sistemas de detección de fallos, proporciona información de diagnóstico acerca del estado de la máquina, con la información se programa tareas de mantenimiento se procede a reparar antes que se agrave y genere una interrupción del funcionamiento del equipo [20].

El MC actual tiene como base información de algunas señales como vibración, acústica, temperatura, entre otras. Dentro de las técnicas más utilizadas para evaluar la condición de los engranes en máquinas rotativas se encuentra el análisis de vibración. El MC consiste en recopilar datos del sistema a través de diversos sensores y luego procesar los datos para obtener información significativa; diversas técnicas de monitoreo de la condición se pueden utilizar para detectar condiciones de fallo e incluso identificar qué componente tiene el fallo en la máquina, el monitoreo de la condición es un medio para implementar el MBC [4].

El MC es el proceso que consiste en determinar el estado de la máquina durante su funcionamiento. Las claves para el éxito de un programa de monitoreo de condición son [21]:

- Saber qué es lo que se debe escuchar.
- Cómo interpretarlo.
- Cuando poner en práctica ese conocimiento.

El uso correcto del programa permite reparar los componentes con fallo incipiente antes de que se produzca un fallo severo. Un sistema de MC puede dar información relevante sobre la salud de los equipos de producción para permitir obtener la mayor eficiencia posible, disminuir paros y aumentar la capacidad de producción en cualquier industria [22].

Existen tres estrategias principales para administrar el mantenimiento de los activos, particularmente los rotativos: reactiva, programada y predictiva. El mantenimiento reactivo puede ser útil para equipos auxiliares de bajo costo, cuya importancia para la producción y la seguridad es mínima, pero es en extremo costoso en maquinaria crítica. Los mantenimientos programados están basados en información estadística, por lo que no garantizan que la máquina no falle inesperadamente, ni que el mantenimiento (y la inversión que implica) sean verdaderamente indispensables [23].

En una estrategia de mantenimiento predictivo, los activos son monitoreados de manera constante para encontrar signos de desgaste a través del MC. Con los parámetros obtenidos, puede hacerse un perfil completo de la máquina que combine información histórica con la

inmediata. Esta información ayuda a predecir su comportamiento futuro y estimar el momento de falla [23]. Así, pueden programarse los tiempos de mantenimiento cuando sea conveniente como se observa en la Figura 2.

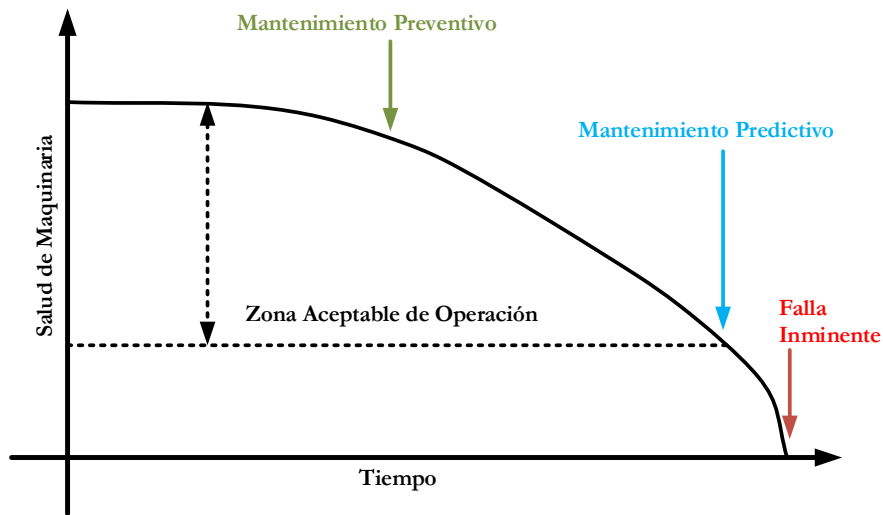


Figura 2. Estrategia de mantenimiento [23].

El monitoreo de condición es un concepto que ha sido utilizado desde hace mucho tiempo. Por lo general los operadores y mecánicos perciben señales de la maquinaria con sus propios sentidos. Ahora lo que se pretende es amplificar estas señales y aislarlas para incrementar su percepción mediante tecnología de medición.

Las técnicas de MC se clasifican en:

- Inspecciones de la maquinaria.
- Mediciones de desempeño de la maquinaria.
- Monitoreo de las condiciones dinámicas de la maquinaria.
- Monitoreo de los fluidos.
- Monitoreo de las partículas de desgaste.
- Monitoreo de vibración y acústica.

5.3 Monitoreo de vibración

Primero se define que es una vibración de forma sencilla; se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio [24]. También es una señal compuesta de varias ondas sinusoidales generadas por cada uno de los componentes que se encuentran en una máquina, la representación más sencilla de la vibración es analizar el movimiento que experimenta una masa suspendida de un resorte cuando es soltada desde una distancia determinada como se observa en la Figura 3.

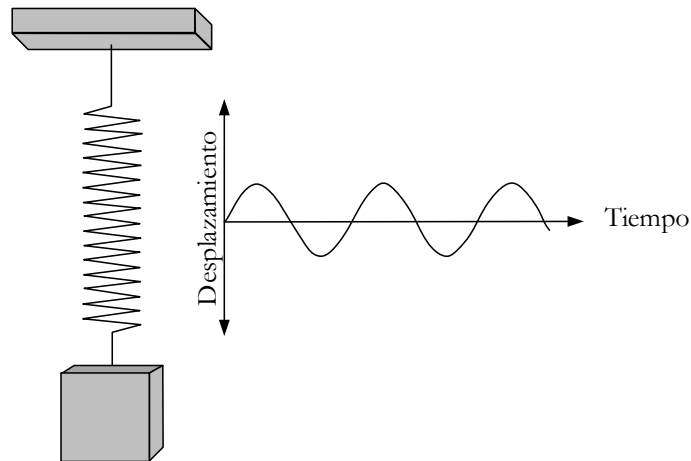


Figura 3. Representación básica de la vibración en el tiempo [24].

El análisis de vibración como herramienta para detectar problemas en máquinas rotativas, ha generado un gran impacto en la industria por su capacidad para diagnosticar de manera más temprana posibles fallos en sistemas mecánicos empleados en diferentes sectores de la industria [25]. En el MC, el análisis de vibraciones es la técnica más utilizada, debido a que puede identificar con gran precisión el 90% de todos los fallos de maquinaria por el cambio en las señales de vibración que se producen, además, el nivel de señal puede dar una predicción con gran exactitud de una futura falla [26].

En el análisis de maquinaria rotativa hay dos temas de interés como las resonancias estructurales que amplifican las vibraciones y la vibración provocada directa o indirectamente por la propia rotación de la máquina [27]. El segundo en el cual se va a centrar este proyecto, las vibraciones causadas son por engranajes con fallo.

Los parámetros característicos de las vibraciones tomando como ejemplo de la Figura 4 son:

- **Desplazamiento:** Indica la cantidad de movimiento que la masa experimenta con respecto a su posición inicial.
- **Periodo:** Es el tiempo que tarda la masa en realizar un ciclo completo.
- **Frecuencia:** Es el número de ciclos que ocurren en una unidad de tiempo.
- **Velocidad:** Se refiere a la posición del cambio de posición con respecto al tiempo.
- **Aceleración:** Proporciona la medida del cambio de la velocidad con respecto al tiempo.

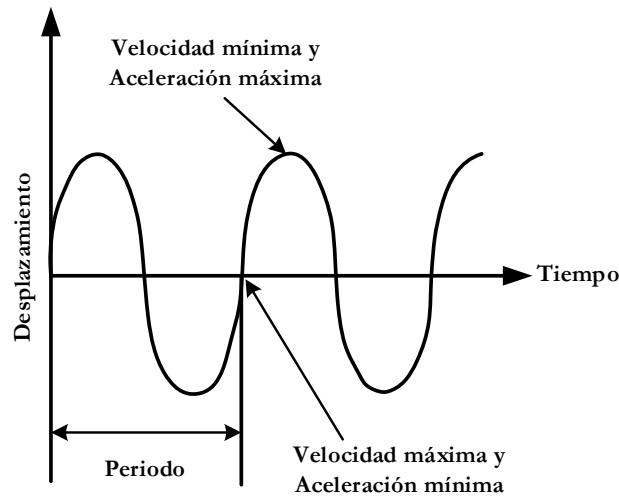


Figura 4. Desplazamiento en función del tiempo [Fuente: Autor].

Una máquina está conformada de diferentes elementos, es decir que trabajan en conjunto, la vibración de la maquina en sí es la suma de todas las señales provenientes de cada una de las piezas y dan como resultado una onda de señal en el tiempo de todos los componentes en uno solo gráfico como se observa en la Figura 5.

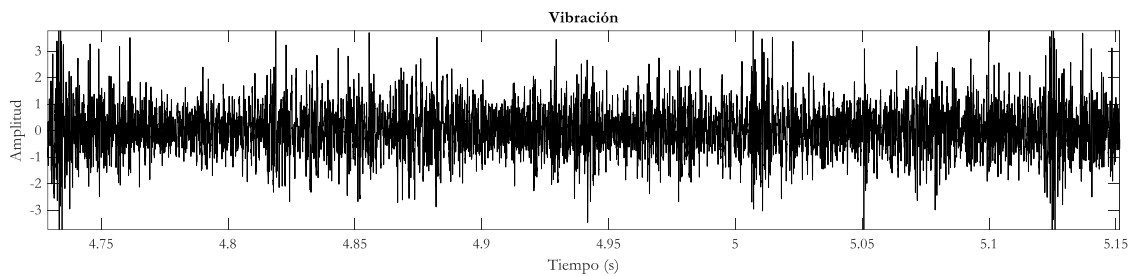


Figura 5. Señal de vibración de una máquina [Fuente: Autor].

5.3.1 Normas para el análisis de vibración

El análisis de vibración es una herramienta de monitoreo capaz de detectar fallos en maquinaria rotativa, por lo tanto, es necesario saber sus normativas para su correcta aplicación como se observa en la Tabla 2. En el ámbito existen dos normas internacionales que son; ISO y UNE, por consiguiente, se las divide en dos fases que son la instrumentación y severidad:

Tabla 2. Normas de instrumentación y severidad [28–32].

Normas para el análisis de vibración	
Instrumentación	Severidad
ISO 2954-2012: Vibración mecánica de maquinaria rotativa y recíproca. Requisitos para instrumentos para medir la severidad de la vibración.	ISO 18436-2: Monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas. Requisitos para la calificación y evaluación del personal. Parte 2: Monitoreo de condición de vibración y diagnóstico.

Normas para el análisis de vibración

Instrumentación	Severidad
UNE 21 328 75 (1): Características relativas a los transductores usados para la medición de choques y vibraciones.	ISO 15242-1: Rodamientos de rodillos. Métodos de medición de vibraciones. Parte 1: Fundamentos.
UNE 21 328 75 (2): Clases de captadores de vibración y elementos sensibles para los mismos.	ISO 20816-1: Vibración mecánica. Medición y evaluación de la vibración de la máquina. Parte 1: Directrices generales.
UNE 95 010 86: Vibraciones y choques, terminología.	

5.3.2 Defectos mecánicos en sistemas rotativos

El análisis de vibración ayuda a la detección de un fallo existente en la máquina a diagnosticar y sus tendencias que están comprendidas en las normas de medición. Con el programa de MBC se identificó los principales problemas mecánicos que causan las vibraciones mediante las frecuencias de fallo. La principal ventaja en esta técnica con respecto a otras técnicas es que se puede evaluar la máquina en funcionamiento evitando la pérdida de producción. En la Figura 6 se representan los problemas más comunes en máquinas rotativas.

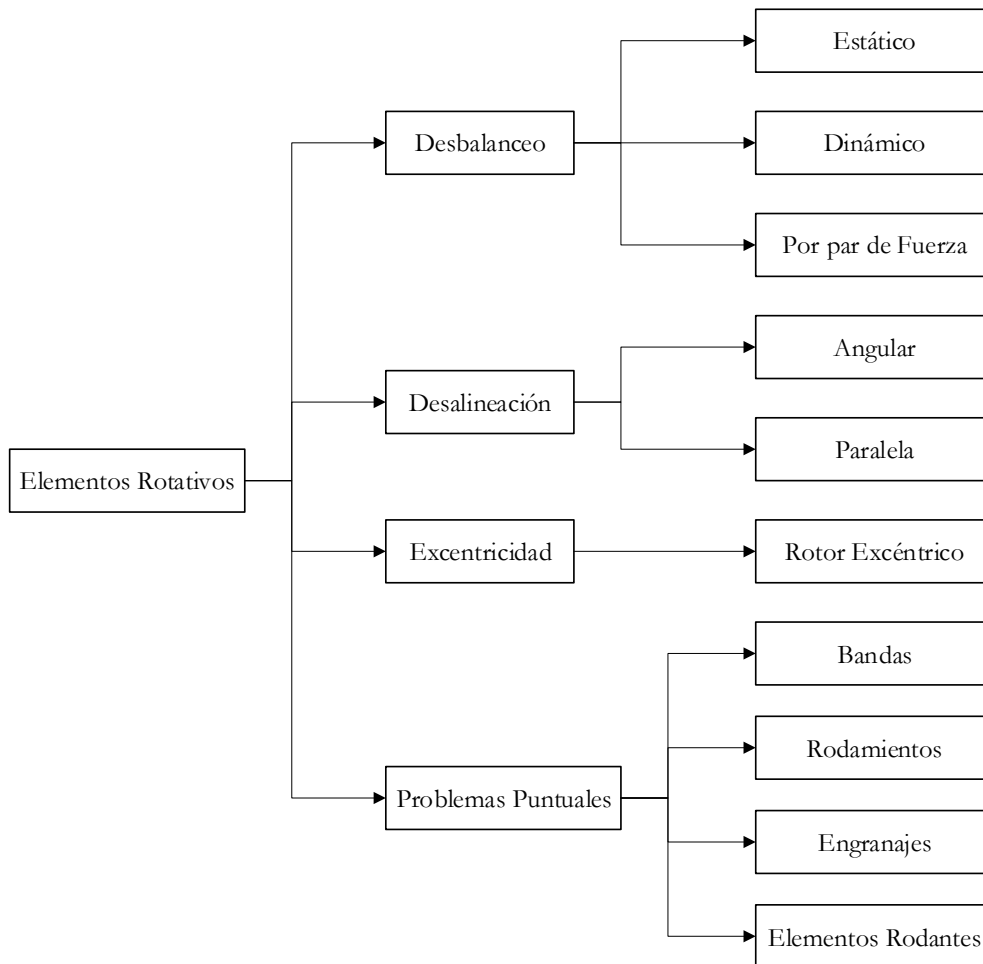


Figura 6. Problemas comunes en máquinas rotativas [24].

5.3.3 Características de la vibración

En la actualidad se utiliza el análisis de vibraciones con el fin de establecer el estado de la máquina y de elementos críticos por lo que se puede prevenir fallos a futuro. Al momento de analizar se cuantifica las frecuencias y amplitudes de las señales obtenidas. Con esto la frecuencia nos revela el problema de la máquina y la amplitud cuan severo es el problema.

Las vibraciones son de tres tipos:

- Vibración armónica
- Vibración periódica
- Vibración aleatoria

5.3.3.1 Vibración armónica

Una onda sinusoidal es la forma más simple de la vibración, se denomina armónica por la siguiente relación [33]:

$$y(t) = Y \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

Donde:

φ : es el ángulo de fase de la vibración.

ω : Velocidad angular.

t : Tiempo.

Y : Amplitud.

Si la velocidad angular es constante ω :

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

La frecuencia de oscilación f expresada en [Hz]:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} \quad (3)$$

Sustituyendo ω en la Ecuación 3, se obtiene el modelo matemático:

$$y(t) = Y \sin(\omega t + \varphi) = Y \sin(2\pi f t + \varphi) \quad (4)$$

En la Figura 7 se observa la generación de una onda armónica mediante el movimiento de un elemento giratorio que se repite en un determinado tiempo.

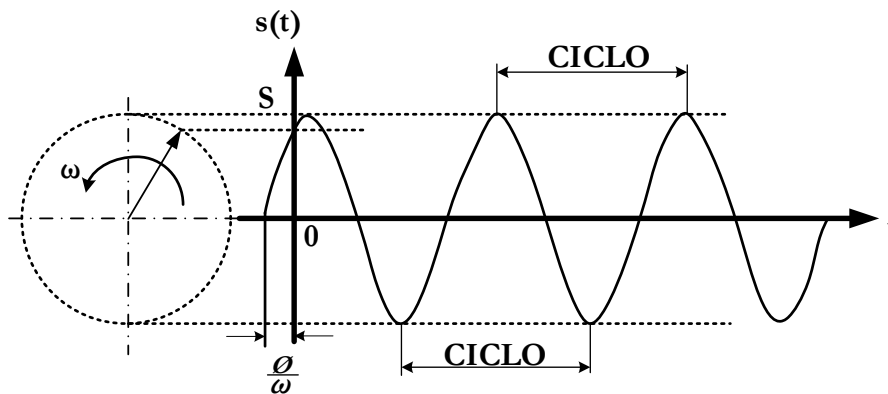


Figura 7. Generación de una vibración armónica [33].

5.3.3.2 Vibración periódica

Es la que se repite después de un intervalo de tiempo conocido como periodo de la vibración y está caracterizada por su periodo de tiempo muy bien definido. En la Figura 8 se muestra

la vibración producida por una transmisión dentada, así se puede producir una vibración periódica [34].

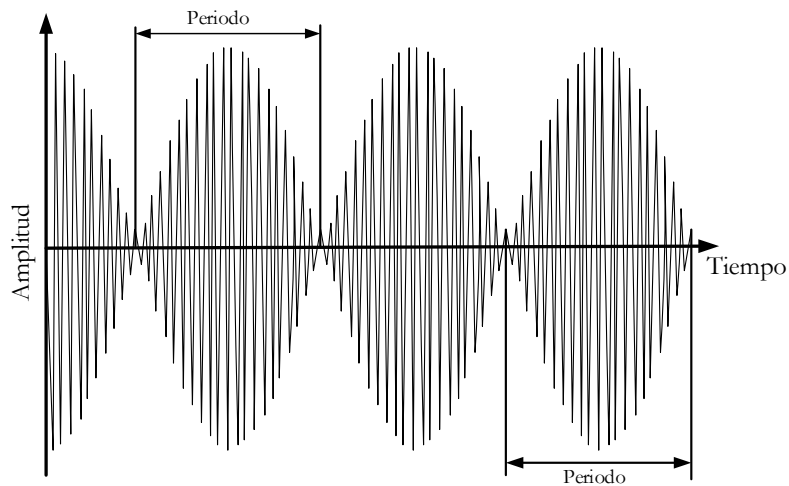


Figura 8. Vibración periódica [Fuente: Autor].

5.3.3.3 Vibración aleatoria

En una vibración aleatoria el espectro está constituido por infinitas señales armónicas, cada una con su respectiva amplitud y frecuencia correspondiente a cada componente de la máquina como se observa en la Figura 9.

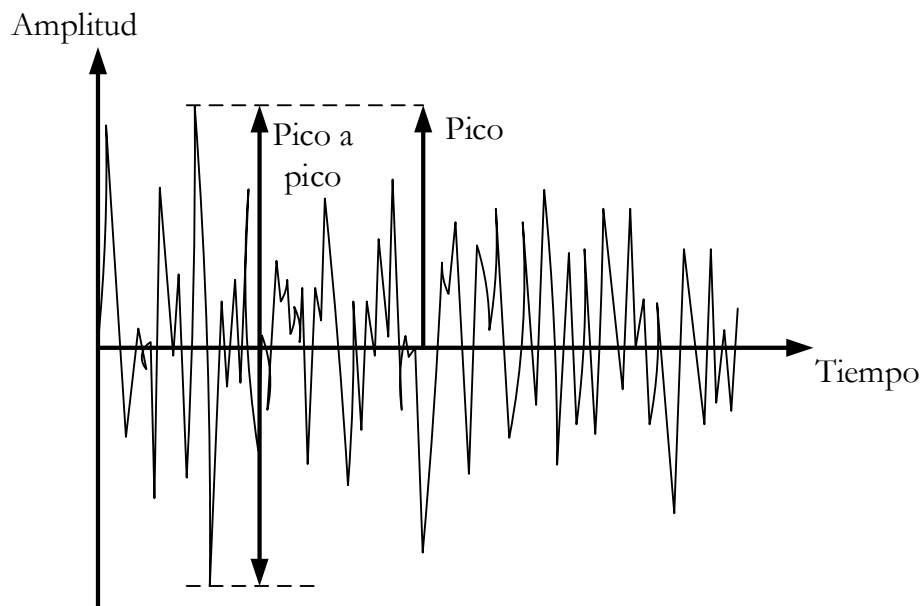


Figura 9. Espectro de vibración aleatorio de una maquina [35].

5.4 Monitoreo acústico

Las señales acústicas son un conjunto de vibraciones que se propagan por un medio elástico como el aire algunas son audibles para el ser humano, pueden ser fácilmente distorsionadas por los ruidos y dependen en gran medida de los parámetros del proceso, por lo que se

requieren técnicas avanzadas de procesamiento de señales [36]. Los avances en las técnicas de procesamiento de señales y capacidades informáticas han permitido que el monitoreo de señales acústicas desempeñe un papel importante en el diagnóstico de fallos en máquinas rotativas [37]. El monitoreo de señales acústicas proporciona datos confiables sobre diferentes condiciones de degradación de elementos mecánicos específicos, por lo que los algoritmos de aprendizaje automático pueden ser empleados para la detección temprana de fallos en un sistema real [38].

De manera similar a las señales de vibración, las señales acústicas cambian gradualmente mientras los componentes desarrollan fallos y cada fallo produce sonidos diferentes. Debido a estos cambios, se puede determinar la condición de la máquina [39].

5.4.1 Diferencia entre emisión acústica y señal acústica

La Emisión Acústica (EA) se refiere a la generación de ondas elásticas transitorias producidas por una rápida liberación de energía de una fuente localizada dentro del material, cuando una estructura está sometida a una carga externa, las fuentes localizadas desencadenan la liberación de energía en forma de ondas de tensión, que se propagan a la superficie y que son fácilmente detectadas por los sensores. Una característica principal de las ondas EA es que no viajan a través del aire y en su lugar viajan a través de un material sólido en un rango de frecuencia típico más allá del umbral auditivo humano de 1 kHz a 1 MHz [40].

Las Señales Acústicas (SA) se refieren a las señales de sonido generadas debido a la liberación de energía de deformación y propagadas en el aire, se pueden monitorear usando sensores sin contacto, los cuales son detectados por micrófonos generalmente, en el rango de frecuencia audible por el ser humano de 20Hz a 20kHz [41]. En la Figura 10 se muestra el método de detección para EA y SA con la ubicación de sus respectivos sensores en una caja de engranajes [42].

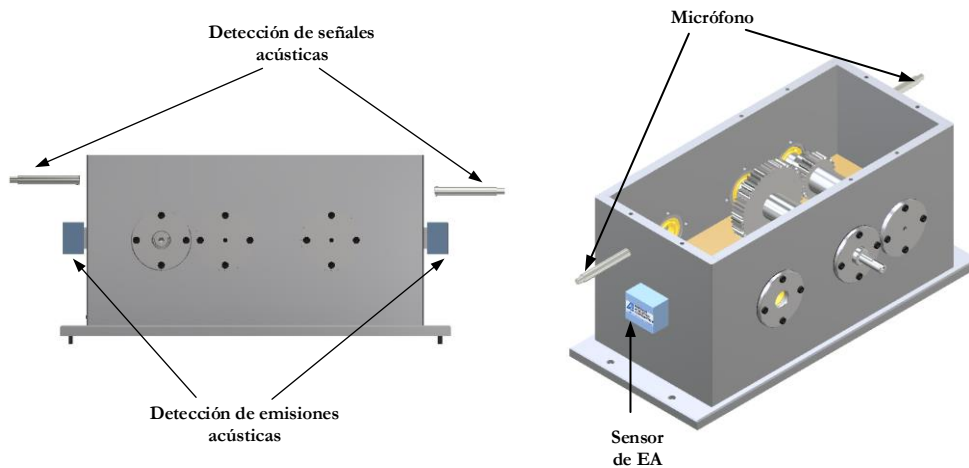


Figura 10. Ubicación típica de sensores de emisiones acústicas y señales acústicas en cajas de engranes [Fuente: Autor].

En la Tabla 3 se pueden observar los indicadores más significativos que marcan diferencias entre el monitoreo de Emisiones Acústicas y el monitoreo de Señales Acústicas.

Tabla 3. Diferencia entre emisión acústica y señales acústicas [11].

Indicador	Emisión Acústica	Señales Acústicas
Medio de Propagación	Sólidos	Aire
Rango de frecuencias	1kHz~1MHz	20Hz~22kHz
Sensores usados generalmente	Transductores piezoeléctricos	Micrófonos de condensador o capacitivos
Contacto con la máquina	Si	No
Montaje en la máquina	En la superficie	Alrededores

5.4.2 Historia del monitoreo acústico

En la Figura 11 se presenta una línea de tiempo de la historia del monitoreo acústico hasta la actualidad [11].

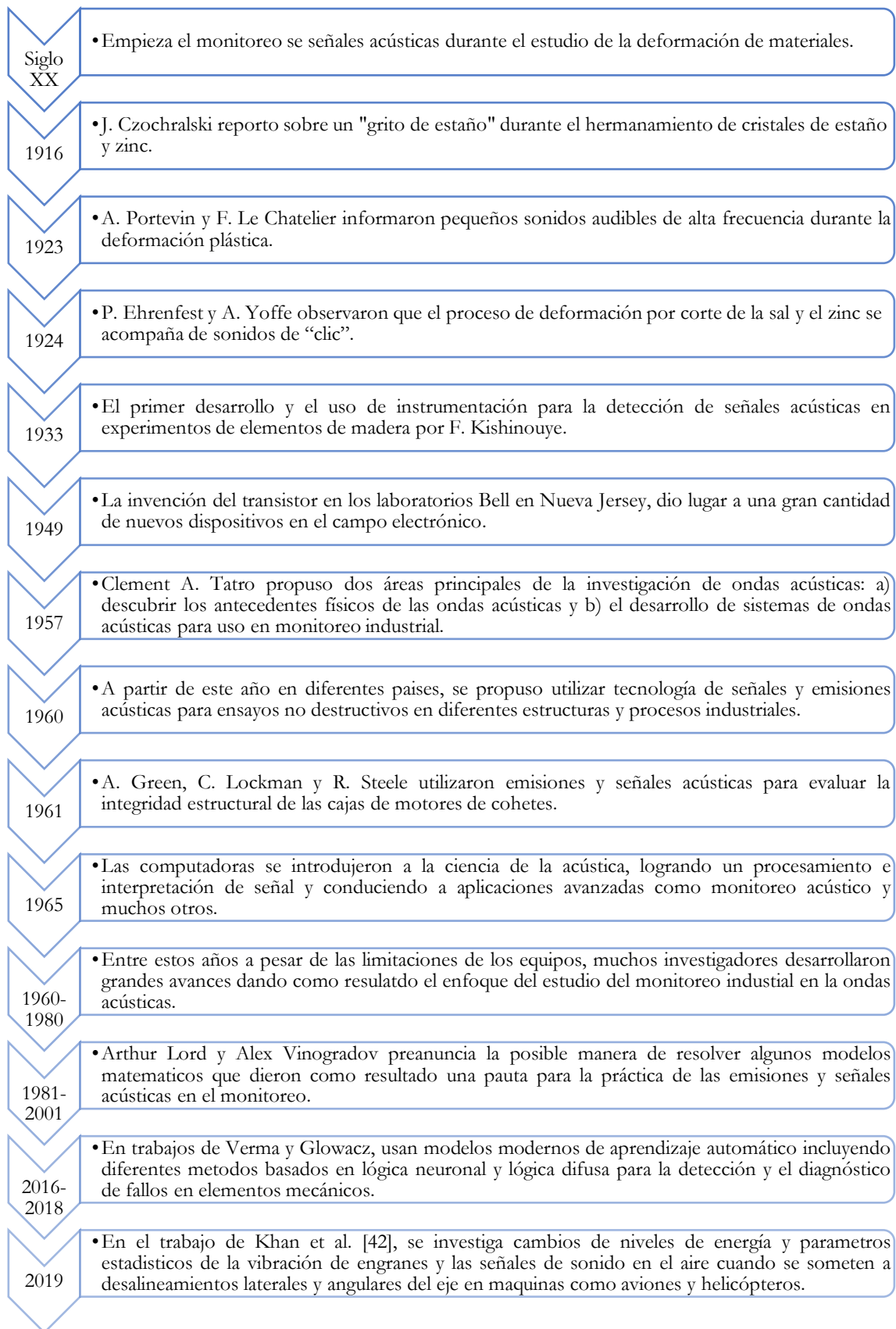


Figura 11. Puntos importantes en la historia del monitoreo acústico [11].

5.4.3 Ventajas y limitaciones del monitoreo de señales acústicas

Analizar una señal captada mediante sensores acústicos, permite obtener la información necesaria para conocer el estado de un componente dentro de la máquina, sus ventajas y limitaciones están relacionadas al análisis de señales por vibración mecánica, como se observa a continuación [7],[44–48]:

Ventajas:

- Las señales acústicas captadas por un micrófono reciben información de diferentes componentes, lo que significa que solo se requiere unos pocos sensores para monitorear todo el sistema.
- Permite la detección de las fuentes activas y procesos de degradación cambiantes, dependiendo de las propiedades de la materia y la geometría de la estructura, desde una distancia considerable.
- Las señales acústicas se pueden adquirir sin contacto con la máquina a distintas distancias de la carcasa evitando el riesgo de accidentes lo cual elimina la necesidad de la implementación de sensores de vibración de alta temperatura, con sus consideraciones de montaje.
- Las señales acústicas son omnidireccionales de modo que al colocar el micrófono puede colocarse en cualquier punto alrededor de un campo esférico donde se generan las señales.
- Los micrófonos pueden captar fuentes de sonidos en áreas que no son accesibles por otros sensores.

Limitaciones:

- La toma de señales puede resultar complicado debido a la presencia de ruidos provenientes de fuentes externas al entorno donde se realiza la medición o la ubicación de otras máquinas que estén operando dentro del mismo campo de medición acústico.
- Hay pocos micrófonos lo suficientemente robustos como para funcionar en un entorno industrial práctico, por lo que la elección de los sensores es limitada.
- Debido a la sensibilidad a otras fuentes de ultrasonidos, se requiere sensores altamente especializados y procesamiento de señales que permitan aislar apropiadamente el comportamiento que se busca.

- Los cambios de temperatura, humedad y corrientes de aire pueden afectar a la sensibilidad de los micrófonos.
- Si las fuentes acústicas están ubicadas en un espacio cerrado, las limitaciones afectaran las características básicas de la fuente acústica y aumentará las dificultades para el diagnóstico de fallos.

5.5 Señales acústicas

5.5.1 Principio físico de la acústica

Cuando a un material sólido se le aplica una fuerza externa, este sufre una deformación elástica o plástica, es decir, consume energía de deformación. Por lo tanto, la mayor parte de la energía de deformación se libera en ese instante. Simultáneamente, la energía restante se consume para generar ondas acústicas y calor, es decir, las ondas acústicas generadas se dividen en dos tipos; en emisiones acústicas y en señales acústicas [42].

Una señal acústica es una vibración mecánica que se propaga a través de un medio material elástico y denso (habitualmente el aire), producto de la antes mencionada liberación de energía de deformación de un material. Según el rango de frecuencias de estas señales generadas se pueden dividir en[49]:

- **Los infrasonidos:** son señales acústicas cuya frecuencia está por debajo del espectro audible del oído humano, es decir por debajo de 20Hz.
- **Los sonidos:** son señales acústicas cuya frecuencia está comprendida entre 20Hz y 20000Hz y son audibles para el oído humano.
- **Los ultrasonidos:** son señales acústicas que se encuentran por encima del rango audible, es decir, su frecuencia es superior a 20000Hz.

En la Figura 12 se presenta el espectro acústico donde se puede diferenciar el rango de frecuencia para cada tipo de onda.

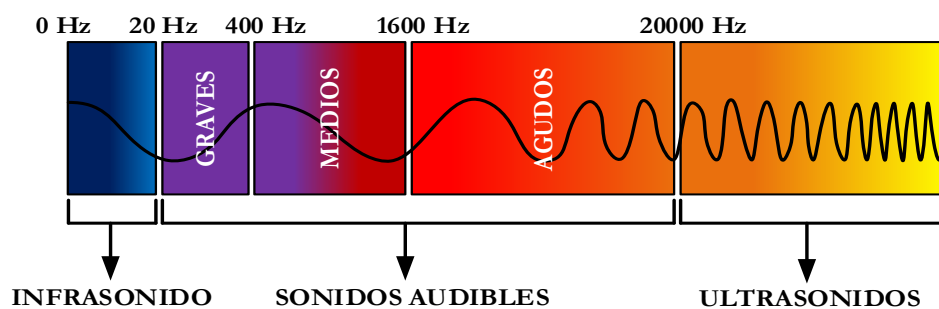


Figura 12. Espectro acústico [Fuente: Autor].

En este trabajo se adquieren señales acústicas que están por debajo de los 20Hz hasta los 22KHz, lo que supera el rango de la audición humana, por lo cual se utiliza un micrófono con un rango de 3.5Hz a 20000Hz para la adquisición.

5.5.2 Onda acústica

5.5.2.1 Definición de onda acústica

El sonido es el fenómeno de propagación en forma de ondas elásticas a través de un determinado medio (gas, fluido, plasma o sólido) que está generando el movimiento vibratorio de un cuerpo. Consiste en ondas omnidireccionales en el dominio espacial y en ondas longitudinales en el dominio temporal. Sus magnitudes son la longitud de onda, la frecuencia, el período y la amplitud, que indica la cantidad de energía que contiene la señal acústica. La fase representa el retardo relativo en la posición de una onda con respecto a otra, cuando hay una superposición de diferentes ondas. El sonido a través del aire tiene una velocidad de transmisión de 331,5m/s, cuando la temperatura es de 0 grados, la presión atmosférica es de 1 atm (nivel del mar) y la humedad relativa del aire es del 0% [50].

En la Figura 13 se muestra cómo se origina la onda, se considera una superficie que oscila horizontalmente, cuando la superficie se mueve hacia la derecha, se desplaza la cantidad de aire que había en el espacio, aumentando la densidad de este en la zona adyacente a la superficie. Esta zona de compresión de aire tiene por tanto mayor presión que la que había antes en la atmósfera. Este fenómeno descrito se repite a las siguientes zonas sucesivamente. Luego cuando la superficie se mueve hacia la izquierda, se aumenta la cantidad de aire en la zona adyacente a la superficie, generando rarefacciones de partículas en el mismo lugar [51].

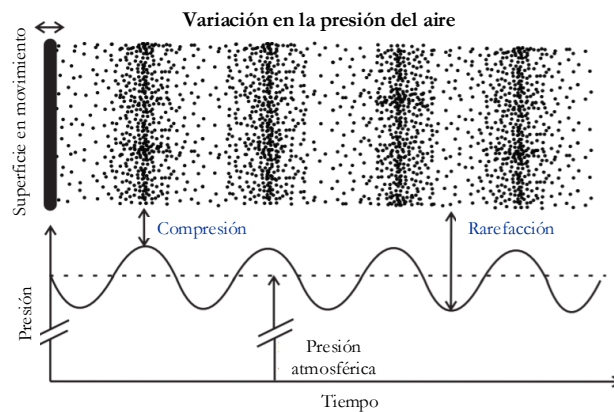


Figura 13. Esquema de generación de la onda acústica en una superficie oscilante [51].

El sonido audible es la sensación percibida por el oído, que recibe las variaciones de presión generadas por el movimiento vibratorio de los cuerpos sonoros. Éstos se transmiten por el

medio que los separa, que generalmente es el aire. Los diferentes organismos en la naturaleza que disponen de percepción sonora tienen un rango audible variable. Para el ser humano el rango audible oscila de media entre los 25Hz y los 16000Hz, llegando hasta los 20000Hz en algunos casos. La variabilidad humana, así como la edad, influyen en este rango.

En general, a medida que las ondas viajan, las partículas del fluido vibran para producir cambios en densidad y presión a lo largo de la dirección de movimiento de la onda. Si la fuente de generación de las ondas vibra sinusoidalmente, las variaciones de presión también serán sinusoidales [51].

5.5.2.2 Propagación de la onda acústica

Las ondas acústicas son un tipo particular de ondas elásticas que pueden producirse y propagarse en un medio que presente la propiedad de poseer elasticidad y masa, como el aire, agua, acero, concreto, etc. Recalcado aquello, la propagación se centra en dos tipos básicos de ondas elásticas: transversales y longitudinales. Estas ondas se identifican según la dirección del movimiento de la partícula del medio en relación con la dirección en la que viaja la onda [52]. En la Figura 14 se muestra una representación de las ondas longitudinales y transversales.

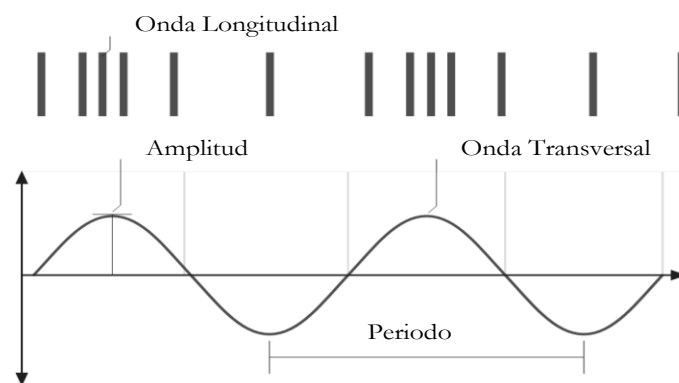


Figura 14. Ondas longitudinales y transversales [52].

5.5.2.3 Velocidad de propagación

Es la velocidad a la que se propaga la onda acústica en un medio elástico y solo dependerá de las características de éste. Se representa por c y se mide en m/s . es el desplazamiento de la onda sonora en la unidad de tiempo, en un determinado medio, esta velocidad es constante siempre que no varíen las condiciones del medio. La velocidad del sonido depende de la temperatura absoluta del aire y está dada por:

$$c = 332 \sqrt{1 + \frac{t}{273.1}} \quad (5)$$

Donde:

c = es la velocidad sónica en m/s.

t = es la temperatura en °C.

En condiciones normales la velocidad de propagación del aire es de aproximadamente 344m/s a 20°C , se observa en la Tabla 4 las velocidades de propagación de los líquidos, sólidos y gases respectivamente.

Tabla 4. Velocidad de propagación de sólidos, líquidos y gaseosos [53].

Sustancia	Velocidad (m/s)	Estado
Aluminio	5140	Sólido
Cobre	3560	Sólido
Hierro	5000	Sólido
Plomo	1227	Sólido
Mármol	3810	Sólido
Agua	1473	Líquido
Alcohol etílico	1220	Líquido
Gasolina	1166	Líquido
Hidrogeno	1262	Gaseoso
Vapor de Agua	401	Gaseoso
Aire	344	Gaseoso
Oxigeno	317.2	Gaseoso
Anhídrido Carbónico	258	Gaseoso

5.5.2.4 Propiedades de la onda acústica

Todas las ondas acústicas pueden exhibir los siguientes fenómenos: reflexión, impedancia, refracción, interferencia y difracción.

