

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

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

PROYECTO TÉCNICO:

**“ESTABLECIMIENTO DE TRES BASES DE DATOS PARA LA
DETECCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS MEDIANTE
SEÑALES ACÚSTICAS, VIBRACIONALES Y DE CORRIENTE”**

AUTOR:

ANDRÉS SEGUNDO VACACELA COSTA

TUTOR:

ING. RENÉ VINICIO SÁNCHEZ LOJA, Ph.D.

CUENCA – ECUADOR

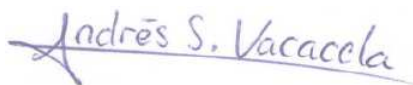
2020

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Andrés Segundo Vacacela Costa con documento de identificación N° 0104750559, 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: **“ESTABLECIMIENTO DE TRES BASES DE DATOS PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS MEDIANTE SEÑALES ACÚSTICAS, VIBRACIONALES Y DE CORRIENTE”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecánico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre del 2020



.....

Andrés Segundo Vacacela Costa

C.I. 0104750559

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“ESTABLECIMIENTO DE TRES BASES DE DATOS PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS MEDIANTE SEÑALES ACÚSTICAS, VIBRACIONALES Y DE CORRIENTE”**, realizado por Andrés Segundo Vacacela Costa, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre del 2020



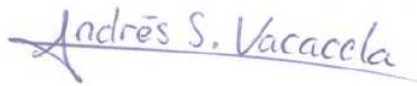
.....
Ing. René Vinicio Sánchez Loja, PhD.

C.I. 0103409587

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Andrés Segundo Vacacela Costa con documento de identificación N° 0104750559, autor del trabajo de titulación: **“ESTABLECIMIENTO DE TRES BASES DE DATOS PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS MEDIANTE SEÑALES ACÚSTICAS, VIBRACIONALES Y DE CORRIENTE”**, certifico que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, diciembre del 2020



.....
Andrés Segundo Vacacela Costa

C.I. 0104750559

DEDICATORIA

A mis padres, Isolina Costa y Segundo Vacacela, por su apoyo incondicional en todo aspecto de mi vida.

A mi hermana Alexandra, por ser ejemplo de esfuerzo y perseverancia.

A mi esposa Nataly Martínez, por su tiempo, comprensión y confianza en mí.

A mi amada hija Melissa Catalina, por ser mi fuente de motivación para superarme cada día más.

A todas las amistades que me acompañaron a lo largo de mi formación académica.

Andrés Vacacela Costa

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios y a mi santo de devoción el Dr. Julio Matovelle por brindarme vida y salud para poder realizar todas las actividades de mi diario vivir.

A mis padres, Isolina Costa y Segundo Vacacela, por su apoyo incondicional, por su esfuerzo y sacrificio para ayudarme a conseguir mis metas. A mi hermana por su apoyo en momentos difíciles de mi vida.

A mi esposa Nataly Martínez, por su compañía, apoyo y confianza.

A mi director de proyecto, Dr. Vinicio Sánchez, quien ha sabido guiarme en todo momento tanto en el ámbito académico como en el personal, gracias por brindarme su confianza, conocimiento, experiencia y su amistad. A los miembros del GIDTEC: Franco Cajas y Cristian Torres, que a lo largo de este tiempo colaboraron para el éxito de este proyecto.

Al laboratorista Mauricio Villacís que aportó con sus ideas y conocimiento para resolver cualquier inconveniente con el desarrollo del proyecto.

A todas las grandes amistades que me acompañaron a lo largo de mi vida universitaria.

A la Universidad Politécnica Salesiana, por su acogida en estos años de estudio, por las enseñanzas y la experiencia que me llevo de cada docente que aportó con sus conocimientos y experiencia para mi formación académica y personal.

Andrés Vacacela Costa

RESUMEN

El presente proyecto técnico se centra en el mantenimiento basado en la condición, que ejecuta tareas de mantenimiento para detección de fallos en rodamientos en un compresor recíprocante de doble etapa, a partir de información recogida mediante la adquisición de señales, empleando técnicas de monitoreo acústico, de vibración y corriente. Particularmente, fallos localizados en las pistas de rodadura y elementos rodantes de rodamientos de rodillos cónicos. Para el procesamiento de las señales acústicas, de vibración y corriente, se emplearon las técnicas *FFT*, envolvente y cepstrum, que permiten brindar un análisis comparativo entre señales en condición normal y condición de fallo severo en los componentes de los rodamientos. De esta manera, es posible determinar que técnica de monitoreo y de procesamiento de señales presenta un desempeño satisfactorio para detección de fallos en rodamientos.

La sección dos presenta la introducción del proyecto técnico, donde se especifica brevemente el elemento mecánico que se va a estudiar, las técnicas que se emplean para el monitoreo de la condición y las técnicas con las que se lleva a cabo el procesamiento de señales. La sección tres presenta los estudios previos, la importancia y alcance del mantenimiento basado en la condición y del monitoreo de la condición, la delimitación del proyecto técnico y los problemas general y específicos a los que se pretende dar solución. La sección cuatro presenta el objetivo general y los objetivos específicos de acuerdo a el planteamiento del problema. La sección cinco establece el fundamento teórico donde se detalla las técnicas de monitoreo de la condición que se emplean en el proyecto para la detección de fallos en rodamientos. Del mismo modo, se especifica las técnicas de procesamiento: *FFT*, Envolvente y Cepstrum empleadas para realizar el análisis comparativo de las señales y las características de los rodamientos de rodillos cónicos con sus frecuencias fundamentales de fallo. La sección seis establece el marco metodológico que especifica el proceso experimental del proyecto, donde se puntualiza tareas como: emplazamiento de sensores, acondicionamiento del software de adquisición, establecimiento de la línea base y adquisición de señales. La sección siete presenta el análisis de resultados, donde se realiza una comparación de señales acústicas, de vibración y corriente en condición normal y condición con fallo severo en los componentes del rodamiento, aplicando las técnicas de procesamiento *FFT*, Envolvente y Cepstrum. En la sección ocho se presenta la discusión de los resultados del análisis de las señales, por medio de las principales observaciones que se realizan en la sección siete, para determinar la mejor técnica de monitoreo y procesamiento de señales

para detección de fallos en los componentes del rodamiento. En la sección nueve se presentan las conclusiones que especifican el cumplimiento de los objetivos planteados para este proyecto técnico.

Para finalizar, en la sección diez se brinda algunas recomendaciones importantes para la mejora del presente proyecto técnico. Además, se presenta una propuesta para trabajos futuros.

ABSTRACT

This technical project focuses on condition-based maintenance, which executes maintenance tasks for bearing faults detection in a dual-stage reciprocating compressor, based on information collected by acquiring signals, using acoustic, vibration and current monitoring techniques. Particularly, localized faults in the raceways and rolling elements of tapered roller bearings. For the processing of acoustic, vibration and current signals, FFT, envelope and cepstrum techniques were used, to provide a comparative analysis between signals under normal condition and severe fault in bearing components. In this way, it is possible to determine which monitoring and signal processing technique has satisfactory performance for bearing faults detection.

Section two presents the introduction of the technical project, where the mechanical element to be studied is briefly specified, the techniques used for the condition monitoring and with which signal processing is carried out. Section three presents previous studies, the importance and scope of condition-based maintenance and condition monitoring, the delimitation of the technical project and the general and specific problems to be solved. Section four presents the general and specific objectives, according to the approach of the problem. Section five establishes the theoretical basis where the condition monitoring techniques used in the project for bearing fault detection are detailed. Similarly, the processing techniques are specified: FFT, Envelope and Cepstrum used to perform the comparative analysis of the signals and characteristics of tapered roller bearings with their fundamental fault frequencies. Section six sets out the methodological framework that specifies the experimental process of the project, where tasks such as: sensor placement, acquisition software conditioning, baseline establishment and signal acquisition are specified. Section seven presents the analysis of results, where a comparison of acoustic, vibration and current signals in normal condition and severe fault in the bearing components is made, applying the techniques of FFT, Envelope and Cepstrum. Section eight presents the discussion of results of the signal analysis, through the main observations made in section seven, to determine the best monitoring and signal processing technique for faults detection in bearing components. Section nine presents the conclusions, which specify the fulfillment of the objectives set for this technical project.

Finally, section ten provides some important recommendations for the improvement of this technical project. In addition, a proposal for future work is provided.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	II
CERTIFICACIÓN	III
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTOS	VI
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	IX
ÍNDICE DE CONTENIDOS	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XVI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XX
1. TEMA.....	1
2. INTRODUCCIÓN	1
3. PROBLEMA.....	2
3.1. Antecedentes	2
3.2. Importancia y alcance.....	5
3.3. Delimitación	8
3.4. Problema General.....	8
3.5. Problemas Específicos	8
4. OBJETIVOS.....	8
4.1. Objetivo General	8
4.2. Objetivos Específicos	8
5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	9
5.1. Mantenimiento Industrial	9

5.2.	Tipos de Mantenimiento.....	9
5.2.1.	Mantenimiento Correctivo	10
5.2.2.	Mantenimiento Preventivo.....	11
5.2.3.	Mantenimiento Predeterminado.....	11
5.2.4.	Mantenimiento Predictivo	11
5.2.5.	Mantenimiento Activo	11
5.2.6.	Mantenimiento Mejorativo.....	12
5.3.	Mantenimiento Basado en la Condición	12
5.4.	Monitoreo de la Condición	14
5.4.1.	Monitoreo de señales acústicas	15
5.4.2.	Monitoreo de vibraciones.....	15
5.4.3.	Monitoreo de la corriente eléctrica del motor.....	16
5.5.	Técnicas de monitoreo de la condición.....	16
5.5.1.	Análisis acústico	17
5.5.1.1.	Acústica	17
5.5.1.2.	Sonido.....	17
5.5.1.2.1.	Percepción del sonido.....	17
5.5.1.3.	Ondas sonoras.....	18
5.5.1.3.1.	Características de las ondas sonoras	19
5.5.1.3.1.1.	Velocidad de propagación	19
5.5.1.3.1.2.	Longitud de onda (λ).....	19
5.5.1.3.1.3.	Período (T).....	20
5.5.1.3.1.4.	Frecuencia (F).....	20
5.5.1.3.2.	La ecuación de onda acústica unidimensional.....	20
5.5.1.3.3.	Solución de la ecuación de onda	22

5.5.1.4.	Características del sonido.....	24
5.5.1.4.1.	Presión acústica.....	24
5.5.1.4.1.1.	Nivel de presión acústica	24
5.5.1.4.2.	Potencia acústica.....	25
5.5.1.4.3.	Intensidad	25
5.5.1.4.4.	Tono	26
5.5.1.5.	Ruido.....	26
5.5.1.5.1.	Tipos de ruido.....	26
5.5.1.5.1.1.	Según intensidad y evolución temporal.....	26
5.5.1.5.1.2.	Según composición en frecuencias.....	27
5.5.1.6.	Adquisición de señales acústicas	29
5.5.1.6.1.	Instrumentación acústica.....	30
5.5.1.6.1.1.	Micrófono dinámico.....	31
5.5.1.6.1.2.	Micrófono de condensador.....	32
5.5.1.6.2.	Sistema integrado de micrófono y preamplificador PCB HT378B02.....	33
5.5.1.6.3.	Módulo de adquisición National Instruments NI-9234	34
5.5.1.6.4.	Chasis de módulos National Instruments NI compact DAQ-9188.....	35
5.5.2.	Análisis de vibración	36
5.5.2.1.	Vibración.....	36
5.5.2.1.1.	Vibración simple.....	36
5.5.2.1.1.1.	Amplitud	37
5.5.2.1.1.2.	Fase	38
5.5.2.1.1.3.	Frecuencia.....	38
5.5.2.1.2.	Vibración Compuesta	38
5.5.2.2.	Instrumentación de medida.....	39

5.5.2.2.1.	Acelerómetro.....	39
5.5.2.3.	Técnicas de fijación del sensor a la máquina.....	40
5.5.2.4.	Normas para la medición y evaluación de los niveles de vibración.....	41
5.5.2.4.1.	MIL-STD-167-1 y MIL-STD-167-2.....	41
5.5.2.4.2.	Norma ISO 10816.....	42
5.5.2.4.3.	Normas comerciales DLI.....	43
5.5.2.4.4.	Carta de Charlotte	44
5.5.3.	Monitoreo de la corriente eléctrica del motor.....	46
5.5.3.1.	El motor de inducción.....	46
5.5.3.2.	Análisis de firma de la corriente del motor (AFCM).....	47
5.5.3.3.	Fallos en rodamientos de máquinas eléctricas	47
5.5.3.4.	Medición de corriente.....	48
5.5.3.4.1.	Sensor de efecto Hall.....	49
5.5.3.4.2.	Pinza amperimétrica.....	49
5.5.3.5.	Equipo de adquisición de señales de corriente	50
5.5.3.6.	Normas para análisis de firma de la corriente del motor	51
5.6.	Adquisición de señales	52
5.7.	Procesamiento de las señales.....	53
5.7.1.	Análisis en el dominio del tiempo	53
5.7.2.	Análisis en el dominio de la frecuencia.....	53
5.8.	Técnicas de procesamiento de señales.....	54
5.8.1.	Transformada Rápida de Fourier (<i>FFT</i>).....	55
5.8.1.1.	Aplicación de la <i>FFT</i> para detección de fallos en rodamientos	57
5.8.2.	Análisis Envolvente.....	58
5.8.3.	Análisis Cepstrum.....	61

5.8.3.1.	Terminología Cepstral.....	62
5.8.3.2.	Aplicación del Cepstrum para la detección de fallos en rodamientos.....	63
5.8.3.3.	Ventajas del Cepstrum comparado con el análisis frecuencial.....	64
5.9.	Rodamientos.....	64
5.9.1.	Introducción.....	64
5.9.2.	Estructura de un rodamiento.....	65
5.9.3.	Tipos de rodamientos.....	65
5.9.4.	Rodamientos de rodillos cónicos.....	66
5.9.4.1.	Características.....	66
5.9.4.2.	La Jaula.....	67
5.9.5.	Frecuencias características en los rodamientos.....	67
5.10.	Fallos en rodamientos.....	68
6.	MARCO METODOLÓGICO.....	68
6.1.	Metodología para la adquisición de señales acústicas, vibratorias y de corriente 68	
6.1.1.	Banco de pruebas experimentales.....	68
6.1.2.	Proceso experimental.....	70
6.1.2.1.	Emplazamiento de sensores.....	71
6.1.2.1.1.	Conexión de sensores.....	71
6.1.2.1.2.	Emplazamiento de los micrófonos.....	72
6.1.2.1.3.	Emplazamiento de los acelerómetros.....	73
6.1.2.1.4.	Emplazamiento de las pinzas.....	74
6.1.2.2.	Acondicionamiento del software de adquisición de datos.....	74
6.1.2.2.1.	Descripción de la interfaz gráfica.....	75
6.1.2.3.	Línea base.....	75