5.5.2.4.1.1 Reflexión acústica

Cuando una onda acústica que se transmite en un medio determinado choca con los objetos presentes, parte de la energía es reflejada [54]. La onda reflejada conserva la misma frecuencia y longitud que la onda incidente, pero disminuye su amplitud. Además, el comportamiento de estas ondas reflejadas depende de la forma geométrica y de las características de la superficie de los objetos contra las que chocan. Si la superficie de impacto es convexa la onda se dispersará y si es cóncava se produciría un efecto de concentración [52], estos fenómenos se presentan en la Figura 15.

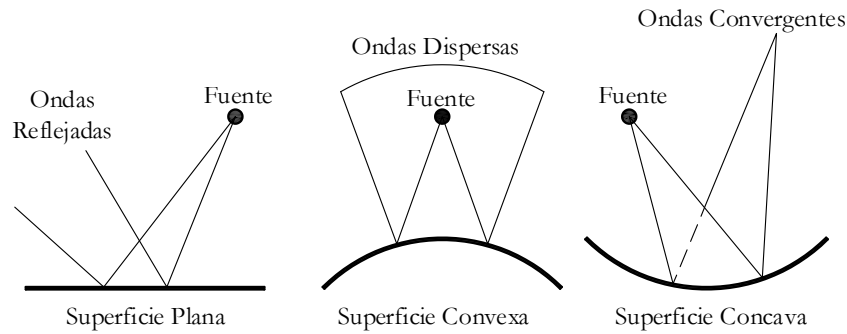


Figura 15. Reflexiones acústicas en distintas superficies [11].

5.5.2.4.1.1 Impedancia acústica

Para las ondas acústicas la impedancia denota por la variable Z se define como la relación entre la presión acústica y la velocidad de la partícula, representa la resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre este que está aquí colgado, es decir una forma de disipación de energía de las ondas que se desplazan en un medio [55]. Las unidades de impedancia son Rayl, llamado así en honor a Lord Rayleigh; el valor de $1 \text{ Rayl} = 1 \text{ Pa s/m}$.

A menudo se habla de la impedancia característica de un medio (un fluido o sólido); en el caso de acústica se habla del fluido el cual es el medio de transmisión de la onda. En la Tabla 5 se presentan algunas características físicas de algunos fluidos, entre ellas se indica el valor de impedancia [52].

Tabla 5. Características físicas de algunos fluidos [54].

Fluido	Temperatura °C	Densidad kg/m ³	Velocidad m/s	Impedancia característica rayls	Coefficiente de viscosidad (N*s)/m ²
Líquido					
Agua pura	20	998	1,481	1,48x10 ⁶	0,001
Agua del mar	13	1026	1,500	1,54x10 ⁶	0,001
Alcohol	20	790	1,150	0,91x10 ⁶	0,0012

Fluido	Temperatura °C	Densidad kg/m ³	Velocidad m/s	Impedancia característica rayls	Coefficiente de viscosidad (N*s)/m ²
Glicerina	20	1260	1,980	2,5x10 ⁶	1,2
Gas					
Aire	0	1293	336,6	428	0,000017
Aire	20	1,21	343	415	0,0000181
Oxigeno	0	1,43	317,2	453	0,00002
Vapor	100	0,6	404,8	242	0,000013

5.5.2.4.1.1 Refracción acústica

La refracción es un cambio en la dirección de propagación de la onda cuando pasa de un medio a otro a través de una interfaz, como se presenta en la Figura 16. Este cambio de dirección ocurre cuando la velocidad de la onda es diferente en los dos medios. Si existe un ángulo entre la normal al plano del límite y la onda incidente, hay un breve intervalo de tiempo cuando parte de la onda está en el medio original (viajando a una velocidad) y parte de la onda está en el segundo medio (viajando a una velocidad diferente). Esto causa la flexión de las ondas a medida que pasan del primer medio al segundo. No hay flexión en incidencia normal [54].

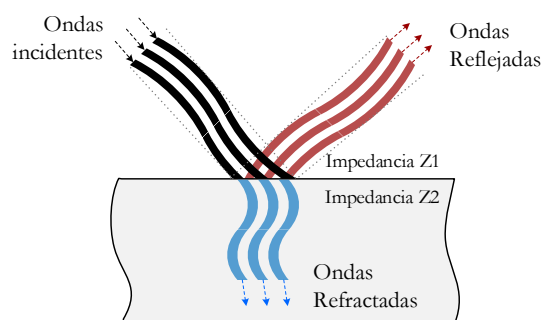


Figura 16. Refracción de onda acústica [52].

5.5.2.4.1.1 Interferencia espacial

La interferencia es un fenómeno que ocurre cuando dos o más ondas se suman. Considere dos ondas transversales idénticas que viajan hacia la derecha (una después de la otra) hacia abajo de una cuerda hacia un límite al final. Cuando la primera onda encuentra el límite, se refleja y viaja en dirección hacia la izquierda. Cuando se encuentra con la segunda onda, que se mueve hacia la derecha, las dos ondas se suman linealmente (de acuerdo con el principio de superposición). La amplitud de desplazamiento en un punto en el espacio donde se

combinan dos ondas es mayor o menor que la amplitud de desplazamiento de cada onda. El desplazamiento máximo posible de la combinación es la suma de los desplazamientos máximos de las dos ondas (interferencia constructiva completa), el desplazamiento mínimo posible es cero (interferencia destructiva completa para ondas de igual amplitud). Es importante tener en cuenta que las ondas solo interfieren cuando pasan entre sí [36]. La Figura 17 muestra los dos casos especiales de interferencia destructiva y constructiva completa (para mayor claridad solo se dibuja una porción de la onda).

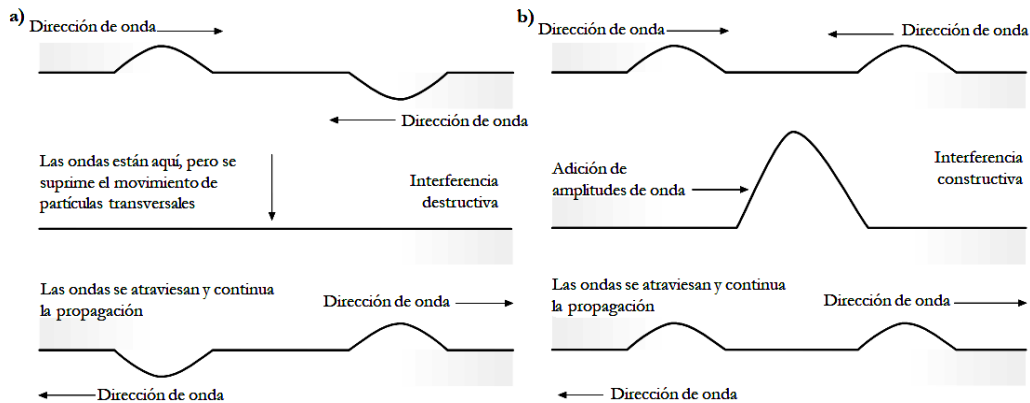


Figura 17. Dos ondas que atraviesan una a otra y que presentan interferencia: a) destructiva y b) constructiva [52].

5.5.2.4.1.1 Interferencia temporal

Es posible que dos ondas interfieran debido a una diferencia de frecuencia (que se conoce como interferencia temporal). Considere dos ondas acústicas sinusoidales con frecuencias ligeramente diferentes que llegan al mismo punto en el espacio, se puede suponer que estas dos ondas tienen la misma amplitud. El principio de superposición informa que la presión resultante causada por las dos ondas es la suma de la presión causada por cada onda individualmente. Como la diferencia de frecuencias es pequeña, las dos ondas pueden estar en fase, causando interferencia constructiva y reforzándose entre sí. Durante un cierto período de tiempo, la diferencia de frecuencias hace que las dos ondas se desfasen, causando interferencia destructiva.

Eventualmente, las ondas vuelven a estar en fase y de manera constructiva, vuelven a interferir. La amplitud de la combinación aumentará y disminuirá de forma periódica. Este fenómeno es el conocido como el golpeteo de ondas o palizada. En la Figura 18 se muestra un ejemplo de la superposición de dos ondas que tienen dos frecuencias que son ligeramente diferentes; la frecuencia de golpeteo corresponde a la diferencia entre las dos frecuencias que están golpeando [52].

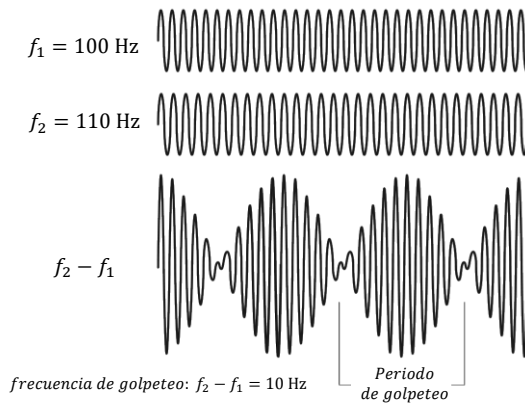


Figura 18. Golpeteo de ondas con frecuencias ligeramente diferentes [52].

5.5.2.4.1.1 Difracción

El fenómeno de la difracción es la flexión de una onda alrededor de un borde. La cantidad de flexión que ocurre depende del tamaño relativo de la longitud de onda en comparación con el tamaño del borde con el que interactúa. La flexión por difracción es el resultado de la interferencia de ondas [52]. Cuando la onda choca un obstáculo este genera nuevas ondas, produciéndose zonas de sombra acústica, en las cual la onda origina ya no puede propagarse debido a las interrupciones de las nuevas ondas generadas; la Figura 19 muestra un ejemplo de aquello. La forma en que se produce el fenómeno de difracción en diferentes tipos de obstáculos se presenta en la Figura 20.

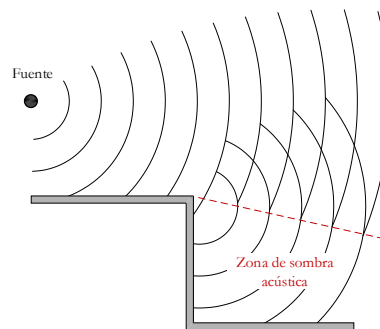


Figura 19. Difracción acústica; formación de sombras acústicas [54].

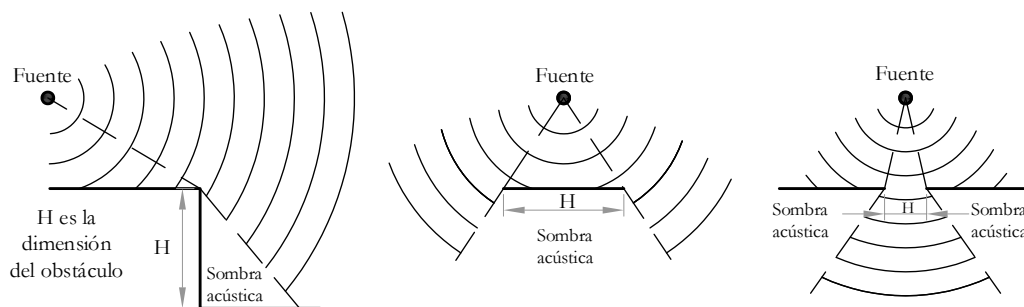


Figura 20. Difracción acústica sobre diferentes superficies [54].

5.5.2.5 Ecuación de la onda acústica

La ecuación de onda acústica o también llamada ecuación gobernante para la transmisión de ondas sonoras, puede escribirse en coordenadas cartesianas (x, y, z) tal como se detalla en la Ecuación 6. Para mejor comprensión de la ecuación se presentan el siguiente ejemplo: se considera un tubo cilíndrico de sección transversal A y extensión infinita, como el indicado en la Figura 21, en dos instantes de tiempo. Las dos regiones sombreadas corresponden a la misma porción de gas. En la parte superior de la figura la presión total es constante e igual a la presión atmosférica, P_o . En la parte inferior la porción de aire se ha desplazado una distancia y , y su espesor pasó de valer Δx a valer $\Delta x + \Delta y$. La presión se ha modificado en un valor p en la cara izquierda y $p + \Delta p$ en la cara derecha, dando lugar a una fuerza neta que actúa sobre el volumen de gas. Tanto el desplazamiento como el incremento de presión son funciones de las dos variables x y t , es decir, $y(x, t)$ y $p(x, t)$. Se llama presión sonora al incremento de presión $p(x, t)$ [56].

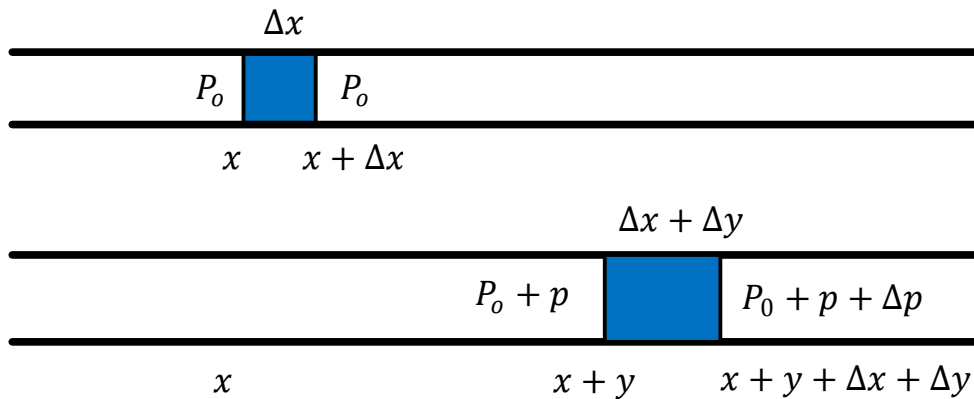


Figura 21. Un tubo de sección constante en dos instantes de tiempo diferentes [56].

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (6)$$

Donde:

p = es la presión acústica instantánea, en Pa o lb_f/ft^2 .

c = es la velocidad del sonido, en m/s o ft/s.

t = es la coordenada en el tiempo, en segundos (s).

Además, la ecuación de onda posee dos restricciones relevantes: la primera, que los efectos de disipación de energía son despreciables, y la segunda, que la amplitud de la onda debe ser relativamente inferior en comparación con la presión atmosférica; si estas dos condiciones

no se cumplen en cualquier situación física analizada, los resultados del análisis carecerán de valor [57].

Ahora bien, las ecuaciones que normalmente se tratan en acústica son lineales en las amplitudes de campo, donde los campos de interés son cantidades que dependen de la posición, presión y el tiempo [52]. La ecuación de onda, cuando se resuelve con sujeción a las condiciones iniciales y de contorno pertinentes, produce expresiones para todas las cantidades acústicas en una situación particular; es así como la ecuación de onda también puede escribirse en términos del desplazamiento instantáneo de partículas, y en términos de la presión acústica instantánea p [57], tal como se muestra en la Ecuación 7 y Ecuación 8 respectivamente.

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (8)$$

Donde:

ξ es el desplazamiento de partículas acústicas, en m o ft.

5.5.2.5.1.1 Solución de la onda acústica

La solución general de la ecuación de onda acústica en coordenadas cartesianas se muestra en la Ecuación 9, donde A y B son constantes de integración que se determinan a partir de las condiciones de contorno; en cambio, la solución general para ondas planas se encuentra en la Ecuación 10 [57]. Estas ondas acústicas planas se definen como ondas progresivas libres unidimensionales que viajan en dirección “ x ” y que sus frentes de ondas son planos infinitos perpendiculares al eje “ x ” y paralelos entre sí en todo momento [54], tal como se presenta en la Figura 22. Las ondas planas son la forma básica para entender los fenómenos y propiedades de las ondas acústicas.

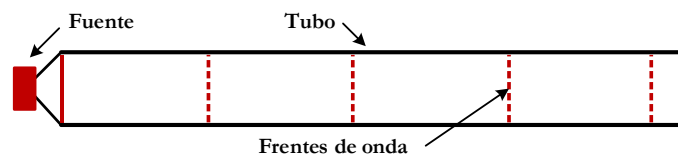


Figura 22. Ejemplo de ondas planas [58].

$$\psi(x) = Ae^{-j\omega t} + Be^{j\omega t} \quad (9)$$

$$\xi(x, t) = Ae^{j(\omega t - kx)} + Be^{j(\omega t + kx)} \quad (10)$$

Donde:

$\psi(x)$ es la función de amplitud, que depende de la coordenada x solamente, para ondas unidimensionales, en m o ft.

k es el número de onda, $k = \omega/c = 2\pi f/\lambda$, en m^{-1} o ft^{-1} .

ω es la frecuencia angular, en rad/s.

f es la frecuencia, en Hz.

λ es la longitud de onda, en m o ft.

La solución general implica dos términos: (a) Un término que contiene $(\omega t - kx)$, que representa una onda acústica que se mueve en la dirección positiva x , y (b) otro término que contiene $(\omega t + kx)$, que representa una onda acústica que se mueve en la dirección negativa x .

En coordenadas esféricas las soluciones de la ecuación de la onda deben ser desarrolladas a partir de la ecuación de la onda en una dimensión expresada en coordenadas de radio r (Ecuación 11). Por lo tanto, la Ecuación 12 representa la solución general para la función de amplitud, y la Ecuación 13 describe la solución general para la presión acústica instantánea.

$$\frac{\partial^2(pr)}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2(pr)}{\partial t^2} \quad (11)$$

$$r \psi(r) = Ae^{-jkr} + Be^{jkr} \quad (12)$$

$$p(r, t) = \frac{1}{r} (Ae^{-jkr} + Be^{jkr})e^{j\omega t} \quad (13)$$

5.5.2.6 Parámetros de la onda acústica

Los parámetros de la forma de onda acústica son utilizados para obtener información sobre lo que sucede en la fuente acústica. Los principales parámetros se muestran en la Figura 23.

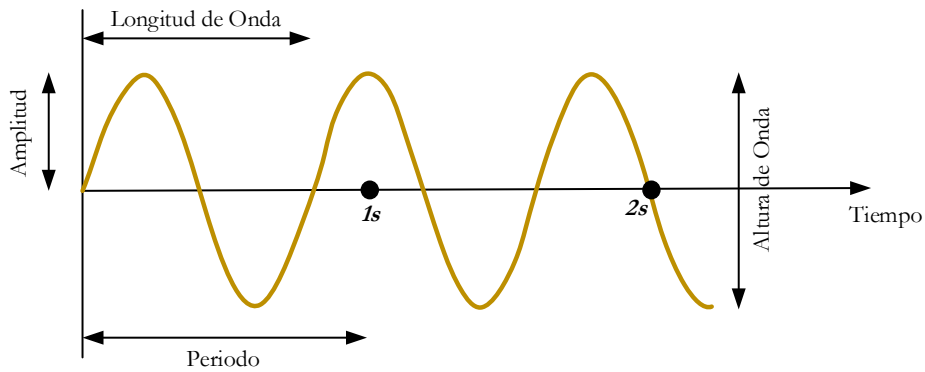


Figura 23. Parámetros de señal acústica [50].

5.5.2.6.1.1 Amplitud

La amplitud se define como el máximo valor que alcanza una oscilación en un ciclo. La amplitud se denomina también valor de pico o valor pico. En acústica corresponde a la presión acústica, representada por una altura medida en la escala del eje vertical. Los valores positivos (arriba del eje t) representan compresiones y los valores negativos (debajo del eje t), rarefacciones [59]. En la Figura 24 se presenta dos ondas acústicas similares, pero con diferentes amplitudes.

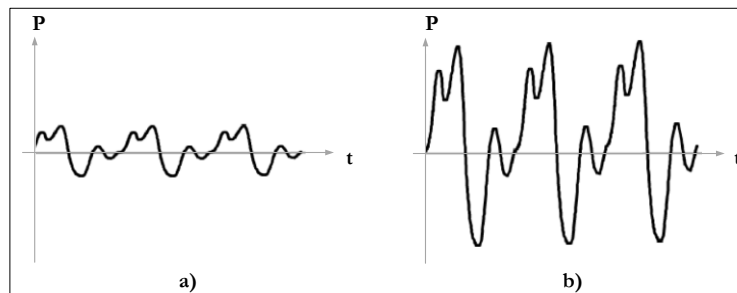


Figura 24. Dos ondas con igual frecuencia y forma de onda, pero con diferente amplitud. (a) Pequeña amplitud. (b) Gran amplitud [59].

En la práctica es conveniente describir a la amplitud en escala de un decibelio (dB). La amplitud de una señal en dB está dada para la Ecuación 14, la cual hace referencia a una señal adquirida por un transductor acústico que emplea los cambios de voltaje como principio de adquisición de datos [60].

$$A(dB_{AE}) = 20 \log \frac{V_p}{V_{ref}} \quad (14)$$

Donde:

V_p es el voltaje máximo en la salida del elemento transductor.

V_{ref} es el voltaje de referencia.

5.5.2.6.1.1 Fase o periodo

Se define como el tiempo transcurrido entre una perturbación y la siguiente. Se mide en segundos o milisegundos. Cabe destacar que son tiempos muy cortos que impiden en los ciclos puedan percibirse como fenómenos separados [59].

5.5.2.6.1.1 Frecuencia

Es el número de veces que una perturbación se realiza en el intervalo de un segundo, se la mide en hertzios (Hz) o ciclos por segundo (c/s). Es la inversa del periodo [61].

5.5.2.6.1.1 Longitud de onda acústica

Es la distancia que existe para el transcurso de un periodo de oscilación completo de un frente de onda en cualquier instante de tiempo [62], como se muestra en la Figura 25.

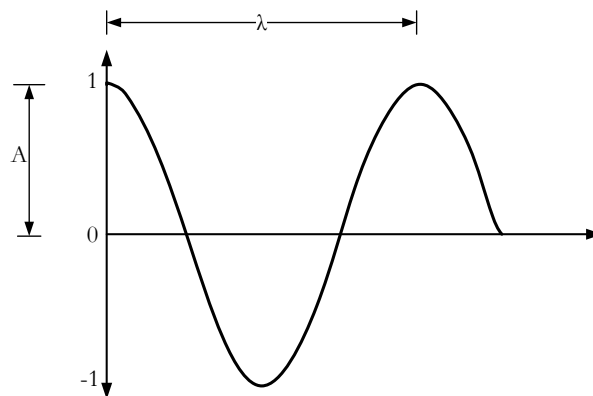


Figura 25. Ciclo de onda sinusoidal [62].

La relación entre la velocidad del sonido (V_p), la frecuencia (f) y la longitud de onda (λ) se expresa en la Ecuación 15.

$$\lambda = \frac{V_p}{f} \quad (15)$$

Dada la relación se afirma que la longitud de onda acústica es proporcional a la velocidad e inversamente proporcional a la frecuencia.

5.5.3 Sonido

5.5.3.1 Definición de sonido

El sonido generalmente se define como las fluctuaciones en la presión por encima y por debajo de la presión ambiental de un medio elástico, lo cual produce sensaciones auditivas al

alcanzar el oído [63]. Las ondas acústicas para provocar una sensación auditiva se deben encontrar dentro del llamado rango de frecuencia audible; este rango va desde 20Hz hasta 20KHz [61].

5.5.3.2 Características del sonido

5.5.3.2.1.1 Presión sonora

Se debe tener en cuenta que la presión atmosférica se mide en pascales y es del orden de los 100000Pa. Sin embargo, los cambios de presión producidos por una onda acústica son muy pequeño respecto al valor de presión atmosférica. Los sonidos más intensos que se perciben implican un incremento de tan solo 20Pa. Por esta razón es más razonable considerar únicamente la variación de presión atmosférica en presencia de sonido. A este incremento de presión se lo denomina presión sonora, y consiste en la presión que se debe agregar a la presión atmosférica en ausencia de sonido para igualar la presión real sonora presente [64]. En la Figura 26 se presenta las variaciones de presión de una onda acústica alrededor de la presión atmosférica, en donde las regiones comprimidas están muy ligeramente por encima y las regiones de descompresión (rarefacción) están por debajo de la presión atmosférica. Las variaciones de presión de las ondas de sonido se superponen a la presión barométrica prevaleciente.

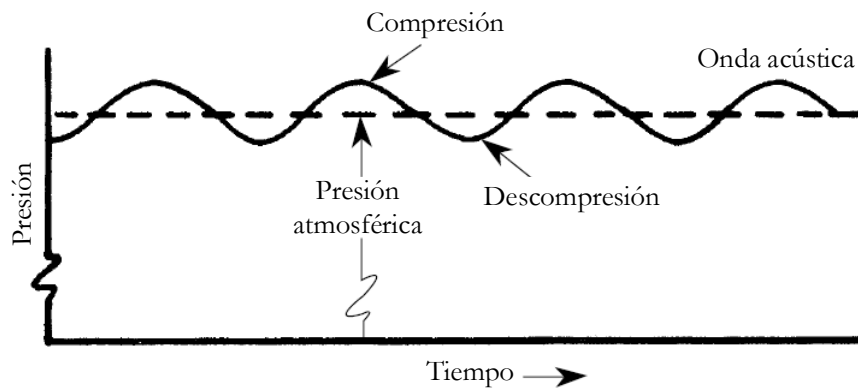


Figura 26. Variaciones de presión de una onda acústica alrededor de la presión atmosférica [65].

Las presiones sonoras audibles varían en términos aproximadamente entre los 20Pa a los 0,00002Pa. Es importante señalar que es un rango muy importante de variación. Esta gran cantidad de cifras es incomoda de manejar y no resulta práctica. Es por lo que la unidad de medida para presión sonora es el decibelio (dB). La Ecuación 16 expresa dicha presión, la cual se define como 20 veces el logaritmo de la relación entre la presión sonora y una presión de referencia correspondiente al umbral de presión auditiva (20 μ Pa) [63].

$$L_p = 20 \log(p/p_o) \quad (16)$$

Donde:

L_p es el nivel de presión sonora, en dB;

p es la presión acústica eficaz, en Pa;

p_o es la presión acústica eficaz de referencia, valor $20\mu\text{Pa}$.

5.5.3.2.1.1 Potencia sonora

Es la cantidad de energía por unidad de tiempo de una fuente de ruido. Se expresa en vatios (W) y sirve para caracterizar una fuente, ya que es un parámetro intrínseco de la misma [63].

Para expresar el nivel de potencia acústica se utiliza la Ecuación 17, la cual se evalúa respecto a una potencia de referencia de $1 \cdot 10^{-12}W$.

$$L_W = 10 \log(W/W_o) \quad (17)$$

Donde:

L_W es el nivel de potencia sonora, en dB;

W es la potencia acústica, en W;

W_o es la potencia acústica de referencia, valor $1 \cdot 10^{-12}W$.

5.5.3.2.1.1 Intensidad

La intensidad es la energía que atraviesa una superficie en la unidad de tiempo. Es proporcional al cuadrado de la presión acústica y se define como 10 veces el logaritmo de la relación entre la intensidad acústica y el umbral auditivo referido a dicha intensidad [63].

$$L_I = 10 \log(I/I_o) \quad (18)$$

Donde:

L_I es el nivel de intensidad acústica, en dB;

I es la intensidad acústica en la escala lineal, en W/m^2 ;

I_o es el umbral de audición ($10^{-12} W/m^2$).

5.5.3.2.1.1 Tono

Es una característica que permite clasificar a los sonidos como agudos (altos) o graves (bajos), a partir de la frecuencia fundamental de las ondas acústicas [61]. En la Tabla 6 se detalla una clasificación de los tonos de acuerdo con el rango de frecuencias.

Tabla 6. Clasificación de tonos de acuerdo con el rango de frecuencias de ondas sonoras [61].

Tono	Frecuencias	Rango
Grave	Bajas	20 a 300 Hz
Medio	Medias	300 a 2000 Hz
Agudo	Altas	2000 a 20000 Hz

5.5.3.3 Unidades

El nivel sonoro es la magnitud que permite medir el sonido; este nivel se define como el logaritmo de la relación de una cantidad en referencia a otra cantidad del mismo tipo (Ecuación 19). Se debe especificar la base del logaritmo, la cantidad de referencia y el tipo de nivel.

Ejemplos de tipos de niveles son: el nivel de potencia eléctrica y el nivel de presión sonora-cuadrado. Además, Se debe tener en cuenta que un logaritmo de base con la décima raíz de diez es lo mismo que diez veces el logaritmo de base diez [66]. Para los logaritmos comunes de base diez, el símbolo es lg . Para los logaritmos naturales en la base Neperiana e , el símbolo es ln .

$$L = \log_r(q/q_0) \quad (19)$$

Donde:

L es el nivel sonoro;

r es la base logarítmica la relación de referencia;

q es la cantidad bajo consideración, puede ser presión, potencia o intensidad sonora;

q_0 es la cantidad de referencia del mismo tipo.

El nivel sonoro puede estar en unidades de bel, decibel o neper, presentadas a continuación [66].

- **Bel:** Unidad de nivel cuando la base del logaritmo es diez, y las cantidades en cuestión son proporcionales a la potencia. Símbolo de unidad B.

- **Decibel:** Unidad de nivel cuando la base del logaritmo es la décima raíz de diez, y las cantidades en cuestión son proporcionales a la potencia. Símbolo de la unidad dB.
- **Neper:** Unidad de nivel de una cantidad de campo cuando el logaritmo está en la base Neperiana $e \approx 2.7183$. También, es un nivel de unidad de cantidad similar a la potencia cuando la base del logaritmo es $e^2 \approx 7.389$. Un neper es aproximadamente igual a 8.686 decibelios.

5.5.4 Ruido

5.5.4.1 Definición de ruido

La norma ANSI S1.1-2013 sobre terminología acústica posee dos definiciones de ruido: (a) Sonido no deseado, y (b) Oscilación errática, intermitente o estadísticamente aleatoria [66].

La definición de sonido no deseado implica que hay un oyente que hace un juicio basado en una serie de factores. Este juicio puede hacerse porque el sonido es demasiado fuerte, es molesto o tiene una calidad desagradable [52]. Esta sensación auditiva no deseada corresponde a una variación aleatoria de la presión acústica a lo largo del tiempo.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que el ruido siempre estará presente; es algo absolutamente natural. El problema no es el ruido en sí, sino la relación de potencia del sonido deseado con el ruido. Por ejemplo, el sistema perceptual auditivo, cuando el sonido deseado tiene determinada potencia respecto al ruido, es capaz de enmascarar al ruido; en ese caso no se escuchará el ruido pese que está presente.

En cambio, la definición de oscilación errática hace referencia a que el ruido acústico es producido por la mezcla de ondas acústicas con diferentes frecuencias y amplitudes. En dicha mezcla se conjugan las frecuencias fundamentales y los armónicos que las acompañan a distintos niveles de intensidad acústica [67]. La representación gráfica del ruido es la de una onda acústica sin forma, no es periódica.

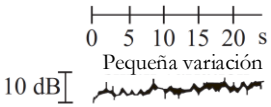
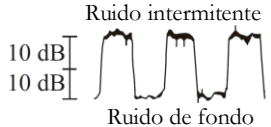
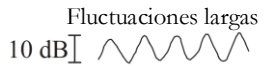
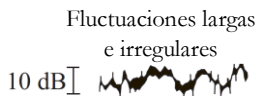
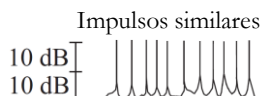
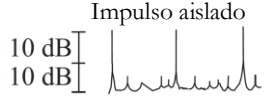
5.5.4.2 Tipos de ruido y su medición

Las características de ruido se clasifican de acuerdo con la forma en que varían con el tiempo. Existen ruidos de estado estacionario y ruidos impulsivos. Entre los estacionarios se tiene el ruido constante, el cual permanece dentro de ± 5 dB del nivel medio durante mucho tiempo; también existe el ruido intermitente el cual es un ruido constante que comienza y se detiene en un periodo de tiempo largo; finalmente, entre los estacionarios también está presente el

ruido fluctuante, el cual varía significativamente, pero tiene un promedio constante a largo plazo. En cambio, los ruidos impulsivos duran menos de un segundo [68].

Los ruidos estacionarios y ruidos impulsivos requieren diferentes tipos de medición, la cual también dependerá del tipo de fuente de ruido. Las mediciones y la instrumentación adecuada para varias fuentes de ruido se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Tipos de ruido y su medición; las características del ruido se clasifican de acuerdo con la forma en que varían con el tiempo [68].

	Características	Tipo de fuente	Tipo de medida	Tipo de instrumentación
	Ruido constante y continuo	Bombas, motores eléctricos, cajas de engranes, transportadores	Lectura directa del valor ponderado A	Sonómetro
	Ruido constante pero intermitente	Compresores de aire, Maquinaria automática durante un ciclo de trabajo	Valor de dB y tiempo de exposición L_{Aeq}	Sonómetro Medidor de nivel de sonido integrado
	Ruido fluctuante y periódico	Producción en masa, rectificado de superficies	Valor de dB, L_{Aeq} o dosis de ruido.	Sonómetro Medidor de nivel de sonido integrado
	Ruido fluctuante no periódico	Trabajo manual, rectificado, soldadura, ensamblado de componentes	L_{Aeq} o dosis de ruido, análisis estadístico.	Dosímetro de ruido Medidor de nivel de sonido integrado
	Impulsos repetidos	Prensa automática, taladro neumático, remachado	L_{Aeq} o dosis de ruido y nivel de ruido "Impulso" Compruebe el valor "pico"	Medidor de nivel de sonido de impulso o sonómetro con retención "pico"
	Impulso simple	Golpe de martillo, manejo de materiales, punzonadora	L_{Aeq} y valor "pico"	Medidor de nivel de sonido de impulso o sonómetro con retención "pico"

5.6 Hardware de adquisición de señales acústicas

El hardware de adquisición de datos consta de una serie de componentes electrónicos que recopilan, acondicionan, convierten y transmiten señales del transductor al computador. En la Figura 27 se presenta un esquema general de los módulos que habitualmente se emplean en el proceso de adquisición de señales acústicas, donde se puede observar que las señales son captadas directamente por los transductores (1), los cuales generan las señales analógicas y las transmiten al preamplificador (2), donde se da una ganancia a la señal hasta que alcance el nivel estandarizado y pueda ser procesada por los demás equipos. Luego, en el módulo de adquisición las señales de cada transductor pasan a ser multiplexadas (3), esto quiere decir que a las señales de cada transductor se van a manejar en un canal separado dentro del módulo. Además, se aplica un filtro de frecuencia de paso bajo o antialiasing (4) para asegurar que la señal muestreada contenga toda la información de la señal analógica de entrada. A continuación, las señales pasan a ser almacenadas temporalmente en un buffer de datos (5) del mismo módulo para luego pasar al convertidor de analógico - digital A/D (6) que transforma la señal analógica de entrada a un paquete de números binarios equivalente. Finalmente, las señales digitales pasan por el chasis de módulos (7) que funciona como una fuente que proporciona alimentación a los componentes electrónicos internos del sistema y permite al sistema de adquisición comunicarse directamente al CPU del ordenador (8) donde las señales son procesadas por los softwares de adquisición y análisis para que puedan ser almacenadas y presentadas al usuario [11].

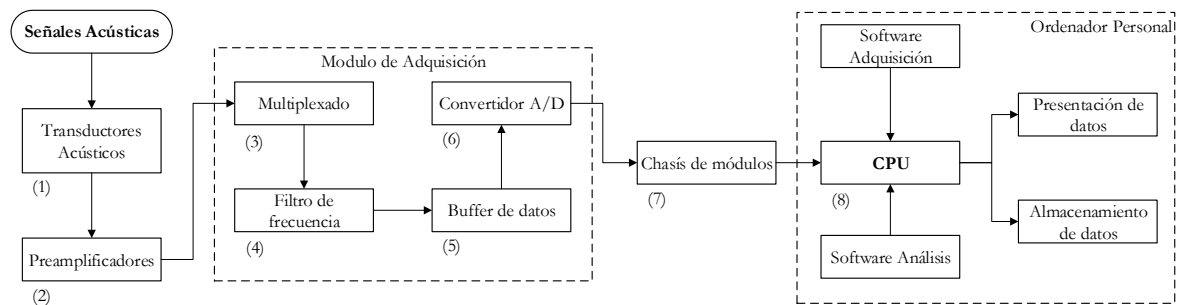


Figura 27. Esquema general de los módulos usados habitualmente en la adquisición de señales acústicas [11].

5.6.1 Transductor acústico

Un dispositivo que transforma la energía eléctrica en sonido, o viceversa. En las aplicaciones relacionadas con la adquisición de registros acústicos, los transductores acústicos suelen fabricarse con cerámica piezoeléctrica o materiales magnetostrictivos, y pueden utilizarse como receptores o bien como transmisores en un rango de frecuencia oscilante entre 1 y

30kHz aproximadamente [52]. Los transductores son excitados ya sea como monopolos, emitiendo o recibiendo el sonido en todas las direcciones, o bien como dipolos, emitiendo o recibiendo en un plano. En las aplicaciones relacionadas con la adquisición de los registros ultrasónicos, los transductores acústicos se fabrican con materiales cerámicos piezoeléctricos, y a menudo se utilizan en forma alternativa como receptores y transmisores (modo pulso-eco) en un rango de frecuencia oscilante entre unos cientos de kilohertz y unos megahertz [69].

5.6.1.1.1 Principio de funcionamiento del micrófono electroacústico

Los micrófonos electroacústicos tienen un diafragma o superficie móvil que es excitada por la presión en el aire que se produce por la acción de las ondas acústicas, esto genera una variación de flujo de electrones en el transductor, generando una salida correspondiente a una señal eléctrica que representa la señal acústica de entrada [70]. El funcionamiento específico, propósito, estructura y tipo de elementos que lo conforman varían según el tipo de micrófono.

En un micrófono, el diafragma tiene solo una superficie expuesta a la fuente acústica, por lo que la salida corresponde a la presión instantánea de las partículas de aire impresas en las ondas acústicas que se propagan hacia el diafragma, sin embargo, en un micrófono de condensador de uso industrial, por el principio físico de un capacitor, genera una onda eléctrica de salida en pasos o escalones como se observa en la Figura 28 [68].

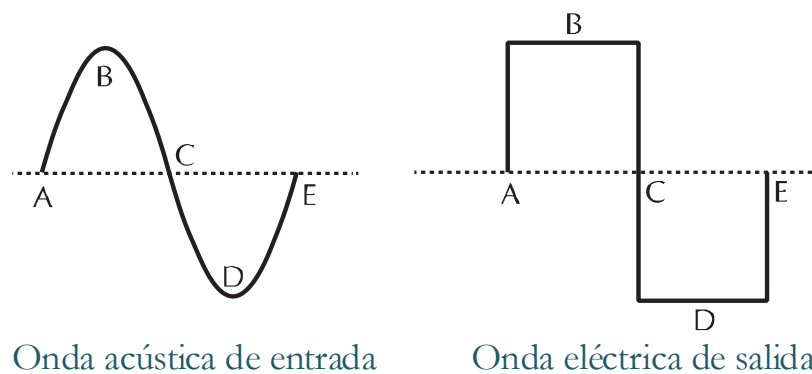


Figura 28. Relación entre la entrada y la salida de una onda acústica en un micrófono capacitivo [11].