6.1.2.3.1.	Validación de línea base.....	76
6.1.2.3.1.1.	Verificación visual.....	76
6.1.2.3.1.2.	Verificación de ruidos extraños	76
6.1.2.3.1.3.	Verificación de frecuencias características	76
6.1.2.3.2.	Resultado de línea base.....	78
6.1.2.4.	Adquisición de señales.....	79
6.1.2.4.1.	Codificación de rodamientos	79
6.1.2.4.2.	Cálculo de frecuencias características de rodamientos.....	79
6.1.2.4.3.	Plan experimental.....	82
6.1.2.4.3.1.	Patrones de fallo en el rodamiento 32208.....	82
6.1.2.4.4.	Resultado del plan experimental.....	85
6.1.2.4.4.1.	Detalles de las bases de datos.....	85
7.	ANÁLISIS DE SEÑALES ACÚSTICAS, VIBRACIONALES Y DE CORRIENTE	87
7.1.	Comparación de señales en el dominio del tiempo con señales en el dominio de la frecuencia con presencia de fallo en los componentes del rodamiento.	88
7.2.	Comparación entre señal en condición normal y señal en condición de fallo en los componentes del rodamiento mediante <i>FFT</i> , envolvente y cepstrum para técnicas de monitoreo acústico, vibracional y corriente.	90
8.	DISCUSIÓN.....	102
9.	CONCLUSIONES.....	107
10.	RECOMENDACIONES.....	108
	TRABAJOS FUTUROS.....	108
	REFERENCIAS.....	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Compresor recíprocante de doble etapa marca BP modelo EBG250.	7
Figura 2. Vistas lateral y superior de la ubicación de los rodamientos en el compresor.....	7
Figura 3. Tipos de mantenimiento según la norma Europea EN 13306: 2017.	10
Figura 4. Comportamiento de la falla en el equipo.	13
Figura 5. Tres pasos en la estrategia de mantenimiento basado en la condición.....	13
Figura 6. Rango de frecuencias del sonido.....	17
Figura 7. Ejemplo de generación de ondas longitudinales: sistema cilindro-émbolo en la compresión de aire.....	18
Figura 8. Características de una onda sinusoidal.	19
Figura 9. Tubo de sección constante en dos instantes de tiempo diferentes.	21
Figura 10. Propagación de una onda a lo largo del tubo.	22
Figura 11. Distribución espacial de la presión sonora en un tubo abierto para tres soluciones estacionarias ($k = 1, 2$ y 3).....	23
Figura 12. Distribución espacial de la presión sonora en un tubo semiabierto para tres soluciones estacionarias ($k = 1, 2$ y 3).....	24
Figura 13. Esquema general de los módulos usados habitualmente en la adquisición de señales acústicas.....	30
Figura 14. Tipos de micrófonos según sus criterios de clasificación más importantes.....	31
Figura 15. Esquema de los elementos esenciales de un micrófono dinámico.....	31
Figura 16. Esquema de los elementos esenciales de un micrófono de condensador.	32
Figura 17. Sistema integrado de micrófono y preamplificador PCB HT378B02.....	33
Figura 18. Módulo dinámico de adquisición de señales de voltaje NI 9234.....	34
Figura 19. Chasis de módulos de adquisición de señales NI compactDAQ-9188.	36
Figura 20. Sistema vibratorio masa-resorte.	36

Figura 21. Movimiento armónico simple.....	37
Figura 22. Formas de medición de la amplitud vibratoria.....	37
Figura 23. Ejemplo de dos señales desfasadas en 90°.	38
Figura 24. Esquema de vibración compuesta.	39
Figura 25. Componentes de un acelerómetro piezoeléctrico.	40
Figura 26. Técnicas de fijación del sensor a la máquina.	41
Figura 27. Espectro de desplazamiento, empleado como referencia para niveles aceptables de vibración.....	42
Figura 28. Severidad de la vibración según la norma ISO 10816-3.....	43
Figura 29. Rango de gravedad de vibración en maquinaria según AZIMA DLI.....	44
Figura 30. Etapa 1 de fallo en rodamientos.....	44
Figura 31. Etapa 2 de fallo en rodamientos.....	45
Figura 32. Etapa 3 de fallo en rodamientos.....	45
Figura 33. Etapa 4 de fallo en rodamientos.....	46
Figura 34. Rotor y estator de un motor de inducción.....	47
Figura 35. Pinza amperimétrica de efecto Hall.....	49
Figura 36. Proceso de adquisición de datos de la señal de corriente.....	51
Figura 37. Medición en el dominio del tiempo vs medición en el dominio de la frecuencia....	54
Figura 38. Señal de vibración en el dominio del tiempo con fallo en la pista interna de un rodamiento.....	57
Figura 39. Espectro de vibración de un rodamiento con fallo en la pista interna.....	58
Figura 40. Forma de onda registrada en un rodamiento con fallo.....	59
Figura 41. Espectro estándar.	59
Figura 42. Forma de onda demodulada.	60
Figura 43. Espectro de demodulación.	60

Figura 44. Proceso de demodulación.....	61
Figura 45. Señal de vibración de un rodamiento con fallo en pista interna, velocidad de entrada 2000 rpm y carga 50 Nm.....	63
Figura 46. Análisis Cepstrum aplicado a una señal de un rodamiento con fallo en pista interna, con velocidad de rotación 2000 rpm y carga 50 Nm.....	64
Figura 47. Componentes de un rodamiento.....	65
Figura 48. Esquema de clasificación de rodamientos.....	65
Figura 49. Esquema de clasificación de rodamientos de rodillos cónicos.....	66
Figura 50. Líneas de proyección de los caminos de rodadura.....	66
Figura 51. Clasificación de fallos en rodamientos según la norma ISO 15243.....	68
Figura 52. Banco de pruebas experimentales para compresor recíprocante.....	69
Figura 53. Partes principales del compresor recíprocante EBG250.....	69
Figura 54. Proceso experimental para la adquisición de señales acústicas, vibracionales y de corriente.....	71
Figura 55. Secuencia de conexión del sistema de adquisición de señales para la experimentación.....	71
Figura 56. Plano de emplazamiento de los micrófonos capacitivos en el compresor recíprocante EBG-250.....	72
Figura 57. Plano de emplazamiento de los acelerómetros en el compresor recíprocante EBG-250.....	73
Figura 58. Esquema de conexión de las tres pinzas amperimétricas.....	74
Figura 59. Conexión real de las tres pinzas amperimétricas.....	74
Figura 60. Partes principales de la interfaz gráfica del programa de adquisición de señales.....	75
Figura 61. Proceso de validación de línea base.....	76
Figura 62. Señal de vibración en el dominio de la frecuencia adquirida por el acelerómetro A3.....	77

Figura 63. Señal acústica en el dominio de la frecuencia del compresor recíprocante EBG250 en condición normal; señal adquirida por el micrófono Mic1.	78
Figura 64. Señal de vibración en el dominio de la frecuencia del compresor recíprocante EBG250 en condición normal; señal adquirida por el acelerómetro A3.	78
Figura 65. Señal de corriente en el dominio de la frecuencia del compresor recíprocante EBG250 en condición normal; señal adquirida por la pinza amperimétrica CVC2.	79
Figura 66. Codificación para el tipo de fallo en rodamientos.	79
Figura 67. Señales acústicas, de vibración y corriente en el dominio del tiempo y la frecuencia para fallo en pista interna del rodamiento 32208.	88
Figura 68. Señales acústicas, de vibración y corriente en el dominio del tiempo y la frecuencia para fallo en elemento rodante del rodamiento 32208.	89
Figura 69. Señales acústicas, de vibración y corriente en el dominio del tiempo y la frecuencia para fallo en pista externa del rodamiento 32208.	90
Figura 70. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica <i>FFT</i> para fallo en pista interna del rodamiento 32208.	91
Figura 71. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica envolvente para fallo en pista interna del rodamiento 32208.	92
Figura 72. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica Cepstrum para fallo en pista interna del rodamiento 32208.	93
Figura 73. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica <i>FFT</i> para fallo en elemento rodante del rodamiento 32208.	95
Figura 74. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica envolvente para fallo en elemento rodante del rodamiento 32208.	96
Figura 75. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica Cepstrum para fallo en elemento rodante del rodamiento 32208.	97
Figura 76. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica <i>FFT</i> para fallo en pista externa del rodamiento 32208.	99

Figura 77. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica envolvente para fallo en pista externa del rodamiento 32208.100

Figura 78. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica Cepstrum para fallo en pista externa del rodamiento 32208.101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proyectos de titulación culminados en el GIDTEC.....	4
Tabla 2. Técnicas del MBC, variables identificativas y equipos o instalaciones de aplicación..	14
Tabla 3. Velocidad del sonido en algunos materiales.....	19
Tabla 4. Clasificación de tonos de acuerdo con el rango de frecuencias de ondas sonoras.....	26
Tabla 5. Tipos de ruido y su medición.....	28
Tabla 6. Especificaciones técnicas del micrófono capacitivo PCB 337B02.	33
Tabla 7. Especificaciones técnicas del preamplificador PCB HT426E01.....	34
Tabla 8. Especificaciones técnicas del módulo de adquisición de señales NI-9234.....	35
Tabla 9. Tipos de transductores de vibración.....	39
Tabla 10. Límite frecuencial según la forma de fijación.....	40
Tabla 11. Norma comercial DLI.	43
Tabla 12. Frecuencias de fallo.....	47
Tabla 13. Tabla comparativa sensores de corriente.....	48
Tabla 14. Características técnicas de la pinza amperimétrica	50
Tabla 15. Terminología Cepstral.	62
Tabla 16. Valores de los parámetros de operación del compresor EBG250.....	70
Tabla 17. Frecuencias características del compresor presentes en la señal de vibración.	77

Tabla 18. Características de las frecuencias fundamentales del compresor presentes en la señal de vibración adquirida por el acelerómetro A3.	77
Tabla 19. Datos de las dimensiones del rodamiento 32208.	80
Tabla 20. Datos de las dimensiones del rodamiento 30307.	80
Tabla 21. Patrones de fallo en el rodamiento 32208.	83
Tabla 22. Resumen de base de datos # 1 para fallos en rodamientos.	85
Tabla 23. Resumen de base de datos # 2 para fallos en rodamientos.	86
Tabla 24. Resumen de base de datos # 3 para fallos en rodamientos.	86
Tabla 25. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica <i>FFT</i> para fallo en pista interna.	91
Tabla 26. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica envolvente para fallo en pista interna.	92
Tabla 27. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica Cepstrum para fallo en pista interna.	94
Tabla 28. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica <i>FFT</i> para fallo en elemento rodante.	95
Tabla 29. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica envolvente para fallo en elemento rodante.	96
Tabla 30. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica Cepstrum para fallo en elemento rodante.	98
Tabla 31. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica <i>FFT</i> para fallo en pista externa.	99
Tabla 32. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica envolvente para fallo en pista externa.	100
Tabla 33. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica Cepstrum para fallo en pista externa.	102

Tabla 34. Resumen de los resultados del análisis de señales para fallo en pista interna del rodamiento 32208.....	103
Tabla 35. Resumen de los resultados del análisis de señales para fallo en elemento rodante del rodamiento 32208.....	104
Tabla 36. Resumen de los resultados del análisis de señales para fallo en pista externa del rodamiento 32208.....	106

1. TEMA

“Establecimiento de tres bases de datos para la detección de fallos en rodamientos mediante señales acústicas, vibracionales y de corriente”

2. INTRODUCCIÓN

Los rodamientos son elementos mecánicos con un amplio campo de aplicación y de vital importancia en maquinaria rotativa, sirven de soporte a los ejes de transmisión, lo que implica que estén sometidos a cargas estáticas y dinámicas; debido a la fricción que se genera entre las superficies rotatorias y los esfuerzos mecánicos a los que se encuentran expuestos, se pueden presentar fallos en su estructura.

Para evaluar el estado de funcionamiento de los rodamientos, se establece un programa de mantenimiento basado en la condición (MBC), que almacena información extraída mediante el monitoreo de la condición (MC), esta actividad es fundamental para la detección y diagnóstico de fallos en la estructura de los rodamientos, para evitar una posible falla catastrófica que origine que una máquina o instalación quede fuera de servicio, ocasionando paradas innecesarias en la línea de producción, incluso llegando a ser un potencial riesgo para la seguridad laboral del operario; estas consecuencias representan altas pérdidas financieras.

Existen varias técnicas para efectuar el monitoreo de la condición, en el presente proyecto técnico son objeto de estudio y experimentación el monitoreo acústico, que es una técnica relativamente nueva en el campo del mantenimiento, el monitoreo basado en vibración que es la técnica más empleada por su ventaja en la detección de fallos incipientes en rodamientos, y el monitoreo de firma de la corriente, que es una técnica no invasiva, es decir, no es necesario el contacto directo con la máquina.

Las técnicas de monitoreo de la condición permiten detectar fallos localizados en los componentes de los rodamientos, mediante un proceso de adquisición de señales con la implementación de sensores apropiados para cada técnica.

Las señales acústicas, vibracionales y de corriente adquiridas mediante los sensores son almacenadas, acondicionadas y convertidas en un módulo de adquisición de datos, y

posteriormente transmitidas a un ordenador para ser procesadas en un software diseñado en LabVIEW, para su análisis y presentación al usuario.

Por lo general, las señales adquiridas son representadas como una señal compleja, es decir, la sumatoria de un conjunto de señales en el dominio del tiempo, por esta razón, para obtener información significativa asociada a las características de fallo se debe realizar un análisis en el dominio de la frecuencia, dado que, cada componente de la maquinaria rotativa genera una frecuencia única, que no se visualiza de manera individual en la señal que el sensor midió; para ello, se emplean técnicas de procesamiento que permitan convertir estas señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia como son la transformada rápida de Fourier (*FFT*, del inglés *Fast Fourier Transform*), análisis de envolvente empleando la transformada Hilbert y cepstrum.

3. PROBLEMA

3.1. Antecedentes

El Mantenimiento Basado en la Condición (MBC) es un programa empleado para conocer el estado de la maquinaria y recomendar acciones preventivas usando información recogida a través del monitoreo de la condición (MC) [1].

En el sector industrial, el MBC ha tenido gran impacto durante los últimos años, hoy en día, existe considerable evidencia que el MBC presenta ventajas económicas en la mayoría de las industrias, por lo tanto, es importante llevar a cabo estudios de investigación que garanticen un proceso productivo continuo [2]. Es por ello que la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca cuenta con un laboratorio para el MC, donde el Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC) realiza estudios enfocados en maquinaria industrial.

En la Tabla 1 se presentan los proyectos de titulación culminados con la asistencia del GIDTEC. A continuación, se detallan brevemente los trabajos realizados en rodamientos, en 2014, Carangui [3] desarrolló el proyecto de titulación, “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”, donde se llevó a cabo el levantamiento de una base de datos, implantando fallos en engranes rectos y en rodamientos rígidos de bolas, combinando fallos en ambos elementos.

En 2015, Guiracocha [4] llevó a cabo el proyecto de titulación “Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones acústicas e imágenes termográficas infrarrojas para un sistema mecánico rotativo con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en engranajes”, donde adquirió señales de emisión acústica, vibración mecánica e imágenes termográficas sobre un sistema mecánico rotativo con fallos en engranes y rodamientos.

En 2015, Muñoz y Vera [5] desarrollaron el proyecto de titulación “Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas y acústicas de un sistema mecánico rotativo con la combinación de fallos de rodamientos y engranajes helicoidales y elaboración de guía de práctica para desbalanceo estático”, se adquirió señales de vibración y emisión acústica en un sistema mecánico rotativo, simulando fallos en rodamientos y engranes helicoidales.

En 2016, Ortiz y Pérez [6] realizaron el proyecto de titulación “Adquisición de señales vibracionales y emisiones acústicas combinando fallos en maquinaria rotativa y elaboración de guías de práctica sobre detección de fallos en engranajes por medio de emisiones acústicas”, se llevó a cabo una comparación de las señales de emisiones acústicas y de vibración adquiridas en un sistema mecánico rotativo con diferentes configuraciones y construcciones de fallos en rodamientos y engranes.

En 2018, Pacheco [7] desarrolló el proyecto de titulación, “Adquisición de señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de severidad de fallos en maquinaria rotativa”, donde se estableció una base de datos de severidad de fallos en engranajes y rodamientos, por medio de la adquisición de señales de vibración y emisión acústica.

En los trabajos mencionados, se han llevado a cabo métodos de análisis y adquisición de señales mediante: emisiones acústicas y vibración, por consiguiente, se plantea en el presente proyecto técnico adquirir de manera simultánea señales de acústica, vibración y corriente, para detección de fallos en rodamientos y comparar estas señales empleando tres técnicas de procesamiento: transformada rápida de Fourier, envolvente y cepstrum.

Tabla 1. Proyectos de titulación culminados en el GIDTEC [8].

Autor (Año)[Ref.]	Título	Descripción	Señales adquiridas	Mecanismos estudiados
Carangui (2014) [3]	“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) [9]	“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) [4]	“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”	Se adquirió señales de emisión acústica, vibración mecánica e imágenes termográficas sobre un sistema mecánico rotativo.	Vibración mecánica. Emisión acústica. Imágenes termográficas	Sistema mecánico rotativo. Engranajes. Rodamientos.
Muñoz y Vera (2015) [5]	“Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas y acústicas de un sistema mecánico rotativo con la combinación de fallos de rodamientos y engranajes helicoidales y elaboración de guía de práctica para desbalanceo estático”	Se adquirió señales de vibración mecánica y emisión acústica en un sistema mecánico rotativo, simulando fallos en rodamientos y engranes helicoidales en una caja de engranajes.	Vibración mecánica. Emisión acústica.	Engranajes. Rodamientos.
Ortiz y Pérez (2016) [6]	“Adquisición de señales vibratorias 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) [7]	“Adquisición de señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de severidad de fallos en maquinaria rotativa”	Se estableció una base de datos de severidad de fallos en engranajes y rodamientos, por medio de la adquisición de señales de vibración y emisión acústica.	Vibración mecánica. Emisión Acústica.	Engranajes. Rodamientos.

Autor (Año)[Ref.]	Título	Descripción	Señales adquiridas	Mecanismos estudiados
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 adquirió señales de corriente en el motor de inducción, para la detección de fallos en engranajes por medio del análisis de firma de corriente del motor.	Vibración mecánica. Corriente.	Engranajes. Motor de inducción.
Cajas y Torres (2018) [8]	“Adquisición de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor recíprocante de doble etapa”	Se estableció una base de datos de señales acústicas y vibración de fallos del sistema mecánico del compresor.	Vibración Mecánica. Acústica.	Compresor Recíprocante.
Calderón y Montalván (2019) [11]	“Adquisición de señales acústicas y vibratorias para el diagnóstico de fallos en una bomba centrífuga multietapa de eje vertical”	Se estableció 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.
Lojano F. (2019) [12]	“Señales acústicas y de vibración: estudio comparativo para la detección de severidad de fallos en engranes rectos”	Se lleva a cabo un estudio comparativo de señales acústicas y de vibración para la detección de severidad de fallos en engranes rectos.	Vibración Mecánica Acústica	Engranajes rectos
Llivicura H. (2019) [13]	“Señales de vibración: Evaluación de indicadores de condición extraídos del dominio de frecuencia, para el diagnóstico de fallos en cajas de engranajes rectos”	Se realiza una evaluación de indicadores de condición extraídos del dominio de la frecuencia para diagnosticar fallos en engranajes rectos.	Vibración Mecánica	Engranajes rectos
Calle A. (2020)	Plan de mantenimiento predictivo de los rodillos de las prensas uno y dos en el molino de Cartopel S.A.I.	Se levanta una base de datos, por medio de la adquisición de señales de vibración.	Vibración Mecánica	Engranajes rectos

3.2. Importancia y alcance

Los rodamientos son los elementos mecánicos más críticos en maquinaria rotativa. Más del 90 % de las máquinas emplean rodamientos [14], la presencia de fallos en su estructura a medida que estos evolucionan, pueden ocasionar la falla catastrófica de la máquina, lo que genera elevados costos por pérdidas en la producción y reparaciones.

El mantenimiento basado en la condición (MBC), permite programar la reparación de los equipos antes de que ocurra una falla catastrófica. El MBC se enfoca a los síntomas de fallo (vibración, sonido, temperatura, etc.) que se presentan una vez que la causa ya está ocasionando desgaste (falla potencial) [15].

Por esta razón, el monitoreo de la condición (MC) como herramienta para detectar fallos toma gran relevancia, ya que permite planificar acciones que admitan disminuir las pérdidas de producción, incrementar la vida útil de las máquinas, reducir los inventarios de repuestos y los paros por el uso del mantenimiento correctivo [15]. Existen diversas técnicas que han sido empleadas para la detección y diagnóstico de fallos, entre las cuales se destacan la acústica, el análisis de vibraciones y análisis de firma de la corriente del motor.

El análisis acústico y de vibraciones ayudan de manera directa a una detección temprana de fallos en maquinaria rotativa, logrando detectarlos cuando están en un nivel incipiente sin producir fallos en los elementos o equipos [9], [4]. Para lo cual se requiere conocer patrones característicos de acústica, vibración y corriente en condiciones normales y con fallos implantados en los elementos críticos de los rodamientos. Las técnicas de MC requieren de instrumentos como acelerómetro para medir vibración, tacómetro para mediciones de velocidad de rotación, sensor acústico para medir los niveles de presión acústica, entre otros distribuidos en todo el sistema mecánico [16].

Uno de los fallos eléctricos más frecuentes, son los que se presentan en el estator, estos fallos producen síntomas como desequilibrio de corrientes y tensiones, incremento de las pérdidas, disminución de la eficiencia, calentamiento excesivo, etc. Para ello existe un método para la detección de fallos en motores y máquinas eléctricas denominado análisis de firma de la corriente del motor (AFCM) [17]. El AFCM es una técnica no invasiva, porque no es necesario montar ningún sensor en la maquinaria rotativa, además, la señal de corriente puede ser medida en lugares lejanos desde el motor, siempre y cuando haya acceso al conductor, que alimenta la corriente al motor [18].

La Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca, cuenta en su laboratorio de vibraciones mecánicas con un compresor recíprocante de doble etapa modelo EBG250, instrumentado para la adquisición y análisis de señales acústicas, vibracionales y de corriente, como se presenta en la Figura 1. El equipo mencionado y el proyecto técnico permitirán aportar conocimientos del tema de MBC, apoyando al sector industrial y a los estudiantes de pregrado a desarrollarse dentro de este campo. Los trabajos desarrollados en el GIDTEC, han llevado a cabo la adquisición de máximo dos tipos de señales, con combinaciones de acústica, emisión acústica, corriente o vibración.

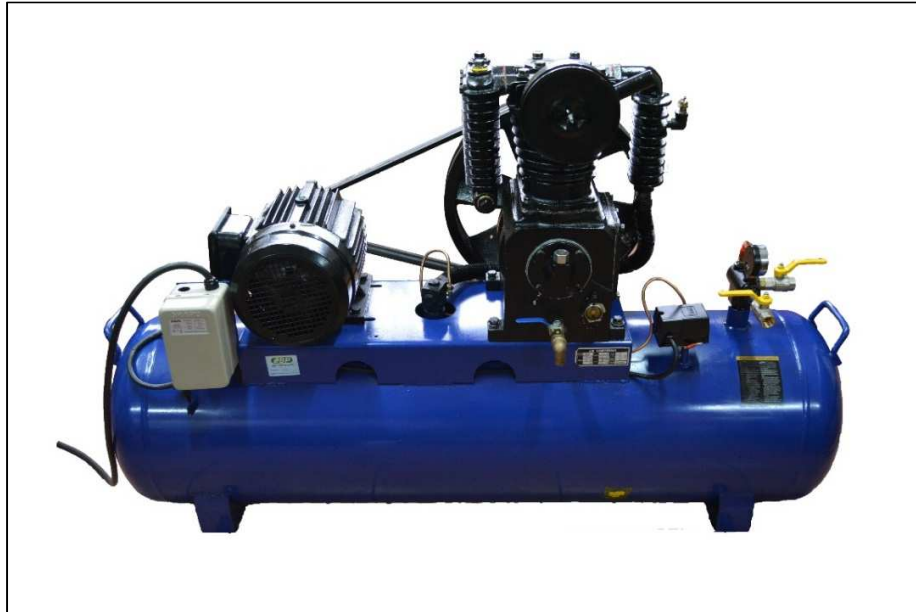


Figura 1. Compresor recíprocante de doble etapa marca BP modelo EBG250.

El presente trabajo de investigación, plantea establecer tres bases de datos para la detección de fallos en los rodamientos del compresor, que se presentan en la Figura 2, mediante la adquisición de señales acústicas, vibracionales y de corriente, que serán analizadas empleando tres técnicas de procesamiento de señales que se detallan a continuación: transformada rápida de Fourier (*FFT*), envolvente y cepstrum, para identificar la técnica y señal que manifieste el desempeño más satisfactorio para monitoreo de la condición en rodamientos.

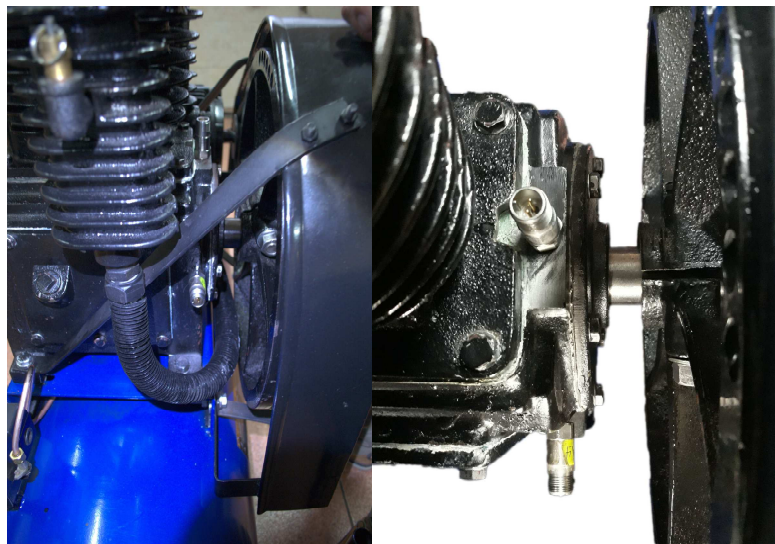


Figura 2. Vistas lateral y superior de la ubicación de los rodamientos en el compresor.

3.3. Delimitación

El Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC), quien se encargará de dicho análisis para la ejecución de futuros proyectos de investigación con miras hacia industrias que deseen implementar un mantenimiento basado en la condición. Con el empleo del banco de pruebas y la configuración del sistema planteado en este proyecto para el establecimiento de las bases de datos, se pretende, proporcionar información eficaz, confiable y estructurada que sirva en el campo de la investigación.

3.4. Problema General

¿Es posible establecer tres bases de datos para detección de fallos en rodamientos mediante señales acústicas, vibracionales y de corriente?

3.5. Problemas Específicos

¿Es posible caracterizar las técnicas de monitoreo de la condición y los fallos más frecuentes en rodamientos?

¿Es posible adquirir datos de señales acústicas, vibracionales y de corriente en condiciones normales y con fallos implantados en los elementos críticos de los rodamientos?

¿Es posible comparar las señales acústicas, vibracionales y de corriente para la detección de fallos en los rodamientos?

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Establecer tres bases de datos para la detección de fallos en rodamientos mediante señales acústicas, vibracionales y de corriente.

4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las técnicas de monitoreo de la condición y los fallos más frecuentes en rodamientos.

- Adquirir señales acústicas, vibracionales y de corriente en condiciones normales y con fallos implantados en los elementos críticos de los rodamientos.
- Comparar las señales acústicas, vibracionales y de corriente empleando las técnicas *FFT*, envolvente y cepstrum.

5. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

5.1. Mantenimiento Industrial

El mantenimiento industrial está definido como el conjunto de actividades encaminadas a garantizar el correcto funcionamiento de las máquinas e instalaciones que conforman un proceso de producción permitiendo que éste alcance su máximo rendimiento [19].

La finalidad del mantenimiento es brindar la máxima capacidad de producción a la planta, aplicando técnicas que brindan un control eficiente del equipo e instalaciones. Por lo tanto, el mantenimiento incide en la calidad y cantidad de la producción [20].

5.2. Tipos de Mantenimiento

Para el conjunto de acciones dedicadas a mantener o restablecer un bien en un estado determinado de calidad de servicio, se especifica tres tipos de mantenimiento: preventivo, correctivo y predictivo [21].

La Norma Europea EN 13306: 2007 (Maintenance – Maintenance terminology), ofrece un “cuadro terminológico estandarizado de mantenimiento” con intención de llegar a un lenguaje común en el tema, elaborado por el Comité Europeo de Normalización en Mantenimiento (CEN/TC 319 Maintenance). Esta norma sirve de referencia para órganos de normalización, empresas y asociaciones de mantenimiento en países fuera de la Unión Europea. En la

Figura 3 se presenta los tipos de mantenimiento según la norma Europea EN 13306 [22].

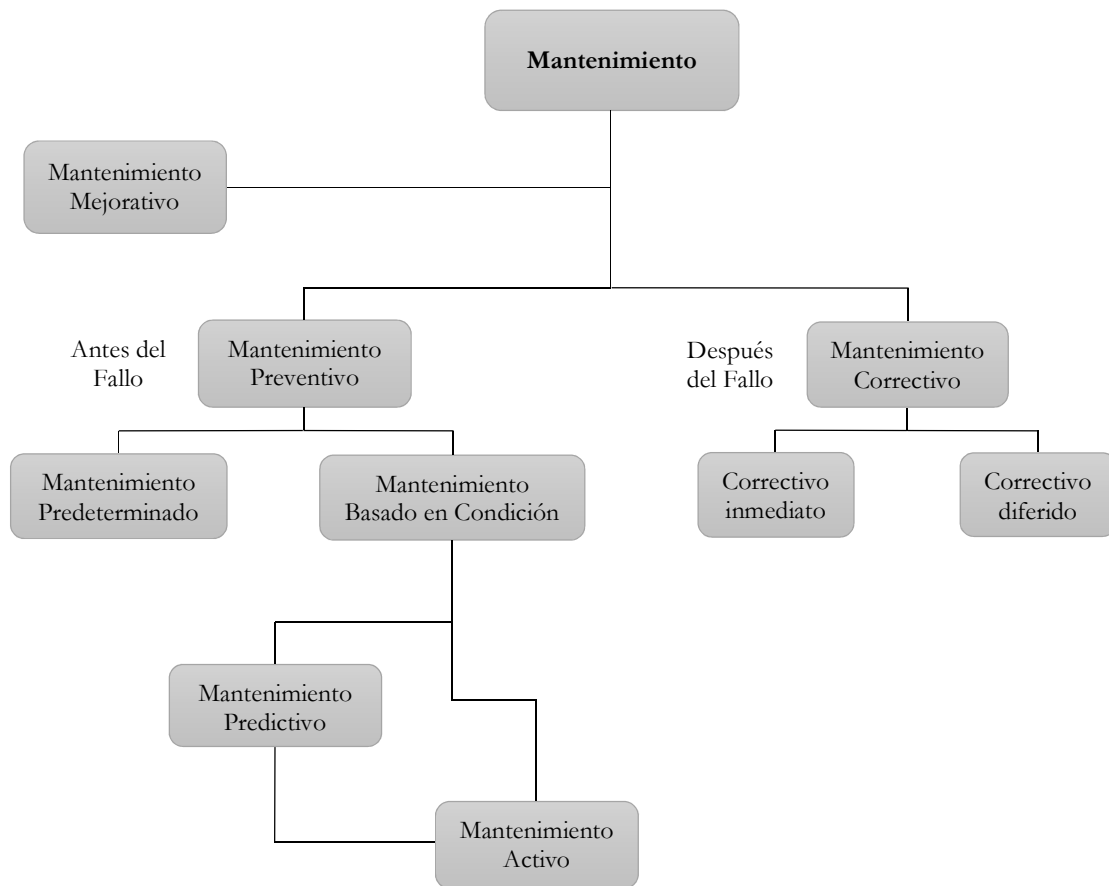


Figura 3. Tipos de mantenimiento según la norma Europea EN 13306: 2017 [22].