5.6.2 Tipos de micrófonos

En la Figura 29 se presentan los tipos de micrófonos según los criterios de clasificación más importantes, así como las características principales de cada tipo:

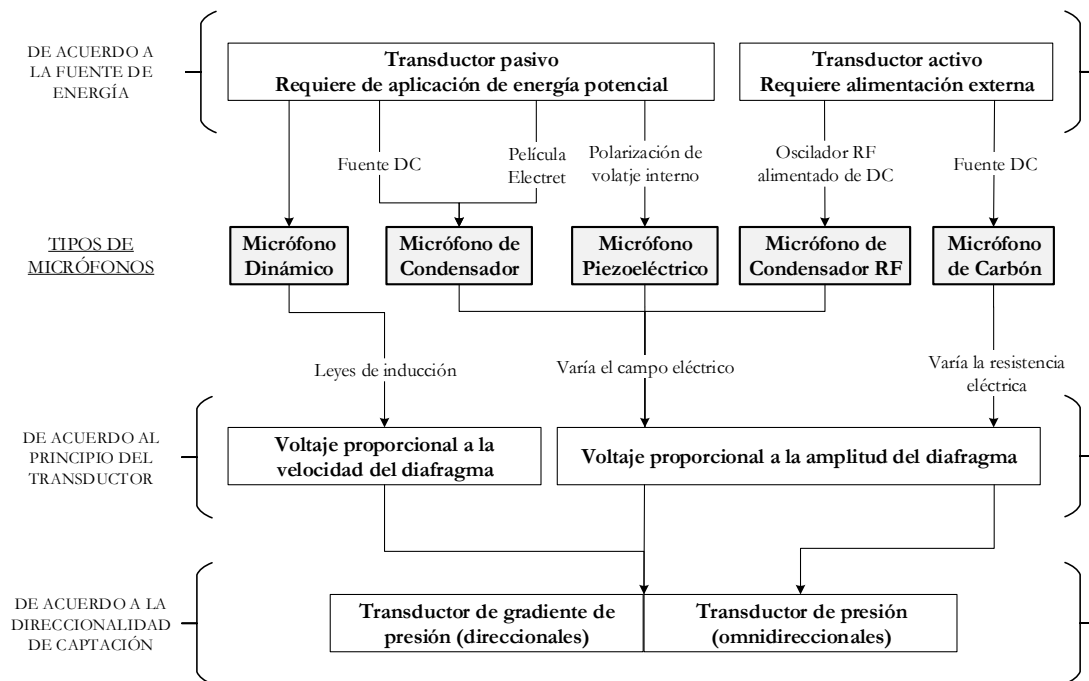


Figura 29. Tipos de micrófonos según sus criterios de clasificación más importantes [11].

5.6.2.1 Micrófono de condensador

El micrófono de condensador también se conoce como micrófono de capacitor o micrófono electrostático. En un micrófono de condensador, las ondas acústicas que golpean la superficie de una de las placas hacen que esta cambie su posición con respecto a la otra y por consiguiente varíe la capacidad del condensador, es decir una placa actúa como diafragma frontal y la otra es una placa posterior fija. Por lo tanto, las variaciones de capacidad del condensador se usan como una entrada de un divisor de voltaje para después ser convertidas a un voltaje proporcional a la presión que imprimen las ondas acústicas [68], [71]. En la Figura 30 se presenta un esquema de los elementos esenciales de un micrófono de condensador.

Es importante aclarar que el condensador del micrófono debe estar polarizado constantemente para obtener las variaciones de capacidad, para lograrlo se usa una fuente de corriente continua, una batería o un electrodo polarizado, sin embargo, no deja de ser un transductor pasivo.

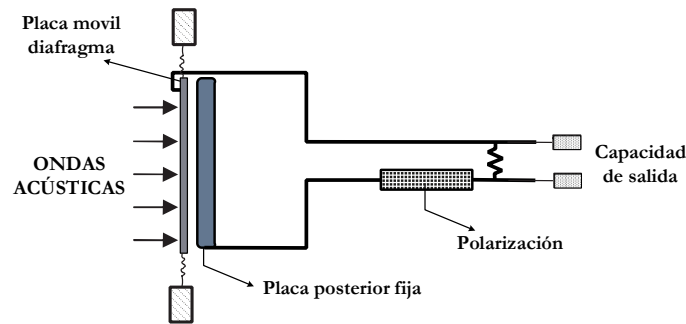
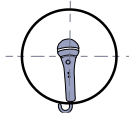
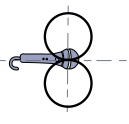
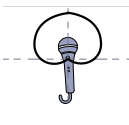
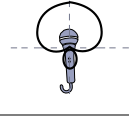
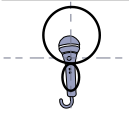


Figura 30. Esquema de los elementos esenciales de un micrófono de condensador [68].

5.6.3 Patrones de captación de los micrófonos

Los micrófonos también se caracterizan por su patrón de captación o la forma en que atenúan las ondas dependiendo la dirección de donde proviene la fuente acústica. El patrón de captación se refiere al rango de apertura en donde el micrófono va a responder a la amplitud real de las ondas que provengan hacia el diafragma y estén dentro del ángulo de captación, mientras que, va a atenuar las ondas que provengan fuera de dicho rango [72]. Los patrones de captación y las características más importantes de respuesta direccional de los distintos tipos de micrófonos se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Clasificación de los micrófonos según su patrón de captación y sus principales características [71-72].

Patrón de captación		Ángulo de captación 3dB de atenuación	Ángulo de captación 6dB de atenuación	Respuesta a ondas aleatorias	Aplicaciones generales
Omnidireccional		—	—	100 %	Sonidos ambientales, sinfonías.
Bidireccional		90°	120°	33 %	Conversatorio de lado opuesto, cámaras tubulares.
Cardioide		130°	180°	33%	Instrumentos de percusión y cuerda.
Supercardioide		116°	156°	27%	Monitoreo industrial, grabación vocal.
Hipercardioide		100°	140°	25%	Monitoreo industrial, cámaras anecoicas.

5.6.4 Sistema integrado de micrófono y preamplificador PCB HT378B02

El sistema integrado de micrófono y preamplificador PCB HT378B02 que se presenta en la Figura 31, es un dispositivo compacto de la marca PCB compuesto por un micrófono de condensador modelo 377B02 y un preamplificador de alta temperatura modelo HT426E01 que ofrece mediciones acústicas altamente precisas para trabajo de laboratorio y es lo suficientemente resistente para pruebas de campo industrial. Además, captura señales con un rango de 3.5 a 20kHz y debido a su alta direccionalidad permiten recoger señales de un punto específico con la mínima cantidad de ruido proveniente de otras fuentes acústicas [73].



Figura 31. Sistema integrado de micrófono y preamplificador PCB HT378B02 [73].

Entre las ventajas más relevantes de usar el dispositivo compacto de micrófono y amplificador están:

- Alta hermeticidad frente a partículas sólidas gracias al acoplamiento fijo entre el micrófono y el preamplificador.
- Tamaño y peso reducidos que reduce la captura de vibración externa.
- Reducción de ruido por difracción gracias al diafragma de diámetro pequeño.
- Uso de soportes y pedestales pequeños que reducen la distorsión de la fuente acústica.

En la Tabla 9 se presentan las especificaciones técnicas más importantes del micrófono capacitivo PCB 337B02 que incluye el sistema integrado.

Tabla 9. Especificaciones técnicas del micrófono capacitivo PCB 337B02 [73].

Designación	Especificación
Principio del transductor	Capacitivo
Diámetro nominal	1/2"
Frecuencia de respuesta	3,15Hz~20KHz
Patrón de captación	Direccional
Sensibilidad	50mV/Pa

Designación	Especificación
Rango dinámico	147dB
Rango de temperatura	-40~150°C
Prepolarizado	Si
Capacitancia	12pF
Peso	7,8gr
Material de carcasa	Aleación inoxidable

En la Tabla 10 se presentan las especificaciones técnicas más importantes del preamplificador de alta temperatura PCB HT426E01 que incluye el sistema integrado.

Tabla 10. Especificaciones técnicas del preamplificador PCB HT426E01 [74].

Designación	Especificación
Ganancia	-0.06dB
Diámetro nominal	1/2"
Frecuencia de respuesta	1,58Hz~126KHz
Patrón de captación	≤4,9uV
Sensibilidad	50mV/Pa
Rango dinámico	147dB
Rango de temperatura	-40~125°C
Alimentación	2~10mA
Voltaje de excitación	20~32VCC
Conexión	BNC
Peso	41gr
Material de carcasa	Aleación inoxidable

5.6.5 Módulo de adquisición National Instruments NI-9234

El National Instruments NI-9234 que se presenta en la Figura 32, es un módulo dinámico de adquisición de señales de voltaje, compatible con cualquier chasis NI compactDAQ. Cuenta con cuatro canales de entrada analógica para adquisición simultánea a altas velocidades. Las señales obtenidas de cada entrada pasan por un filtro de frecuencia, para

luego ser almacenadas temporalmente y de forma independientemente en el buffer de datos que incluye el módulo [75].



Figura 32. Módulo dinámico de adquisición de señales de voltaje NI 9234 [75].

Posteriormente el convertidor A/D transforma las señales analógicas de entrada a una forma digital equivalente, asignando un número binario para cada valor de amplitud de señal analógica. Por último, el paquete de números binarios que representan el fenómeno físico es transferido al chasis de módulos NI compactDAQ. En la Tabla 11 se presentan las especificaciones técnicas más relevantes del módulo de adquisición de señales NI-9234.

Tabla 11. Especificaciones técnicas del módulo de adquisición de señales NI-9234 [75].

Designación	Especificación
Número de canales de entrada	4 analógicos
Tipo de conexión de canales	BNC
Canales simultáneos	Si
Rango del voltaje analógico de entrada	$\pm 5V$
Protección de sobrecarga de voltaje	$\pm 30V$
Frecuencia de muestreo máxima	51.2kS/s por canal
Filtro de frecuencia (Antialiasing)	Si
Resolución del convertidor A/D	24 bits
Rango dinámico general	102dB
Consumo	1W
Voltaje operativo	60VCC
Temperatura operativa	$-40^{\circ}C \sim +70^{\circ}C$
Dimensiones generales	25mm x 115mm x 80mm
Peso	173g

5.6.6 Chasis de módulos National Instruments NI compactDAQ-9188

El NI compactDAQ-9188 que se presenta en la Figura 33, es una plataforma de adquisición de datos robusta y portátil que integra conectividad, adquisición de datos y acondicionamiento de señal de entrada y salida para interactuar directamente con cualquier sensor. Al usar cualquier chasis NI compactDAQ con el software LabVIEW®, se puede programar la forma de adquirir, analizar, visualizar y administrar los datos de medición que se adquieren a través de los módulos montados en el chasis [76].



Figura 33. Chasis de módulos de adquisición de señales NI compactDAQ-9188 [76].

5.7 Análisis gráfico de señales en el dominio del tiempo

El análisis en el dominio de tiempo es una técnica natural de análisis de la forma de onda en el tiempo de la señal adquirida; esto es debido a que los sensores entregan una onda en el tiempo. Este análisis es computacionalmente menos costoso de implementar y el único preprocesamiento necesario es acondicionar la señal. Este análisis es sencillo, se trata de inspeccionar visualmente partes de la forma de onda de tiempo y detectar comportamientos anormales. Sin embargo, las señales de vibración producidas por una máquina contienen muchos componentes y puede ser muy complicado verlos en el dominio del tiempo, lo que hace poco probable que un fallo sea detectado por una simple inspección visual [77].

Los métodos en el dominio de tiempo tratan de analizar información de la amplitud y de la fase de la señal de vibración en el tiempo para detectar la falla del sistema. El dominio del tiempo es una percepción natural y facilita la interpretación física en la vibración. Es particularmente útil en el análisis de señales impulsivas de defectos de rodamientos y engranajes con características no estacionarias e impulsos transitorios cortos [13].

5.8 Análisis gráfico de señales en el dominio de la frecuencia

Este análisis se basa en la señal transformada al dominio de la frecuencia refleja las frecuencias constituyentes de una señal. El método más utilizado para transformar las señales

de vibración y de acústica desde el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, es la transformada rápida de Fourier. La información de amplitud de la transformada de Fourier (también conocida como espectro de Fourier, o espectro de frecuencia) investiga principalmente en el análisis de espectro y puede utilizarse como firma de fallo [77].

La principal ventaja del análisis en el dominio de la frecuencia es que indica los picos en el espectro, esto permite detectar fallos que tienen una respuesta característica, además de que es posible percibir el comportamiento del fallo en el tiempo [78]. El análisis espectral es la técnica clásica en el diagnóstico engranajes, al comparar el espectro de una caja dañada con referencia al espectro de una caja de engranajes en buenas condiciones, es posible detectar algunos fallos, sin embargo, en sistemas complicados de engranajes es difícil identificar los fallos a partir del espectro debido al gran número de componentes implicados [79].

5.8.1 Transformada rápida de Fourier

La Transformada Rápida de Fourier conocida por la abreviatura FFT (del inglés *Fast Fourier Transform*) es un algoritmo que permite calcular la Transformada de Fourier Discreta (DFT) y su inversa. Fue precisamente el matemático francés Jean Baptiste Fourier (1768 - 1830) quien encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas sinusoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos [80]. La FFT es importante en una amplia variedad de aplicaciones, desde el tratamiento digital de señales y filtrado digital, cuando se habla de tratamiento de señales, el algoritmo FFT impone algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante de la señal muestreada y que se va a transformar de un número de muestras igual a una potencia de dos. El rango de frecuencia cubierto por el análisis FFT depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo [81].

La FFT es un algoritmo que reduce el tiempo de cálculo de n^2 pasos a $n * \log_2(n)$. El único requisito es que el número de puntos en la serie tiene que ser una potencia de $2(2^n \text{ puntos})$, por ejemplo 32, 1024, 4096, etc [82]. La FFT utiliza la Ecuación 20 que puede transformar del dominio de tiempo al dominio de la frecuencia y la Ecuación 21 transformada inversa que regresa a su forma original. Teniendo en cuenta que en el dominio de la frecuencia contiene exactamente la misma información que el dominio del tiempo, pero en una forma diferente [13].

$$X(K) = \sum_{j=1}^N x(j)w_N^{(j-1)(k-1)} \quad (20)$$

$$x(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k)w_N^{-(j-1)(k-1)} \quad (21)$$

Donde: $w_N = e^{(2\pi i)/N}$

El rango en el dominio del tiempo es N , en el dominio de la frecuencia es $N/2$, y la escala de la frecuencia se suele representar como una fracción de la frecuencia de muestreo, como se observa en la Figura 34.

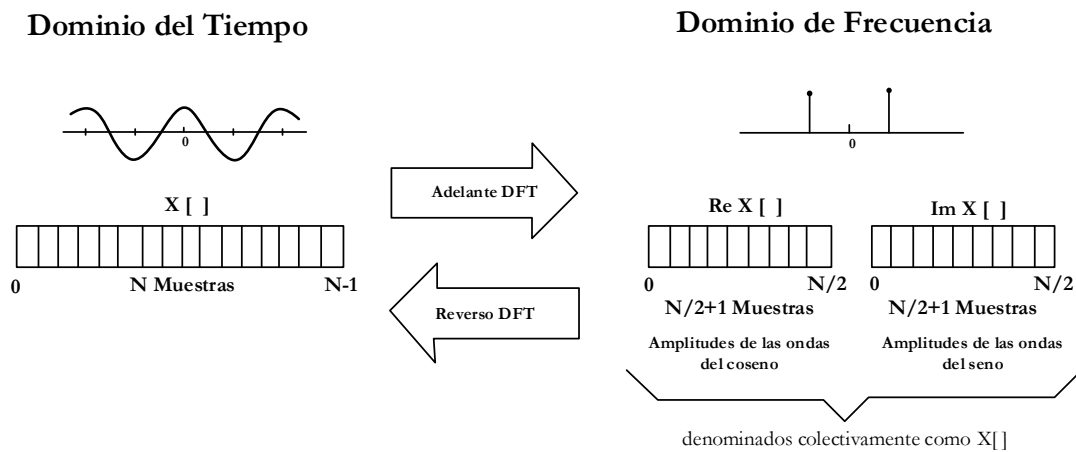


Figura 34. Transformada discreta de Fourier [Fuente: Autor].

La DFT representa la señal en el tiempo, descompuesta en una serie de funciones sinusoidales, que al ser sumadas forman la señal original en el dominio del tiempo y puede calcularse de dos maneras diferentes:

- Con un conjunto de ecuaciones simultáneas, muy útil para entender la DFT, pero ineficiente desde un punto de vista práctico
- Utilizando la idea de la correlación, basado en detectar una forma de onda conocida en otra señal

Utilizando el algoritmo más eficiente que es la FFT, que descompone la señal en simples puntos, como se observa en la Figura 35, que llega a ser inclusive cientos de veces más rápida para analizar, es muy útil en aplicaciones de tiempo real [83].

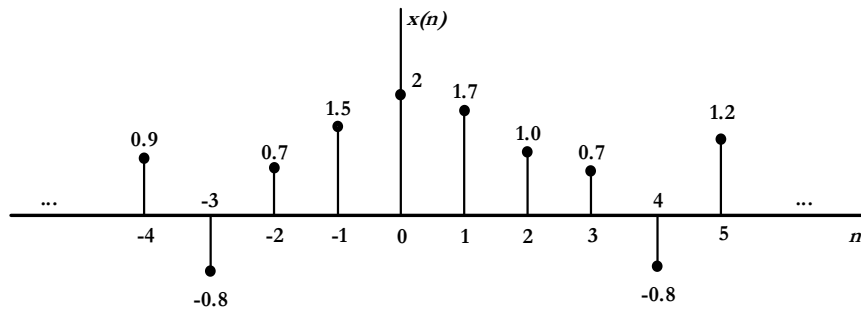


Figura 35. Representación gráfica de una señal discreta en el tiempo [83].

5.8.2 Análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia

Desde el punto de vista electrónico, la vibración se registra mediante señales y se visualiza en el dominio del tiempo, luego la señal pasa por un filtro para analizar minuciosamente cada componente de la señal por frecuencia así se obtiene el espectro, como se observa en la Figura 36.

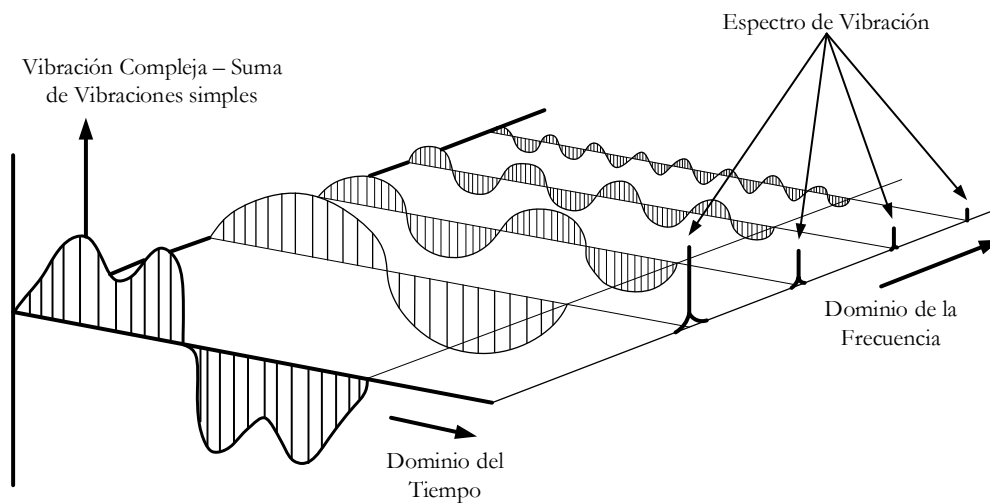


Figura 36. Señales en el dominio del tiempo (Onda) y en el dominio de la frecuencia (Espectro) [80].

Se analiza la distribución de los niveles de vibración:

- Gráfica en el dominio del tiempo llamado onda.
- Gráfica en el dominio de la frecuencia llamado espectro.

La Ecuación 22 se observa la relación que hay entre tiempo y frecuencia:

$$T = \frac{1}{f} ; f = \frac{1}{T} \quad (22)$$

Donde: T : Tiempo

f : Frecuencia

5.9 Firma de vibración

Cada máquina rotativa presenta una vibración característica que la diferencia de forma única y se conoce comúnmente como firma de vibración. Esta señal está totalmente condicionada por su diseño, fabricación, uso y el desgaste de cada uno de sus componentes. El mecánico o ingeniero de mantenimiento al cargo de un equipo industrial invierte su tiempo en conocer la naturaleza de la vibración que esta presenta [80].

Los analistas capacitados en vibración buscan “firmas” reveladoras; comportamientos y patrones que se encuentran una y otra vez. Estas firmas, del mismo modo que cuando un experto en ajedrez mira la distribución de un juego en curso en el tablero, se reconocerán de inmediato como fuentes de excitación de las vibraciones. Por lo tanto, un analista capacitado en vibraciones es un miembro muy valioso de cualquier equipo de servicio en campo o de mantenimiento [84].

En cajas de engranajes la firma de vibración está centrada en el diagnóstico de los engranes, pueden ser estimado en instancias generales con la interpretación de patrones, que reflejan las frecuencias características de los fallos. Para ello, las cartas de Charlotte representan un manual muy acertado en cuanto a componentes tanto normales como las que surgen con la presencia de fallos [85].

5.9.1 Frecuencias generadas por una caja de engranajes

La localización de todas las frecuencias espectrales de un engranaje pasa por conocer unos datos de la caja de engranajes. Los datos son la velocidad de giro del eje de entrada o el de salida y el número de dientes de los diferentes engranes. Las frecuencias asociadas directamente con un engranaje son las siguientes [80]:

- **Frecuencia de piñón:** es la frecuencia generada de motor al eje de entrada de la caja de engranajes, $F_g = F_{motor}[Hz]$ dado en Hertz.
- **Frecuencia de rueda:** es la reducción de frecuencia del eje de entrada, mediante la transmisión de velocidad del piñón a la rueda al eje de salida de la caja de engranajes.
- **Frecuencia de engrane GMF** (*del inglés Gear Mesh Frequency*): es propia de cada engranaje y aparece en el espectro de frecuencia independientemente del estado del engranaje. Su amplitud depende significativamente de la carga en el momento de la lectura. Se calcula mediante la siguiente Ecuación 23 donde, Z es el número de dientes y F_g la frecuencia de giro de la rueda dentada. La GMF es igual para piñón y rueda.

$$GMF = Z_p \times F_G \quad (23)$$

- **Bandas laterales de la frecuencia de engrane:** son frecuencias equidistantes a la frecuencia de engrane. Estas bandas laterales se corresponden con la frecuencia de giro del piñón y rueda. Son muy importantes en el diagnóstico del engrane, ya que indican si la rueda o el piñón se encuentran en mal estado.
- **Armónicos de la GMF:** por lo general tiene bandas laterales de velocidad de giro, son frecuencias de vibración que son múltiplos integrales de la frecuencia fundamental específica.
- **Frecuencias naturales del engranaje:** cuando se desarrolla algún tipo de deterioro en el engrane se puede provocar la excitación de las frecuencias naturales del engranaje.
- **Frecuencias fantasmas:** están relacionadas con un defecto relativamente poco frecuente que se manifiesta como una frecuencia típicamente más alta que la GMF, pero no directamente relacionada con la geometría del engranaje. Es debido a errores de fabricación que son debidos a vibración en el tren de fabricación y se puede típicamente relacionar con el número de dientes y la velocidad de la máquina de corte.

Se observa en la Figura 37, el espectro de la frecuencia de un engrane en buenas condiciones.

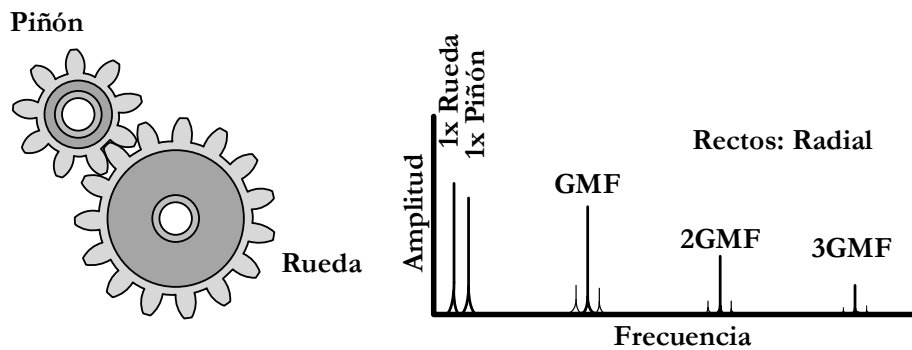


Figura 37. Espectro característico de un engranaje en buen estado [80], [85].

5.10 Fallos en engranajes

Para realizar la investigación de fallos en engranajes se ha utilizado un orden de clasificación en los cuales constan: categoría, tipo y subtipo de fallos del elemento en estudio. Indica esquemáticamente como se ha tomado para la clasificación que genera las normas a detallar.

Los engranes son uno de los principales elementos mecánicos que se encuentran en la gran mayoría de la maquinaria rotativa para transmitir movimiento, un fallo en uno de estos

elementos puede generar daños catastróficos. Las causas de los fallos en engranajes es la desalineación, mala lubricación, fatiga, altas velocidades, entre otras. Los principales fallos que se presentan en los dientes de los engranajes es el agrietamiento (cracking), gripado (scuffing), rotura de diente (brooken tooth), picaduras (pitting) y desgaste (wear).

La detección de fallos en los engranes se realiza mediante técnicas de monitoreo de la condición, estas técnicas pueden ser: vibraciones, acústica, emisiones acústicas, análisis de corriente, termografía, entre otros. El monitoreo de vibraciones es la técnica más utilizada para detectar fallos en engranes, pero actualmente el monitoreo de señales acústicas está empezando a ganar terreno en la detección de fallos, debido a su precisión en detectar fallos incipientes [86, 87].

Los engranes están sometidos a altas cargas cíclicas y ambientes severos, esto hace que sean uno de los elementos más propensos a generar fallos en maquinarias, por lo tanto, es muy importante monitorear el estado de los engranajes. La norma ISO 10825:1995, clasifica los modos de falla de los engranajes como se muestra en la Figura 38 [88].

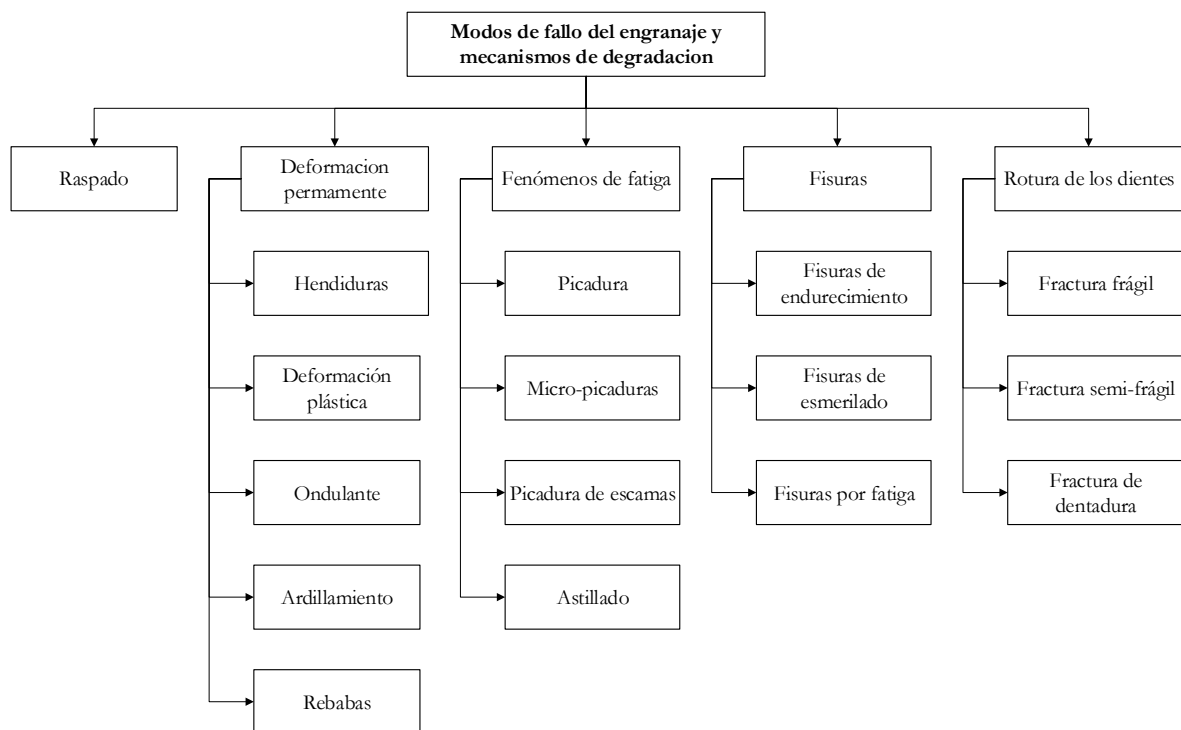


Figura 38. Clasificación de los modos de fallos en engranajes según la norma ISO 10825:1995 [88].

La Tabla 12 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 12. Normas y clasificación de fallos en engranajes [9]

Norma	Categoría de fallo
ISO 10825	Indicaciones de perturbaciones en la superficie (14) Raspado (1) Deformaciones permanentes (6) Fenómeno de fatiga superficial (6) Fisuras y grietas (3) Rotura de dientes (7)
ANSI/AGMA 1010-E95	Desgaste (10) Raspado (1) Deformación plástica (10) Fatiga por contacto (3) Agrietamiento (5) Fractura (5) Fatiga por flexión (2)

En el presente proyecto se seleccionaron dos fallos: agrietamiento en los dientes del engrane y picadura en la cara del diente del engrane.

5.10.1 Caracterización de fallos en engranajes

5.10.1.1 Fallo de picadura

Este tipo de fallo se presenta en parte de los dientes o en la totalidad de ellos un 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 van en aumento, aunque las inspecciones visuales periódicas y mantenimiento preventivo pueden ayudar a reducir la tasa de fracaso de los sistemas, el costo y el tiempo de inactividad del equipo son ineficaces y antieconómicas. Además, existen causas por una mala ubicación o un mal lubricante para el equipo [89–91]. En la Figura 39 se presenta la clasificación de los fallos por de fatiga en la superficie, en los que están los diferentes modos de picadura.

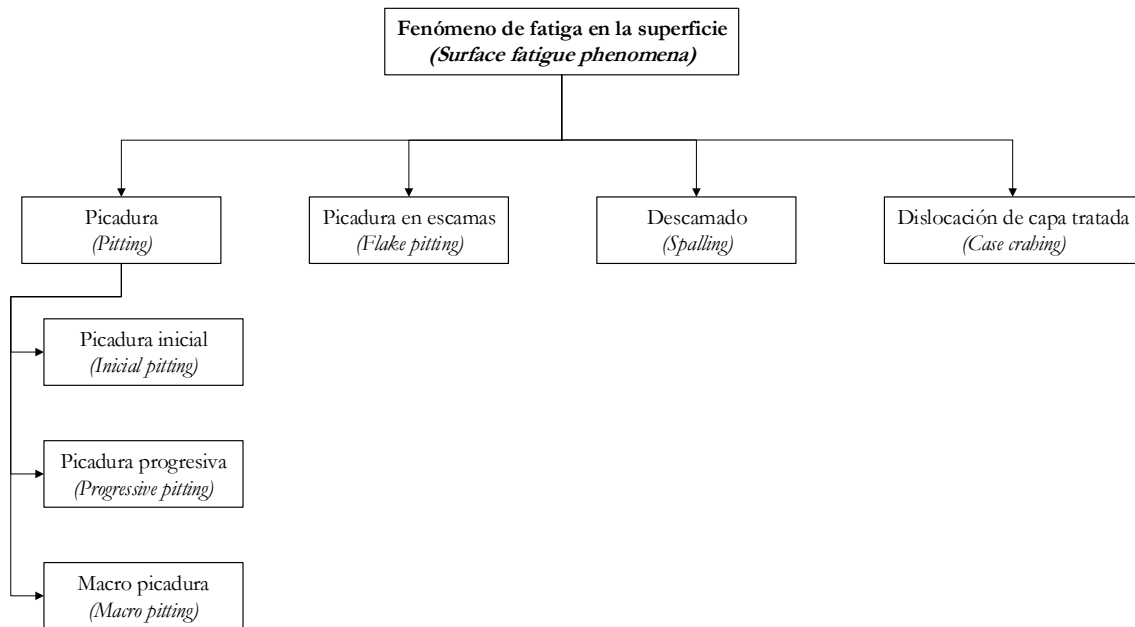
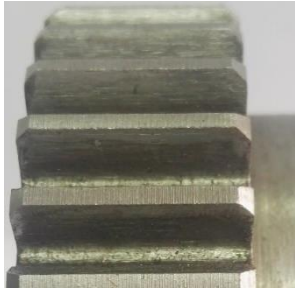





Figura 39. Clasificación de fatiga en la superficie del diente según la norma ISO 10825 [92].

De la misma forma los niveles de severidad del fallo de picadura que pueden existir en un engrane, se presenta en la Tabla 13 un resumen de las principales características que se presenta mientras que el fallo evoluciona.

Tabla 13. Niveles de severidad de picadura en el engrane [1], [10].

Estado del Engrane	Normal	Fallo leve	Fallo moderado	Fallo severo	
Imagen del Fallo					
Causa de fallo	_____	Ruptura de capa límite de lubricante.	Carga de trabajo excesiva por tiempo prolongado en un engrane con fallo leve de picadura.	Carga de trabajo excesiva por tiempo prolongado en un engrane con fallo moderado de picadura.	
Descripción del fallo	Características de los dientes	Podría tener presencia de micro picadura.	Presencia de agujeros bajo la línea del diámetro primitivo en la parte del dedendum.	Presencia de agujeros sobre y bajo la línea del diámetro primitivo.	Agujeros pueden ocupar cualquier lugar dentro de la cara de un diente.
Porcentaje de área en los dientes	_____	Menor al 15% del área total del diente.	Entre 15% y 40% del área total de un diente.	Mayor al 40% del área total de un diente.	
Ruido durante su funcionamiento	No causa ruido.	Poca presencia de ruido durante su funcionamiento.	Causa ruido durante su funcionamiento.	Causa ruido considerable.	

5.10.1.2 Fallo de rotura de diente

El fallo por rotura de diente es ocasionado por la concentración de carga a lo largo de la longitud del diente. Este fallo comienza con una grieta en la raíz del diente en el lado de las capas estiradas, donde se producen tensiones de flexión junto con las tensiones locales debido a la forma de los dientes [93].

La norma ISO 10825, establece a este tipo de fallo como rotura de diente (*Tooth breakage*), y divide a su vez en cuatro subtipos de fallos los cuales son: Rotura por sobrecarga (*Overload breakage*), cizalla de dientes (*Tooth shear*), rotura tras deformación plástica (*Breakage after plastic deformation*) y rotura por fatiga (*Fatigue breakage*) [92]. En la Figura 40 se presenta la clasificación de los fallos por rotura de diente.

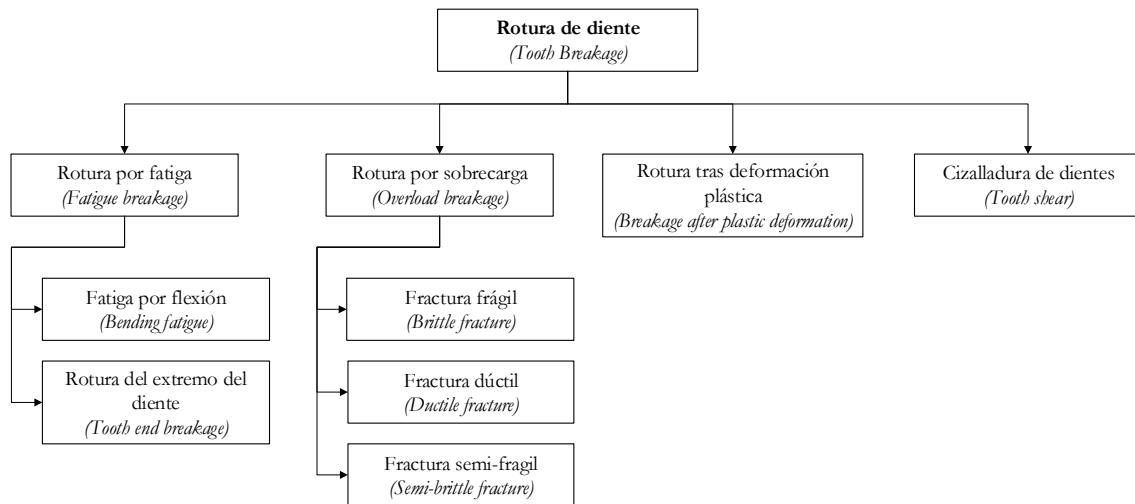






Figura 40. Clasificación de fallo rotura de diente según la norma ISO 10825 [92].

Uno de los principales tipos fallos de esta categoría es rotura por sobrecarga y rotura por fatiga, los cuales son ocasionados por sobrecargas o ciclos de esfuerzo de los dientes más allá del límite de resistencia del material, 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.

Para poder observar los niveles de severidad del fallo de rotura de diente que pueden existir en un engrane, se presenta en la Tabla 14, donde se resumen las principales características que se presenta mientras que el fallo evoluciona.

Tabla 14. Niveles de Severidad de rotura de diente en el engrane [1], [10].

Estado del Engrane	Normal	Fallo leve	Fallo moderado	Fallo severo
Imagen del Fallo				
Causa de fallo		Carga de trabajo excesiva por un tiempo prolongado.	Carga de trabajo excesiva por tiempo prolongado en un engrane con fallo leve de rotura. Se presenta también picado en la línea de paso debido a sobrecargas y tensión cíclica.	Carga de trabajo excesiva por tiempo prolongado en un engrane con fallo moderado de rotura debido a sobrecargas y tensión cíclica.
Descripción del fallo		Pequeñas grietas en la raíz del diente que causan desprendimiento de un pequeño porcentaje del diente.	Desprendimiento de más de la mitad del diente.	El diente se rompe desde la raíz completamente.
Porcentaje de área en los dientes		Menor al 25% del volumen total de un diente.	Hasta el 50% del volumen total de un diente.	Mayor al 50% del volumen total de un diente.
Ruido durante su funcionamiento	No causa ruido	Poca presencia de ruido durante su funcionamiento.	Causa ruido durante su funcionamiento.	Causa ruido considerable.

6. Experimentación

6.1 Metodología para la adquisición de señales de vibración y acústica

6.1.1 Banco de pruebas experimentales

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

El banco consta de cinco unidades principales: (1) unidad de mando, (2) unidad motriz, (3) unidad de carga, (4) unidad de sistemas rotativos y (5) unidad de sistema de adquisición de datos, como se muestra la Figura 41.