5.2.1. Mantenimiento Correctivo

También llamado mantenimiento “a rotura” (*breakdown maintenance*), sólo se interviene en los equipos cuando el fallo se ha producido [23]. El mantenimiento correctivo se centra en la identificación de las fallas causadas por el fenómeno de la falla. El fenómeno de la falla contiene uno o más síntomas de fallo [24]. Este tipo de mantenimiento se clasifica en [20]:

Inmediato: Es el mantenimiento de emergencia. Debe efectuarse con urgencia, ya sea por una avería imprevista a reparar de manera inmediata o por una condición imperativa a satisfacer (problemas de seguridad, contaminación, aplicación de normas legales, etc.)

Diferido: Se conoce con antelación lo que debe hacerse, de modo que cuando se pare el equipo para realizar la reparación, se disponga del personal, repuesto y documentos técnicos necesarios para proceder correctamente.

5.2.2. Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento preventivo (MP) es aquel que se realiza mediante una programación previa de actividades, con el fin de evitar en lo posible la mayor cantidad de daños imprevistos, disminuir los tiempos muertos de producción por fallas y por ende disminuir los costos de la misma [25]. El MP se compone de una serie de inspecciones periódicas de los equipos, haciendo tareas de limpieza, lubricación, ajuste, comprobación y reemplazo de componentes con fallo, con el objetivo de mantener el equipo funcionando siempre en un estado óptimo [24].

El éxito de este tipo de mantenimiento depende de la correcta elección del período de inspección. Un período demasiado largo conlleva el peligro de la aparición de fallos entre dos inspecciones consecutivas, mientras que un período demasiado corto puede elevar el costo considerablemente del proceso productivo [23].

El mantenimiento preventivo se subdivide en dos tipos: mantenimiento basado en la condición y mantenimiento predeterminado (preventivo sistemático) [21].

5.2.3. Mantenimiento Predeterminado

El mantenimiento predeterminado es aquel mantenimiento preventivo efectuado de acuerdo con un plan establecido, según el tiempo o el número de unidades fabricadas [21].

5.2.4. Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo, parte del conocimiento del estado de la maquinaria. De esta manera es posible, por un lado, reemplazar los elementos cuando realmente no se encuentren en buenas condiciones operativas, eliminando las paradas por inspección innecesarias, por otro lado, evitar las averías imprevistas, mediante la detección de cualquier fallo funcional y el seguimiento de su posible evolución [23]. Para este mantenimiento es necesario identificar las variables físicas (vibración, presión, temperatura, etc.), cuyas variaciones están apareciendo y pueden causar daño a la máquina. Este mantenimiento requiere de equipos sofisticados [20].

5.2.5. Mantenimiento Activo

El mantenimiento activo es aquel que se realiza como resultado de los diagnósticos o el monitoreo de la condición del activo. Puede ser mantenimiento activo preventivo o

mantenimiento activo correctivo, de acuerdo a el tipo de orden de trabajo que el resultado de la evaluación por la condición del activo indique se necesita realizar [22].

5.2.6. Mantenimiento Mejorativo

El mantenimiento mejorativo, considera cambios en características intrínsecas del diseño, pero no cambia las funciones del activo. Mejora y modificación son términos que no deben utilizarse como sinónimos, ya que se trata de conceptos diferentes en alcance y sentido [22].

5.3. Mantenimiento Basado en la Condición

El Mantenimiento Basado en la Condición (MBC), puede definirse como un conjunto de procesos y capacidades de mantenimiento derivados de la evaluación en tiempo real de la condición de la maquinaria, obtenidos a partir de sensores incorporados y/o de pruebas y mediciones externas con equipo portátil [26].

El objetivo principal del MBC es adquirir y analizar datos en tiempo real recopilados sobre la degradación de la máquina dentro del entorno operativo, todo esto en un procedimiento central que detecta variaciones en los parámetros funcionales y predice el riesgo de fallos que pueden conducir potencialmente a averías [27], [28].

El MBC consiste en monitorear la condición de la maquinaria rotativa en un intento de detectar problemas incipientes y prevenir fallos catastróficos. La premisa común del MBC es que el monitoreo regular del estado mecánico real, la eficiencia operativa y otros indicadores del estado de funcionamiento de la maquinaria, proporcione los datos necesarios para garantizar el máximo intervalo entre reparaciones, de este modo, reducir al mínimo el número y el costo de las interrupciones no programadas creadas por fallos en la maquinaria [29].

Algunos autores han intentado explicar el MBC con la curva P-F, representada en la Figura 4; en la que simboliza cómo la variable medida va evidenciando un determinado nivel de desgaste de la máquina a partir del punto P, para que antes de que ésta falle (punto F), se produzca la intervención [21].

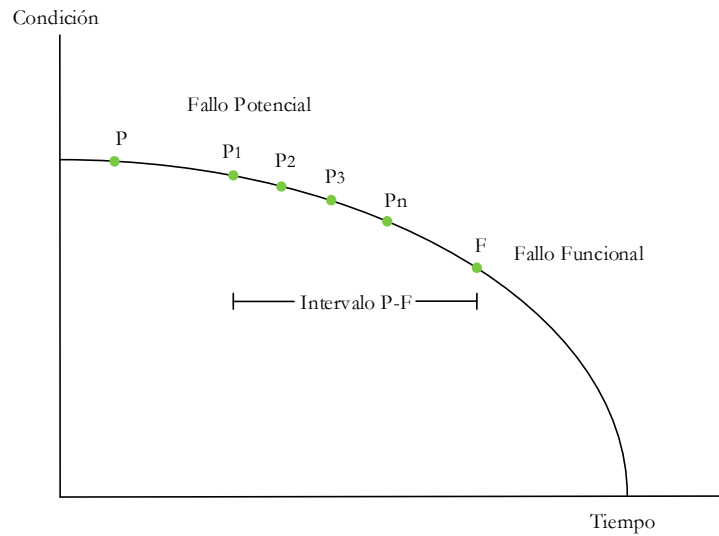


Figura 4. Comportamiento de la falla en el equipo [26].

Un fallo potencial es un estado físico identificable que indica que está a punto de producirse un fallo funcional o probablemente esté ocurriendo el fallo. El intervalo P-F es el tiempo transcurrido entre un fallo potencial y su desgaste hasta que se convierta en un fallo funcional [21].

La Figura 5, presenta las tres etapas del programa de mantenimiento basado en la condición [30].

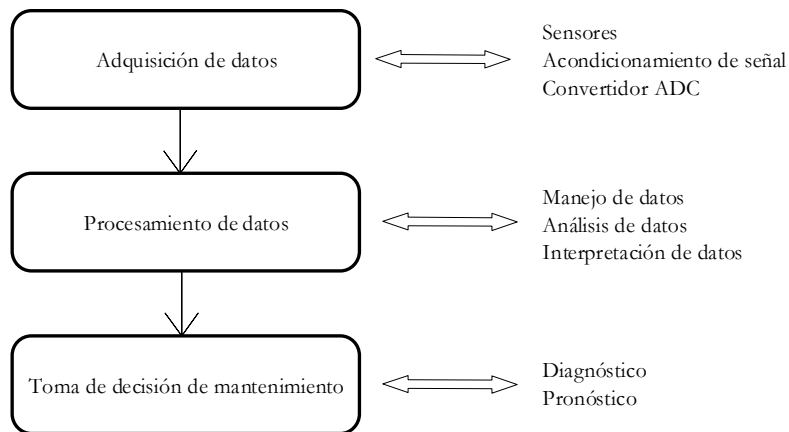


Figura 5. Tres pasos en la estrategia de mantenimiento basado en la condición [30].

En la Tabla 2, se exponen algunas de las principales técnicas que se utilizan en el mantenimiento basado en la condición [21].

Tabla 2. Técnicas del MBC, variables identificativas y equipos o instalaciones de aplicación [21], [31].

Variable identificadora a medida	Técnicas de diagnosis	Tipo de instalación o equipo
Vibraciones	Análisis de vibraciones Impulsos de choque Analizador de frecuencias	Maquinaria rotativa
Corriente	Análisis espectral de corriente eléctrica	Motores eléctricos
Viscosidad, partículas y degradación de lubricantes	Análisis de aceites	Reductores, cajas de cambio, motores térmicos, compresores
Temperatura	Termografía Pintura térmica Adhesivos de bandas	Sistemas estáticos, térmicos, eléctricos y electrónicos
Valor óhmico y capacidad	Medida de resistencia, ondas de choque, corrientes de absorción, conducción	Motores eléctricos
Grietas	Fluido magnético Resistencia eléctrica Corrientes inducidas Ondas ultrasónicas Ondas de radiación	Estructuras metálicas y equipos estáticos
Ruidos	Medición de acústica Medición de emisión acústica	Maquinaria rotativa
Corrosión	Sonido ambiental (ultrasonido) Detector de gas	Depósitos, tuberías, calderas, etc.

5.4. Monitoreo de la Condición

El monitoreo de la condición (MC), se define como la actividad realizada para determinar el estado operacional y la salud de una máquina con el propósito de detectar posibles fallos potenciales antes de que se conviertan en fallos funcionales [32]. El proceso de MC consiste en la recopilación periódica o continua de datos, el análisis de datos, la interpretación y el diagnóstico [32].

Una de las ventajas del MC permite prevenir fallos catastróficos e inesperados de la maquinaria, que pueden resultar muy costosos e inseguros [33].

Típicamente, el monitoreo periódico se realiza a ciertos intervalos, como cada hora o al final de cada turno de trabajo, con la ayuda de indicadores portátiles como instrumentos de medición de mano, unidades de emisión acústica y/o sensores de vibración [34].

5.4.1. Monitoreo de señales acústicas

Las señales acústicas son un conjunto de vibraciones que se propagan por un medio elástico como el aire y son audibles para el ser humano, pueden ser causadas por alteraciones mecánicas producidas en elementos específicos de una máquina y es posible usar para detectar y monitorear la aparición de fallos [35]. El monitoreo de señales acústicas, aporta información para el procesamiento de señales de elementos mecánicos específicos; es decir, desempeña un rol importante en la detección de fallos de los componentes críticos principalmente en máquinas rotativas [36]. A medida que los fallos comienzan a desarrollarse, los espectros de frecuencia cambian. Esta es la razón esencial para utilizar la medición y el análisis acústico como parte del monitoreo de la condición. En algunos casos, la señal que se va a monitorear está sumergida dentro de alguna otra señal y no puede ser reconocida por un análisis espectral. Para esta situación, hay que utilizar técnicas específicas de procesamiento de señales [30].

5.4.2. Monitoreo de vibraciones

Las mediciones de la vibración se utilizan ampliamente en la industria para monitorear el estado de diversas máquinas y sus componentes. Es una técnica muy eficaz para detectar y diagnosticar fallos en la maquinaria [33]. Las condiciones que pueden provocar las vibraciones incluyen desequilibrio, desalineación, desprendimiento de piezas, desmoronamiento en los rodamientos y fallos en los engranes [30].

La vibración puede ser medida usando sensores, tales como acelerómetros y transductores de velocidad. Para llevar a cabo mediciones precisas se debe montar los sensores firmemente en la máquina [37].

Una de las desventajas del monitoreo de vibraciones es que presenta una baja eficiencia para detección de fallos en etapa inicial, debido a variaciones en las condiciones de operación de la maquinaria como la velocidad o carga, ruido generado por fuentes cercanas y dificultades para el emplazamiento de sensores a causa de ambientes industriales agresivos donde puede afectar la sensibilidad de los mismos [38].

5.4.3. Monitoreo de la corriente eléctrica del motor

El diagnóstico de los motores eléctricos es ampliamente analizado en varios artículos científicos [39]. Para detectar fallos en el motor se debe emplear una técnica para medir la corriente del motor. Las corrientes del motor pueden medirse y analizarse para extraer información sobre su condición, mediante el denominado análisis de firma de corriente del motor (AFCM) [38].

El AFCM consiste en realizar un análisis frecuencial de las corrientes del motor. Los fallos que presenta un motor modifican el campo magnético del mismo, al producirse una variación en el campo, las corrientes también se verán afectadas [17].

Diferentes métodos de medición de corrientes se pueden utilizar para obtener una señal equivalente a esta corriente que circula por el estator del motor, técnicas basadas en resistencia Shunt, sensores de efecto Hall, transformadores de corrientes y también bobinas Rogowski [40].

El monitoreo de la corriente puede proporcionar un patrón único para la detección eficaz de fallos [41], es decir, fallos mecánicos (desequilibrio mecánico, fallos de los rodamientos, desalineación de los ejes, deformación de la cámara de aire) y los fallos eléctricos (fallos del rotor y del estator) de los motores [39].

La técnica AFCM tiene la ventaja de ser no invasiva y fácil de implementar, proporcionando buenos resultados en la detección de fallos [42]; sin embargo, bajo ciertas condiciones su aplicación no es lo suficientemente sensible porque tiene una baja relación señal-ruido, lo que es más evidente en los motores alimentados por inversores [43].

5.5. Técnicas de monitoreo de la condición

Las técnicas típicas de MC incluyen análisis de vibración, análisis de aceite, análisis acústico, análisis ultrasónico, análisis termográfico y análisis de firma de la corriente del motor [32]. En el presente proyecto técnico se trabaja con las técnicas de monitoreo acústico, vibración y firma de la corriente.

5.5.1. Análisis acústico

5.5.1.1. Acústica

La acústica es el campo científico que estudia el sonido [44], especialmente los fenómenos de generación, propagación y recepción de las ondas sonoras en numerosos medios, así como su transducción, su percepción y sus variadas aplicaciones tecnológicas. Las ondas sonoras se originan en la interacción entre la elasticidad (compresibilidad) y la inercia (segunda ley de Newton) de un medio como el aire [45].

5.5.1.2. Sonido

El sonido es un fenómeno físico que consiste en una pequeña alteración de la presión atmosférica originada por la oscilación de partículas en el aire u otro medio elástico, se define también al sonido como aquella excitación del mecanismo auditivo que puede producir la percepción del sonido (sensación auditiva) [46], [47].

El sonido con frecuencias por debajo de los 20 Hz, se llama infrasonido. El infrasonido puede ser percibido, ya que es demasiado bajo para ser escuchado por los seres humanos. El rango audible se define por las frecuencias entre 20 Hz y 20 KHz. Las frecuencias superiores a 20 KHz se denominan ultrasonidos [44]. Las principales aplicaciones de los ultrasonidos son: en medicina y ensayos no destructivos. En la Figura 6, se presenta el rango de frecuencias del sonido.

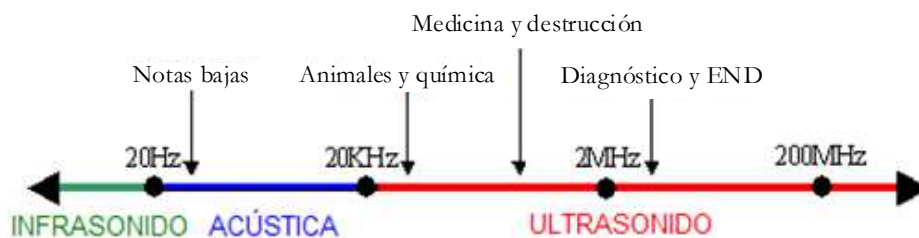


Figura 6. Rango de frecuencias del sonido [48].

5.5.1.2.1. Percepción del sonido

En este proceso ocurren pequeñas variaciones de la presión en el aire a las que se denominan presión sonora y se combinan con la presión estática. Dependiente del tiempo y del espacio, la presión sonora, es la magnitud acústica más importante [48].

El evento sonoro captado en un punto del espacio posee dos características: volumen que se relaciona con la magnitud física presión sonora y el tono con la frecuencia [48].

5.5.1.3. Ondas sonoras

Las ondas sonoras son un tipo particular de ondas elásticas. Las ondas elásticas son las que se pueden producir y propagar en un medio (sólido, líquido, gaseoso) que presente la propiedad de poseer elasticidad y masa [49].

En el ejemplo de la Figura 7, se presenta el movimiento de un pistón que produce una onda de presión que se propaga alejándose: en el estado inicial (a), las partículas de aire se encuentran en equilibrio, en (b), el pistón empuja el aire circundante, perturbando el equilibrio, las fuerzas elásticas tenderán a retornarla a la posición original, debido a la inercia, no es posible mover precipitadamente toda la columna de aire, por lo cual el aire próximo al émbolo se comprime. El resultado ilustrado en (c), es que la perturbación se propaga a través de las oscilaciones de partículas elásticas próximas (como un efecto dominó), este proceso se repite, como se indica en (d) y (e). La perturbación se aleja de la fuente [45], [49].

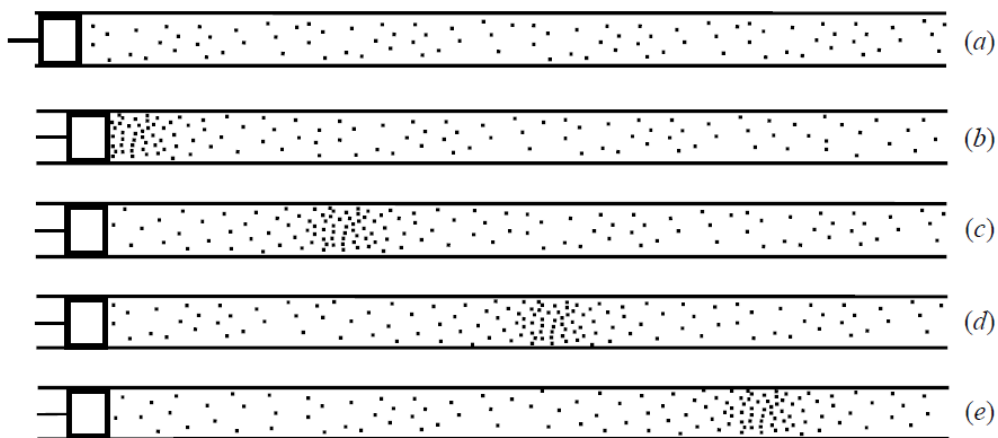


Figura 7. Ejemplo de generación de ondas longitudinales: sistema cilindro-émbolo en la compresión de aire [45].

Existen dos tipos básicos de ondas elásticas dependiendo cómo se desplacen las partículas por el medio [49]:

Ondas Longitudinales: el desplazamiento de las partículas es paralelo a la dirección de propagación.

Ondas Transversales: el desplazamiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación.

5.5.1.3.1. Características de las ondas sonoras

5.5.1.3.1.1. Velocidad de propagación

El sonido viaja por el aire aproximadamente a 340 m/s. La cercanía de las partículas de ese medio, que transportan la onda al chocar unas con otras, facilita la propagación. Por lo tanto, en un medio de propagación más denso y menos elástico que el aire, por ejemplo, el acero, la velocidad de propagación será más alta [46]. En la Tabla 3, se muestra la velocidad del sonido para distintos materiales.

Tabla 3. Velocidad del sonido en algunos materiales [46].

Material	Velocidad del sonido (m/s)
Aire	340
Acero	6100
Madera	5260
Ladrillo	3650

El sonido más simple: un tono puro, produce una onda sinusoidal en la que podemos diferenciar algunas variables del sonido [46], como se observa en la Figura 8.

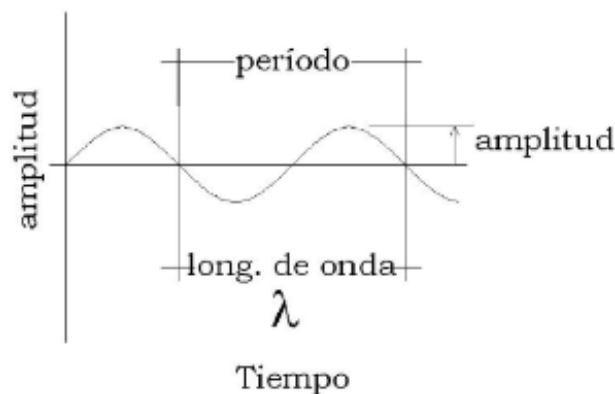


Figura 8. Características de una onda sinusoidal [46].

5.5.1.3.1.2. Longitud de onda (λ)

Es la longitud de un ciclo completo de la onda, comprendido por un valle y una cresta [46]. La velocidad de propagación V es la distancia recorrida por la onda en una unidad de tiempo. Si se considera un ciclo completo, el tiempo será T y la distancia recorrida λ [50], como se representa en la Ecuación 1.

$$V = \frac{\lambda}{T} \quad (1)$$

5.5.1.3.1.3. *Período (T)*

Es la duración en segundos de un ciclo completo de la onda [46]. El período depende de las características iniciales de la perturbación [50].

5.5.1.3.1.4. *Frecuencia (F)*

El número de ciclos de vibración que se producen durante un tiempo determinado se denomina frecuencia [44]. Su unidad está expresada en Hertzios [Hz] (ciclos por segundo) [46]. La frecuencia es representada en la Ecuación 2.

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

La relación entre la longitud de onda (λ), la velocidad del sonido (c) y la frecuencia (f) está dada por la Ecuación 3:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3)$$

5.5.1.3.2. **La ecuación de onda acústica unidimensional**

Se considera un tubo cilíndrico de sección transversal A y extensión infinita, como el ilustrado en la Figura 9, 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_0 . 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 del 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 denomina presión sonora al incremento de presión $p(x,t)$ [45].

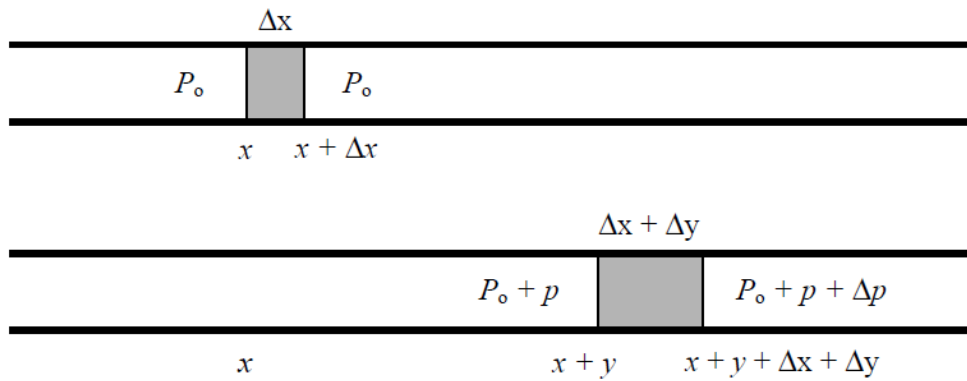


Figura 9. Tubo de sección constante en dos instantes de tiempo diferentes [45].

La Ecuación 4 es conocida como la ecuación de onda unidimensional:

$$p_{tt} = c^2 p_{xx} \quad (4)$$

Donde:

c es la velocidad del sonido.

Es posible demostrar que la solución general de la Ecuación 4, está dada por la Ecuación 5:

$$p(x, t) = f(x - c * t) + g(x + c * t) \quad (5)$$

Donde f y g son dos funciones arbitrarias de una variable derivables dos veces. Cada término de esta ecuación puede interpretarse de un modo sencillo. Por ejemplo, si en el término $f(x - c * t)$ tomamos $t = 0$, se tiene la distribución inicial de presión, como se ilustra en la parte superior de la Figura 10. Luego de un tiempo $t > 0$ la nueva distribución de presión es la que se indica en la parte inferior. Se observa que cualquier rasgo característico (por ejemplo, un pico) de la presión se ha desplazado una distancia $c * t$ hacia la derecha. Es por este motivo que c se interpreta como la velocidad del sonido. Es importante distinguir, lo que se propaga es la distribución de presión, no la materia. Cuando uno de los dos términos f o g es 0 se tiene una onda unidireccional o progresiva [45].

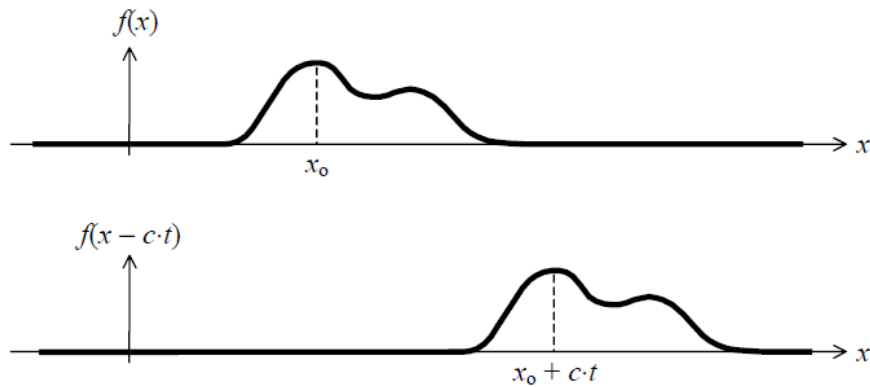


Figura 10. Propagación de una onda a lo largo del tubo [45].

5.5.1.3.3. Solución de la ecuación de onda

El tubo de la Figura 9 es infinitamente largo, situación que en la práctica no es posible. La longitud finita impone a la presión sonora condiciones de contorno o condiciones de borde.

Las condiciones de contorno aplicadas en el caso de un tubo acotado pueden interpretarse como condiciones impuestas a los puntos $x = 0$ y $x = L$ de un tubo infinito, del cual solo interesa lo que sucede en el intervalo $0 \leq x \leq L$ [45]. Para estas condiciones de contorno, la presión sonora viene dada por la Ecuación 6:

$$p(x, t) = P \operatorname{sen}\left(\frac{k\pi}{L}x\right) \operatorname{sen}\left(\frac{k\pi c}{L}t + \varphi_0\right) \quad (6)$$

Para cada número natural k existe una solución cuya forma es senoidal en el espacio y en su evolución temporal, como se presenta en la Figura 11. A la izquierda, gráficas de las distribuciones para varios instantes. A la derecha, las moléculas de aire para la máxima amplitud de la presión [45].

Las únicas soluciones estacionarias posibles son de esta forma. Todas son armónicos de una frecuencia fundamental dada por la Ecuación 7:

$$f_1 = \frac{c}{2L} \quad (7)$$

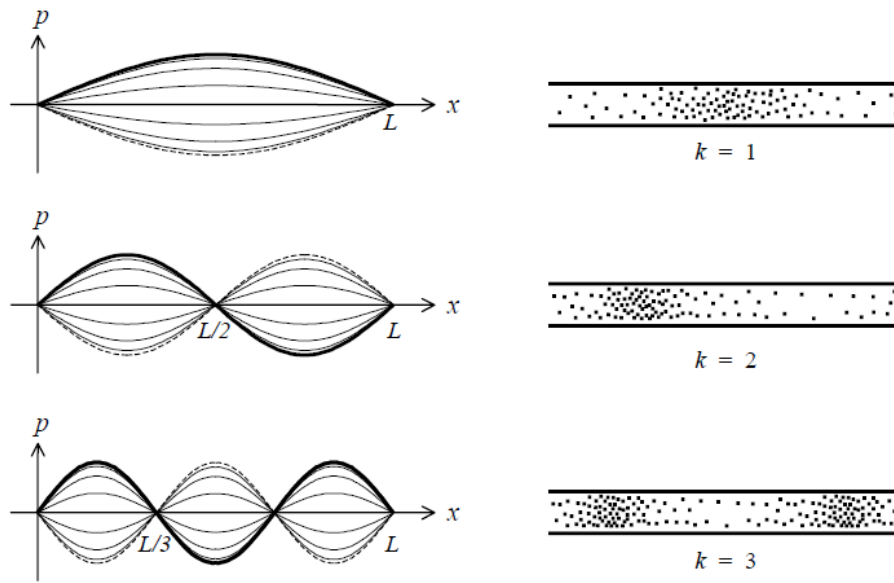


Figura 11. Distribución espacial de la presión sonora en un tubo abierto para tres soluciones estacionarias ($k = 1, 2$ y 3) [45].

Como segundo ejemplo se establece un tubo de longitud L cerrado en $x = 0$ y abierto en $x = L$.

La presión sonora para este caso se presenta en la Ecuación 8:

$$p(x, t) = P \cos\left((2k - 1)\frac{\pi}{2L}x\right) \text{sen}\left((2k - 1)\frac{\pi}{2L}t + \varphi_0\right) \quad (8)$$

Para cada número natural k existe una solución cuya forma es cosenoidal en el espacio y senoidal (desfasada) en su evolución temporal [45], como se observa en la Figura 12. Para este caso, la frecuencia fundamental está dada por la Ecuación 9:

$$f_1 = \frac{c}{4L} \quad (9)$$

Sólo aparecen armónicos impares $2k - 1$, que constituyen una base de soluciones que permite, por desarrollo en serie, expresar la solución general [45].

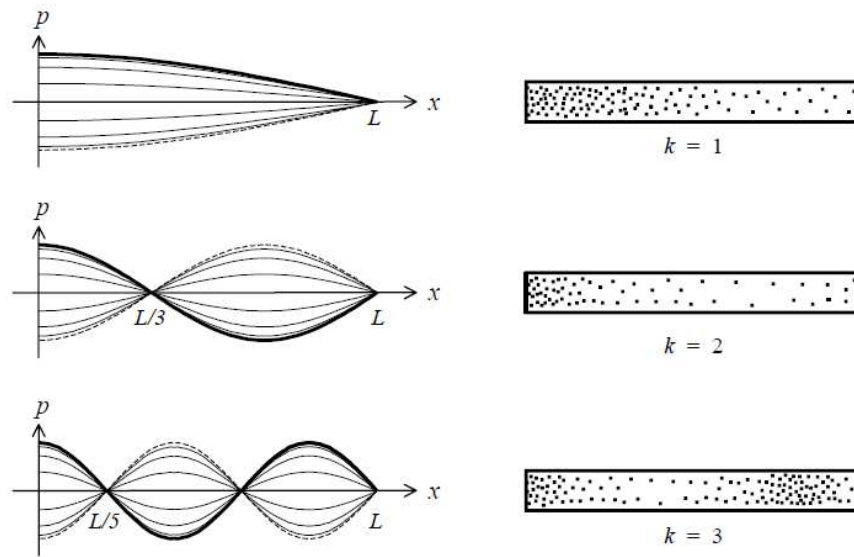


Figura 12. Distribución espacial de la presión sonora en un tubo semiabierto para tres soluciones estacionarias ($k = 1, 2$ y 3) [45].