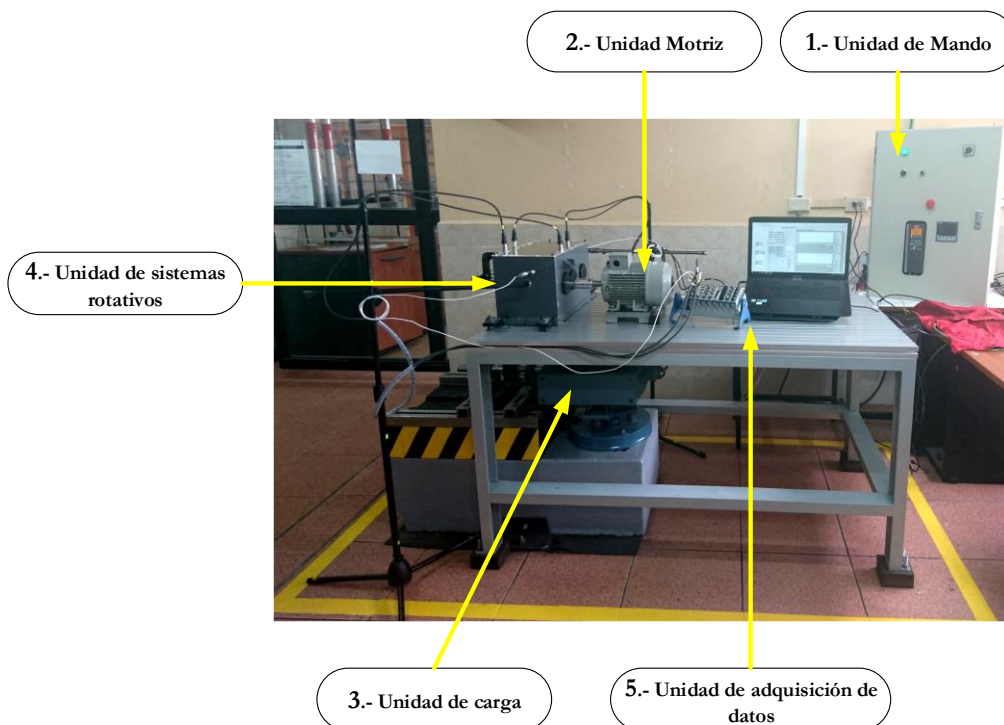


Figura 41. Banco de vibraciones de la UPS. [Fuente: Autor].

6.1.2 Montaje de sensores y elementos mecánicos en buen estado

En el montaje de los elementos mecánicos y sensores, tanto los acelerómetros como los micrófonos se debe tener una ubicación fija, lo cual permitirá que el sistema no sufra alteraciones durante su funcionamiento. La Figura 42 presenta el procedimiento a seguir para los respectivos montajes

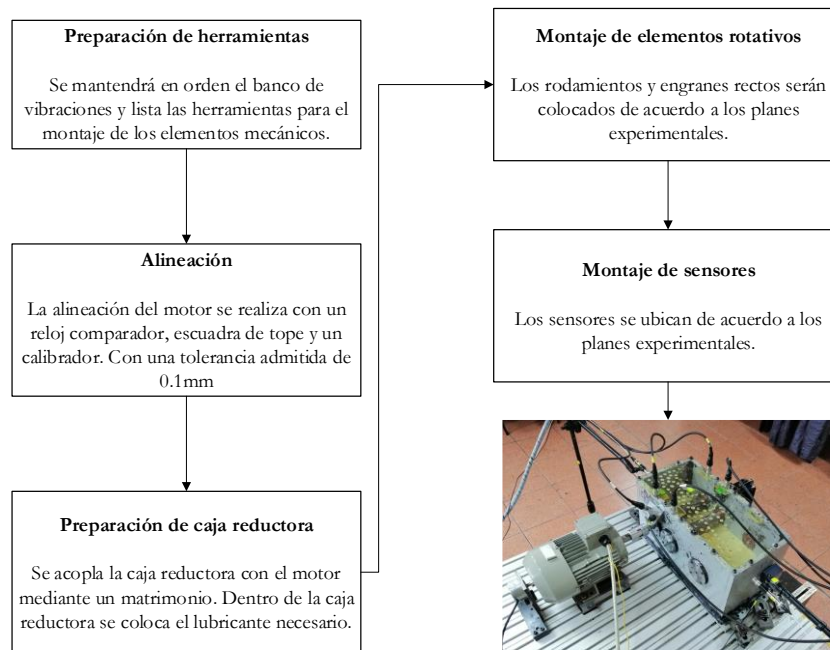


Figura 42. Proceso para el montaje de sensores y elementos mecánicos [Fuente: Autor].

6.2 Descripción del funcionamiento del banco

El movimiento es generado por un motor marca Siemens modelo 1LA7 096-6YA60, con alimentación trifásica de 220 V CA, de 2 Hp, 1200 rpm; mediante un acople flexible, éste transmite el movimiento al eje de entrada de la caja de engranajes. En el eje de salida de la caja de engranajes se ubica una polea que transmite, por medio de una banda flexible, el movimiento al freno electromagnético Rosati de 8.83 kW que permite simular carga. La caja de engranajes se configura en una etapa para trabajar en engranes rectos.

La Figura 43 muestra un modelo 3D de la configuración de la caja de engranajes y elementos mecánicos adicionales para la experimentación de esta base de datos. La Tabla 15 especifica estos elementos.

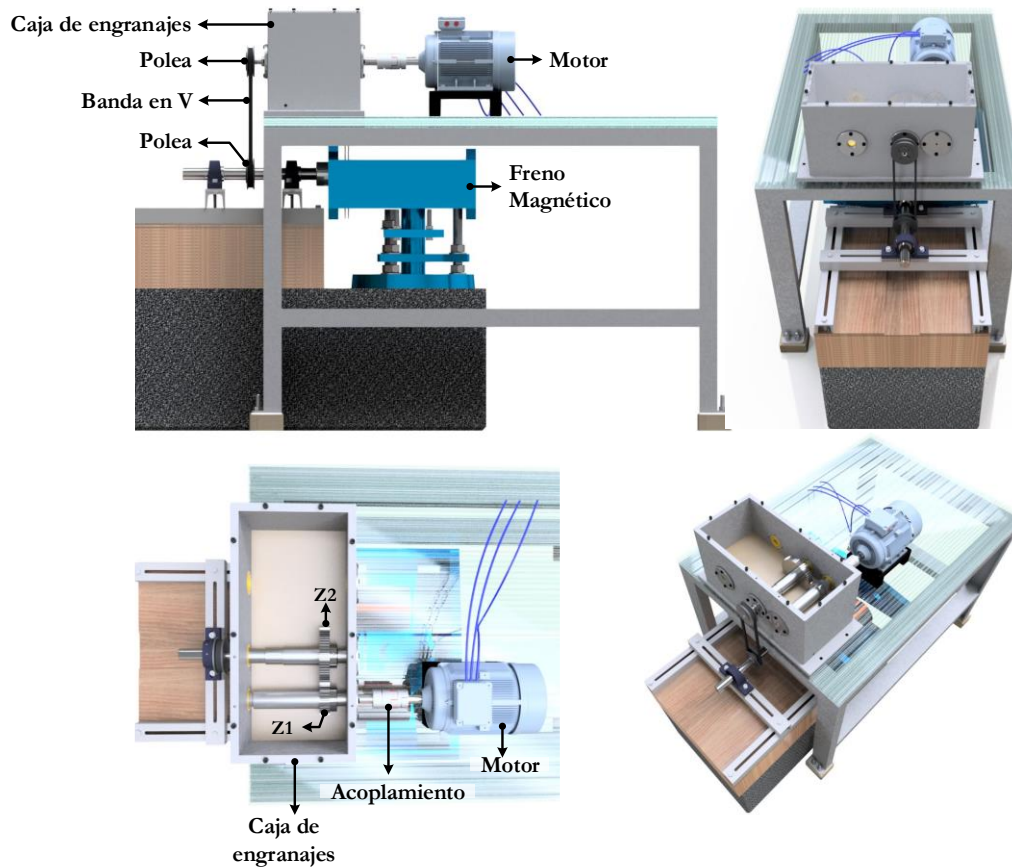


Figura 43. Configuración de la caja de cambios y de los elementos mecánicos adicionales [Fuente: Autor].

Tabla 15. Especificación del equipo mecánico utilizado en el equipo de ensayo [Fuente: Autor].

Especificación del equipo mecánico	
Caja de engranajes	Una fase con engranajes rectos
Motor	Siemens 1LA7 096-6YA60 2Hp
RPM Motor	1200 rpm
Acoplamiento	Acoplamiento flexible
Tipo de carga	Electromagnético a través de una transmisión de correa
Rodamientos	NTN 6005 Z2C3
Tipo de transmisión	Polea -Correa
Tipo de banda	Banda en V
Tipo de lubricación	Baño de aceite
Aceite	Gulf Harmony AW ISO VG 68
Cantidad de aceite	1,8 gal
Nivel de aceite	80mm desde la placa base

6.2.1 Engranajes rectos

El tipo de engranajes utilizados en este experimento son los engranajes rectos. Los fallos se simularán únicamente en la rueda dentada de piñón ($Z1$). La Figura 44 muestra el engranaje de piñón.



Figura 44. Engranaje de piñón [Fuente: Autor].

Las principales características de los engranajes rectos se presentan en la Tabla 16. Además, en la Figura 43 se puede ver la ubicación en la caja de engranajes.

Tabla 16. Características de los engranajes rectos [Fuente: Autor].

Características de los engranajes rectos	
Tipo de engranajes	Recto
Material	Acero E410
Ancho	20,7 mm
Números dientes	$Z1 = 32$
	$Z2 = 48$

6.3 Instalación de acelerómetros

Durante el funcionamiento de la máquina rotativa, las señales de vibración provenientes de la interacción mecánica de los engranes, se propagan a través de la carcasa hasta los acelerómetros, por tal motivo, se deben situar los acelerómetros en un punto estratégico para que recojan la mayor cantidad de información.

6.3.1 Ubicación de los acelerómetros

En trabajos anteriores del grupo se desarrolló la metodología de la ubicación de los acelerómetros mediante norma con sus debidas consideraciones. La medición de vibración está contemplada por la norma ISO 10816-3 [94], esta norma enuncia máquinas de engranajes y rodamientos tipos reductores, también la posición de los acelerómetros los cuales deben estar en una parte segura, en la cual no afecte a la rotación de la máquina y no afecte para el montaje y desmontaje. Como se muestra en la Figura 45.

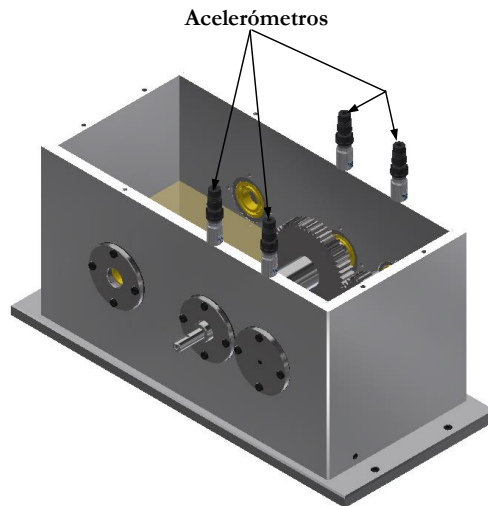


Figura 45. Ubicación de los acelerómetros en la caja de engranajes [Fuente: Autor].

6.3.2 Conexión de los acelerómetros

En la conexión cabe señalar que el acelerómetro no necesita de un preamplificador debido a que las señales tienen la suficiente amplitud para ser manejadas computacionalmente, por lo que se conectan directamente al módulo de adquisición, como se observa en la Figura 46.

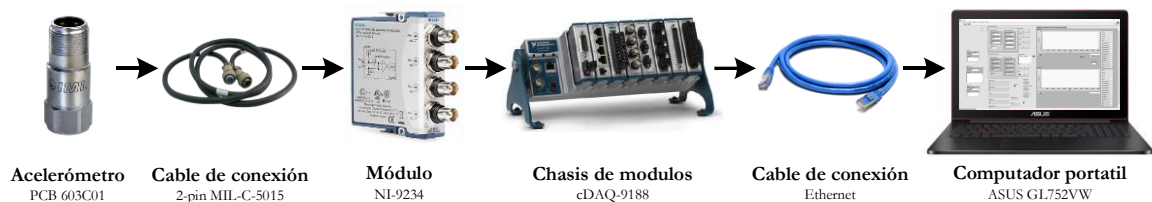


Figura 46. Esquema de la conexión real del sistema de adquisición de señales de vibración para la experimentación [Fuente: Autor].

El módulo de adquisición de cuatro canales NI-9234 recibe las señales de los cuatro acelerómetros a una frecuencia de 50kHz por cada canal y está montado directamente sobre un chasis de módulos NI cDAQ-9188 que a su vez está conectado al computador portátil mediante cable Ethernet [11].

6.4 Instalación de los micrófonos

Durante el funcionamiento de la caja, las señales acústicas provenientes de la interacción mecánicas de los engranes, se propagan a través del aire hasta los micrófonos, por tal motivo, se realizará una revisión bibliográfica del emplazamiento de micrófonos y se procederá a la ubicación en la caja de engranajes.

6.4.1 Revisión bibliográfica de la ubicación del micrófono

En la Tabla 17 se presenta una revisión bibliográfica de trabajos relacionados con señales acústicas. En esa tabla se detalla el mecanismo ocupado, el tipo de fallo, el tipo y el número de micrófonos utilizados, la posición del micrófono en el mecanismo, el tamaño de la muestra del experimento y la frecuencia de muestreo utilizada.

Tabla 17. Ubicación de los micrófonos en trabajos [Fuente: Autor].

Ref.	Mecanismo	Tipo de Fallo	Tipo de Micrófono	Nº de Micrófonos	Posición de Micrófono	Tamaño de muestra	Frecuencia de muestreo
[43]	Caja de cambios	Desalineación	Micrófono GRAS © 40 PP	1	Vertical	*	3.5kHz
[95]	Caja de cambios	Rotura de diente	Micrófono B&K integrado	1	Vertical	*	6,4kHz
[96]	Caja de engranajes	Fallo de desgaste de la superficie del diente del piñón	Micrófono de campo directo con una sensibilidad de 50mV/Pa	1	Horizontal	120 s	*
[97]	Dispositivo de excitación accionado por un electroimán	Grieta (<i>Crack</i>)	Micrófono Electret de 4mm (diámetro) - 1.5 espesor marca: Panasonic WM-G10D, Japón	1	Distancia de 10 mm dentro de un tubo	512, 1024 y 2048 puntos de muestreo	51,2kHz
[98]	Motor	Mapeo bidimensional de las fuentes de sonido	*	29	Posición en cruz de distancia de 1,5 m con separación de 0.1m	*	11025Hz
[99]	Caja de engranajes planetarios de rotura de diente	Engranaje de anillo roto, engranaje de anillo agrietado, y engranaje planetario con cara de diente desgastado.	Micrófono AKG modelo C147 con rango de frecuencia entre 20 Hz y 20 kHz	1	Parte posterior	42 muestras en total, 28 de entrenamiento y 14 para analizar	*
[100]	Torno	Corte con herramienta de desbaste	Micrófono de condensador	1	Plano vertical	100 ms	50kHz

* El autor no proporciona información al respecto.

Ref.	Mecanismo	Tipo de Fallo	Tipo de Micrófono	Nº de Micrófonos	Posición de Micrófono	Tamaño de muestra	Frecuencia de muestreo
[101]	Caja de engranajes rectos	Grieta (<i>Crack</i>)	Micrófono array de tipo 40PH de la carga G.R.A.S. con sensibilidad de 52,14 mV/Pa	1	Campo libre a una distancia de 1m	50 muestras y un total de 600 muestras	44000Hz
[102]	Sonidos de dos maquinas	Desequilibrio	Micrófono incorporado	2	Horizontal	*	44100Hz
[103]	Caja de cambios	Engrane desgastado y otro de perdida de dos dientes	Micrófono basado en IEPE	1	Vertical	100 muestras por cada uno en un retraso de 10 min	*
[104]	Compresor	Caracterización de fallos en compresor	Micrófonos unidireccionales	1	El total de posiciones 24 a 1,5 cm de distancia de la maquina	5 seg y un total de 250000 muestras	50kHz
[105]	Caja de cambios planetarios	Daño por desgaste local en el diente	*	1	Parte superior de la caja a 10cm	Tiempo de muestreo 60 s	20480Hz
[106]	Caja de engranajes	Rotura de diente (<i>Tooth Breakage</i>) Grieta (<i>Crack</i>)	Micrófono de campo libre prepolarizado Tipo 46 AE	1	Horizontal a 20cm de la caja	*	8192Hz
[107]	Caja de engranajes	Grieta (<i>Crack</i>)	*	2	Vertical a 6cm de distancia de la maquina	Muestreo es 8192 con un retraso de 3s	5kHz

* El autor no proporciona información al respecto.

6.4.2 Ubicación de los micrófonos

De acuerdo con la información anterior se procede a ubicar lo más cerca en un punto donde recojan mayor cantidad de información sobre el engrane, como se observa en la Figura 47.

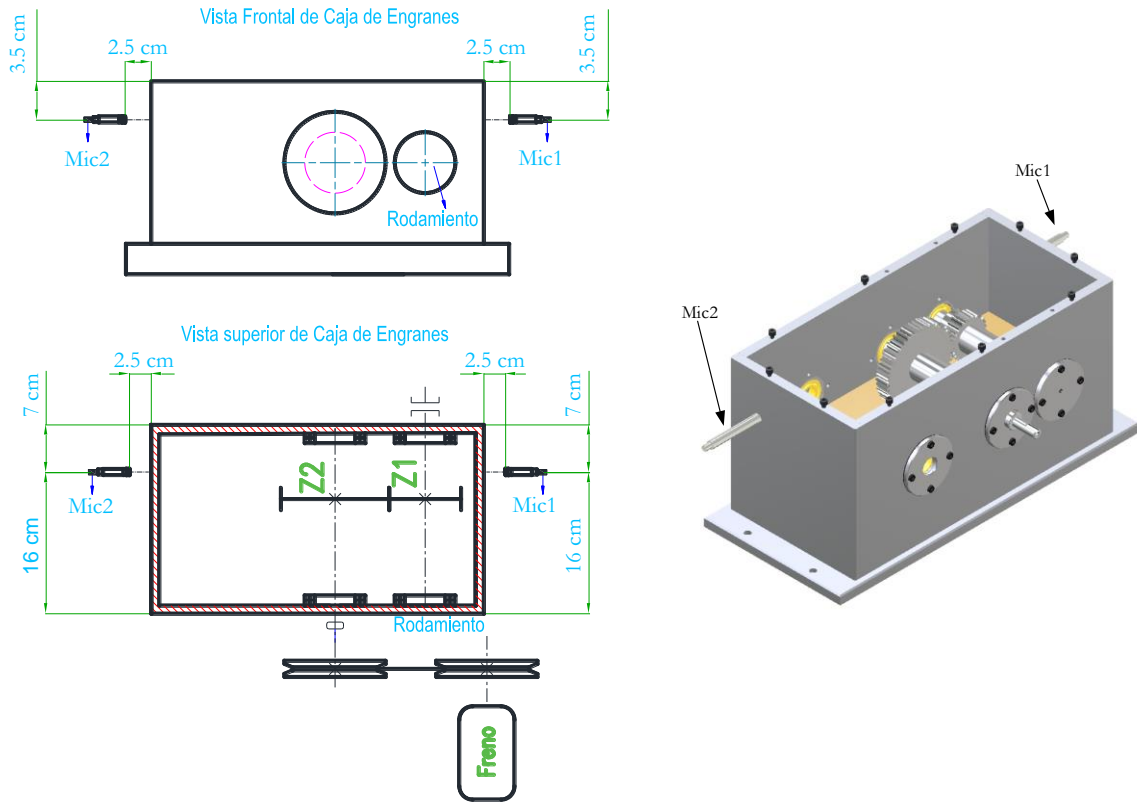


Figura 47. Ubicación real de los micrófonos en el experimento [Fuente: Autor].

6.4.3 Conexión de los micrófonos

En la conexión cabe señalar que el micrófono y el preamplificador están compactados en un solo elemento, que se conecta directamente al módulo de adquisición mediante cable con entrada y salida tipo BNC, como se observa en la Figura 48.

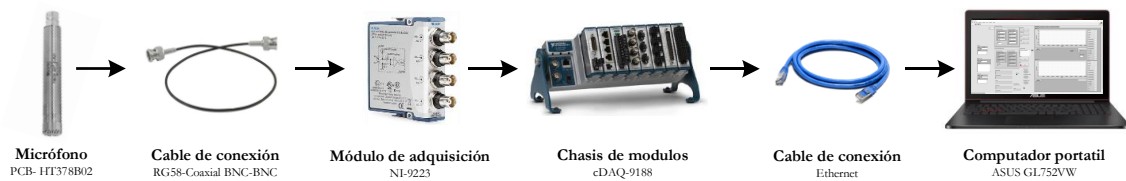


Figura 48. Esquema de la conexión real del sistema de adquisición de señales acústicas para la experimentación [Fuente: Autor].

El módulo de adquisición de cuatro canales NI-9234 recibe las señales de los dos micrófonos capacitivos a una frecuencia de 50kHz por cada canal y está montado directamente sobre un

chasis de módulos NI cDAQ-9188 que a su vez está conectado al computador portátil mediante cable Ethernet.

6.5 Programa de adquisición de datos

El GIDTEC cuenta con su propio software para adquirir señales de vibración y señales acústicas, el cual fue desarrollado en LabVIEW®. En la Figura 49 se presenta la interfaz gráfica del programa.

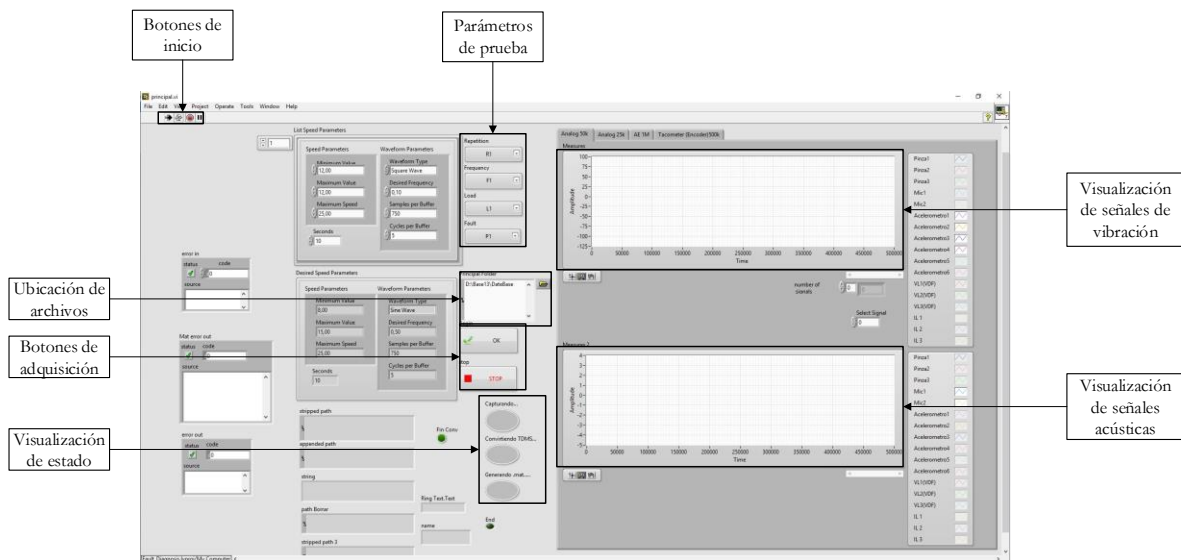


Figura 49. Interfaz del programa vibraciones y acústica [Fuente: Autor].

En los botones de inicio se pueden ejecutar, pausar, actualizar y detener el programa. En los parámetros de prueba se tienen la combinación característica de cada señal, como la repetición, frecuencia, carga y fallo. La repetición es el número de señal o datos que se adquieren con la misma configuración operacional y experimental, la frecuencia es la velocidad de la caja, la carga es el voltaje enviado al freno magnético y el fallo es nivel de severidad de fallo de engrane experimentado.

6.6 Establecimiento de la línea base

Consiste en la adquisición de las señales de vibración y acústica de la caja engranes en condiciones normales, es decir, con engranes normales sin fallos. Las señales adquiridas de los diferentes fallos que se configuran en la caja de engranajes se comprobarán con esta línea base, lo cual ayudará a detectar los cambios que se presenten en las señales, conforme a la severidad del fallo incrementa.

6.7 Validación de la línea base

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

6.7.1 Verificación visual

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

6.7.2 Verificación de ruidos extraños

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

6.7.3 Verificación de frecuencias características

Cuando una caja de engranajes se encuentra en buenas condiciones generan frecuencias características que están determinadas por la relación de transmisión entre piñón-rueda y velocidad de giro. En la Figura 50 se presenta un espectro característico de vibraciones de una caja de engranajes en buenas condiciones [9].

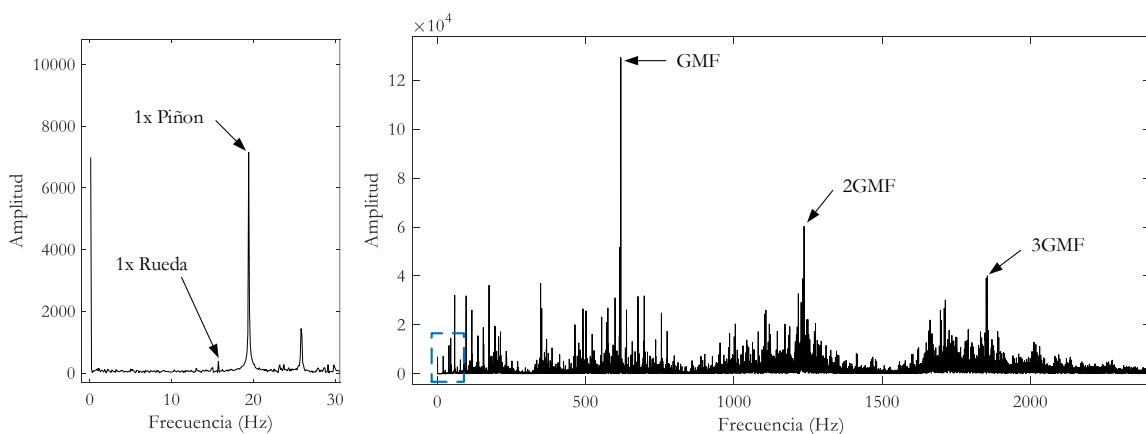


Figura 50. Espectro característico de la caja de engranajes en buenas condiciones [Fuente: Autor].

El cálculo de las frecuencias características de las señales en dominio de la frecuencia se presenta en las siguientes ecuaciones:

- Frecuencia de giro

$$F_g = \frac{RPM_{motor}}{60} [Hz] \quad (24)$$

- Frecuencia de giro piñón

$$1X \text{ piñón} = F_g [Hz] \quad (25)$$

- Frecuencia de giro de rueda

$$1X \text{ rueda} = F_g * \frac{Z_1}{Z_2} [Hz] \quad (26)$$

- Frecuencia de paso de engranes

$$GMF = F_g * Z_1 \quad (27)$$

Donde:

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

Z_1 : Número de dientes del piñón

Z_2 : Número de dientes del engrane

GMF : Frecuencia de engrane

6.8 Plan experimental

Los planes experimentales fueron desarrollados en el laboratorio de vibraciones mecánicas de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, se ocupa el banco de maquinaria rotativa el cual cuenta con un motor de marca Siemens y está conectado a una caja de engranajes es un conjunto que también cuenta con un freno magnético para simulaciones, en la adquisición de datos se emplean cuatro acelerómetros y dos micrófonos, las señales serán adquiridas por diferentes tarjetas de adquisición de datos que están montadas en un chasis NI cDAQ-9188 de National Instruments a través de un computador portátil marca ASUS, en la Figura 51 se muestra la configuración del chasis NI cDAQ-9188 para el experimento y número de modelo de cada tarjeta.

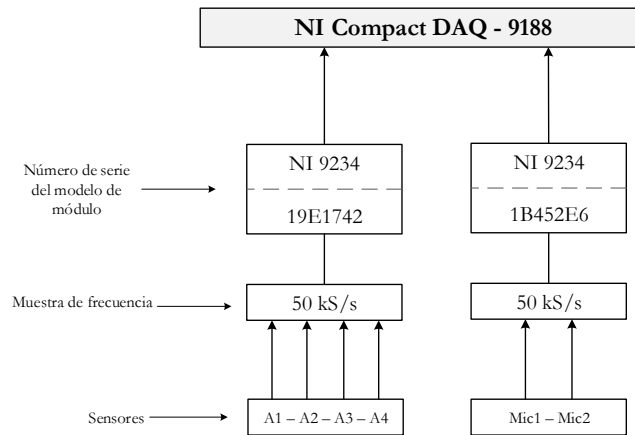


Figura 51. Configuración del chasis [Fuente: Autor].

En la figura anterior se observa la configuración de la tarjeta para la adquisición de datos, tanto para acelerómetros como para micrófonos en 50000 muestras por segundo. En la Figura 52 se observa la caja de engranajes y la ubicación de los sensores en el experimento.

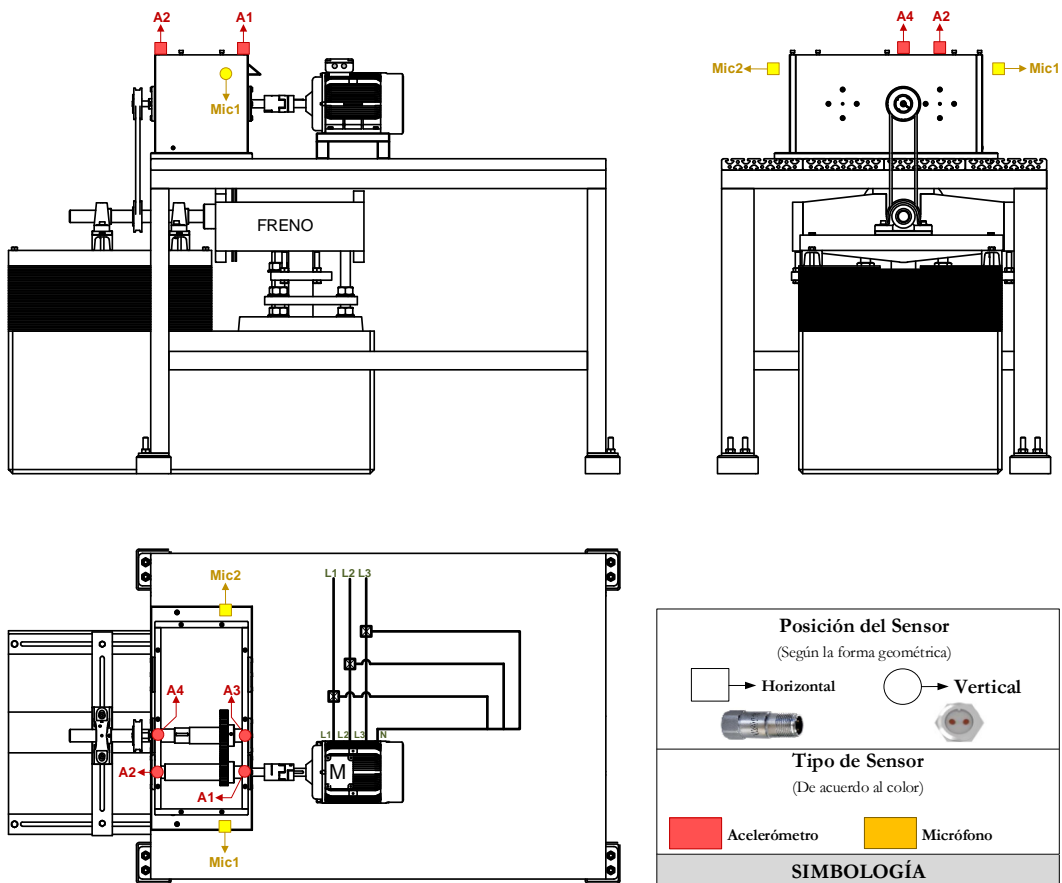


Figura 52. Configuración de la caja de engranajes para la adquisición de datos [Fuente: Autor].

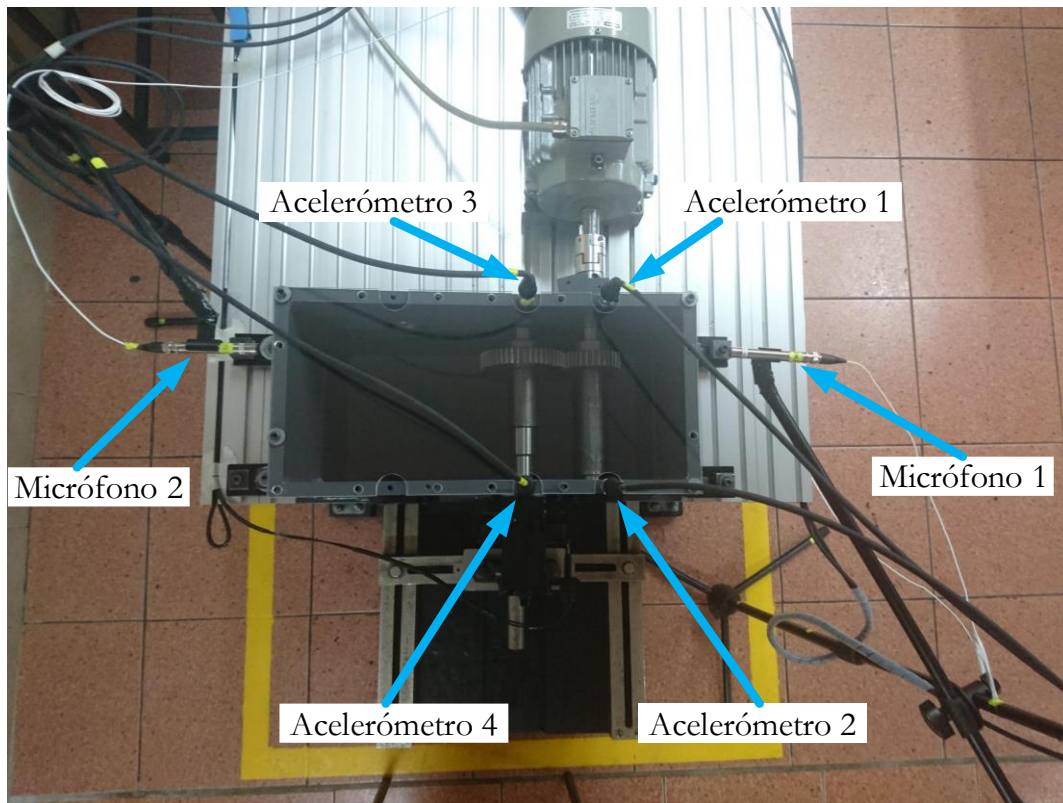


Figura 53. Foto real de la ubicación de los sensores [Fuente: Autor].

En la Figura 53 se observa una foto real de la ubicación de los acelerómetros y micrófonos en la caja de engranajes.

Se realizó un plan experimental de severidad para engranes rectos, el cual se encuentra disponible en el GIDTEC con su formato establecido dentro del grupo; esto define los parámetros para realizar la experimentación, con el fin de que puedan ser replicados en futuros trabajos o investigaciones.

6.9 Metodología de validación de la línea base

Se realizó un diagrama para la validación de la línea base para las señales de vibración y acústica, como se observa en la Figura 54.

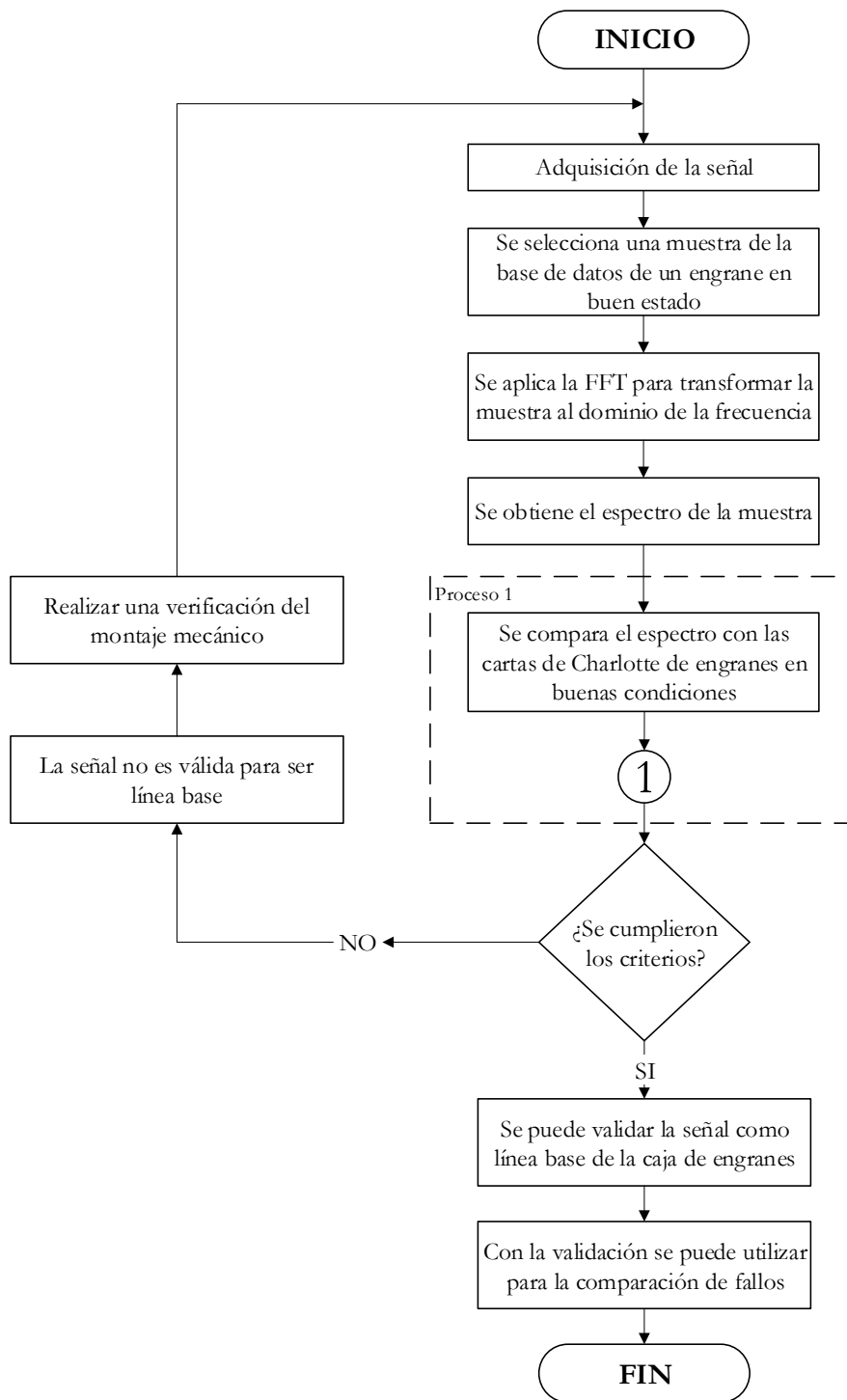


Figura 54. Validación de señales adquiridas [Fuente: Autor].

El proceso para establecer una línea base de la caja de engranajes, comienza con una selección de una muestra adquirida de una señal de un engrane en buen estado, por tanto, se utiliza la FFT para transformar la muestra al dominio de la frecuencia, de tal manera se obtiene un espectro característico de la caja de engranajes; así mismo sirve para una comparación mediante las cartas de Charlotte. En el proceso 1 se detalla la verificación con los diferentes criterios como se observa en la Figura 55.