5.5.1.4. Características del sonido

5.5.1.4.1. Presión acústica

La presión sonora, se entiende como la diferencia entre la presión instantánea debida al sonido y la presión atmosférica (sus valores son menores, niveles en torno a los 20Pa). La presión sonora a diferencia de la atmosférica varía con rapidez de valores positivos a negativos y es lo que se conoce como su frecuencia (Hz) [51].

Esta es una medida básica de cuanta energía acústica puede producir una fuente sonora con independencia del contorno. Cuando se mide el nivel de presión acústica, éste no solo dependerá de la potencia y la distancia radiada respecto de la fuente, también dependerá de la cantidad de energía absorbida y de la cantidad de energía transmitida [50].

5.5.1.4.1.1. Nivel de presión acústica

La diferencia entre sonidos intensos y débiles es grande, para ello se emplea una escala logarítmica que permite comprimir estos datos [51]. El nivel de presión acústica (L_p) se calcula mediante la Ecuación 10:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) \quad (10)$$

Donde:

L_p es el nivel de presión acústica, en dB;

P_{ref} es la presión de referencia (es decir, 20 Pa);

P es la presión acústica.

El nivel de presión acústica de los sonidos audibles varía entre 0 dB y 120 dB. Los sonidos de más de 120 dB pueden causar daños auditivos inmediatos e irreversibles en la mayoría de personas [51].

5.5.1.4.2. Potencia acústica

La potencia acústica es la cantidad de energía radiada por una fuente determinada, es un valor intrínseco de la fuente y no depende del lugar donde se encuentre [50].

El nivel de potencia acústica se enuncia mediante la Ecuación 11, la cual se evalúa respecto a una referencia de $1 * 10^{-12} W$.

$$L_W = 10 \log \left(\frac{W}{W_o} \right) \quad (11)$$

Donde:

L_W nivel de potencia acústica, en dB;

W potencia acústica, en W;

W_o potencia acústica de referencia.

5.5.1.4.3. Intensidad

La intensidad acústica se define como la cantidad de energía sonora transmitida en una dirección determinada por unidad de área. Para la medición de intensidades se emplea analizadores de doble canal con posibilidad de espectro cruzado y una sonda que consiste en dos micrófonos separados a corta distancia, permite determinar la cantidad de energía sonora que radia una fuente dentro de un ambiente ruidoso [50].

La Ecuación 12 expresa el nivel de intensidad acústica y el umbral auditivo referido a dicha intensidad:

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_o} \right) \quad (12)$$

Donde:

L_I nivel de intensidad acústica, en dB;

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

I_0 umbral de audición ($10^{-12} W/m^2$)

5.5.1.4.4. 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 [52]. Una clasificación de tonos de acuerdo al rango de frecuencias se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4. Clasificación de tonos de acuerdo con el rango de frecuencias de ondas sonoras [52].

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

5.5.1.5. Ruido

Un ruido es la sensación auditiva no deseada correspondiente a una variación aleatoria de la presión a lo largo del tiempo. Es un sonido complejo y puede ser caracterizado por la frecuencia de los sonidos puros que lo componen y por la amplitud de la presión acústica correspondiente a cada una de esas frecuencias. Si estas últimas son muy numerosas, se caracteriza entonces el ruido por la repartición de energía sonora en bandas de frecuencias contiguas, definiendo lo que se denomina espectro frecuencial del ruido [50].

5.5.1.5.1. Tipos de ruido

5.5.1.5.1.1. Según intensidad y evolución temporal

Los tipos de ruido según su intensidad y evolución temporal se clasifican en [53]:

- **Ruido continuo o constante:** es aquel ruido cuya intensidad permanece constante o presenta pequeñas fluctuaciones (menores a ± 5 dB) a lo largo del tiempo. Por ejemplo, el producido por máquinas o motores que trabajan de forma continua.

- **Ruido fluctuante:** es aquel ruido cuya intensidad fluctúa a lo largo del tiempo en intervalos mayores a ± 5 dB. Las fluctuaciones pueden ser periódicas o aleatorias. Ejemplo: ruido del tráfico.
- **Ruido transitorio:** tiene comienzo y final en un corto intervalo de tiempo, como sucede con el paso de un vehículo.
- **Ruido de impacto:** es aquel cuya intensidad aumenta bruscamente durante un impulso. La duración de este impulso es breve. Ejemplo: un disparo o golpe de martillo.

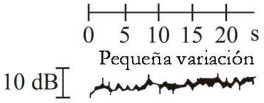
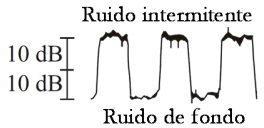
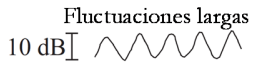
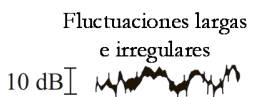
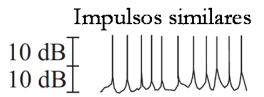
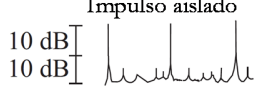
5.5.1.5.1.2. Según composición en frecuencias

Los tipos de ruido según composición en frecuencias se clasifican en [53]:

- **Ruido blanco:** consiste en una señal de banda ancha que contiene todas las frecuencias del espectro con distribución aleatoria de amplitud que da una densidad espectral independiente de la frecuencia. En la práctica, su rango está comprendido desde los 20 Hz a los 20 KHz. El sonido producido por el agua de corriente, la imagen de un televisor analógico cuando no está sintonizado ningún canal, se ajusta bastante al ruido blanco. El ruido blanco de baja intensidad puede favorecer la relajación y el sueño.
- **Ruido rosa:** es un ruido con una distribución de frecuencias tal que su densidad espectral de potencia es proporcional a la inversa de la frecuencia. El espectro del ruido rosa es semejante al espectro medio acumulado de la música sinfónica o de instrumentos armónicos como el piano o el órgano.
- **Ruido marrón:** su densidad espectral de energía es proporcional a $1/v^2$, por tanto, tiene más energía a bajas frecuencias que el ruido rosa.

La instrumentación y mediciones para diversas fuentes de ruido se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5. Tipos de ruido y su medición [8], [54].

	Características	Tipo de fuente	Tipo de medida	Tipo de instrumentación
 <p>Pequeña variación</p>	Ruido constante y continuo	Bombas, motores eléctricos, cajas de engranes, transportadores	Lectura directa del valor ponderado A	Sonómetro
 <p>Ruido intermitente</p> <p>Ruido de fondo</p>	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
 <p>Fluctuaciones largas</p>	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
 <p>Fluctuaciones largas e irregulares</p>	Ruido fluctuante y 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
 <p>Impulsos similares</p>	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"
 <p>Impulso aislado</p>	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"

5.5.1.6. Adquisición de señales acústicas

Por señales acústicas se entiende también a las vibraciones en estructuras, las ondas de tensión internas y las interacciones entre estructuras y fluidos que implican radiación acústica. Existe variedad de sensores acústicos que originan fluctuaciones alternas de voltaje que luego se muestrean a intervalos regulares de tiempo para su análisis en los dominios temporal, espacial o de frecuencia [55].

La parte más fundamental de la adquisición de datos puede considerarse como la calibración objetiva de la señal y la caracterización de la relación señal-ruido (*SNR*, del inglés *signal to noise ratio*). La calibración para los sistemas multicanal implica no sólo la amplitud de la señal, sino también la fase relativa y el retardo temporal entre canales, así como la fuga de la señal, o la diafonía entre canales [55].

El hardware para adquisición de datos consta de una serie de componentes electrónicos que recopilan, acondicionan, convierten y transmiten señales del sensor al computador. En la Figura 13, se presenta un esquema general de los módulos que se emplean en el proceso de adquisición de señales acústicas, donde se ilustra que los transductores encargados de captar las señales (1), 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 sensor pasan a ser multiplexadas (3), esto significa que las señales se van a manejar en un canal separado dentro del módulo. Al mismo tiempo, 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 son 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 el software de adquisición y análisis para que puedan ser almacenadas y presentadas al usuario [4], [6], [8].

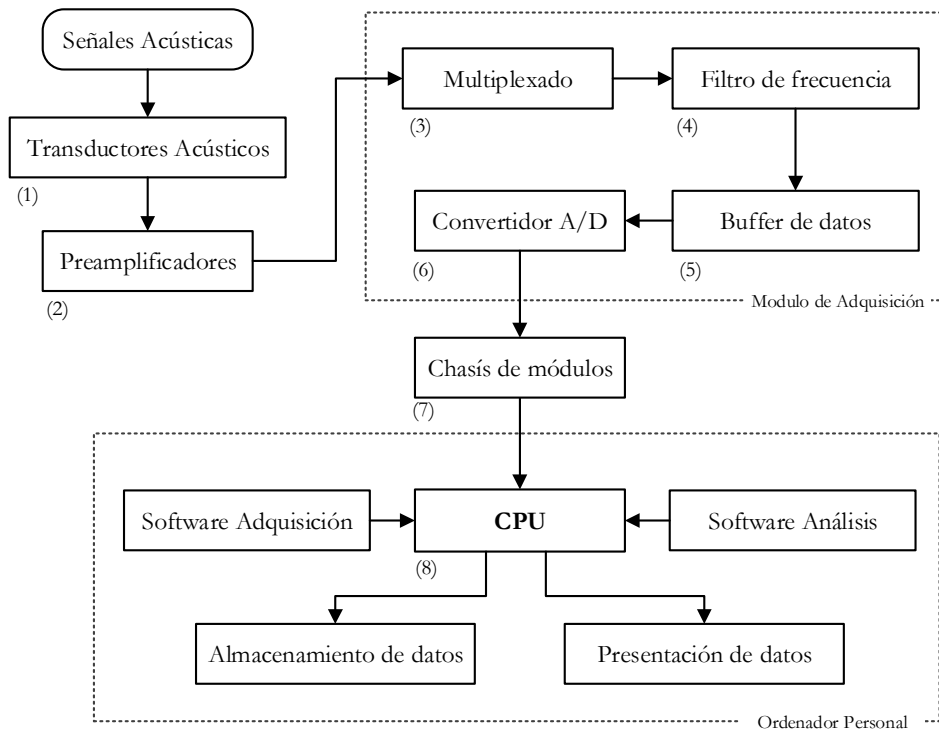


Figura 13. Esquema general de los módulos usados habitualmente en la adquisición de señales acústicas [8].

5.5.1.6.1. Instrumentación acústica

El conocimiento de la instrumentación acústica, permite su adecuada elección para cada caso determinado, ya sea una medida en laboratorio o de campo [56]. Para realizar las mediciones acústicas es necesario contar con instrumentos conocidos como transductores, que son dispositivos electrónicos que captan la energía acústica (vibraciones sonoras) y la convierten en energía eléctrica (variaciones de voltaje) o viceversa. En gran parte de la instrumentación moderna se emplea micrófonos, por este motivo, es importante conocer los criterios de clasificación, así como las características más significativas de estos dispositivos, que se presentan en la Figura 14.

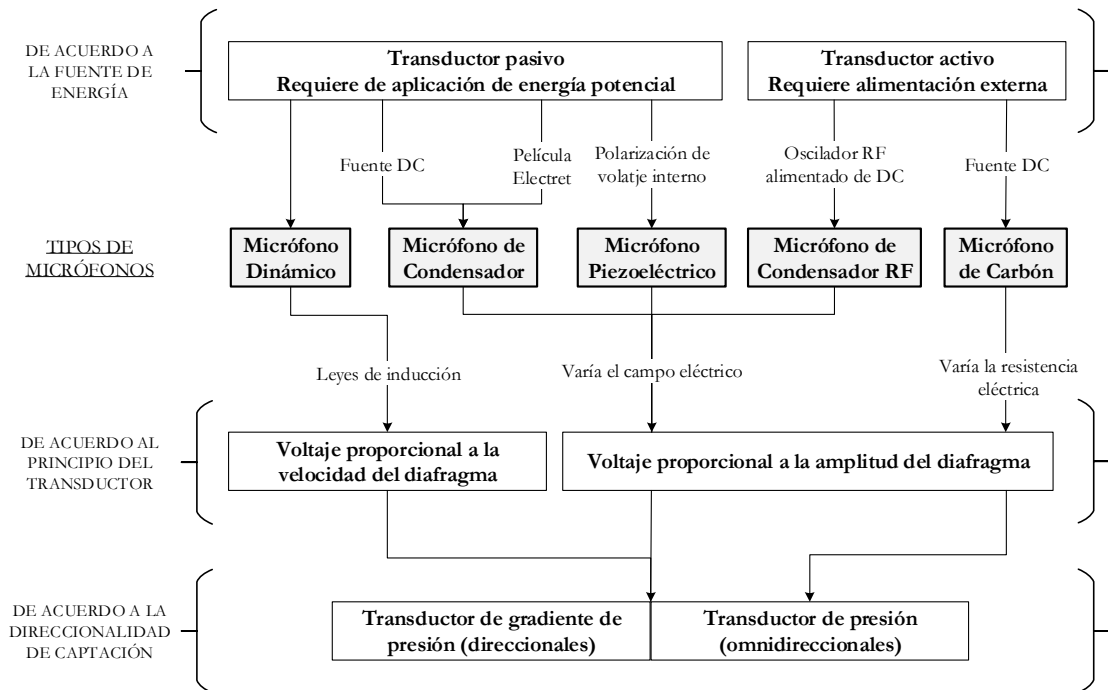


Figura 14. Tipos de micrófonos según sus criterios de clasificación más importantes [8].

5.5.1.6.1.1. *Micrófono dinámico*

Este micrófono es un transductor pasivo, convierte la energía acústica directamente en energía eléctrica sin necesidad de una fuente de alimentación externa. Está conformado por una bobina que está montada en un pequeño diafragma, moviéndose en un campo magnético permanente, por lo tanto, se rige a las leyes de inducción. Las ondas acústicas que golpean la superficie del diafragma provocan que la bobina se desplace en el campo magnético proveniente de un imán, generando un voltaje proporcional a la presión que imprimen las ondas acústicas en la superficie del diafragma [57]. En la Figura 15, se ilustra los elementos que conforman un micrófono dinámico.

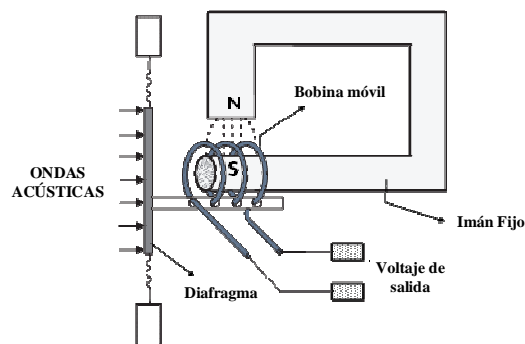


Figura 15. Esquema de los elementos esenciales de un micrófono dinámico [57].

5.5.1.6.1.2. *Micrófono de condensador*

El componente esencial de este micrófono consiste en un condensador, en el cual uno de sus electrodos es una membrana muy delgada y liviana, esta membrana constituye la placa que es desplazada por la presión del sonido, en cambio, el otro electrodo es muy rígido y pesado, llamada placa trasera y se coloca dentro de una cavidad cerrada [48], [55]. 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 [8], [57]. En la Figura 16, se presenta el esquema de los elementos que conforman el micrófono de condensador.