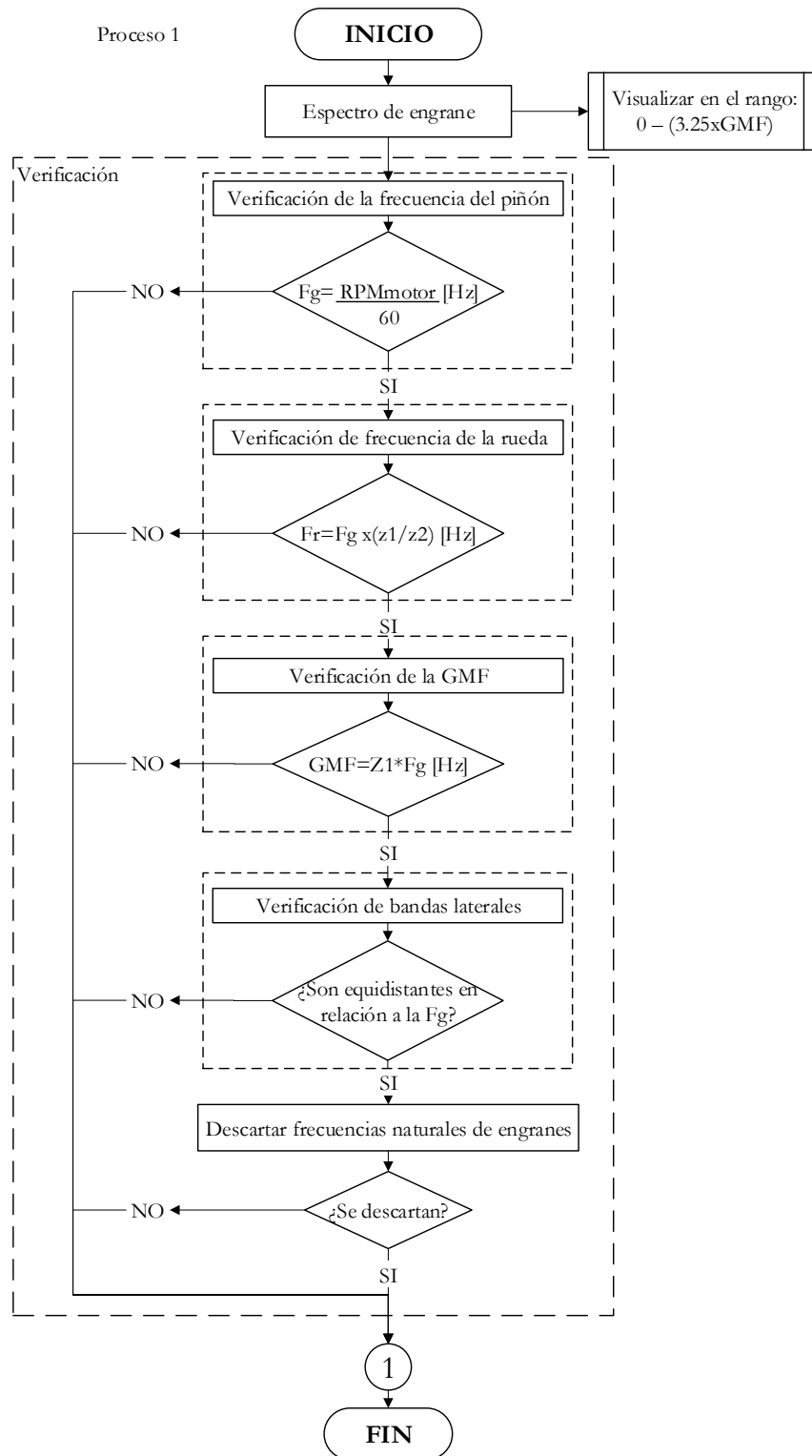


Figura 55. Proceso de verificación [Fuente: Autor].

Para el proceso de verificación se debe tener en cuenta que la información principal en un espectro se encuentra en un rango de 0 a 3.25xGMF según cartas de Charlotte. Primeramente, se verifican la frecuencia del piñón, de la rueda, la GMF, bandas laterales y se debe descartar frecuencias naturales del engrane. Con estos parámetros verificados se regresa

a la Figura 54, de tal manera que se realiza una pregunta, ¿se cumplieron los criterios? se tiene dos respuestas que son: SI se cumplieron los criterios, se puede validar la señal como línea base de caja de engranajes rectos y NO se cumplieron los criterios, no es válida la señal como línea base, se procede a realizar una verificación del montaje mecánico de la caja de engranajes y se adquiere nuevamente la señal para una nueva validación.

6.10 Validación de las repeticiones

La validación de las repeticiones es un paso importante en el análisis de señales, el cual consiste en que todas las repeticiones tengan igualdad de muestras en cada una de los mismos, para comprobar aquello se realizó un diagrama como se observa en la Figura 56.

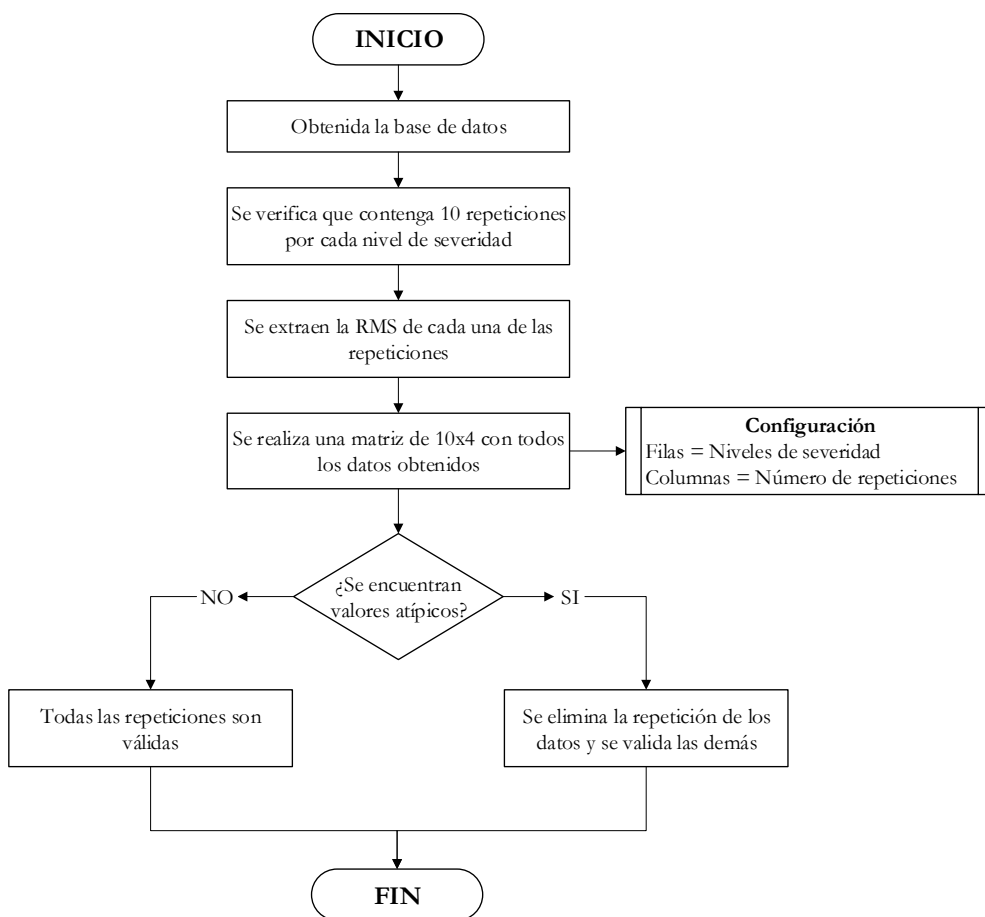


Figura 56. Validación de las repeticiones [Fuente: Autor].

Para la validación primeramente se verifica visualmente que la base de datos contenga 10 repeticiones por cada nivel de severidad; luego se extraen las RMS (Raíz media cuadrática) de cada una de las repeticiones; posteriormente se realiza una matriz de 10x4 con todos los datos obtenidos, la cual tiene la siguiente configuración: las filas son los niveles de severidad y las columnas el número de repeticiones de cada severidad. Con la matriz obtenida se procede a realizar la siguiente pregunta, ¿Se encuentran valores atípicos? Se tiene dos

respuestas que son: SI se encuentran valores atípicos se procede a eliminar la repetición; NO se encontró ningún valor atípico por lo tanto se validan las repeticiones de la base de datos. Esto sirve para al momento de elegir una muestra de la señal estar seguro de que las repeticiones sean iguales en toda la base de datos.

6.11 Selección de sensores

6.11.1 Selección del sensor de vibración

Una vez adquirida la base de datos se procede a seleccionar el sensor que recoja más señales de la caja, el cual tenga más información del sistema mecánico, por lo tanto se procede a comparar todas las muestras recogidas por los acelerómetros, los cuales están divididos en dos por sus respectivos ejes; en el eje de entrada se encuentran ubicados los acelerómetros 1 y 2, en cambio en el eje de salida se encuentran ubicados los acelerómetros 3 y 4, como se observa en la Figura 57.

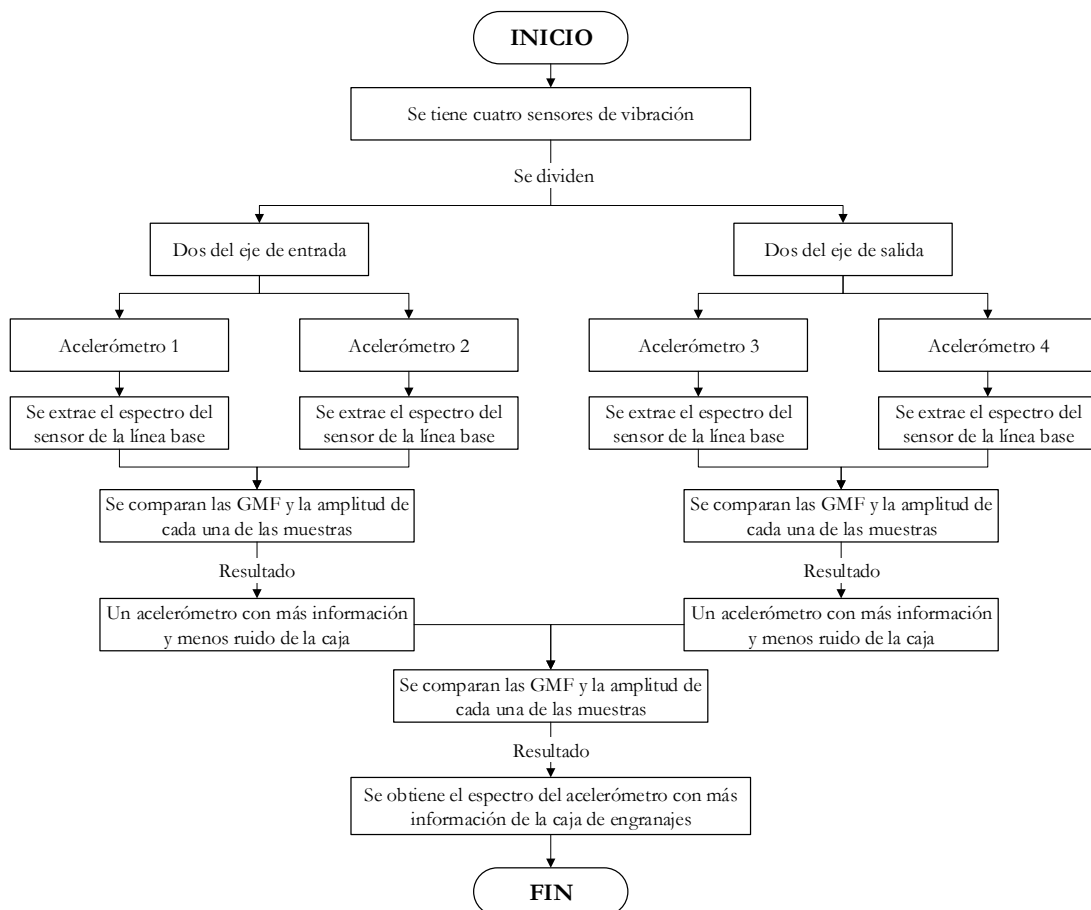


Figura 57. Selección del sensor de vibración [Fuente: Autor].

Como se observa en la Figura 57, se extrae el espectro de cada uno de los acelerómetros y se procede a una comparación, mediante los siguientes parámetros: la GMF y la amplitud de la

muestra. Con estos parámetros se obtiene una muestra de cada uno de los ejes y posteriormente se comparan con los mismos parámetros hasta obtener la muestra con más información de la caja de engranajes, esto sirve para el proceso de comparación de las señales.

6.11.2 Selección del sensor acústico

Ahora para la selección del sensor acústico se tiene dos micrófonos se extraen los espectros de cada uno utilizando la línea base, se procede a comparar con los siguientes parámetros: la GMF y amplitud más alta, determinando así cual micrófono nos entrega más información del espectro acústico de la caja, esto sirve para el proceso de comparación de las señales, como se observa en la Figura 58.

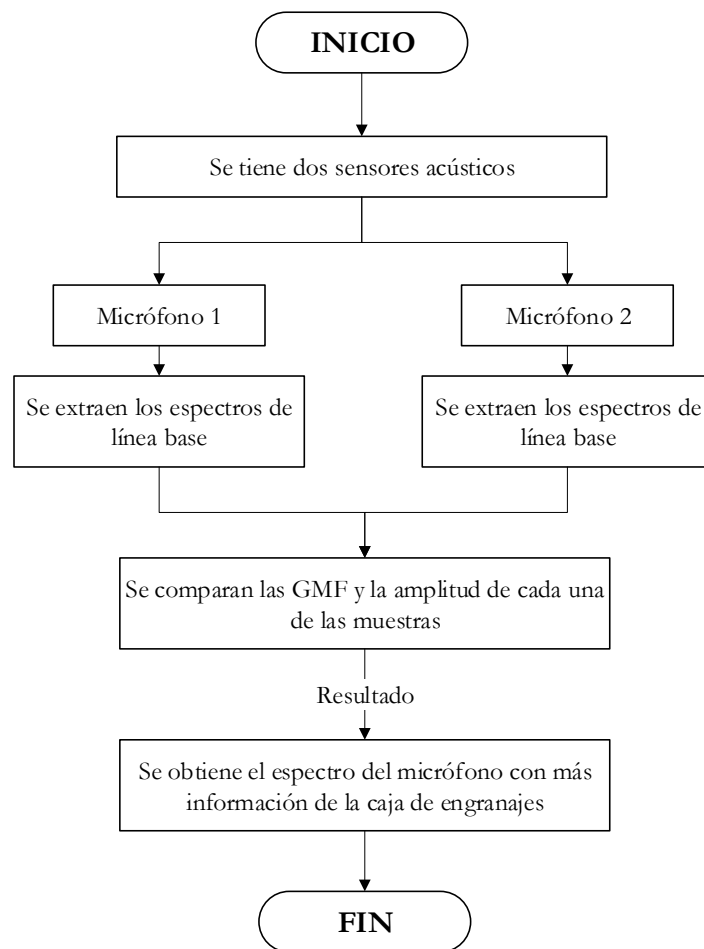


Figura 58. Selección del sensor acústico [Fuente: Autor].

6.12 Comparación de severidad

En la comparación de severidad se comparan las señales de vibración y acústica para las severidades de fallos en engranes rectos, esto se aplicará para los fallos de picadura y rotura de diente.

6.12.1 Comparación de severidad de vibración

Se procede a seleccionar cuatro muestras de la base de datos; la primera constaría de la línea base, la segunda de un fallo leve, la tercera de un fallo moderado y por último de un fallo severo como se observa en la Figura 59.

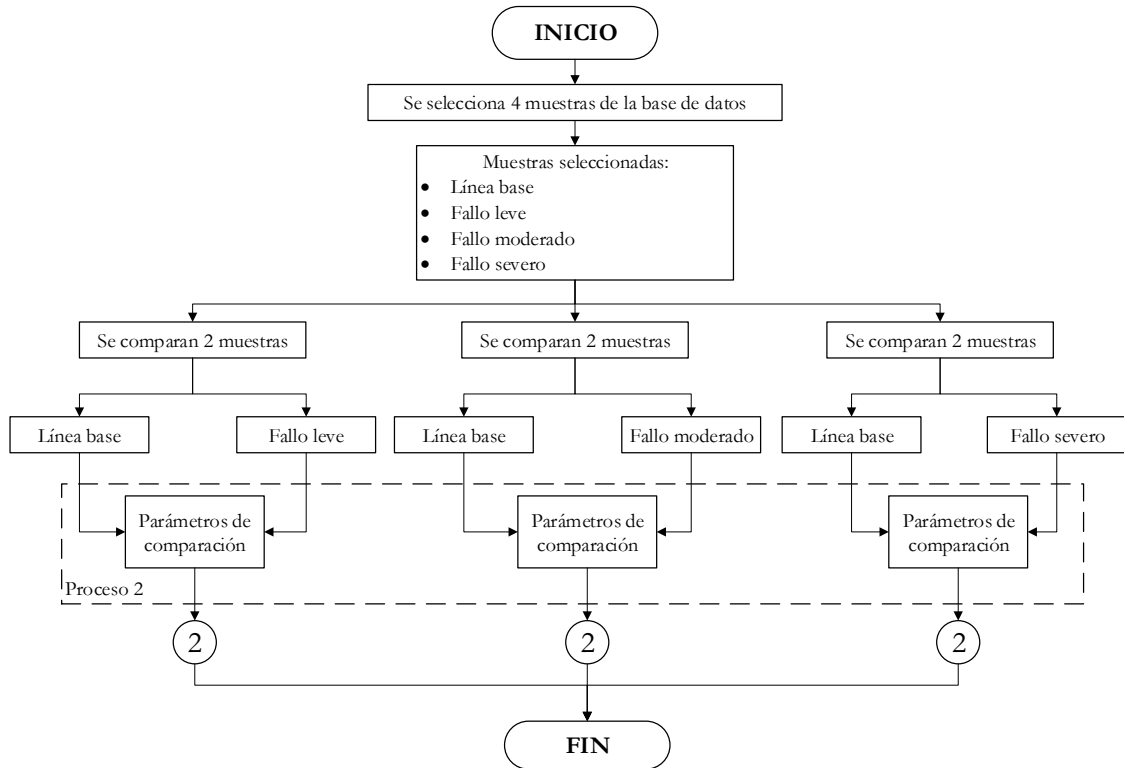


Figura 59. Comparación de severidad en vibración [Fuente: Autor].

Como se observa, la forma de comparación de las cuatro muestras de las señales de vibración de la caja de engranajes, la línea base es el punto comparativo con las demás muestras de los fallos con tres fases de comparación por cada fallo. De esta manera se procede a realizar la comparación con los siguientes parámetros que se encuentran en el proceso 2, como muestra la Figura 60.

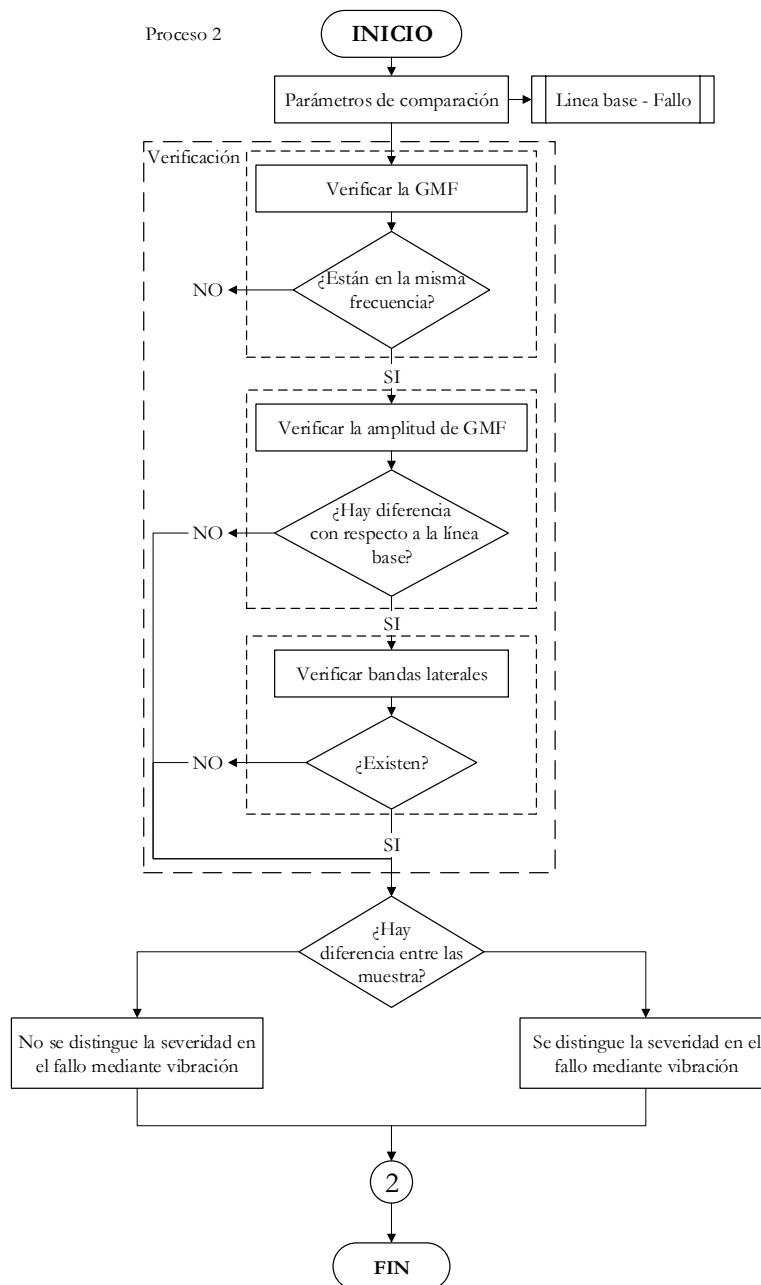


Figura 60. Proceso de comparación de vibración [Fuente: Autor].

Como se observa en la Figura 60, para los parámetros de comparación se debe contar con la línea base y un fallo. Primeramente, se realizó una verificación de la GMF, comprobando que en cada muestra sea la misma. Luego, se verificó que la amplitud de la GMF exista diferencia con respecto a línea base y también se verificó que las bandas laterales existan en ambas muestras. Ya verificado estos parámetros se responde a la siguiente pregunta: ¿Hay diferencia en la muestra? se tiene dos opciones de respuesta que son: SI la muestra se distingue de la línea base, por lo tanto es apreciable la severidad; caso contrario, si la respuesta es NO, la muestra no se distingue de la línea base, por lo tanto no se aprecia la severidad de fallo en engranes rectos mediante vibración; por lo que se regresa al diagrama de la Figura 59.

6.12.2 Comparación de severidad en acústica

Con la obtención de la muestra del sensor acústico se procede a tomar cuatro muestras de la base de datos; la primera constaría de la línea base, la segunda de un fallo leve, la tercera de un fallo moderado, y por último de un fallo severo como se observa en la Figura 61.

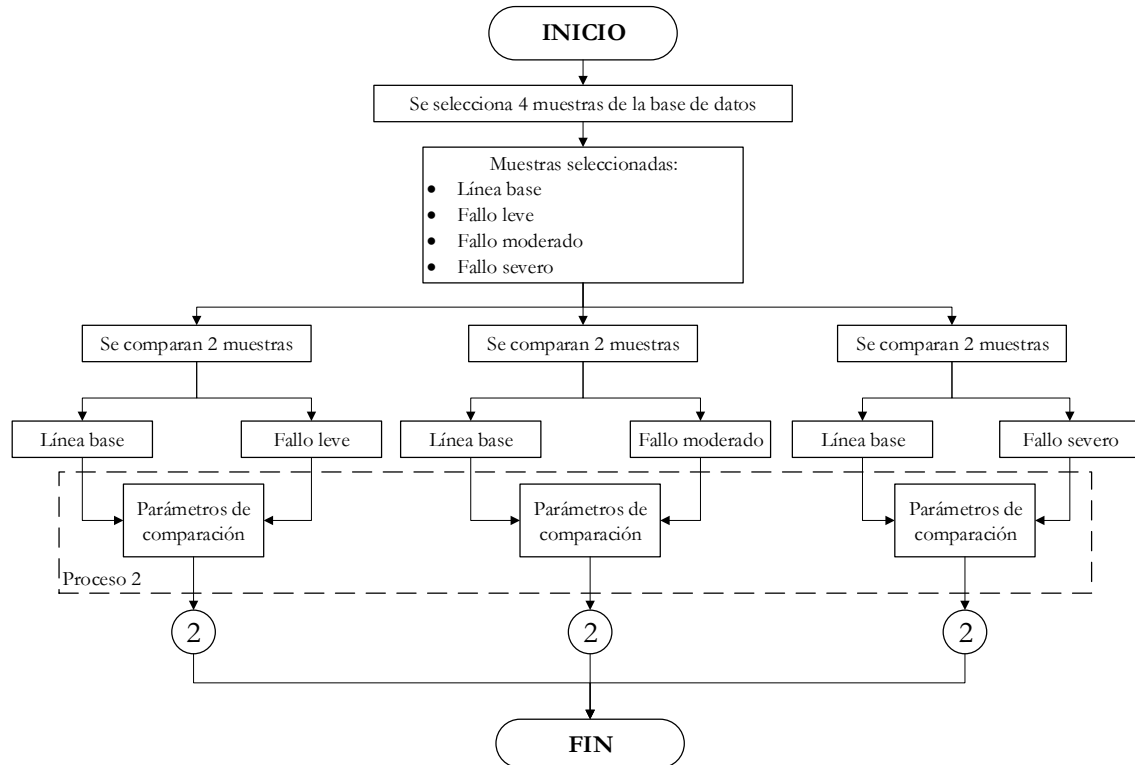


Figura 61. Comparación de severidad en acústica [Fuente: Autor].

Como se observa, la forma de comparación de las cuatro muestras de las señales acústicas de la caja de engranajes, la línea base es el punto comparativo con las demás muestras de los fallos con tres fases de comparación por cada fallo. De esta manera se procede a realizar la comparación con los siguientes parámetros que se encuentran en el proceso 2, como muestra la Figura 62.

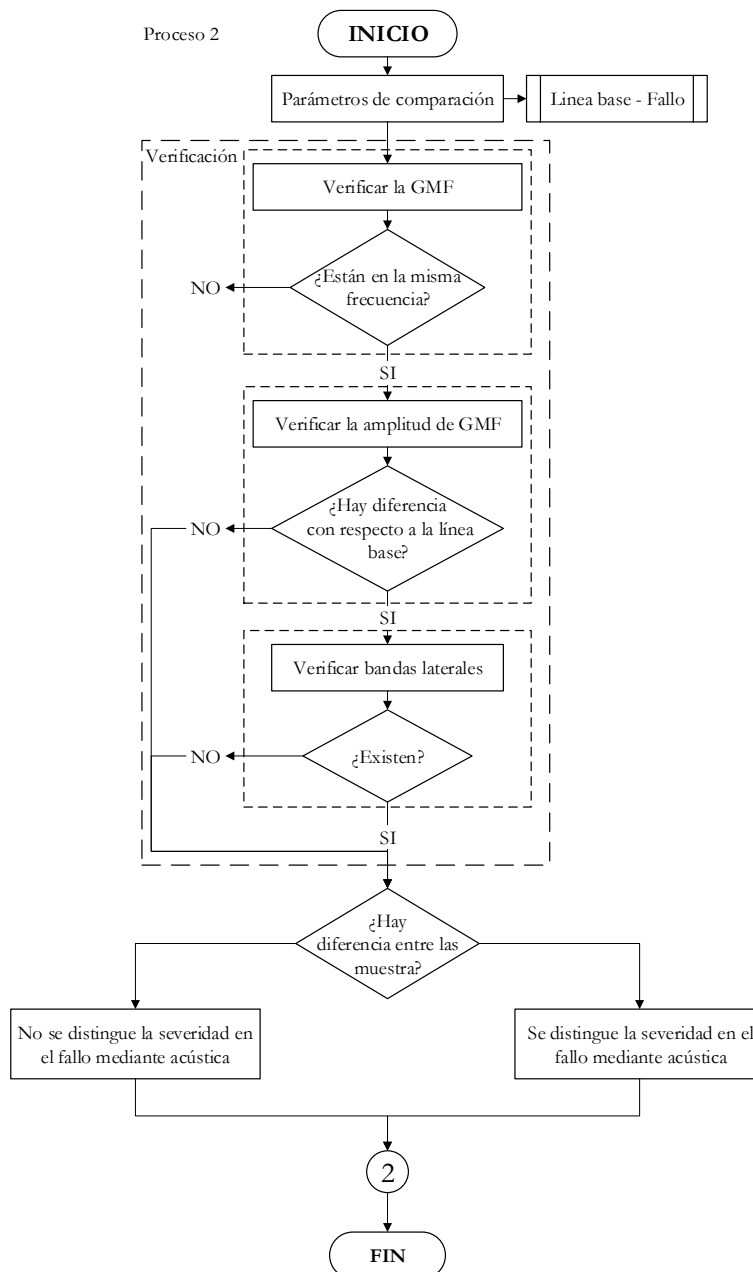


Figura 62. Proceso de comparación de acústica [Fuente: Autor].

Como se observa en la Figura 62, para los parámetros de comparación se debe contar con la línea base y un fallo. Primeramente, se realizó una verificación de la GMF, comprobando que en cada muestra sea la misma. Luego, se verificó que la amplitud de la GMF exista diferencia con respecto a línea base y también se verificó que las bandas laterales existan en ambas muestras. Ya verificado estos parámetros se responde a la siguiente pregunta: ¿Hay diferencia en la muestra? se tiene dos opciones de respuesta que son: SI la muestra se distingue de la línea base, por lo tanto es apreciable la severidad; caso contrario, si la respuesta es NO, la muestra no se distingue de la línea base, por lo tanto no se aprecia la severidad de fallo en engranes rectos mediante acústica; por lo que se regresa al diagrama de la Figura 61.

6.13 Metodología de comparación de señales entre vibración y acústica

Para la comparación de las señales se utilizó la Tabla 18. Esta tabla permite comparar las señales de vibración y acústica de los fallos de picadura y rotura de diente. Estos fallos constan de cuatro niveles: los cuales consisten en el primero de línea base, el segundo fallo leve, el tercero fallo moderado y por último el fallo severo. Por consiguiente, cada uno de estos se divide en tres para las siguientes cargas: L1 = 0V, L2 = 10V y L3 = 20V, que son voltajes aplicados al freno magnético el cual aplica un torque al eje de salida de la caja. Además, la frecuencia $F1 = 20\text{Hz}$ es la frecuencia de giro del motor hacia el eje de entrada la caja de engranajes.

Tabla 18. Proceso comparativo de espectros de las señales [Fuente: Autor].

Severidad de fallo	Vibración	Acústica
Línea Base	$F1 - L1$	$F1 - L1$
	$F1 - L2$	$F1 - L2$
	$F1 - L3$	$F1 - L3$
Fallo Leve • Picadura • Rotura de diente	$F1 - L1$	$F1 - L1$
	$F1 - L2$	$F1 - L2$
	$F1 - L3$	$F1 - L3$
Fallo Moderado • Picadura • Rotura de diente	$F1 - L1$	$F1 - L1$
	$F1 - L2$	$F1 - L2$
	$F1 - L3$	$F1 - L3$
Fallo Severo • Picadura • Rotura de diente	$F1 - L1$	$F1 - L1$
	$F1 - L2$	$F1 - L2$
	$F1 - L3$	$F1 - L3$

Diagrama de anotaciones en la Tabla 18:
 - Una flecha vertical azul a la izquierda indica "Evolución" hacia abajo.
 - Una flecha vertical azul a la derecha indica "Aumento".
 - Flechas horizontales azules entre las columnas "Vibración" y "Acústica" indican "Comparación".
 - Flechas verticales azules dentro de las columnas "Vibración" y "Acústica" indican "Comparación".

Con la Tabla 18 se observa la evolución del fallo de un engrane en buen estado a un estado de un fallo severo, así mismo se observa el aumento de la carga en cada uno de los niveles, por último, ayudará a tener una mejor comparación de las señales tanto de vibración como de acústica en cada nivel de severidad de fallo. Para el estudio comparativo se formulará preguntas que ayudará en la comparación de las señales tanto de vibración como de acústica, son las siguientes:

1. ¿Las muestras se comparan en el mismo rango de frecuencia para vibración y acústica?
2. ¿Es visible el espectro característico de la GMF en señales acústicas y de vibración?

3. ¿Que muestra presenta mayor amplitud visualmente en las señales?
4. ¿Que muestra presenta un espectro anormal en donde no se diferencie la GMF visualmente?, En la Figura 63 se presenta un ejemplo de una señal normal contra una señal anormal.

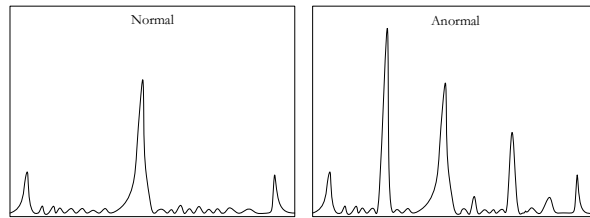


Figura 63. Señal normal y anormal [Fuente: Autor].

5. ¿Se afecta a la amplitud de la GMF de cada fallo con respecto a la línea base?
6. ¿Cómo afecta a la GMF en el aumento de carga en cada configuración?
7. ¿Los valores de frecuencia obtenidos de las bandas laterales son iguales para señales de vibración y acústica?
8. ¿En qué tipo de señal (acústica/vibración) es posible visualizar las bandas laterales de manera clara?

Teniendo en cuenta las preguntas, se formuló unas respuestas las que ayudarán a la comparación como se observa en la Tabla 19. Cuenta con los símbolos para las respuestas y el significado de cada uno de ellos.

Tabla 19. Datos para las respuestas de las preguntas [Fuente: Autor].

Símbolos	Datos
x	Señal de vibración
+	Señal acústica
-	Normal (Vibración / Acústica)
SI	Afirmación
NO	Negación

Con los datos para la respuesta se procede a responder cada pregunta, en lo cual servirá para la comparación de las señales de cada uno de los niveles de severidad, también se puede realizar un análisis general de todos los niveles con las siguientes preguntas:

- ¿Qué sucede al aumentar el nivel de severidad en el fallo? (Acústica y Vibración)
- ¿Qué sucede al aumentar la carga en el eje a la salida de la caja de engranajes? (Acústica y Vibración)
- ¿Qué técnica de detección es factible para el análisis de fallos en engranes rectos?

7. Resultados

7.1 Resultados de validación de señales de la línea base

En el proceso se verificó la frecuencia de piñón, rueda, GMF, bandas laterales y se descartar la existencia de la frecuencia natural en la línea base, obteniendo como resultado lo que se observa en la Tabla 20.

Tabla 20. Resultados nominales y reales [Fuente: Autor].

Cálculos	Resultado nominal	Resultado real
Frecuencia de piñón	20 Hz	19.26 Hz
Frecuencia de rueda	13.333 Hz	12.843 Hz
GMF	640 Hz	616.5 Hz
Bandas laterales	620 Hz – 660 Hz	597.3 Hz – 635.8 Hz
Frecuencia natural	No hay frecuencias naturales	No existe frecuencia natural

7.1.1 Gráficos de las señales de vibración y acústica

En la Figura 64 se presenta las cuatro muestras obtenidas de los acelerómetros con su respectiva GMF en cada una de ellas, se verificó que se obtuvo una GMF de 616.5Hz que está en un rango aceptable para validar la señal de vibración.

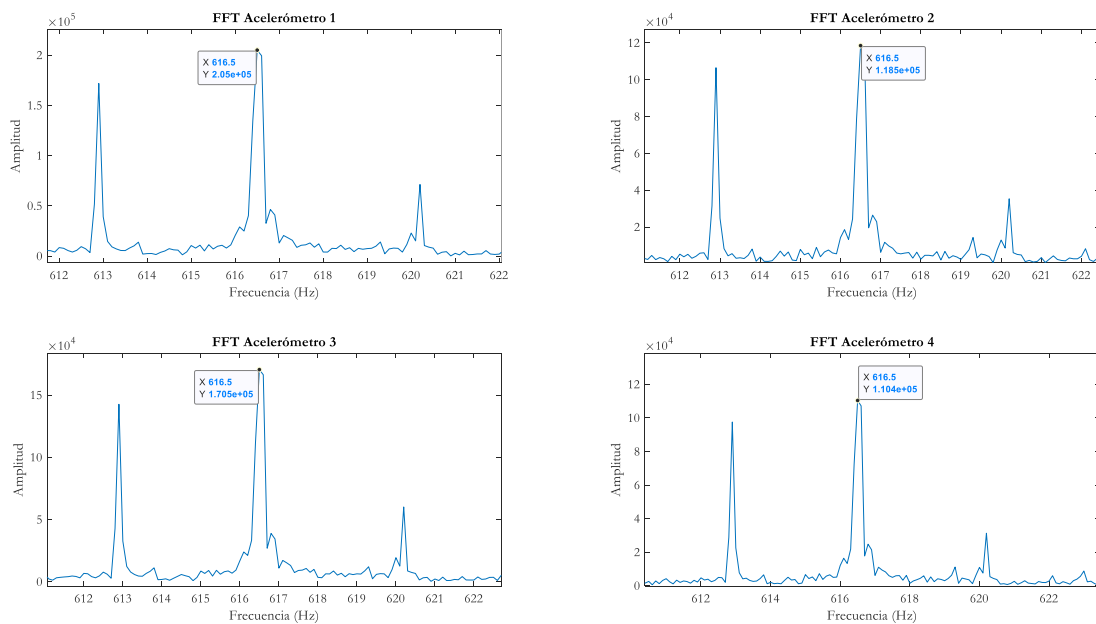


Figura 64. Señales de 4 acelerómetros de vibración [Fuente: Autor].

Como se presenta, en la Figura 65 las señales obtenidas de dos micrófonos y se aprecia que la GMF es de 616.6Hz que está en un rango aceptable para validar la señal acústica.

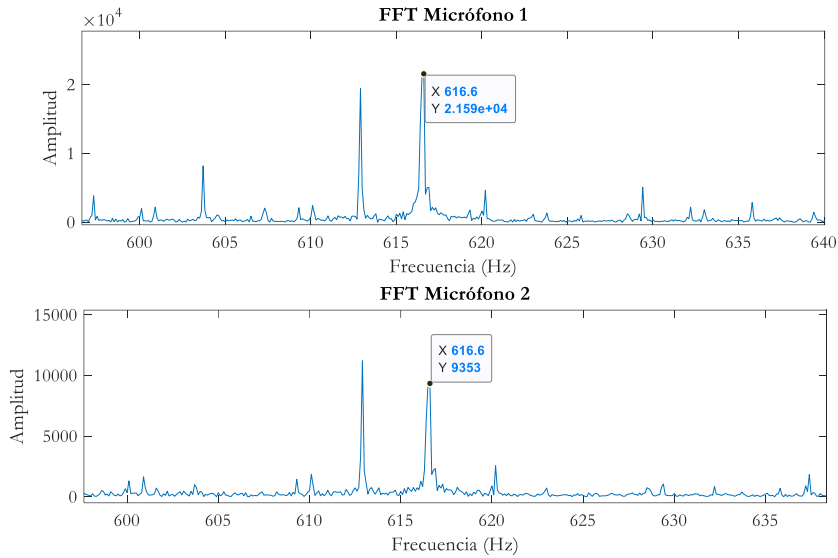


Figura 65. Señales de 2 micrófonos de acústica [Fuente: Autor].

Como resultado se puede validar las señales en condiciones normales y establecer la línea base de la caja de engranajes.

7.2 Resultados de la validación de repeticiones en los fallos

Obtenida la base de datos se procede a realizar la validación de las repeticiones; como primer paso se verifica que la carpeta contenga las 10 repeticiones de cada severidad en cada uno de los fallos, luego se extrae la RMS de cada repetición y se realiza una matriz de 10x4 para el fallo de picadura como se observa en la Tabla 21.

Tabla 21. Datos de las repeticiones del fallo de picadura [Fuente: Autor].

Fallo de picadura											
Repeticiones											
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
Severidad	P1	0,4524	0,45385	0,4537	0,4536	0,4527	0,4526	0,4526	0,4524	0,4525	0,4526
	P2	0,5430	0,5494	0,5487	0,5480	0,5471	0,5467	0,5460	0,5452	0,5448	0,5435
	P3	0,4506	0,4515	0,4512	0,4514	0,4509	0,4511	0,4510	0,4508	0,4505	0,4503
	P4	0,5422	0,5504	0,5494	0,5485	0,5476	0,5472	0,5456	0,5439	0,5428	0,5428

Se genera un gráfico el cual permita observar de mejor manera los resultados de las repeticiones y si hay valores atípicos en las repeticiones.

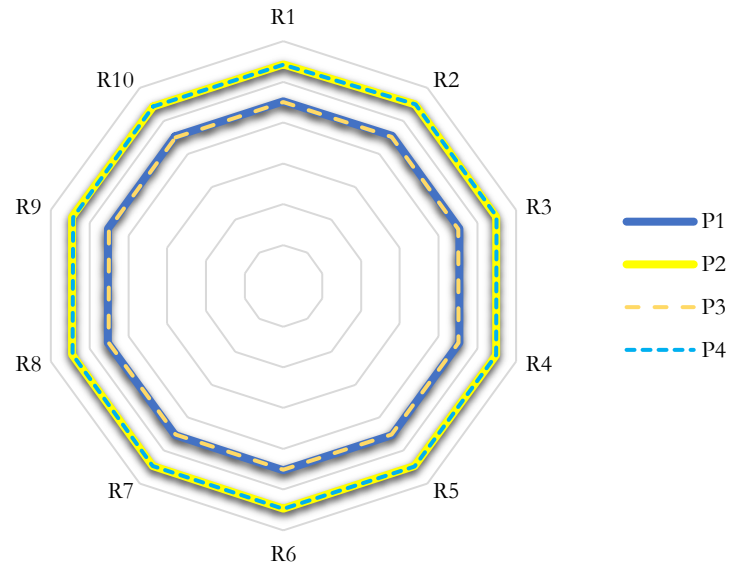


Figura 66. Gráfica de resultados de las repeticiones de fallo de picadura [Fuente: Autor].

En la Figura 66, se observa una tendencia en las repeticiones sin presencia de valores atípicos en cada una de las severidades, por lo que se puede validar las repeticiones en el fallo de picadura.

Ahora se procede a extraer la RMS de cada repetición, se realiza una matriz de 10x4 para el fallo de rotura de diente como se observa en la Tabla 22.

Tabla 22. Datos de las repeticiones del fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].

Fallo de rotura de diente											
Repeticiones											
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	
Severidad	P1	0,5470	0,5531	0,5523	0,5512	0,5490	0,5493	0,5484	0,5481	0,5485	0,5476
	P2	0,5278	0,5302	0,5300	0,5295	0,5291	0,5288	0,5285	0,5281	0,5281	0,5280
	P3	0,5135	0,5180	0,5172	0,5164	0,5162	0,5153	0,5155	0,5146	0,5145	0,5144
	P4	0,5187	0,5239	0,5224	0,5227	0,5213	0,5209	0,5205	0,5199	0,5200	0,5193

Se genera un gráfico el cual permita observar de mejor manera los resultados de las repeticiones y se observará si hay valores atípicos en las repeticiones.

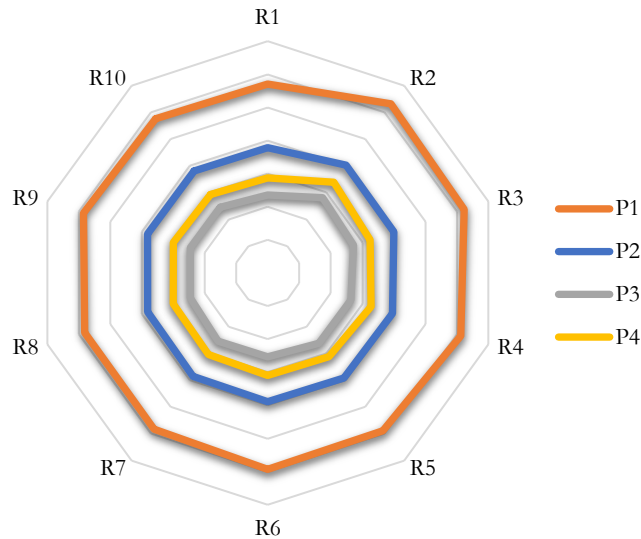


Figura 67. Gráfica de resultados de las repeticiones de fallo rotura de diente [Fuente: Autor].

En la Figura 67, se observa una tendencia en las repeticiones desde la línea base hasta el fallo severo sin tener valores atípicos, por lo que se procede a validar las repeticiones para el fallo de rotura de diente.

7.3 Resultado de selección de acelerómetro

Se tiene cuatro acelerómetros de los cuales se obtienen las muestras de cada uno de ellos, se utilizará la línea base para la selección, se extraen los espectros de las muestras de los acelerómetros 1 y 2 que se encuentran en el eje de entrada a la caja, mediante parámetro de comparación de la GMF, amplitud y bandas laterales, se tiene como resultado la muestra del acelerómetro 1 que tiene más información de la caja de engranajes, como se observa en la Figura 68.

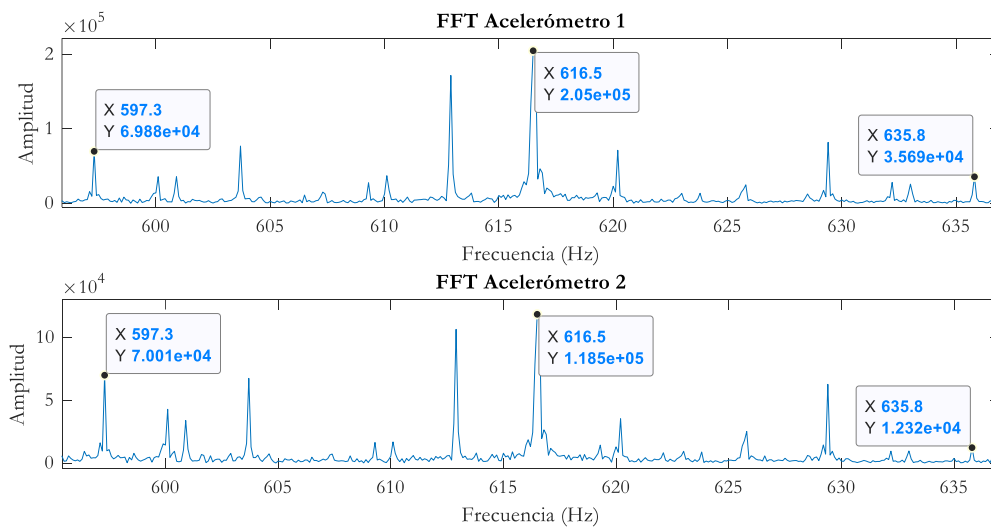


Figura 68. Comparación de los espectros de acelerómetros 1 y 2 [Fuente: Autor].

Ahora con las muestras de los acelerómetros 3 y 4 que se encuentran en el eje de salida de la caja, se extraen los espectros de las muestras, mediante parámetros de comparación de la GMF, amplitud y bandas laterales, se tiene como resultado que la muestra del acelerómetro 3 contiene más información de la caja de engranajes, como se observa en la Figura 69.

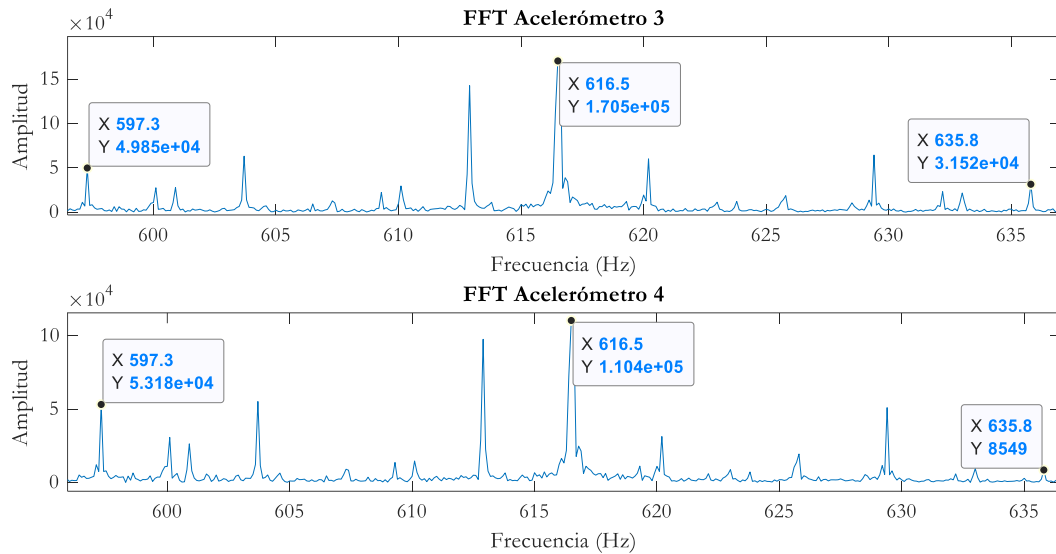


Figura 69. Comparación de los espectros de acelerómetros 3 y 4 [Fuente: Autor].

Con la obtención de las muestras de los acelerómetros de 1 y 3, luego se procede a realizar nuevamente la comparación con la GMF, amplitud y bandas laterales. Con lo que se tiene como resultado que la muestra del acelerómetro 1 contiene más información de la caja de engranajes, como se observa en la Figura 70.

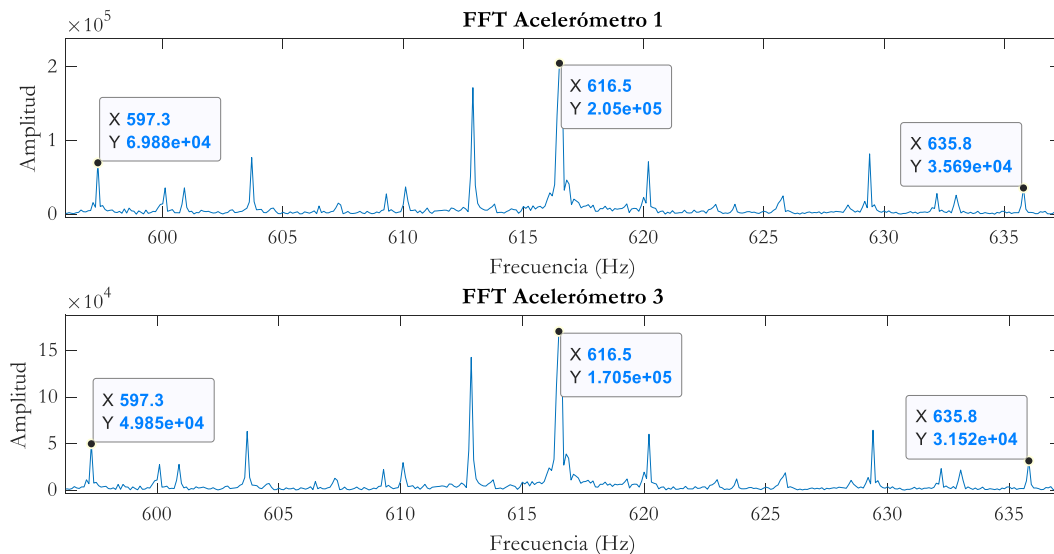


Figura 70. Comparación de los espectros de acelerómetros 1 y 3 [Fuente: Autor].

Seleccionada la muestra del acelerómetro 1 se utilizará el sensor para la extracción de las muestras en los niveles de fallo tanto en de picadura como en rotura de diente.

7.4 Resultado de la selección del micrófono

Se tiene dos micrófonos de los cuales se obtiene las muestras de cada uno de ellos, se utilizará la línea base para la selección, se extraen los espectros de cada una de las muestras, como se observa en la Figura 71.

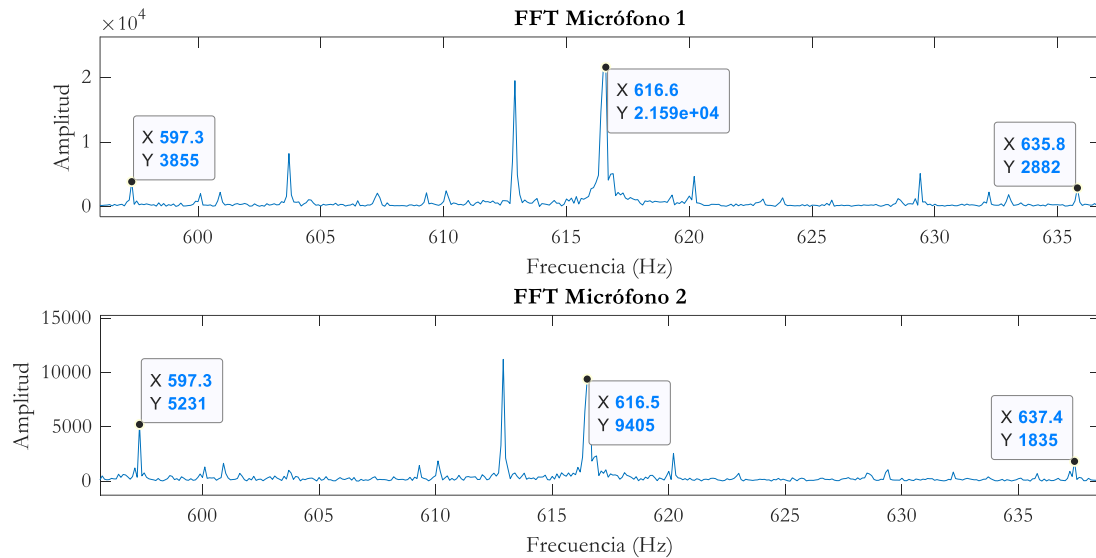


Figura 71. Comparación de los espectros de micrófonos 1 y 2 [Fuente: Autor].

Mediante los parámetros de comparación de la GMF, amplitud y banda laterales; se puede observar que la GMF y bandas laterales tienen el mismo resultado, la diferencia se encuentra en la amplitud. Por lo tanto, el resultado es la selección de la muestra del micrófono 1, la cual es la que contiene más información de la caja de engranajes. Ya seleccionado el sensor se procede a la extracción de las muestras en los niveles de fallo tanto en picadura como en rotura de diente.

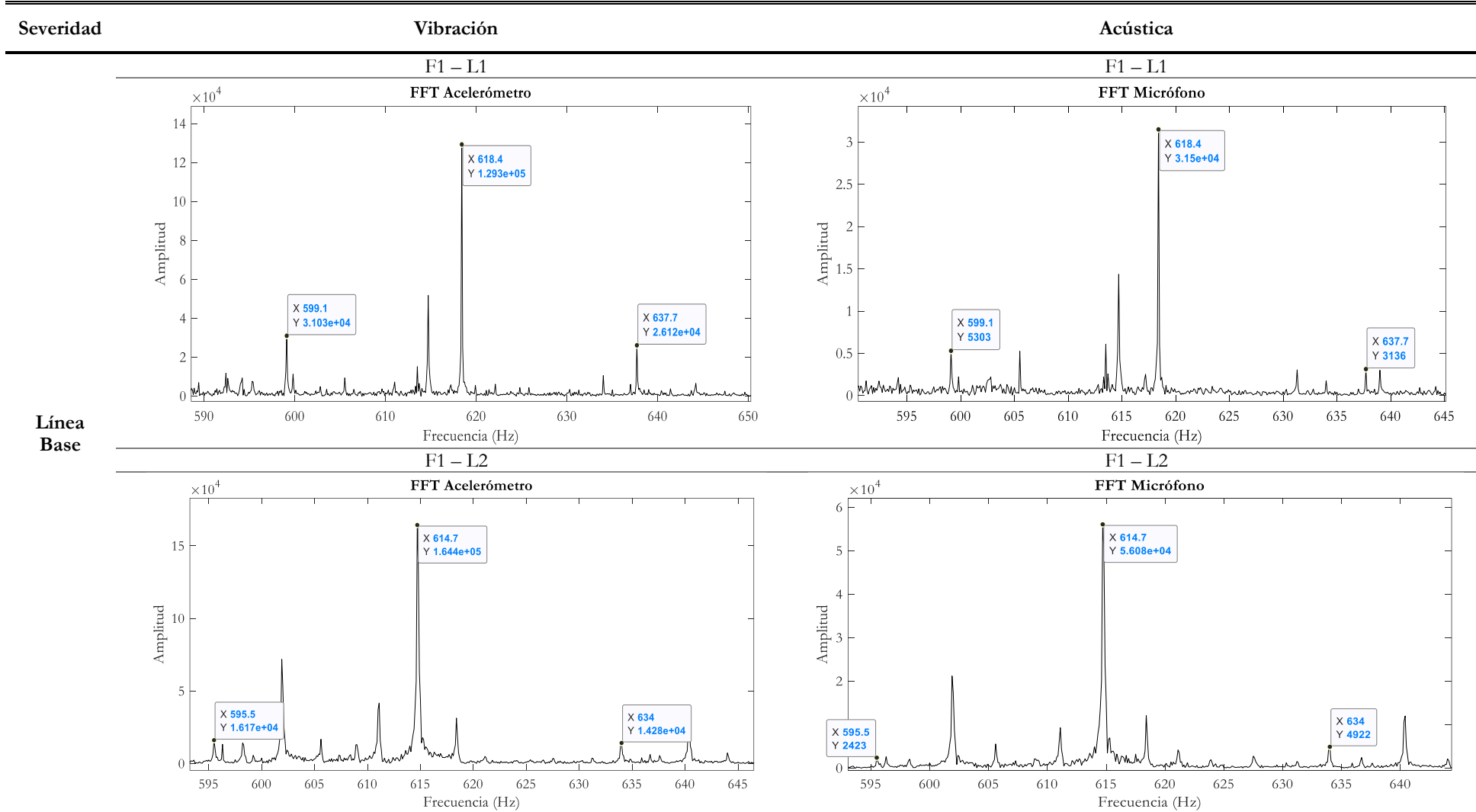
7.5 Resultados comparativos de las señales de vibración y acústica

En las Tabla 23 y Tabla 26 se presentan los resultados de los espectros de los fallos de picadura y rotura de diente.

7.5.1 Resultado de fallo de picadura

En la Tabla 23 se tiene todos los espectros del fallo de picadura, con su respectiva evolución de severidad de fallo y aumento de carga.

Tabla 23. Resultados de fallo de picadura [Fuente: Autor].

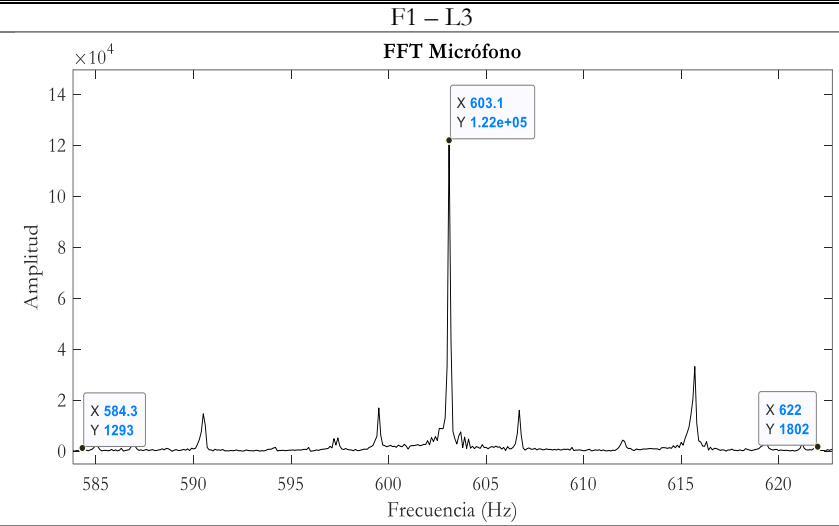
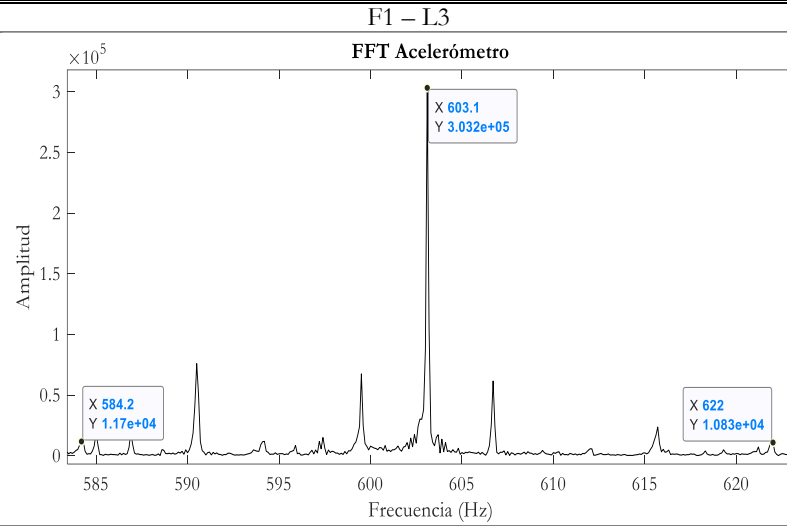


Severidad

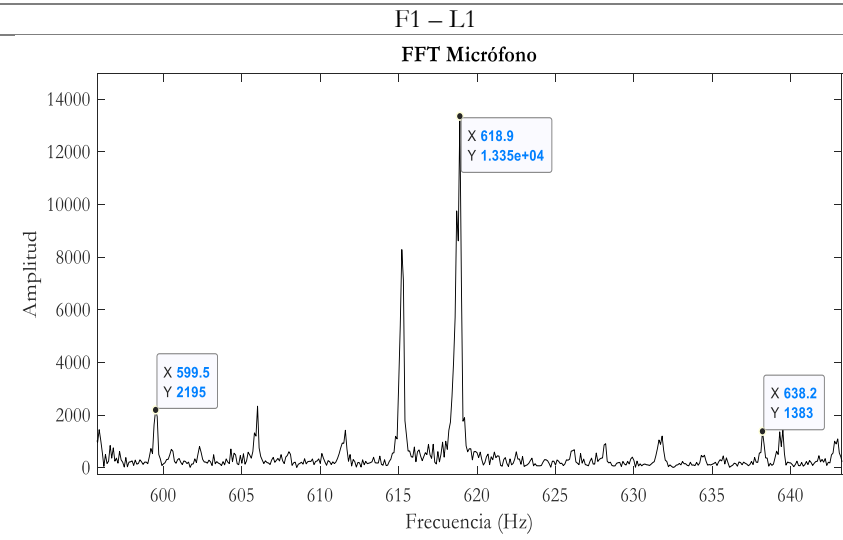
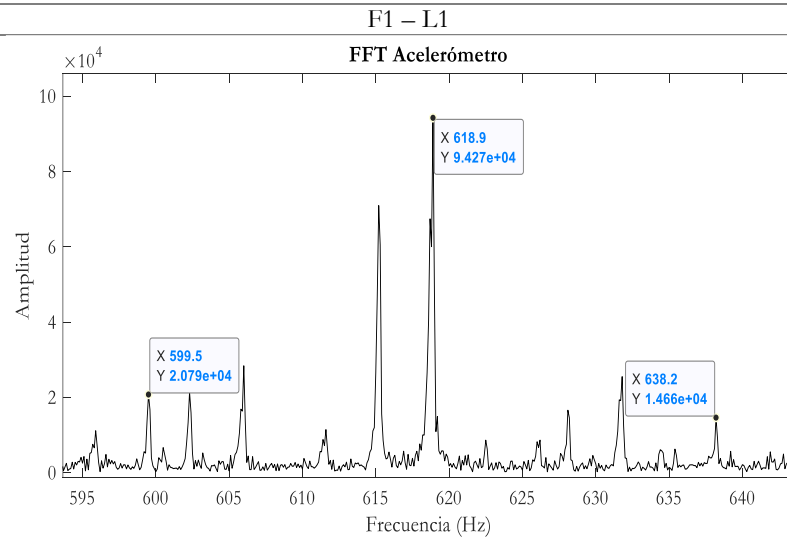
Vibración

Acústica

Línea Base



Fallo Leve



Severidad

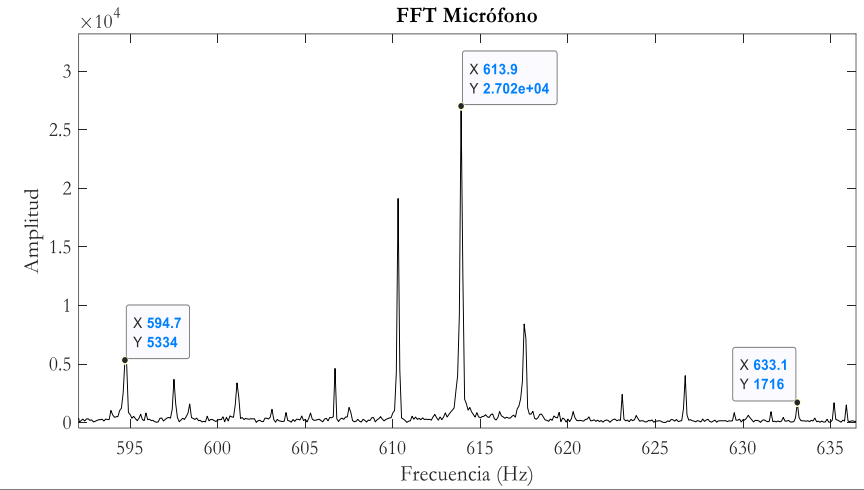
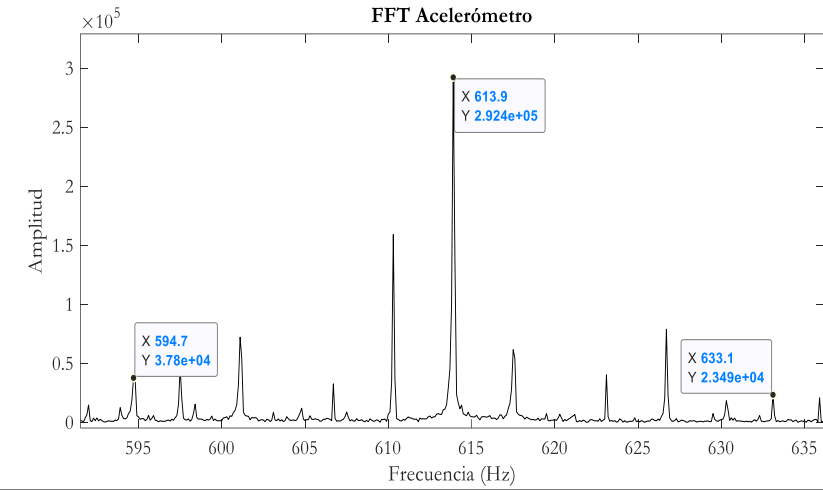
Vibración

Acústica

Fallo
Leve

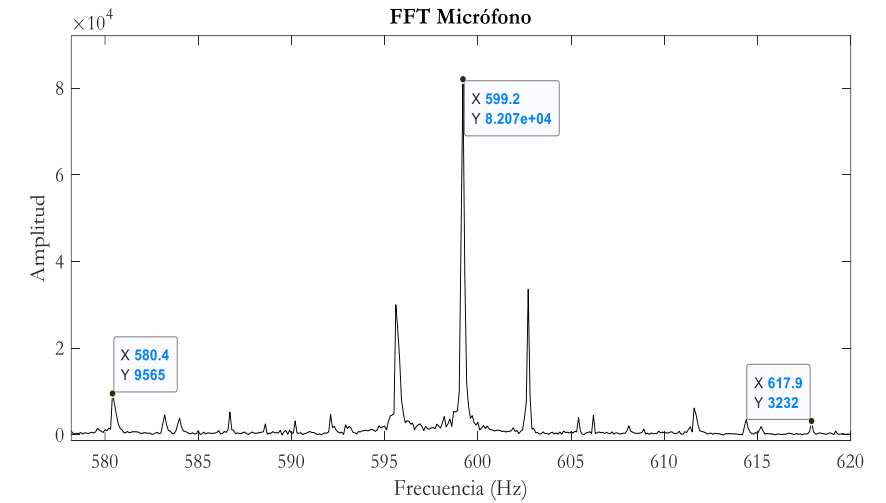
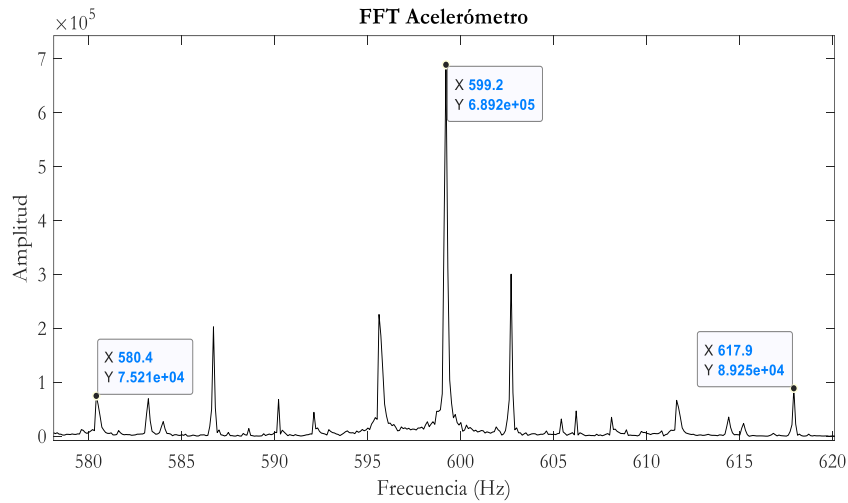
F1 – L2

F1 – L2



F1 – L3

F1 – L3



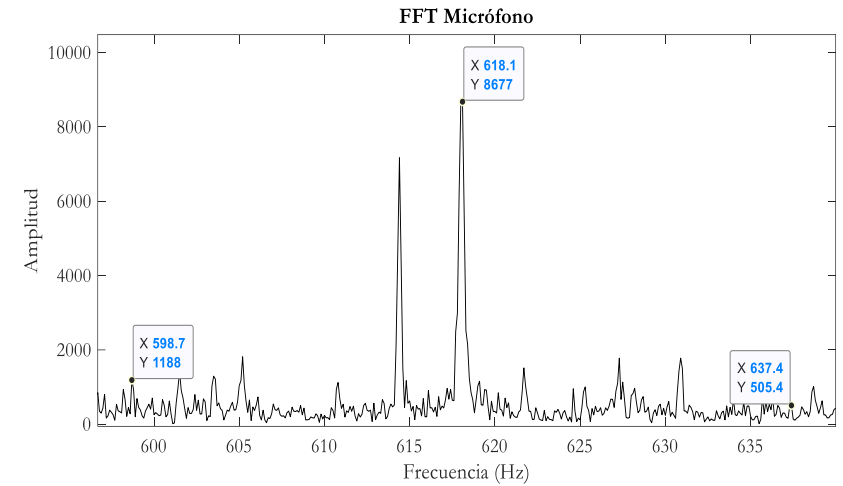
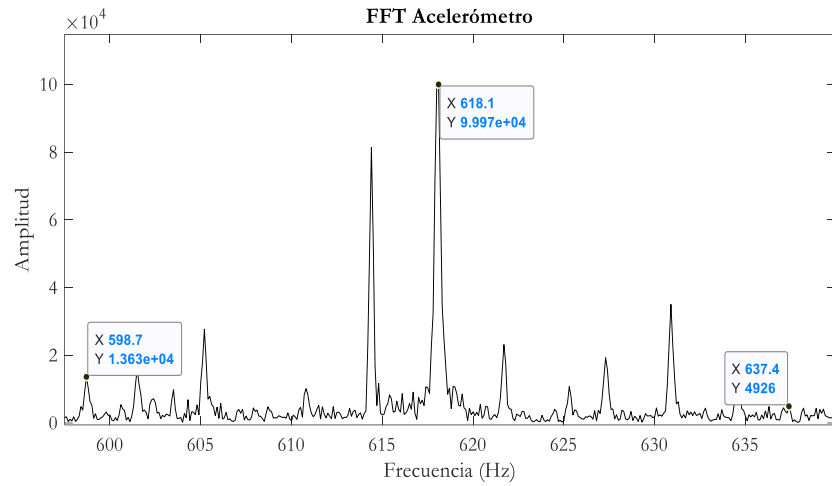
Severidad

Vibración

Acústica

F1 - L1

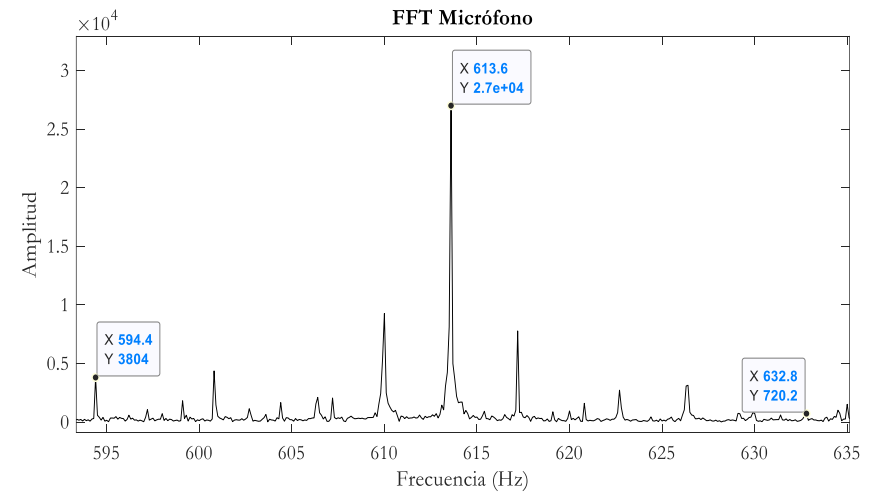
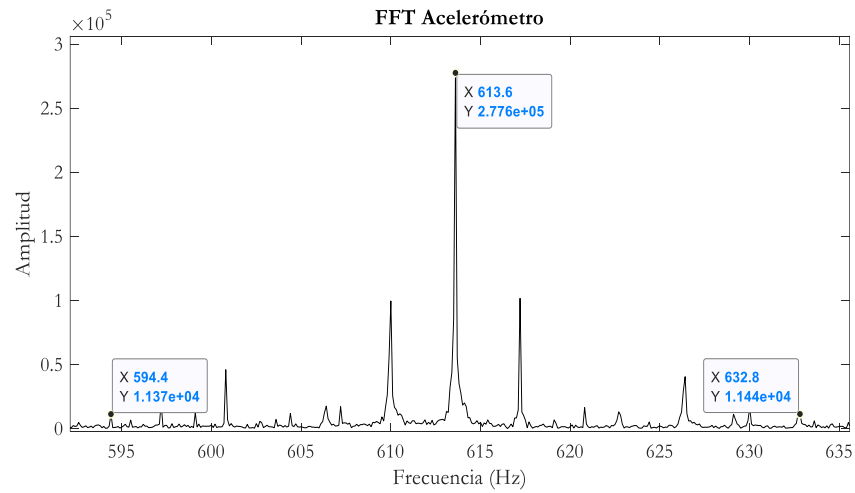
F1 - L1



Fallo Moderado

F1 - L2

F1 - L2

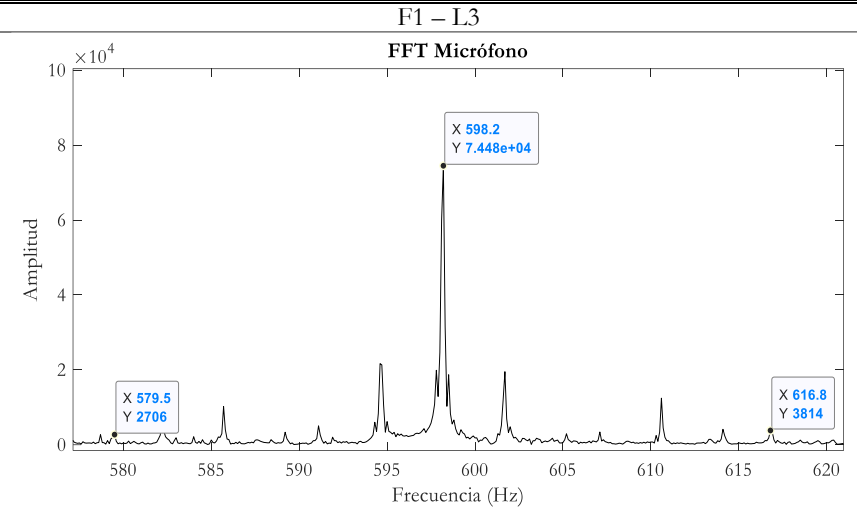
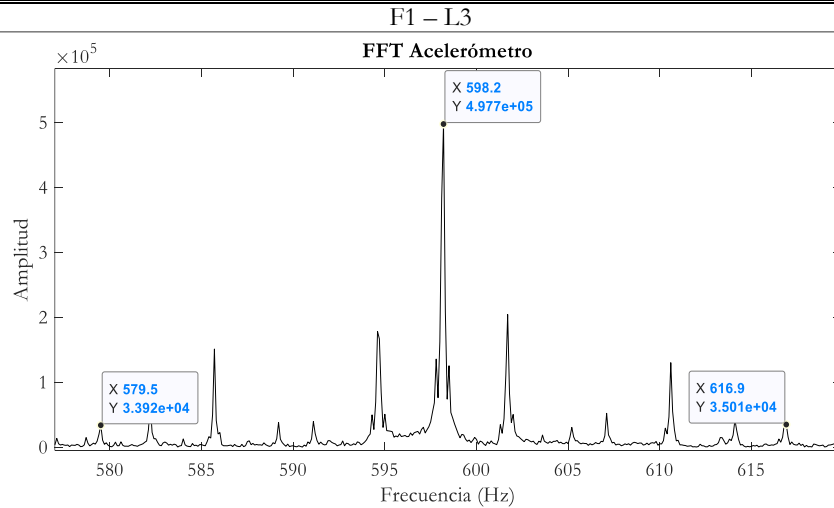