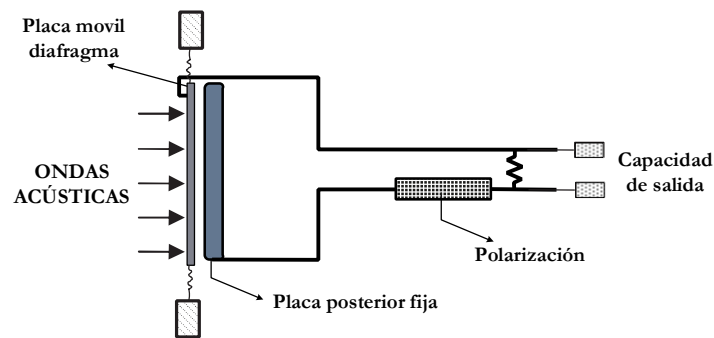


Figura 16. Esquema de los elementos esenciales de un micrófono de condensador [57].

Las ventajas de este tipo de micrófonos son [56]:

- Adecuada sensibilidad.
- Buena respuesta en frecuencia.
- Fácil calibrado.
- Gran estabilidad de sus características.
- Bajo nivel de ruido interno.
- Poca sensibilidad a las vibraciones.
- Características adecuadas de direccionalidad.

Las desventajas e inconvenientes son [56]:

- Fragilidad del diafragma
- Susceptibilidad a la humedad
- Necesidad de sistemas preamplificadores
- Costos elevados.

5.5.1.6.2. Sistema integrado de micrófono y preamplificador PCB HT378B02

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 adecuado para pruebas de campo industrial. Así mismo, captura señales con la mínima distorsión hasta los 20 kHz y debido a su alta direccionalidad permiten recoger señales de un punto específico con la mínima cantidad de ruido proveniente de otras fuentes acústicas [8]. En la Figura 17, se ilustra el sistema integrado de micrófono y preamplificador.



Figura 17. Sistema integrado de micrófono y preamplificador PCB HT378B02 [8].

En la Tabla 6, se presentan las especificaciones técnicas principales del micrófono PCB 337B02 que incluye el sistema integrado.

Tabla 6. Especificaciones técnicas del micrófono capacitivo PCB 337B02 [58].

Designación	Especificación
Principio del transductor	Capacitivo
Diámetro nominal	1/2"
Frecuencia de respuesta	3,15Hz~20KHz
Patrón de captación	Direccional
Sensibilidad	50mV/Pa
Rango dinámico	147dB
Rango de temperatura	-40~150°C
Prepolarizado	Si
Capacitancia	12pF
Peso	7,8gr
Material de carcasa	Aleación inoxidable

En la Tabla 7 se presentan las especificaciones técnicas principales del preamplificador de alta temperatura PCB HT426E01 que incluye el sistema integrado.

Tabla 7. Especificaciones técnicas del preamplificador PCB HT426E01 [58].

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

5.5.1.6.3. Módulo de adquisición National Instruments NI-9234

El módulo de adquisición National Instruments NI-9234 que se presenta en la Figura 18, es un módulo dinámico de adquisición de señales de voltaje, compatible con cualquier chasis NI compactDAQ. Consta de 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 independiente en el buffer de datos que incluye el módulo [8].



Figura 18. Módulo dinámico de adquisición de señales de voltaje NI 9234 [59].

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 [8]. En la Tabla 8 se detallan las especificaciones técnicas del módulo de adquisición de señales NI-9234.

Tabla 8. Especificaciones técnicas del módulo de adquisición de señales NI-9234 [59].

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	51.2 kS/s por canal
Filtro de frecuencia (Antialiasing)	Si
Resolución del convertidor A/D	24 bits
Rango dinámico general	102 dB
Consumo	1W
Voltaje operativo	60 VCC
Temperatura operativa	$-40^{\circ}C \sim +70^{\circ}C$
Dimensiones generales	25 mm x 115 mm x 80 mm
Peso	173 g

5.5.1.6.4. Chasis de módulos National Instruments NI compact DAQ-9188

El NI compactDAQ-9188 que se observa en la Figura 19, es un chasis de módulos 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 distinto sensor. Al emplear 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 [8].



Figura 19. Chasis de módulos de adquisición de señales NI compactDAQ-9188 [60].

5.5.2. Análisis de vibración

5.5.2.1. Vibración

Una vibración se puede considerar como la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero [61]. Otro concepto de vibración, se puede considerar como el intercambio de energía cinética en cuerpos con rigidez y masa finitas, el cual surge de una entrada de energía dependiente del tiempo. El vaivén de un péndulo y el movimiento de una cuerda pulsada son ejemplos comunes de vibración [62].

5.5.2.1.1. Vibración simple

La base principal de las señales de vibración en el dominio del tiempo son las ondas sinusoidales. Estas son las más simples y son la representación de las oscilaciones puras [63]. Una oscilación pura puede ser representada físicamente mediante la Figura 20, a la izquierda, el resorte se encuentra en posición de equilibrio y a la derecha el desplazamiento del resorte cuando se une a la masa. Un sistema vertical masa-resorte oscila alrededor de esta posición de equilibrio de $y = 0$ [64].

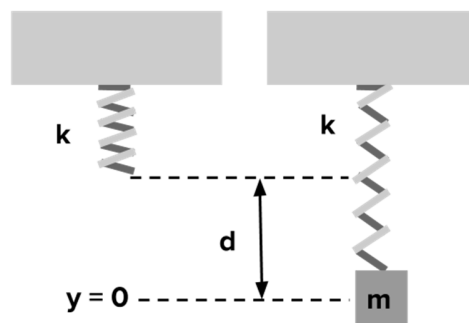


Figura 20. Sistema vibratorio masa-resorte [64].

Ahora a la masa vibrante se adiciona un lápiz y una hoja de papel en su parte posterior, de manera que pueda marcar su posición. Si se desplaza el papel con velocidad constante hacia el lado izquierdo se formará una gráfica de posición de la masa con respecto al tiempo que se presenta en la Figura 21 [63]. El tiempo que tarda la masa para ir y regresar al punto de equilibrio ($y = 0$) siempre es constante. Este tiempo recibe el nombre de período de oscilación [31].

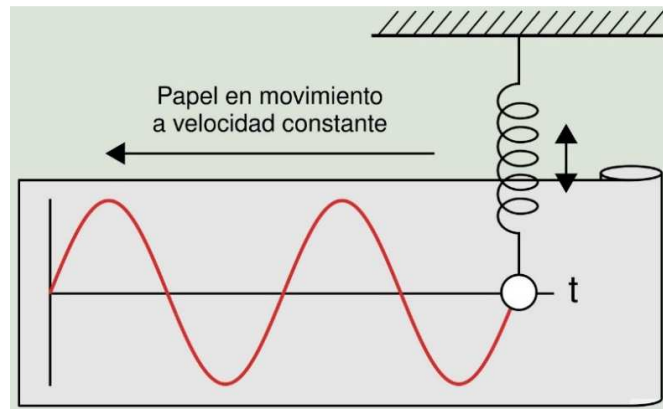


Figura 21. Movimiento armónico simple [63].

A continuación, se describen los tres parámetros, que definen este tipo de vibración.

5.5.2.1.1. Amplitud

La amplitud desde el punto de vista de las vibraciones es cuanta cantidad de movimiento puede tener una masa desde una posición neutral. Es la intensidad de la vibración y es indicativa de la severidad de la misma. En la Figura 22 se presenta las distintas formas de medición de la amplitud generalmente en valores pico-pico para desplazamiento, valores pico para velocidad y RMS para aceleración [31], [63].

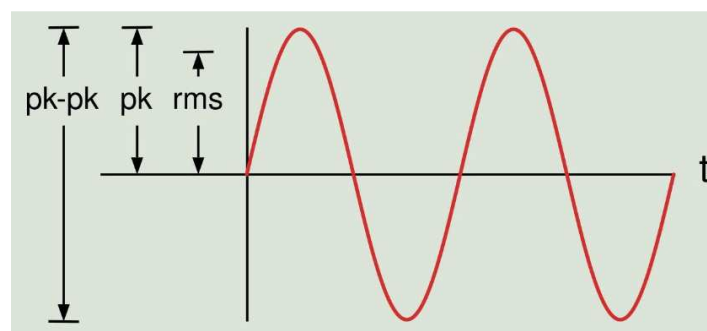


Figura 22. Formas de medición de la amplitud vibratoria [63].

5.5.2.1.1.2. Fase

Es una medida de la diferencia de tiempo entre dos ondas sinusoidales. Se mide en términos de ángulo, en grados o radianes [63]. La Figura 23 muestra dos señales sinusoidales de igual amplitud y período, pero desfasadas 90 grados.

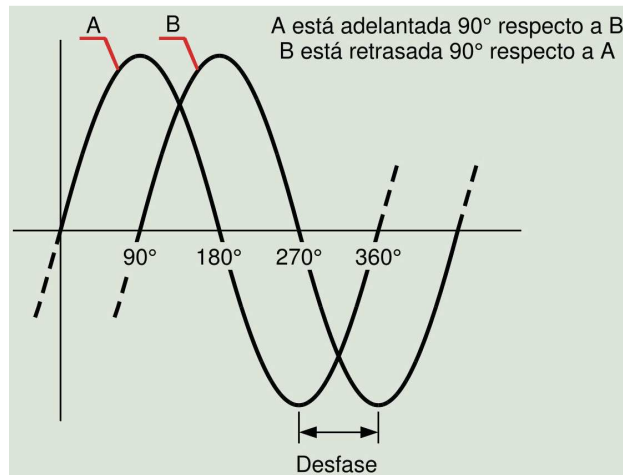


Figura 23. Ejemplo de dos señales desfasadas en 90° [63].

5.5.2.1.1.3. Frecuencia

El tiempo que tarda la masa para ir y regresar al punto de equilibrio $y=0$ siempre es constante. Este tiempo recibe el nombre de período de oscilación (medido generalmente en segundos o milisegundos) y significa que el resorte completó un ciclo. El recíproco del período es la frecuencia (es decir $F = 1/P$), la cual es dada en Hz o también revoluciones por minuto (RPM) [31], [63].

5.5.2.1.2. Vibración Compuesta

Una vibración compuesta es una sumatoria de varias señales sinusoidales que comprenden cada uno de los componentes que se encuentran en la máquina. Incluyendo todos los impactos y vibraciones aleatorias [31]. De manera que, la forma de onda de vibración de una máquina no es una señal sinusoidal sino que puede llegar a ser muy compleja [63]. En la Figura 24 se presenta la señal compleja que como se indica está conformada por ondas sinusoidales simples.

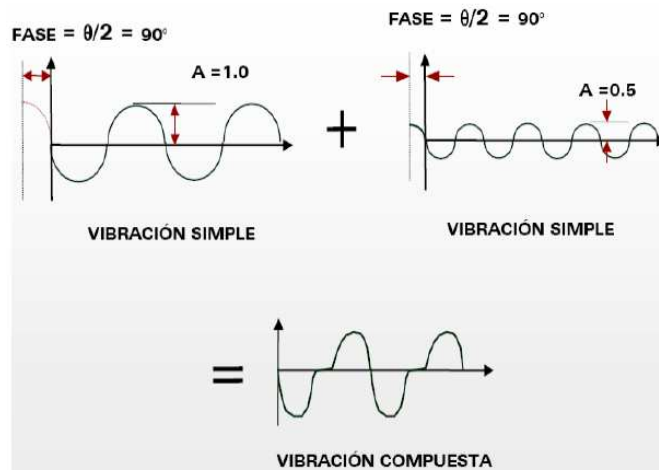


Figura 24. Esquema de vibración compuesta [65]

5.5.2.2. Instrumentación de medida

Para coleccionar las señales vibratorias se deben emplear sensores para medir desplazamiento, velocidad y aceleración. Los sensores de vibración o transductores, convierten la señal mecánica en señal eléctrica que es procesada y acondicionada por una amplia variedad de instrumentos que proporcionan la información necesaria para monitorear la condición de la máquina [66].

Los transductores responden a magnitudes diferentes de la fuente de vibración, como se da a conocer en la Tabla 9.

Tabla 9. Tipos de transductores de vibración

Tipo	Sensible a
Transductor de desplazamiento o sonda de proximidad	Desplazamiento
Transductor sísmico de velocidad o sonda de velocidad	Velocidad
Transductor piezoeléctrico o acelerómetro	Aceleración

5.5.2.2.1. Acelerómetro

El sensor más utilizado es el piezoeléctrico, este tipo de transductor genera una tensión eléctrica, por presión sobre un cristal piezoeléctrico, que es proporcional a la aceleración. Un acelerómetro puede captar con gran precisión señales entre 1 Hz y 15000 Hz. Son muy apropiados para tomar datos de vibración a alta frecuencia, donde aparecen grandes esfuerzos con desplazamientos

relativamente pequeños [63]. En la Figura 25 se observa que el acelerómetro está compuesto por un cristal de cuarzo, sobre el cual se apoya por un lado una masa y por el otro está rígidamente unida a la base, la cual se fijará a la superficie cuyo movimiento se desea medir. Al tener el acelerómetro unido a un sistema vibrante, la masa ejerce fuerzas de inercia sobre el material piezoeléctrico, el que genera cargas eléctricas proporcionales a la aceleración y a la masa [31].

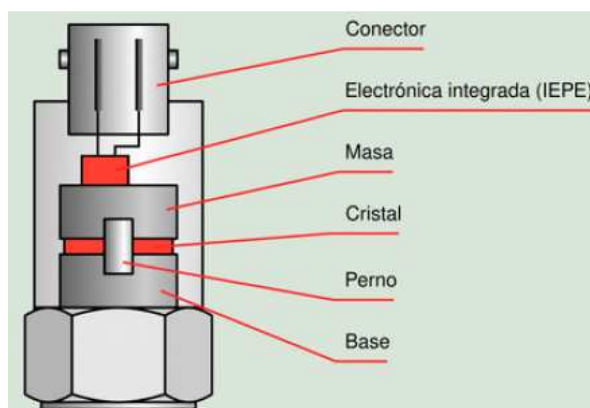


Figura 25. Componentes de un acelerómetro piezoeléctrico [63].

5.5.2.3. Técnicas de fijación del sensor a la máquina

El método de sujeción del sensor en la máquina determina directamente el corte de altas frecuencias, ya que el contacto sensor-máquina actúa como un filtro paso bajo. En la Tabla 10, se indica la frecuencia límite según las distintas formas de sujeción de los sensores que aparecen en la Figura 26 agrupadas como temporales y permanentes [63].

Tabla 10. Límite frecuencial según la forma de fijación [63].

Forma de fijación	Frecuencia máxima (Hz)
Sujeción manual	2000
Montaje con imán	5000
Montaje con adhesivo	6000
Montaje atornillado	7000

Evidentemente, el mejor método de sujeción es atornillando el sensor a la superficie de la máquina donde se va a medir, aunque, por su coste, se emplea este método en sistemas de monitoreo continuo. Para capturar señales a muy alta frecuencia (de 6 a 8 kHz), se recomienda la utilización de grasas y pegamentos a base de silicona. Los analizadores de vibraciones

modernos disponen de rangos de frecuencia de medición lineales que están muy por encima de los rangos de respuesta lineales de los sensores [63].

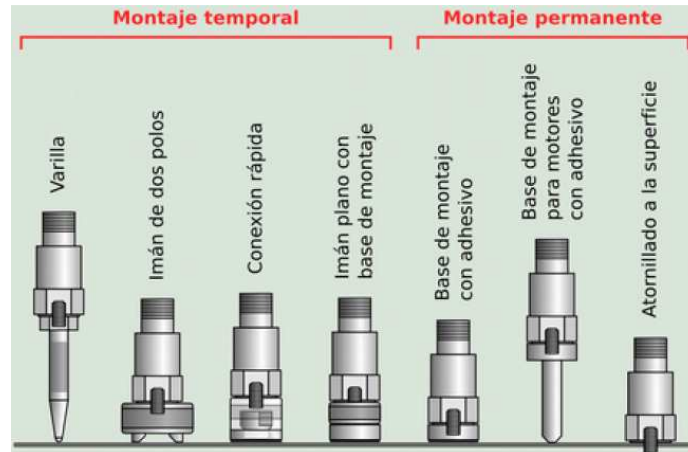


Figura 26. Técnicas de fijación del sensor a la máquina [63].