Severidad

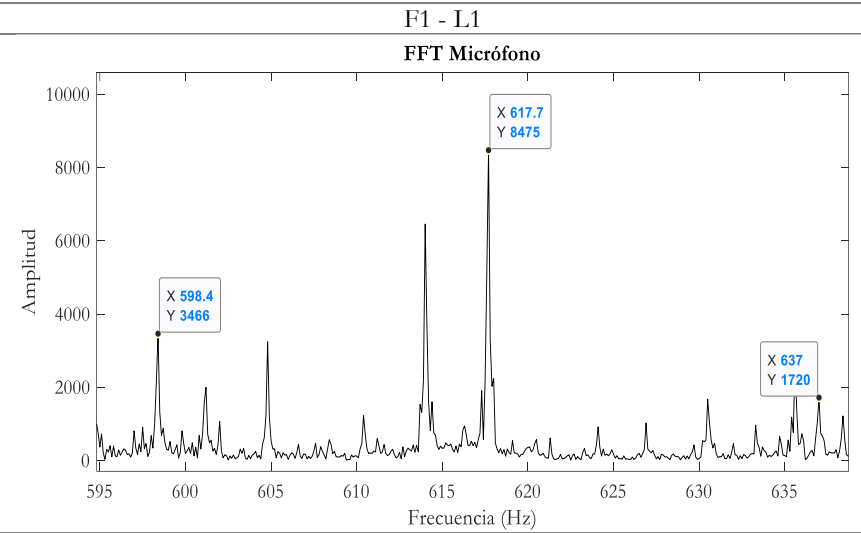
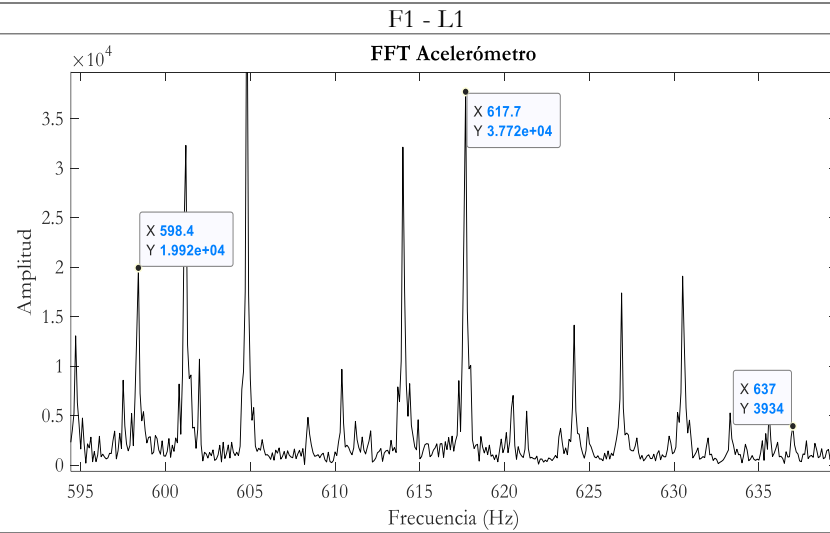
Vibración

Acústica

Fallo Moderado



Fallo Severo



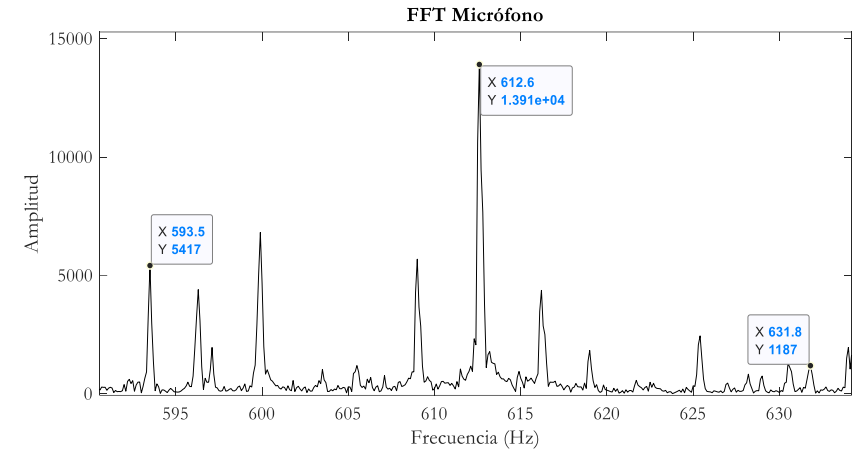
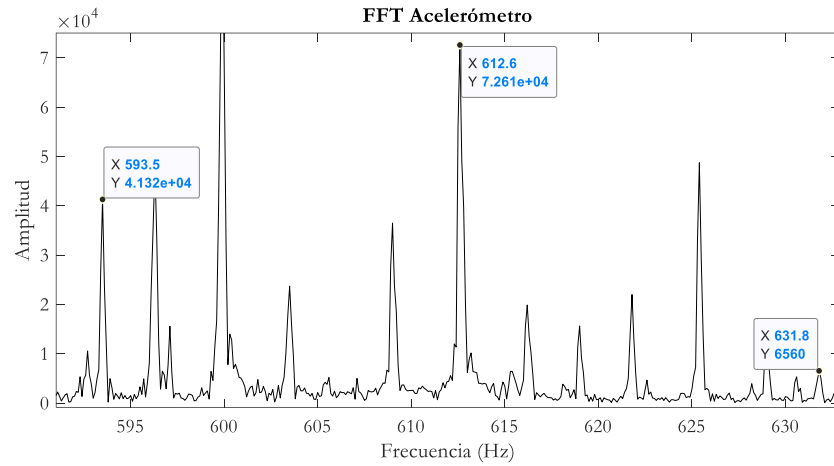
Severidad

Vibración

Acústica

F1 – L2

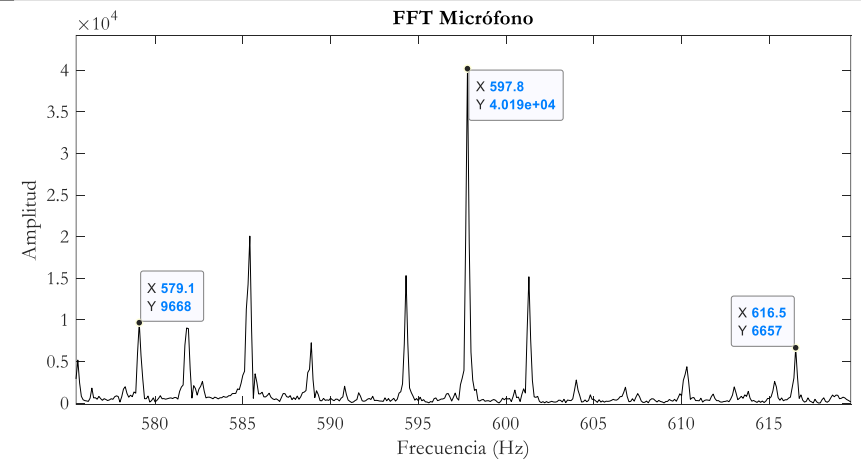
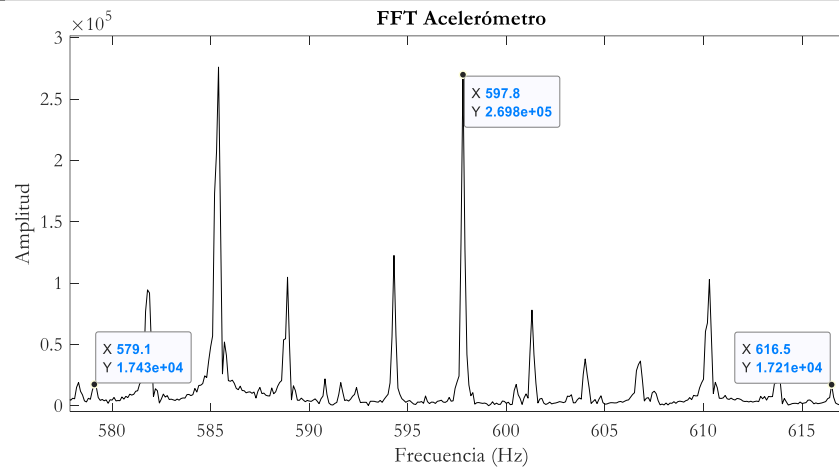
F1 – L2



Fallo Severo

F1 – L3

F1 – L3



En la Tabla 23, se presentó los espectros resultantes de cada nivel de severidad de fallo, donde se puede observar la evolución, el aumento de carga en el engrane y la diferencia de las señales de vibración y acústica del fallo.

En la Tabla 24, se presentan las preguntas y datos de respuestas para el fallo de picadura.

Tabla 24. Preguntas y datos de respuestas para fallo de picadura [Fuente: Autor].

Preguntas	Datos de respuestas	
	Símbolos	Significado
1. ¿Las muestras se comparan en el mismo rango de frecuencia para vibración y acústica?	x	Señal de Vibración
2. ¿Es visible el espectro característico de la GMF en señales acústicas y de vibración?	+	Señal Acústica
3. ¿Que muestra presenta mayor amplitud visualmente en las señales?	-	Normal (Vibración / Acústica)
4. ¿Que muestra presenta un espectro anormal en donde no se diferencie la GMF visualmente?	SI	Afirmativo
5. ¿Se afecta a la amplitud de la GMF de cada fallo con respecto a la línea base?	NO	Negativo
6. ¿Cómo afecta a la GMF en el aumento de carga en cada configuración?		
7. ¿Los valores de frecuencia obtenidos de las bandas laterales son iguales para señales de vibración y acústica?		
8. ¿En qué tipo de señal (acústica/vibración) es posible visualizar las bandas laterales de manera clara?		

Como se observa en la Tabla 25 se responde a las preguntas en cada uno los niveles de severidad de fallo.

Tabla 25. Resultados de las preguntas para fallo de picadura [Fuente: Autor].

Severidad de fallo	Vibración	Acústica	Respuesta							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Fallo Leve	F1 – L1	F1 – L1	SI	SI	x	-	SI	NO	SI	-
	F1 – L2	F1 – L2	SI	SI	x	-	SI	SI	SI	x
	F1 – L3	F1 – L3	SI	SI	+	-	SI	SI	SI	x
Fallo Moderado	F1 – L1	F1 – L1	SI	SI	x	-	SI	NO	SI	x
	F1 – L2	F1 – L2	SI	SI	x	-	SI	SI	SI	+
	F1 – L3	F1 – L3	SI	SI	+	-	SI	SI	SI	-
Fallo Severo	F1 – L1	F1 – L1	SI	SI	x	x	SI	NO	SI	+
	F1 – L2	F1 – L2	SI	SI	x	x	SI	SI	SI	-
	F1 – L3	F1 – L3	SI	SI	+	x	SI	SI	SI	+

En la Tabla 25 se tiene todos los resultados de las preguntas realizadas, por lo cual se procede a graficar las respuestas para una mayor comprensión de los resultados, que son los siguientes:

En la pregunta 1 cada una de las muestras se encuentran en el mismo rango de frecuencia y no se encuentran ninguna muestra en otro rango. En la pregunta 2 si es visible el espectro característico de la GMF en las muestras de vibración y acústica de forma clara. En la pregunta 5 a medida que va evolucionando el fallo la amplitud en cada muestra va en aumento la GMF en vibración y acústica. Para la pregunta 7 se tiene como respuesta en que tanto en vibración como acústica tienen los mismos valores en sus bandas laterales y son equidistantes de la GMF. Para todas las respuestas de cada una de las preguntas se obtuvo un resultado de un 100% afirmativo en cada una y un 0% en resultado negativo, como se observa en la Figura 72.

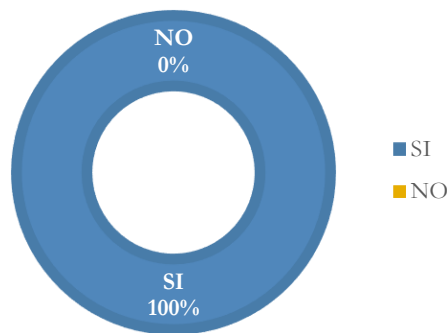


Figura 72. Resultados de las preguntas 1,2,5,7 del fallo de picadura [Fuente: Autor].

Para la pregunta 3, el resultado es algunas muestras presentan mayor amplitud en comparación con la otra muestra de las señales, en el fallo de picadura las muestras de vibración tienen una mayor amplitud que las muestras de acústica, pero también las muestras acústicas también tienen mayor amplitud que la vibración, como se observa en la Figura 73.

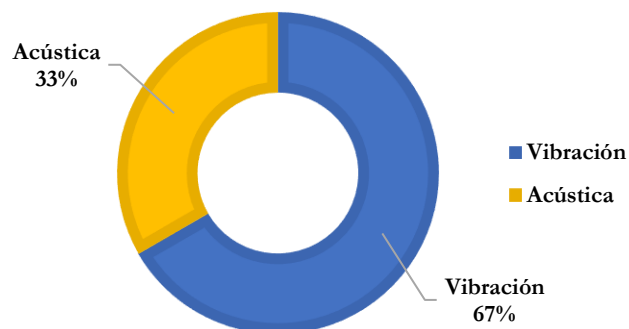


Figura 73. Resultado de la pregunta 3 del fallo de picadura [Fuente: Autor].

En la pregunta 4, el resultado en el fallo de picadura tenemos que las muestras en acústica son normales, a comparación con la vibración que se tiene algunas muestras anormales que es difícil diferenciar la GMF en la muestra de forma clara, como se observa la Figura 74.

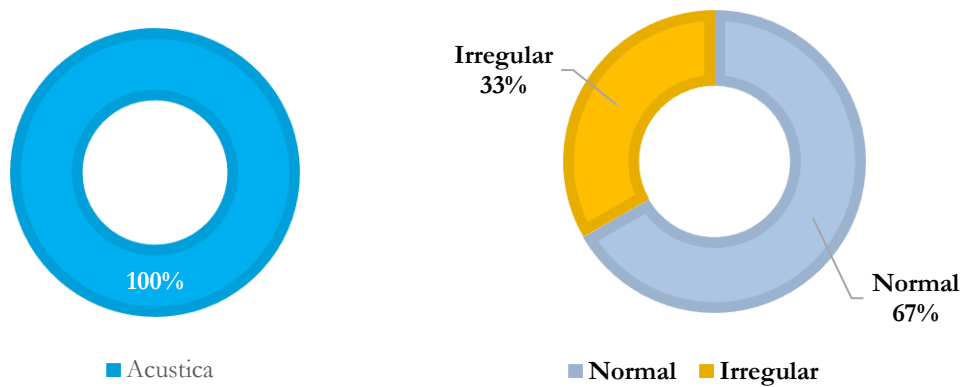


Figura 74. Resultado de la pregunta 4 de fallo de picadura [Fuente: Autor].

Para la pregunta 6, el resultado es que la GMF va disminuyendo a medida que va en aumento la carga en el fallo, con respecto a las muestras de sin carga que son normales, esto se presenta en ambas muestras sea en vibración y acústica, como se observa la Figura 75.

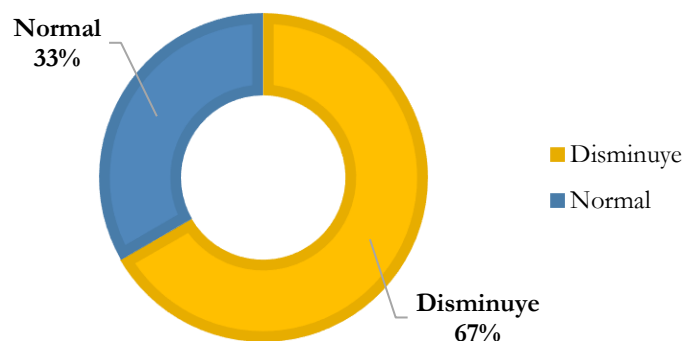


Figura 75. Resultado de la pregunta 6 de fallo de picadura [Fuente: Autor].

Para la pregunta 8, el resultado tanto en vibración como en acústica las bandas laterales se presentan de forma clara, como se observa la Figura 76.

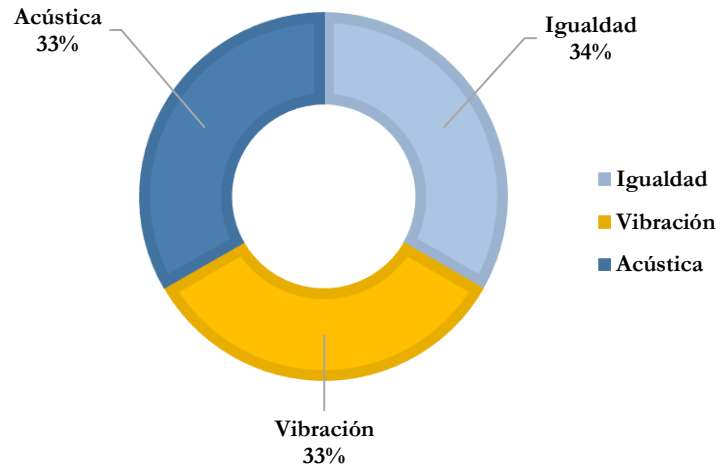


Figura 76. Resultados de la pregunta 8 de fallo de picadura [Fuente: Autor].

Con estas respuestas se pudo determinar que tanto el análisis de vibración como el análisis de acústica, sirven para la detección del fallo de picadura en engranes rectos.

7.5.2 Resultados de fallo de rotura de diente

En la Tabla 26 se tiene todos los espectros del fallo de rotura de diente, con su respectiva evolución de severidad de fallo y aumento de carga.

Tabla 26. Resultados de fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].

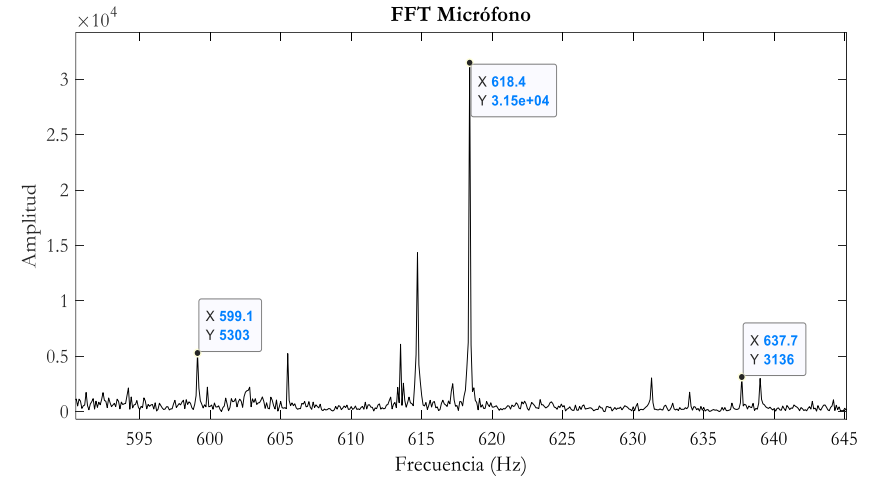
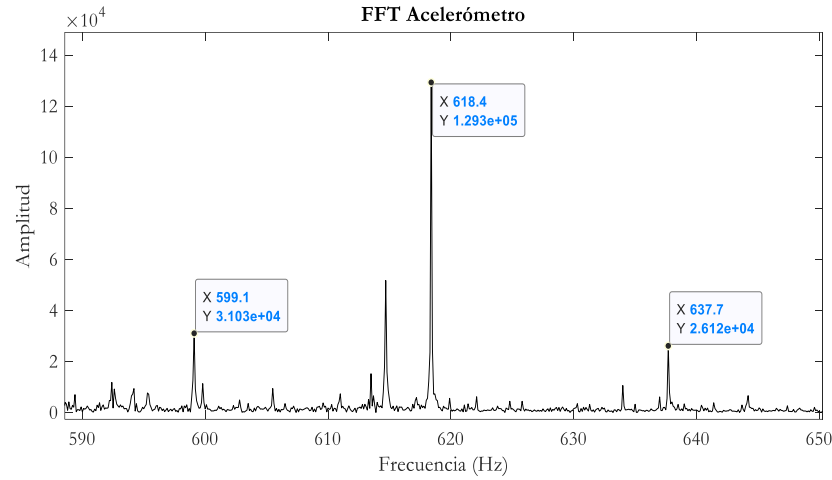
Severidad

Vibración

Acústica

F1 – L1

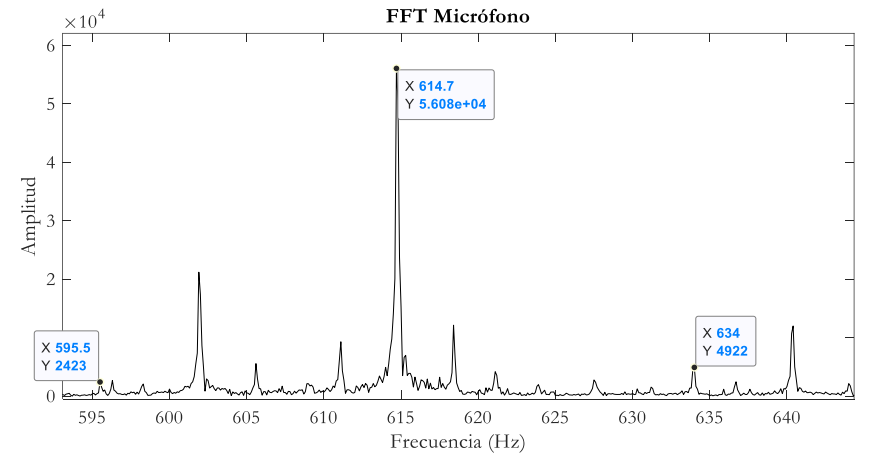
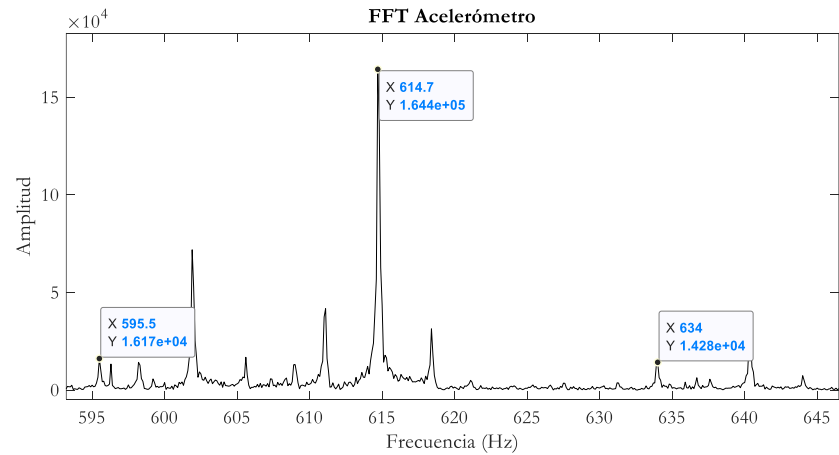
F1 – L1



Línea Base

F1 – L2

F1 – L2

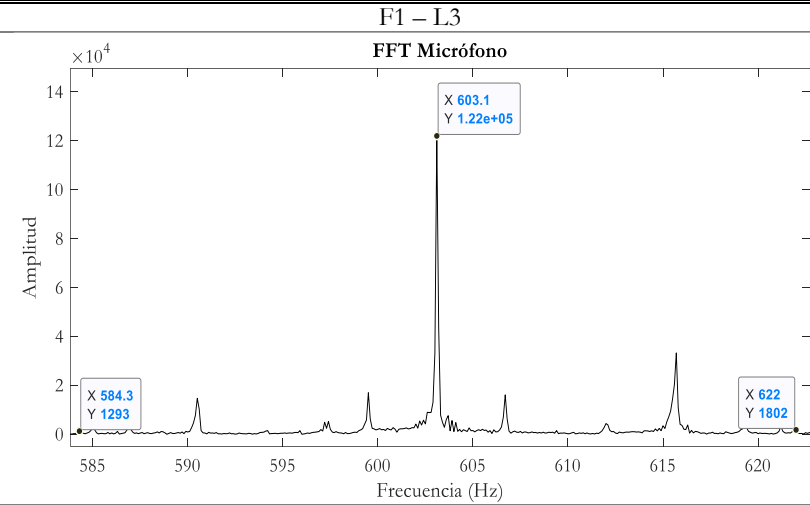
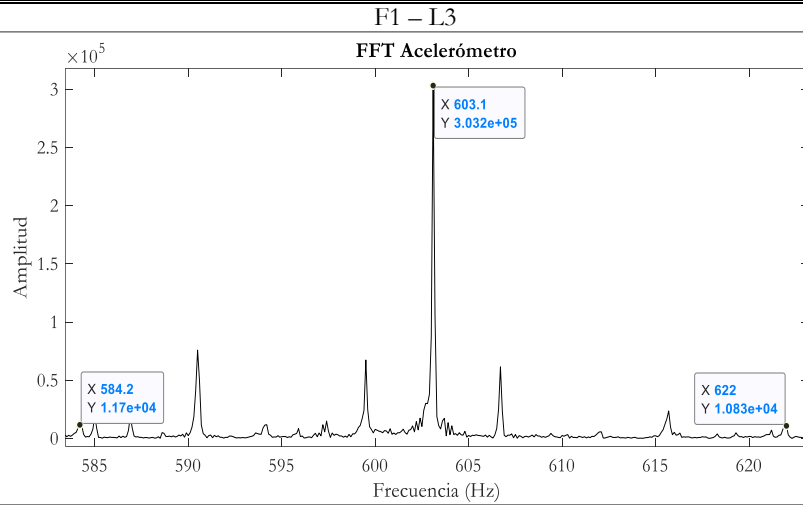


Severidad

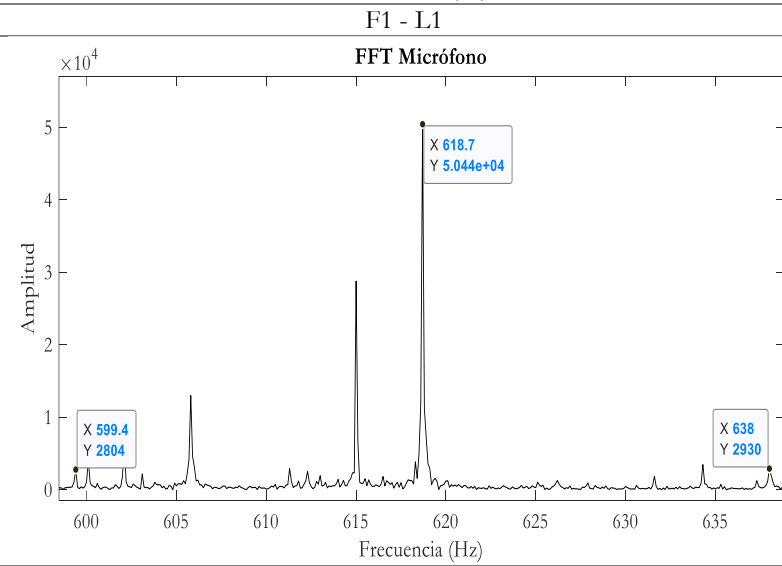
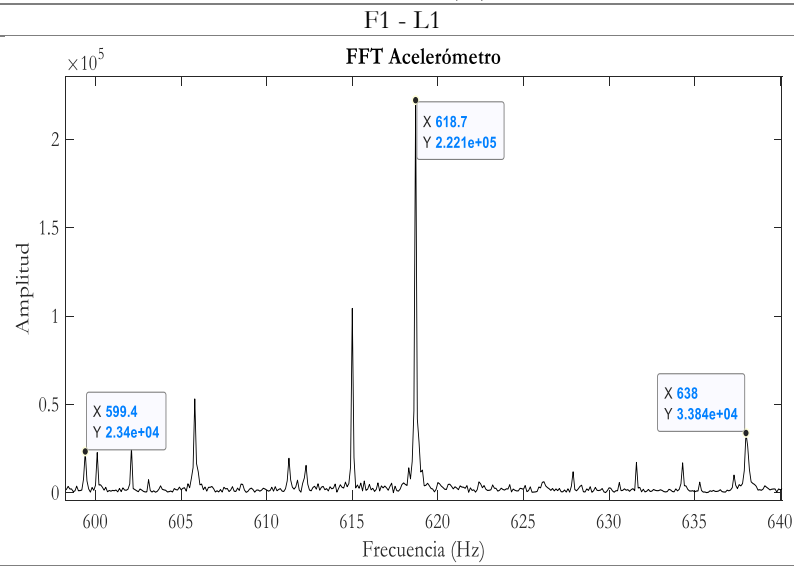
Vibración

Acústica

Línea Base



Fallo Leve



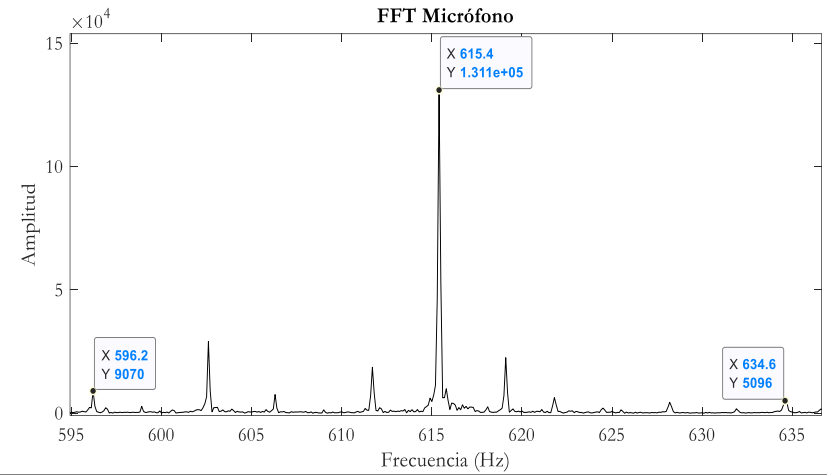
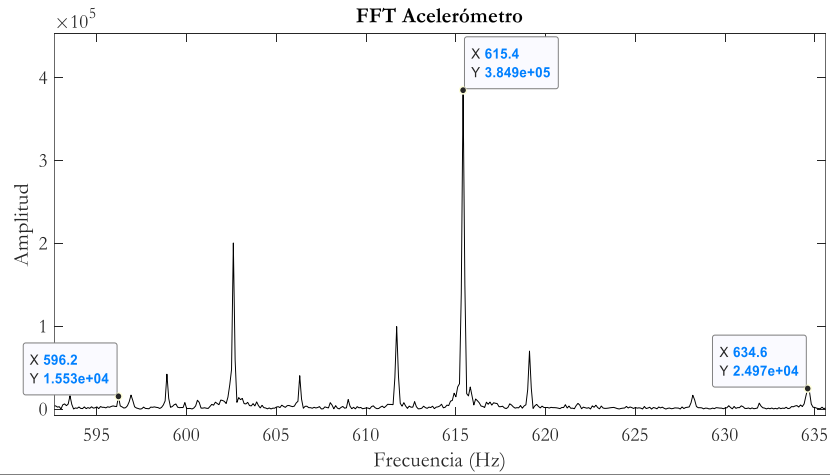
Severidad

Vibración

Acústica

F1 - L2

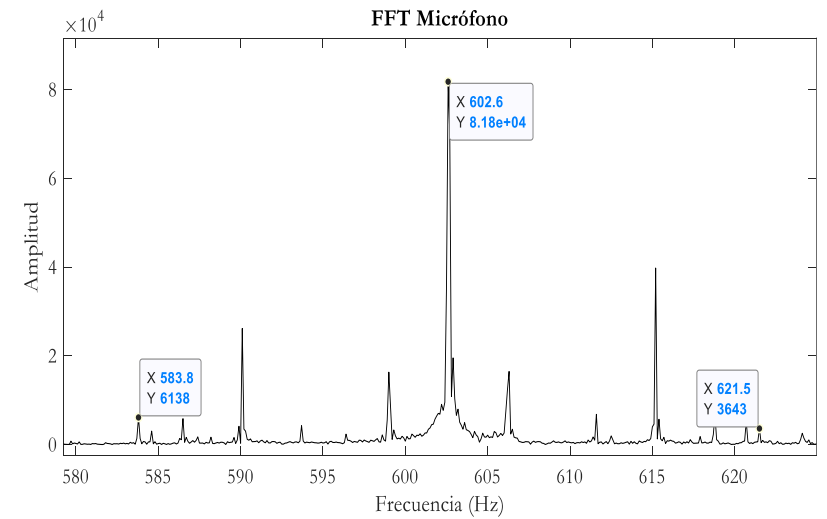
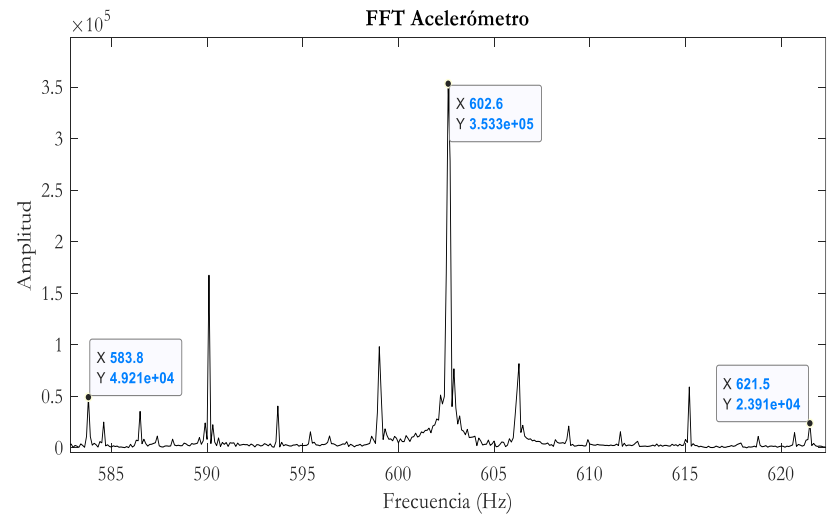
F1 - L2



Fallo
Leve

F1 - L3

F1 - L3



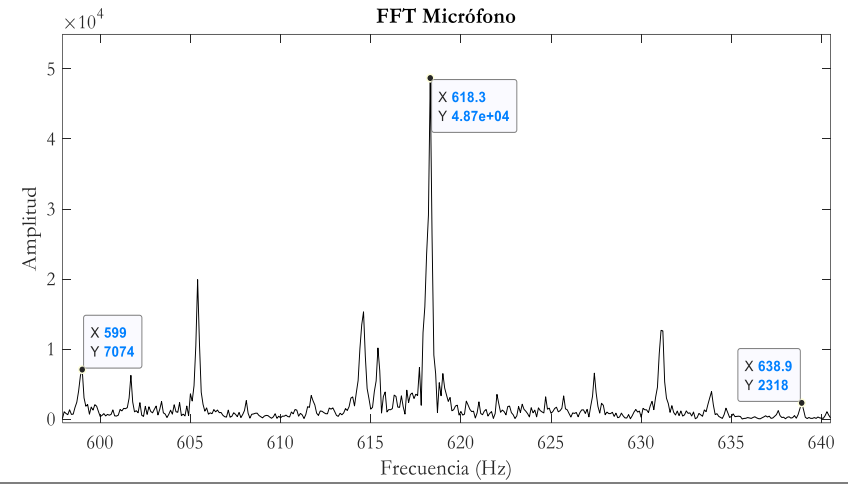
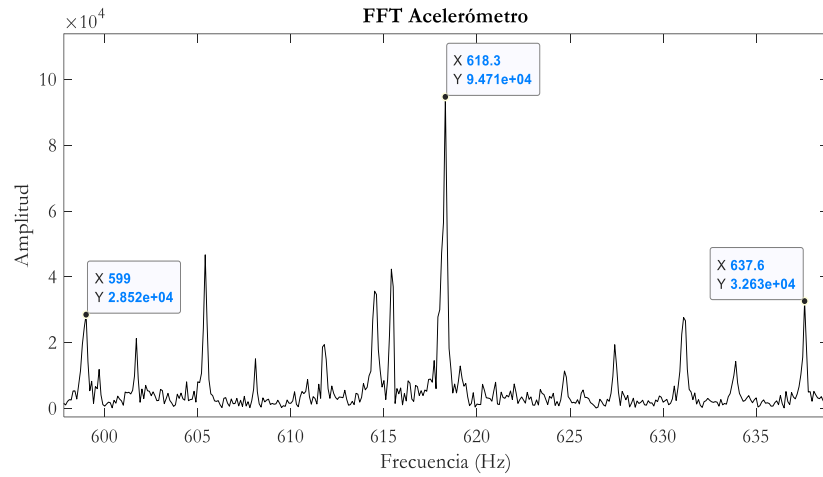
Severidad

Vibración

Acústica

F1 - L1

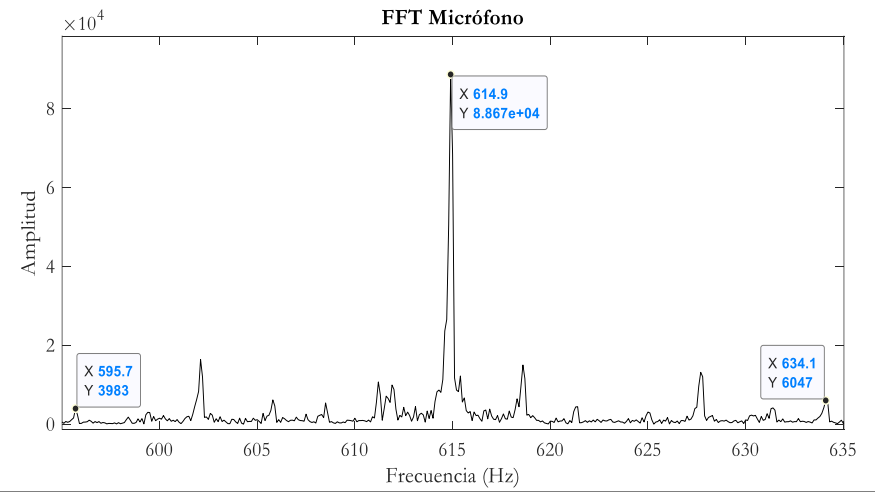
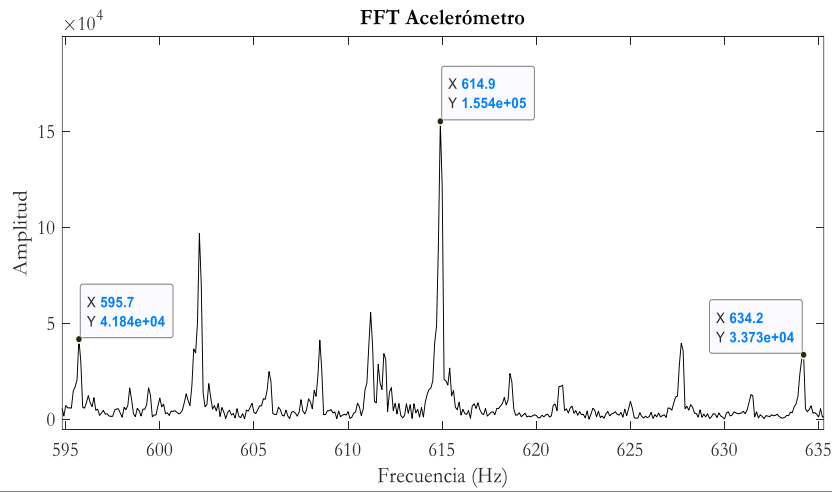
F1 - L1



Fallo Moderado

F1 - L2

F1 - L2

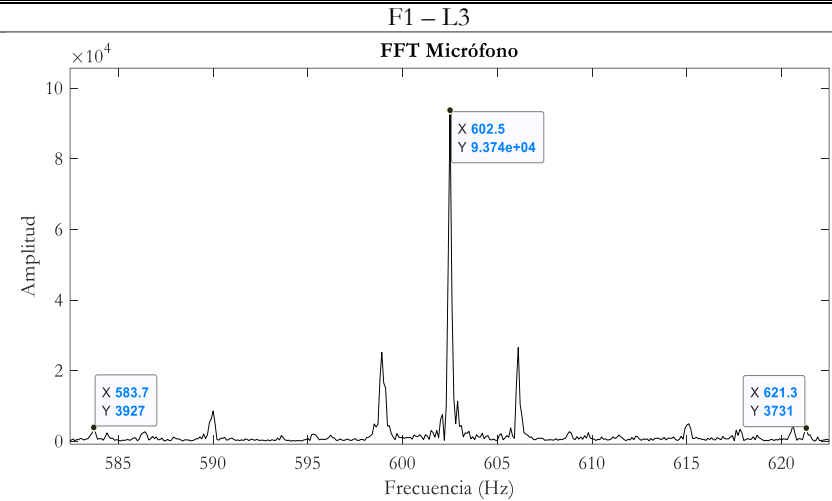
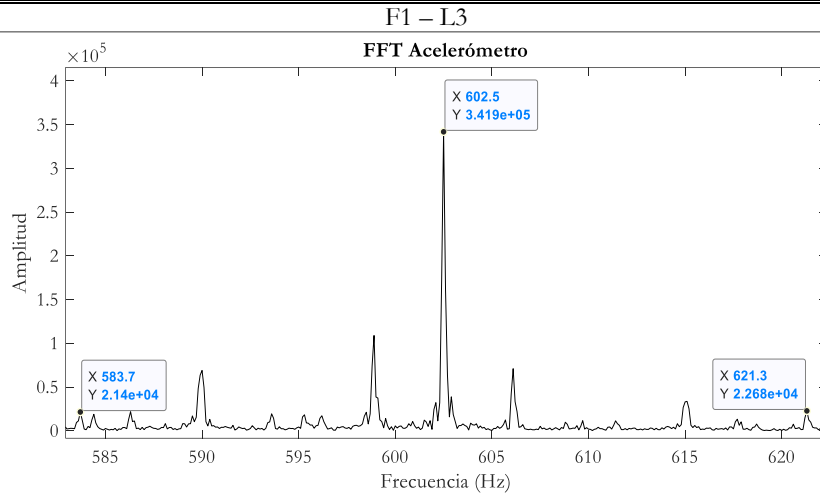


Severidad

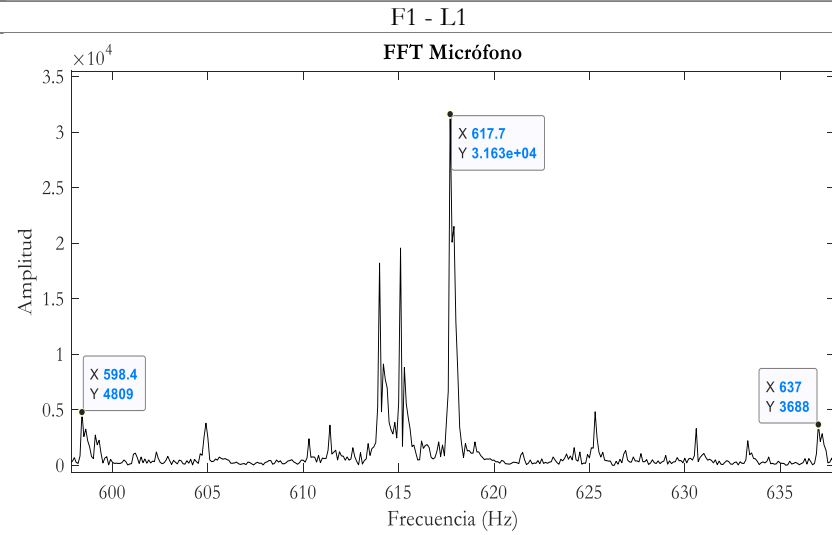
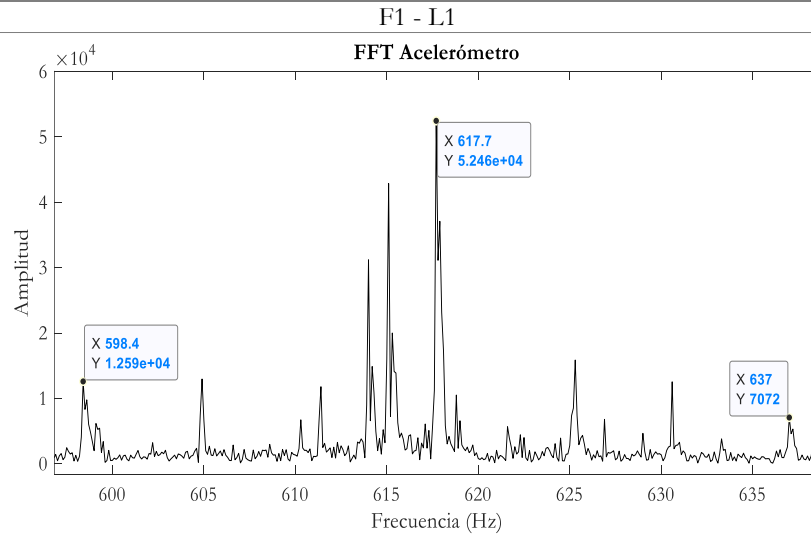
Vibración

Acústica

Fallo Moderado



Fallo Severo



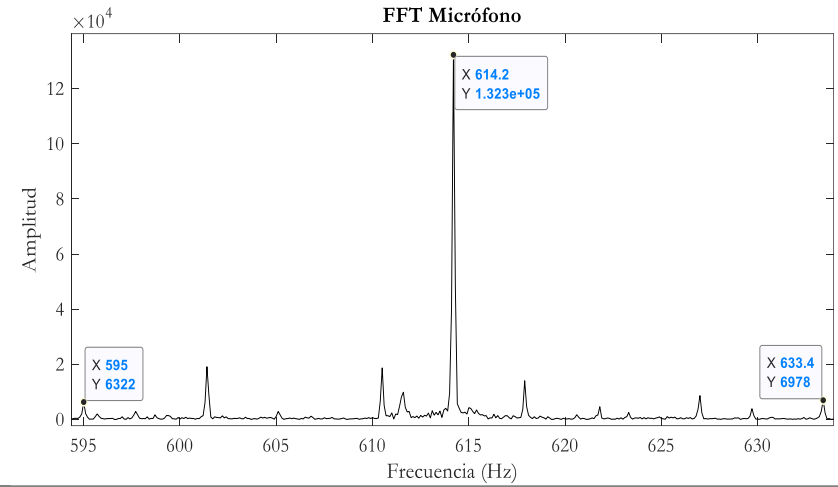
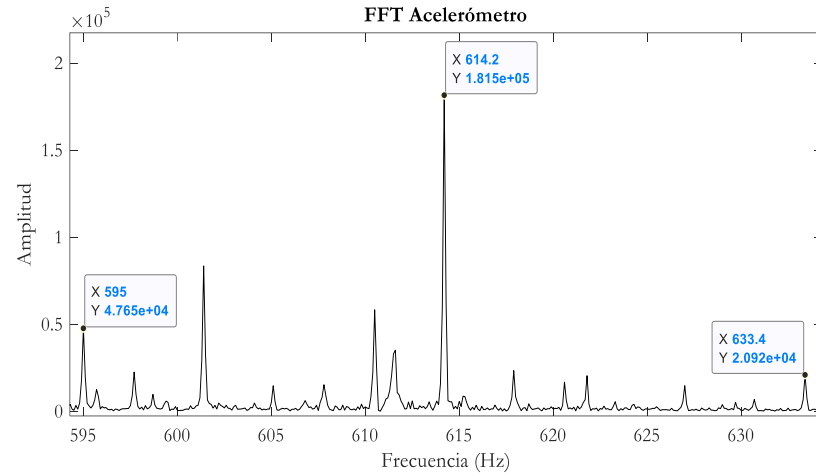
Severidad

Vibración

Acústica

F1 - L2

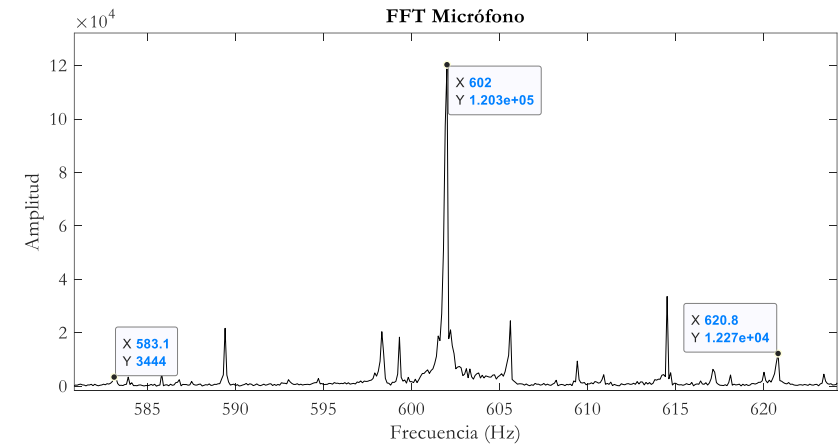
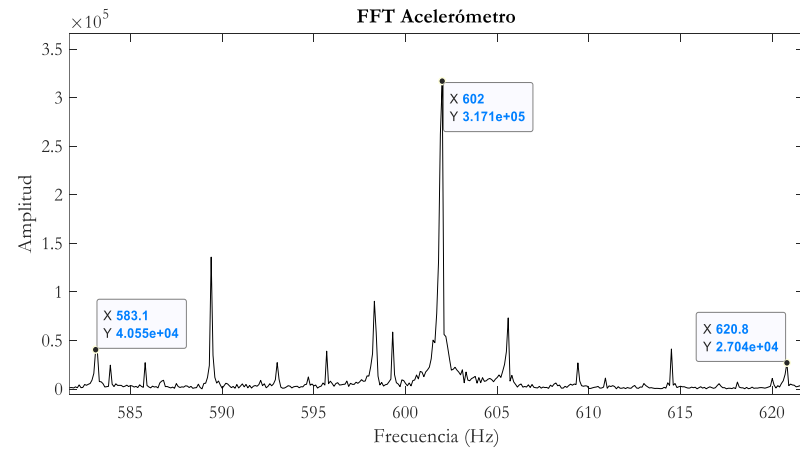
F1 - L2



Fallo Severo

F1 - L3

F1 - L3



En la Tabla 26, se observa los espectros resultantes de cada nivel de severidad de fallo, donde se puede observar la evolución, el aumento de carga en el engrane y la diferencia de las señales de vibración y acústica del fallo.

En la Tabla 27, se presentan las preguntas y datos de respuestas para el fallo de rotura de diente.

Tabla 27. Preguntas y datos de respuestas de fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].

Preguntas	Datos de respuestas	
	Símbolos	Significado
1. ¿Las muestras se comparan en el mismo rango de frecuencia para vibración y acústica?	x	Señal de Vibración
2. ¿Es visible el espectro característico de la GMF en señales acústicas y de vibración?	+	Señal Acústica
3. ¿Que muestra presenta mayor amplitud visualmente en las señales?	-	Normal (Vibración / Acústica)
4. ¿Que muestra presenta más ruido o en casos que no se diferencie la GMF visualmente?	SI	Afirmativo
5. ¿Se afecta a la amplitud de la GMF de cada fallo con respecto a la línea base?	NO	Negativo
6. ¿Cómo afecta a la GMF en el aumento de carga en cada configuración?		
7. ¿Los valores de frecuencia obtenidos de las bandas laterales son iguales para señales de vibración y acústica?		
8. ¿En qué tipo de señal (acústica/vibración) es posible visualizar las bandas laterales de manera clara?		

Como se observa en la Tabla 28 se responde a las preguntas en cada uno los niveles de severidad de fallo.

Tabla 28. Resultados de las preguntas del fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].

Severidad de fallo	Vibración	Acústica	Respuesta							
			1	2	3	4	5	6	7	8
Fallo Leve	F1 – L1	F1 – L1	SI	SI	+	-	SI	NO	SI	x
	F1 – L2	F1 – L2	SI	SI	x	-	SI	SI	SI	-
	F1 – L3	F1 – L3	SI	SI	+	-	SI	SI	SI	+
Fallo Moderado	F1 – L1	F1 – L1	SI	SI	x	x	SI	NO	SI	-
	F1 – L2	F1 – L2	SI	SI	+	x	SI	SI	SI	+
	F1 – L3	F1 – L3	SI	SI	+	-	SI	SI	SI	-
Fallo Severo	F1 – L1	F1 – L1	SI	SI	x	x	SI	NO	SI	+
	F1 – L2	F1 – L2	SI	SI	x	-	SI	SI	SI	x
	F1 – L3	F1 – L3	SI	SI	x	-	SI	SI	SI	x

En la Tabla 28 se tiene todos los resultados de las preguntas realizadas, por lo cual se procede a graficar las respuestas para una mayor comprensión de los resultados, que son los siguientes:

En la pregunta 1 cada una de las muestras se encuentran en el mismo rango de frecuencia y no se encuentran ninguna muestra en otro rango. En la pregunta 2 si es visible el espectro característico de la GMF en las muestras de vibración y acústica de forma clara. En la pregunta 5 a medida que va evolucionando el fallo la amplitud en cada muestra va en aumento la GMF en vibración y acústica. Para la pregunta 7 se tiene como respuesta en que tanto en vibración como acústica tienen los mismos valores en sus bandas laterales y son equidistantes de la GMF. Para todas las respuestas de cada una de las preguntas se obtuvo un resultado de un 100% afirmativo en cada una y un 0% en resultado negativo, como se observa en la Figura 77.

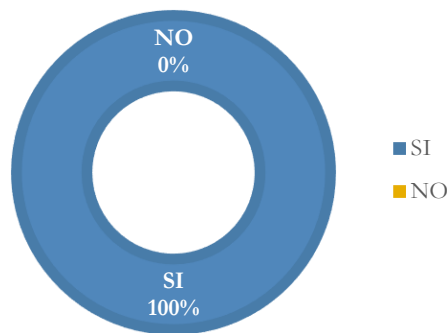


Figura 77. Resultados de las preguntas 1,2,5,7 del fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].

Para la pregunta 3, el resultado es algunas muestras presentan mayor amplitud en comparación con la otra muestra de las señales, en el fallo de rotura de diente las muestras de vibración tienen una mayor amplitud que las muestras de acústica, pero también las muestras acústicas también tienen mayor amplitud que la vibración, como se observa en la Figura 78

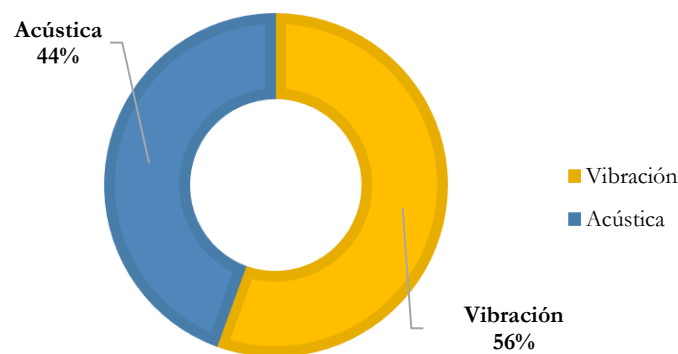


Figura 78. Resultado de la pregunta 3 de fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].

Para la pregunta 4, el resultado en el fallo de rotura de diente tenemos que las muestras en acústica son normales, a comparación con la vibración que se tiene algunas muestras anormales que es difícil diferencia la GMF en la muestra de forma clara, como se observa la Figura 79.

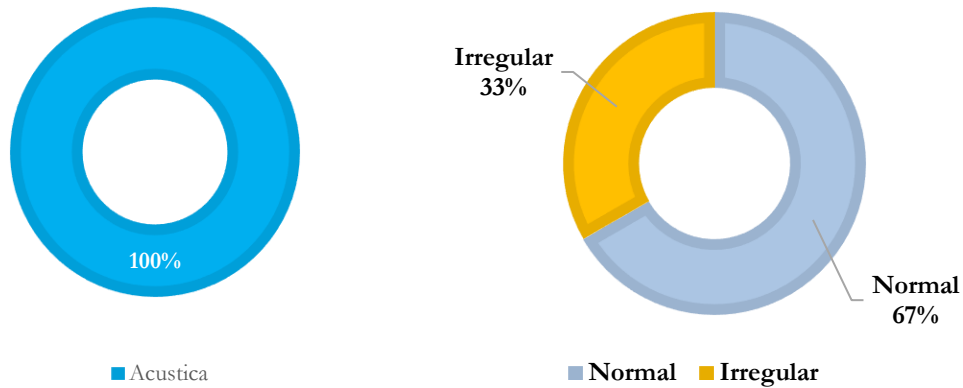


Figura 79. Resultado de la pregunta 4 de fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].

Para la pregunta 6, el resultado es que la GMF va disminuyendo a medida que va en aumento la carga en el fallo, con respecto a las muestras de sin carga que son normales, esto se presenta en ambas muestra sea en vibración y acústica, como se observa la Figura 80.

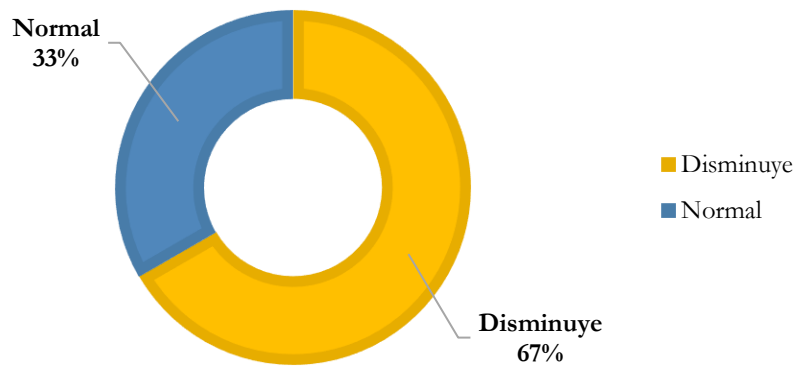


Figura 80. Resultado de la pregunta 6 de fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].

Para la pregunta 8, el resultado tanto en vibración como en acústica las bandas laterales se presentan de forma clara, como se observa la Figura 81.

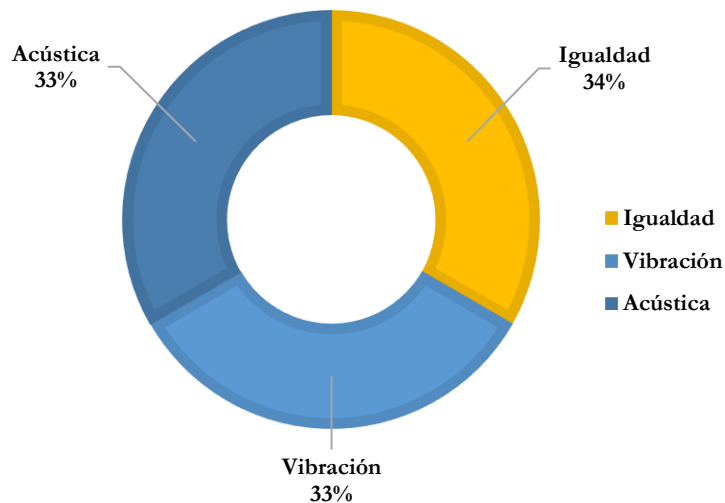


Figura 81. Resultado de la pregunta 8 de fallo de rotura de diente [Fuente: Autor].

Con estas respuestas se pudo determinar que tanto el análisis de vibración como el análisis de acústica, sirven para la detección del fallo de rotura de diente en engranes rectos.

Como resultado final del estudio se puede determinar que el análisis acústico es comparable con el análisis de vibración, el cual como tema nuevo en la industria se puede emplear como método de detección de fallos en maquinarias rotativas, en casos que la señal acústica presenta muestras claras de los fallos de mejor manera que la señal de vibración.

A continuación, se responde a las siguientes preguntas planteadas para ambas señales para un mejor análisis.

- **¿Qué sucede al aumentar el nivel de severidad en el fallo? (Acústica y Vibración)**

Al momento de que va evolucionando el fallo se va incrementando la amplitud en las dos señales, tanto en la GMF y bandas laterales. Pero en acústica las bandas laterales tienen menor amplitud que la vibración, los datos de las bandas son equidistantes a la GMF y los valores son iguales en cada muestra ya sea acústica o vibración.

- **¿Qué sucede al aumentar la carga en el eje a la salida de la caja de engranajes? (Acústica y Vibración)**

Se observa en cada una de las muestras al momento de aumentar la carga mediante el freno magnético al eje de salida de la caja, se aplica un torque al eje lo que produce que la GMF va reduciendo en las dos muestras y la amplitud se va incrementando haciendo visible el fallo en la caja de engranajes.

- **¿Qué técnica de detección es factible para el análisis de fallos en engranes rectos?**

Se puede determinar que el análisis acústico es una técnica factible en la detección de fallos en cajas de engranes como el análisis de vibración, el cual la muestra acústica es clara sin mucho ruido, a comparación de la vibración que también tiene muestras claras, pero en algunas muestras presenta anomalías en las muestras dificultando determinar la GMF de forma rápida, a comparación con la acústica que no presenta anomalías en la muestra.

8. Conclusiones

Con este trabajo de titulación se realizó un estudio de señales acústicas y de vibración, para la detección de fallos en engranes rectos mediante la metodología de monitoreo de la condición, empleando señales acústicas y de vibración. Para lo cual se adquirió dos bases de datos de señales acústicas y de vibración de los fallos de picadura y rotura de diente, con distintos niveles de severidad de una caja de engranajes rectos. Estas señales se compararon entre ellas para justificar que sean aceptables para el diagnóstico de severidad de fallos en engranes rectos, obteniendo las siguientes conclusiones:

- Se acondicionó el sistema de adquisición de datos y la caja de engranajes para el levantamiento de bases de datos y aportando con conceptos teóricos que involucran y profundizan en el aprendizaje en técnicas de detección de fallos en engranes rectos.
- Se implementó una metodología para evaluar la mejor ubicación y dirección de los micrófonos para su adquisición de datos en la caja de engranaje.
- Con el acondicionamiento del sistema de adquisición se aporta con dos bases de datos en los fallos de picadura y rotura de diente en señales acústicas y de vibración con tres niveles de severidad.
- Con la comparación de señales acústicas y de vibración se logran verificar las frecuencias características en cajas de engranes, mientras que para la detección de fallos las señales acústicas presentan mejores resultados que las señales de vibración.

9. Recomendaciones

- Se recomienda optimizar y sistematizar la caja de engranes, también en el montaje y desmontaje de los elementos mecánicos y sensores, como ajustes de los rodamientos al eje, la alineación de las poleas que están conectados al freno magnético, con el fin

de descartar variaciones en las señales acústicas y de vibración, con el propósito de reducir el tiempo de adquisición de bases de datos más extensas.

- Se recomienda realizar el cambio de aceite de la caja de engranajes antes de levantar la línea base como cada tipo de fallo, de tal manera evitar cambios en la señal que puedan ser generados al aceite contaminado.

10. Trabajos futuros

- Adquirir señales acústicas y de vibración con fallos en engranes rectos con fallos de agrietamiento y rayadura.
- Adquirir una base de datos con señales acústicas determinando la severidad de fallos en engranes de dientes helicoidales en distintos niveles.
- Establecer tres bases de datos en la detección de fallos en rodamientos mediante la vibración, acústica y corriente.

11. Referencias bibliográficas

- [1] E. E. Pacheco Córdova, «Adquisición de señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de severidad de fallos en maquinaria rotativa», Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2018.
- [2] R. Vilela, J. C. Metrolho, y J. C. Cardoso, «Machine and industrial monitorization system by analysis of acoustic signatures», en *Electrotechnical Conference, 2004. MELECON 2004. Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean*, 2004.
- [3] 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. Concep. Chile*, 2011.
- [4] A. K. Jardine, D. Lin, y D. Banjevic, «A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 20, n.º 7, pp. 1483–1510, 2006.
- [5] M. R. Caranguí Vintimilla, «Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas de una caja reductora combinando fallos de rodamientos y engranajes rectos para fines investigativos en la Universidad Politécnica Salesiana», Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2014.
- [6] S. V. Niveló Jara y D. J. Romero Rodríguez, «Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas para sistemas mecánicos rotativos con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en rodamientos», Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2014.
- [7] R. A. Guiracocha Guiracocha, «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», Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2015.
- [8] C. E. Muñoz Zumba y Á. G. Vera Rodas, «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», Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2015.
- [9] C. G. Ortiz Farfán y I. A. Pérez Rivera, «Adquisición de señales vibracionales y emisiones acústicas combinando fallos en maquinaria rotativa y elaboración de guías de práctica sobre detección de fallos en engranajes por medio de emisiones acústicas», Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2016.
- [10] D. E. Chingal Imaicela, «Adquisición de señales de corriente del motor de inducción combinando fallos en la maquinaria rotativa y elaboración de una guía de práctica sobre detección de fallos por medio del AFCM», Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2018.
- [11] F. D. Cajas Muñoz y C. P. Torres Díaz, «Adquisición de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor reciprocante de doble etapa», Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2018.
- [12] J. C. Calderón Malla y F. I. Montalván Pulla, «Adquisición de señales acústicas y vibracionales para el diagnóstico de fallos en una bomba centrífuga multietapa de eje vertical», Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2019.
- [13] R. V. Sánchez Loja, «Diagnóstico de fallos en engranajes basado en el análisis de señales de vibración empleando una red neuronal perceptrón multicapa con retropropagación del error», Tesis de Máster, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España, 2012.
- [14] J.-H. Shin y H.-B. Jun, «On condition based maintenance policy», *J. Comput. Des. Eng.*, vol. 2, n.º 2, pp. 119–127, 2015.
- [15] H.-E. Kim, «Machine prognostics based on health state probability estimation», Tesis doctoral, Queensland University of Technology, Queensland, Australia, 2010.
- [16] P. Henriquez, J. B. Alonso, M. A. Ferrer, y C. M. Travieso, «Review of Automatic Fault Diagnosis Systems Using Audio and Vibration Signals», *Syst. Man Cybern. Syst. IEEE Trans. On*, vol. 44, n.º 5, pp. 642–652, 2014.
- [17] C. Mundarain, «Diseño de un programa de mantenimiento basado en condición, enfocado a la mejora de la efectividad de los activos rotativos», Tesis de Pregrado, Universidad de Oriente, Puerto la Cruz, Venezuela, 2009.
- [18] Z. Chen, C. Li, y R.-V. Sanchez, «Gearbox fault identification and classification with convolutional neural networks», *Shock Vib.*, 2015.
- [19] Gerardo Trujillo C., «Monitoreo de Condición – Una estrategia de Integración de Tecnologías», en *Congreso Mexicano de Confiabilidad y Mantenimiento*, 2003.
- [20] F. E. Hernández Montero, M. L. Ruiz Barrios, J. R. Rodríguez Suárez, A. Rolo Naranjo, Samir N.Y. Gerges, y Luis Javier de Miguel, «Sistema de bajo costo para el monitoreo por condición a aplicar en parques eólicos», *Univ. Republica Cuba*, p. 10, 2011.
- [21] SKF, «Monitoreo de condición», Svenska Kullagerfabriken AB (SKF), 2018.

- [22] L. Amendola, «Diagnóstico de fallos por monitoreo de condición.», *Manten. Ing. Ind. Edificios*, n.º 167, pp. 50–53, 2003.
- [23] A. Vargas, «Monitoreo de condiciones para maximizar el uso de maquinaria crítica», vol. Regional Marketing Manager de Latino América y Canadá de National Instruments, 2015.
- [24] G. White, *Introducción al análisis de vibraciones*, Woburn, MA, Estados Unidos: Ázima, vol. 551. 2010.
- [25] V. Sharma y A. Parey, «Frequency domain averaging based experimental evaluation of gear fault without tachometer for fluctuating speed conditions», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 85, pp. 278-295, 2017.
- [26] S. Devendiran y K. Manivannan, «Vibration Based Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technologies For Bearing and Gear Components-A Review», *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 11, n.º 6, pp. 3966–3975, 2016.
- [27] M. del R. Prieto García, «Vibraciones de Máquinas Rotativas; Análisis de Órdenes», Tesis de Pregrado, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2017.
- [28] «Normativa sobre Vibraciones». Departamento de Ingeniería Mecánica, Energética y de Materiales, 2019.
- [29] ISO 2954, *Mechanical vibration of rotating and reciprocating machinery*. 2012.
- [30] ISO 18436-2, *Monitoreo de condición y diagnóstico de máquinas. Requisitos para la calificación y evaluación del personal. Parte 2: Monitoreo de condición de vibración y diagnóstico*. 2014.
- [31] ISO 15242-1, *Rodamientos de rodillos. Métodos de medición de vibraciones. Parte 1: Fundamentos*. 2015.
- [32] ISO 20816-1, *Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 1: General guidelines*. 2016.
- [33] J. A. Jara Jimbo, S. Vivar, y J. Gabriel, «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», Tesis de Pregrado, 2012.
- [34] E. P. Marín, *Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias*. Editorial Félix Varela, 2012.
- [35] M. Rodríguez Súnico, «Análisis modal operacional: Teoría y Práctica», Tesis de Pregrado, Escuela Superior de Ingenieros, Sevilla, España, 2005.
- [36] H. Cao, Y. Yue, X. Chen, y X. Zhang, «Chatter detection in milling process based on synchrosqueezing transform of sound signals», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 89, n.º 9-12, pp. 2747–2755, 2017.
- [37] M. Amarnath y I. R. Praveen Krishna, «Empirical mode decomposition of acoustic signals for diagnosis of faults in gears and rolling element bearings», *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 6, n.º 4, p. 279, 2012.
- [38] S. K. Abraham, V. Sugumaran, y M. Amarnath, «Acoustic Signal Based Condition Monitoring of Gearbox using Wavelets and Decision Tree Classifier», *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 9, n.º 33, 2016.
- [39] C. Li, V. Sanchez, G. Zurita, M. C. 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, 2016.

- [40] S. M. A. Al-Obaidi, M. S. Leong, R. I. Hamzah, y A. M. Abdelrhman, «A Review of Acoustic Emission Technique for Machinery Condition Monitoring: Defects Detection & Diagnostic», en *Applied Mechanics and Materials*, 2012.
- [41] Y. Qu, D. He, J. Yoon, B. Van Hecke, E. Bechhoefer, y J. Zhu, «Gearbox tooth cut fault diagnostics using acoustic emission and vibration sensors—A comparative study», *Sensors*, vol. 14, n.º 1, pp. 1372–1393, 2014.
- [42] C. U. Grosse y M. Ohtsu, *Acoustic emission testing*. Springer Science & Business Media, 2008.
- [43] M. A. Khan *et al.*, «Gear misalignment diagnosis using statistical features of vibration and airborne sound spectrums», *Measurement*, vol. 145, 2019.
- [44] A. Ahmaida, D. Zhen, F. Gu, y A. Ball, «Gear wear process monitoring using acoustic signals», *Hudders. West Yorks. Inglaterra*, 2014.
- [45] A. G. Rehorn, J. Jiang, y P. E. Orban, «State of the art methods and results in tool condition monitoring: a review», *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 26, n.º 7-8, pp. 693–710, 2005.
- [46] N. Baydar y A. Ball, «Detection of gear failures via vibration and acoustic signals using wavelet transform», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 17, n.º 4, pp. 787–804, 2003.
- [47] N. Tandon y A. Choudhury, «A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings», *Tribol. Int.*, vol. 32, n.º 8, pp. 469–480, 1999.
- [48] A. Singh *et al.*, «Sensing Technologies for Monitoring Intelligent Buildings: A Review», *Dep. Sci. Technol. Gov. India*, 2018.
- [49] Y. Mizutani, *Practical acoustic emission testing*. Springer Japan, Tokyo, 2016.
- [50] B. Goller y D. J. M. Ramos, «Espacios Sonicos Intersecciones entre Arquitectura y Sonido», Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2014.
- [51] J. D. Mejía Henao, «Sistema de monitoreo de señales industriales de máquinas rotativas basado en señales de emisión acústica.», Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales, 2016.
- [52] T. Rossing, *Springer Handbook of Acoustics*, 2nd Edición. Springer, 2015.
- [53] F. H. Robledo, *Riesgos físicos I: Ruido, vibraciones y presiones anormales*. Ecoe Ediciones, 2004.
- [54] P. F. Pereira, *Manual de acústica, ruido y vibraciones*. Ediciones GYC, 1989.
- [55] N. A. Flores Martínez, «Medición de propiedades elásticas en sólidos por efecto foto-termo-acústico», Tesis de Máster, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2016.
- [56] F. Miyara, «Introducción a la Acústica», Universidad Nacional de Rosario, Argentina, 2018.
- [57] R. F. Barron, *Industrial noise control and acoustics*. Louisiana, U.S.A.: Louisiana Tech University Ruston, 2003.
- [58] Laboratorio de Electrónica, Ed., «Ondas Planas», en *Sonido*, Venezuela: Universidad Simón Bolívar, 2018.
- [59] J. G. Cabrera Ortiz, *Acustica y Fundamentos del sonido*. Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia, 2010.

- [60] A. Sidorova, «Aplicación del método de la emisión acústica en la monitorización de las estructuras de hormigón», Master thesis, Universidad Politécnica de Cataluña, 2010.
- [61] D. X. Montalvo Echeverría y F. E. Gallegos Guzmán, «Diseño de una cámara anecoica y una cámara reverberante», Tesis de Pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2008.
- [62] A. C. Isbert, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*, vol. 4. Univ. Politèc. de Catalunya, 1998.
- [63] SINTEC, «Conceptos fundamentales del sonido», en *Sistemas de insonorización para la industria y medio ambiente*, 2018.
- [64] M. Rocamora y A. de, «Apuntes de acústica musical», en *Estudio de Musica electroacústica*, Universidad de la República Oriental del Uruguay, 2006.
- [65] F. A. Everest, *Master handbook of acoustics*. ASA, 2001.
- [66] ISO 15243, *Rolling bearings - Damage and failures - terms, characteristics and causes*. 2017.
- [67] O. Hernández Norberto, M. Leo, D. Enrique, y H. F. Ontiveros Cuevas, «Acondicionamiento acústico del auditorio 2 de la ESIME Zacatenco», Tesis Doctoral, 2008.
- [68] D. A. Bies, C. Hansen, y C. Howard, *Engineering noise control*. CRC press, 2017.
- [69] Schlumberger Oilfield Glossary, «Transductor acústico», *Schlumberger Oilfield Glossary*, 2018.
- [70] B. Owsinski, *The recording engineer's handbook*. S.l.: Artistpro Publ, 2005.
- [71] L. L. Beranek y T. J. Mellow, *Acoustics: Sound Fields and Transducers, chapter 6*. Academic Press, Elsevier, Waltham, Massachusetts, USA, 2012.
- [72] G. Ballou, *Electroacoustic devices: microphones and loudspeakers*. CRC Press, 2012.
- [73] PCB Piezotronics, «Specifications manual for ICP Mic System HT378B02», PCB Piezotronics, 2017.
- [74] PCB Piezotronics, «Specifications manual for Microphone Preamplifier System HT378B02», PCB Piezotronics, 2017.
- [75] National Instruments, «NI 9234 Datasheet», National Instruments, 2015.
- [76] National Instruments, «Specifications manual for NI cDAQ™-9188», National Instruments, 2017.
- [77] R. V. Sánchez Loja, «Diagnóstico de fallos en cajas de engranajes con base en la fusión de datos se señales de vibración, corriente y emisión acústica», Tesis Doctoral, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2018.
- [78] P. Jayaswal, A. K. Wadhvani, y K. B. Mulchandani, «Machine Fault Signature Analysis», *Int. J. Rotating Mach.*, pp. 1-10, 2008.
- [79] W. Q. Wang, F. Ismail, y M. Farid golnaraghi, «Assessment of gear damage monitoring techniques using vibration measurements», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 15, n.º 5, pp. 905-922, 2001.
- [80] A. Fernandez, «Formación en análisis de vibraciones». Power-MI, 2016.
- [81] K. Lynch, N. Marchuk, y M. Elwin, *Embedded computing and mechatronics with the PIC32 microcontroller*. Newnes, 2015.

- [82] A. F. García, «MATLAB para el Grado en Ingeniería de Energías Renovables». Universidad del País Vasco, 2013.
- [83] O. C. Morales, «Análisis tiempo-frecuencia de señales de vibraciones mecánicas para la detección de fallos en máquinas rotativas», Tesis de Máster, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales, Manizales, Colombia, 2011.
- [84] Valmet, «Análisis de vibración». Valmet, 2017.
- [85] J. E. Berry, «Illustrated Vibration Diagnostics Chart», *Čes. Překlad Tech. Assoc. Charlotte*, 2005.
- [86] R. Errichello, «How to analyze gear failures», *Pract. Fail. Anal.*, vol. 2, n.º 6, pp. 8–16, 2002.
- [87] J. R. Davis, *Gear materials, properties, and manufacture*. ASM International, 2005.
- [88] A. Cubillo, S. Perinpanayagam, y M. Esperon-Míguez, «A review of physics-based models in prognostics: Application to gears and bearings of rotating machinery», *Adv. Mech. Eng.*, vol. 8, n.º 8, 2016.
- [89] F. K. Choy, V. Polyshchuk, J. J. Zakrajsek, R. F. Handschuh, y D. P. 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.
- [90] 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.
- [91] C. Zhe, H. Niaoqing, G. Fengshou, y Q. Guojun, «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.
- [92] ISO 10825, *Gears - Wear and damage to gear teeth - Terminology*. 1995.
- [93] S. P. Radzevich, *Dudley's handbook of practical gear design and manufacture*. CRC Press, 2012.
- [94] ISO 10816-3, *Vibraciones mecánicas - Evaluación de las vibraciones de la máquina mediante mediciones en partes no giratorias - Parte 3: Vibraciones mecánicas*. 2009.
- [95] N. Baydar y A. Ball, «A comparative study of acoustic and vibration signals in detection of gear failures using Wigner–Ville distribution», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 15, n.º 6, pp. 1091–1107, 2001.
- [96] S. H. Kia, H. Henao, y G.-A. Capolino, «A comparative study of acoustic, vibration and stator current signatures for gear tooth fault diagnosis», en *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on*, 2012.
- [97] H. Wang, J. Mao, J. Zhang, H. Jiang, y J. Wang, «Acoustic feature extraction and optimization of crack detection for eggshell», *J. Food Eng.*, vol. 171, pp. 240–247, 2016.
- [98] W. F. Xue, J. Chen, J. Q. Li, y X. F. Liu, «Acoustical feature extraction of rotating machinery with combined wave superposition and blind source separation», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C-J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 220, n.º 9, pp. 1423-1431, 2006.
- [99] M. Khazaei, H. Ahmadi, M. Omid, A. Moosavian, y M. Khazaei, «Classifier fusion of vibration and acoustic signals for fault diagnosis and classification of planetary gears based on Dempster–Shafer evidence theory», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.*, vol. 228, n.º 1, pp. 21–32, 2014.

- [100] D. R. Salgado y F. J. Alonso, «An approach based on current and sound signals for in-process tool wear monitoring», *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 47, n.º 14, pp. 2140-2152, 2007.
- [101] P. Kane y A. Andhare, «Application of psychoacoustics for gear fault diagnosis using artificial neural network», *J. Low Freq. Noise Vib. Act. Control*, vol. 35, n.º 3, pp. 207-220, 2016.
- [102] A. Shumeika, «Unbalance defect detection in rotating machines by means of sound analysis», *Univ. Gothenbg. Chalmers Swed.*, 2012.
- [103] N. Zuber, R. Bajrić, y R. Šostakov, «Gearbox faults identification using vibration signal analysis and artificial intelligence methods», *Eksploat. Niezawodn.*, vol. 16, n.º 1, pp. 61-65, 2014.
- [104] N. K. Verma, R. K. Sevakula, S. Dixit, y A. Salour, «Intelligent condition based monitoring using acoustic signals for air compressors», *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 65, n.º 1, pp. 291-309, 2016.
- [105] Z. Zhou y Z. Feng, «Planetary Gearbox Fault Diagnosis via Acoustic Signal Analysis», en *International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC)*, Shanghai, 2017.
- [106] A. Parey y A. Singh, «Gearbox fault diagnosis using acoustic signals, continuous wavelet transform and adaptive neuro-fuzzy inference system», *Appl. Acoust.*, vol. 147, pp. 133-140, 2018.
- [107] I. Vamsi, G. R. Sabareesh, y P. K. Penumakala, «Comparison of condition monitoring techniques in assessing fault severity for a wind turbine gearbox under non-stationary loading», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 124, pp. 1-20, 2019.