5.5.2.4. Normas para la medición y evaluación de los niveles de vibración

A través de los años, se han llevado a cabo varios intentos para establecer niveles de vibración absolutos o normas de niveles para una operación aceptable en diferentes tipos de máquinas. Los primeros de esos intentos fueron mediciones generales del desplazamiento de vibración. Las mediciones de velocidad fueron agregadas más tarde [65]. Las normas de severidad de vibraciones de maquinaria se basan en dos parámetros: amplitud y frecuencia.

5.5.2.4.1. MIL-STD-167-1 y MIL-STD-167-2

MIL-STD-167-1 cubre la vibración excitada internamente en toda clase de maquinaria rotativa con la excepción de maquinaria recíproca y MIL-STD-167-2 cubre la maquinaria recíproca, sistemas de propulsión y flechas. Se basan en un espectro de desplazamiento (mils pico), ilustrado en la Figura 27, que es equivalente a una velocidad constante de 0-13 pulgadas por segundo (107 VdB) arriba de 1200 RPM. Estas normas son usadas como una referencia aproximada para niveles aceptables de vibración para máquinas sencillas de tamaño medio, como motores de bombas eléctricas, pero no se deben usar como una norma absoluta [61].

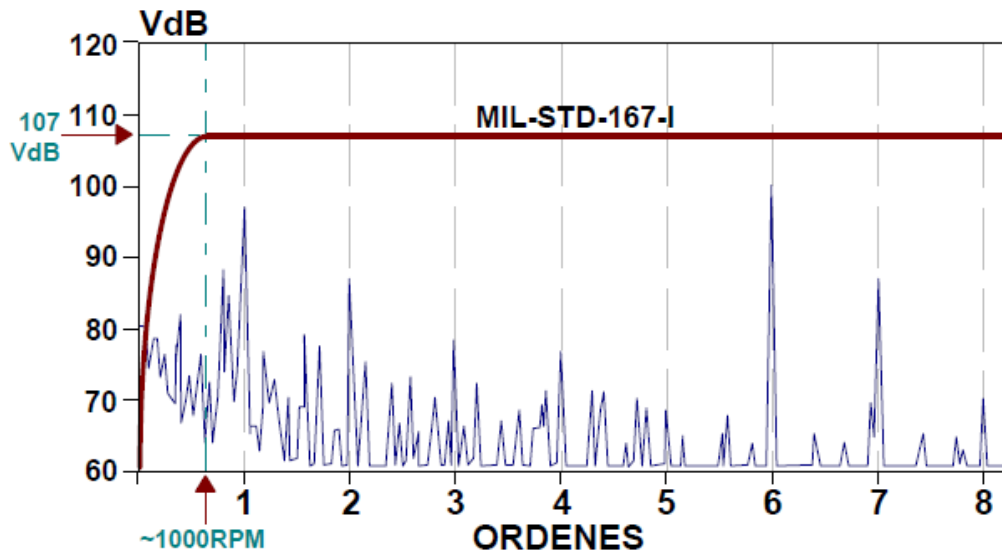


Figura 27. Espectro de desplazamiento, empleado como referencia para niveles aceptables de vibración [61].

5.5.2.4.2. Norma ISO 10816

Norma internacional que clasifica a las máquinas en grupos de acuerdo a la potencia del motor, como se indica en la Figura 28. Mientras más grande es la máquina, mayor es su capacidad de soportar vibración [65]. Este estándar consta de cinco partes [63]:

- Parte 1: Indicaciones generales
- Parte 2: Turbinas de vapor y generadores que superen los 50 MW con velocidades típicas de trabajo de 1500, 1800, 3000 y 3600 RPM.
- Parte 3: Maquinaria industrial con potencia nominal por encima de 15 kW y velocidades entre 120 y 15000 RPM.
- Parte 4: Conjuntos movidos por turbinas de gas excluyendo las empleadas en aeronáutica.
- Parte 5: Conjuntos de máquinas en plantas de hidrogenación y bombeo.

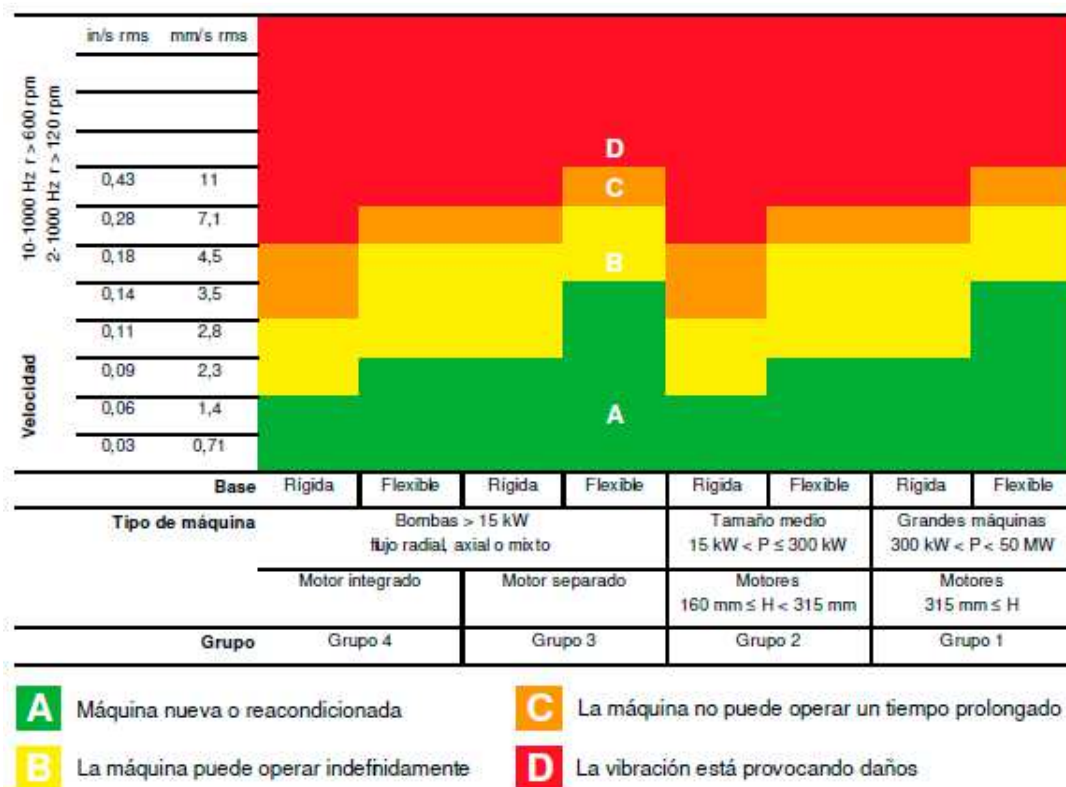


Figura 28. Severidad de la vibración según la norma ISO 10816-3 [63].

5.5.2.4.3. Normas comerciales DLI

El rango de datos que se indica en la Tabla 11 se puede aplicar a un gran número de máquinas rotativas con una confianza razonable.

Tabla 11. Norma comercial DLI [61].

Nivel de vibración	< 30 Hz	30 Hz – 1000 Hz	> 1000 Hz
Extremo	10 mils p-p	125 VdBrms	11.2 G rms
Excesivo	4.2 mils p-p	117 VdBrms	4.46 G rms
Tolerable	1.5 mils p-p	108 VdBrms	1.58 G rms
Aceptable	0.6 mils p-p	100 VdBrms	0.630 G rms

La misma información se encuentra ilustrada en la Figura 29.

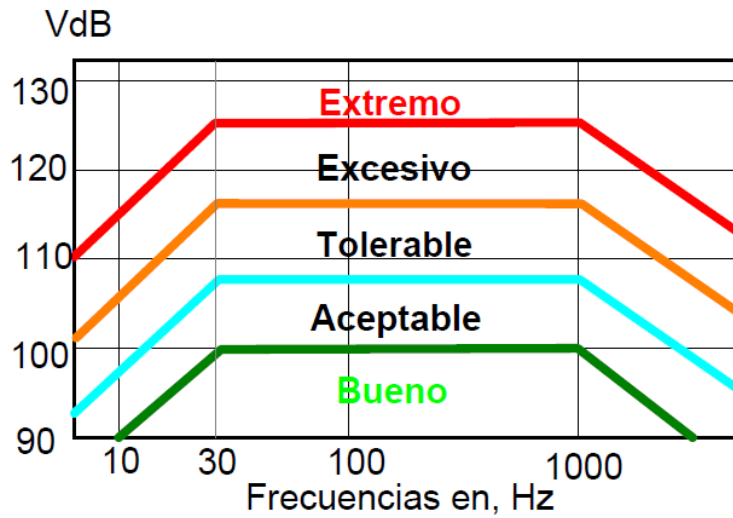


Figura 29. Rango de gravedad de vibración en maquinaria según AZIMA DLI [61].

5.5.2.4.4. Carta de Charlotte

La carta de Charlotte es una tabla ilustrada empleada para el diagnóstico de vibración, que presenta la fuente del problema y el espectro típico, detallando las frecuencias fundamentales y los componentes espectrales que deben estar presentes en las señales adquiridas, brindando los parámetros necesarios para proceder a realizar el respectivo análisis de vibración. De acuerdo a la carta de Charlotte, existen 4 etapas de fallos en los rodamientos. En la Figura 30, se presenta la etapa 1.

En la etapa 1, en la zona A, se identifican las frecuencias de funcionamiento de la máquina, por ejemplo, velocidad de giro o fallos como desalineación o desbalanceo.

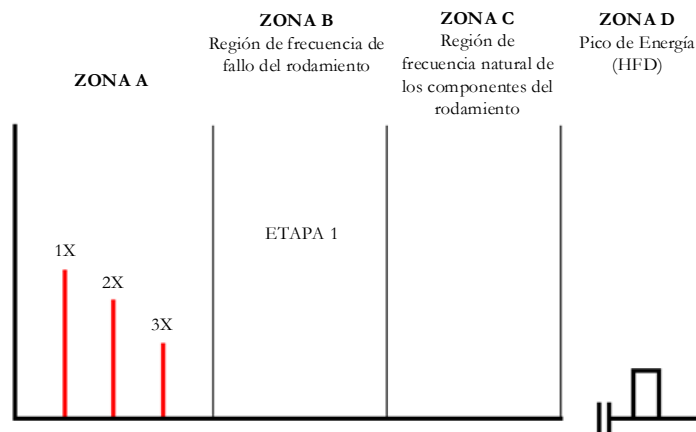


Figura 30. Etapa 1 de fallo en rodamientos [67].

En la etapa 2 que se presenta en la Figura 31, ligeros fallos del rodamiento comienzan a “hacer sonar” las frecuencias naturales (fn) de los componentes del rodamiento que ocurren en el rango de 500 – 2000 Hz. Esas frecuencias naturales pueden ser también resonancias de las estructuras de soporte del rodamiento. Al final de la etapa 2 aparecen frecuencias de banda lateral por encima y por debajo del pico de frecuencia natural [67]. El pico de energía aumenta. El rodamiento empieza a experimentar desgaste, pero aún no es necesario realizar el cambio.

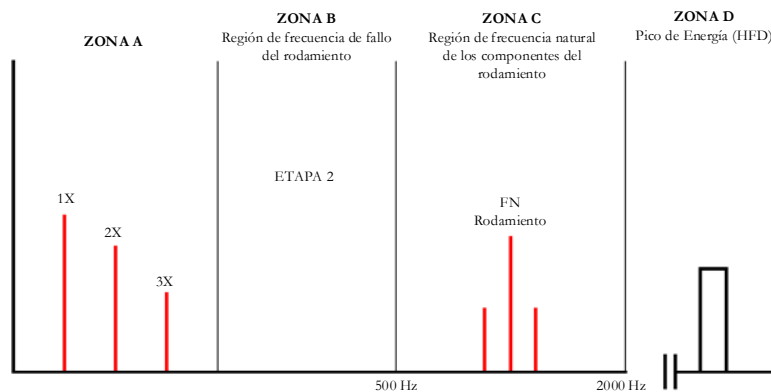


Figura 31. Etapa 2 de fallo en rodamientos [67].

En la etapa 3, aparecen frecuencias y armónicos de fallos en rodamientos denominados BPFO, BPFI. Cuando el desgaste progresa, más armónicos de estas frecuencias aparecen y el número de bandas laterales aumenta, como se observa en la Figura 32. El desgaste es por ahora visible y se puede prolongar a la periferia del rodamiento, particularmente cuando bandas laterales bien formadas acompañan a las armónicas de la frecuencia de fallo del rodamiento [67].

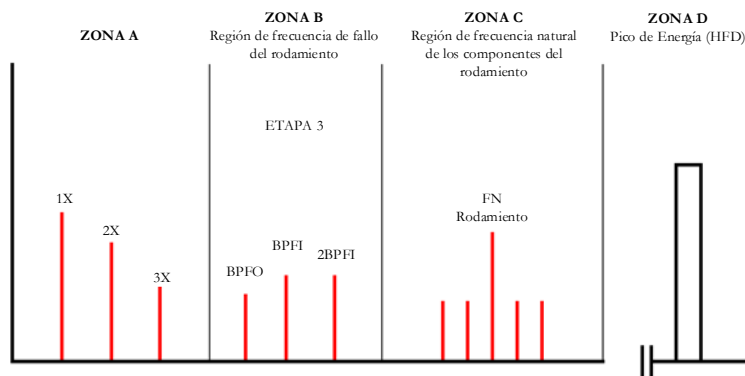


Figura 32. Etapa 3 de fallo en rodamientos [67].

En la etapa 4, hacia la parte final, la amplitud 1X crece y normalmente causa el aumento de numerosas armónicas de velocidad de giro. De hecho, los discretos fallos del rodamiento y las frecuencias naturales de los componentes comienzan a “desaparecer” y son reemplazados por

un “ruido de piso” al azar, de banda ancha y alta frecuencia [67], como se presenta en la Figura 33.

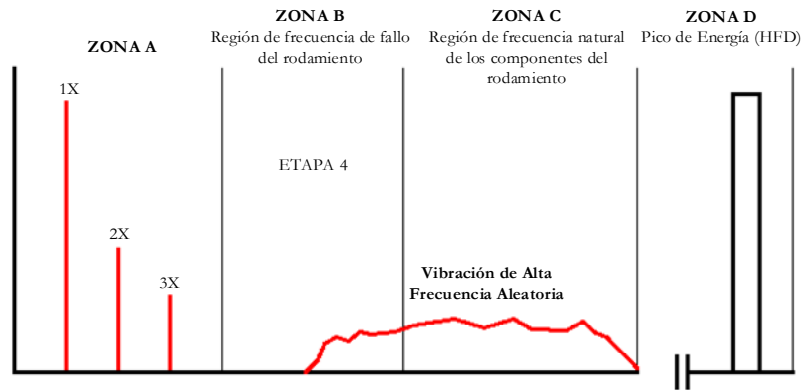


Figura 33. Etapa 4 de fallo en rodamientos [67].

5.5.3. Monitoreo de la corriente eléctrica del motor

La aplicación de técnicas predictivas especializadas en motores tiene como propósito principal detectar problemas eléctricos y mecánicos en las máquinas eléctricas rotativas para evaluar su condición y su eficiencia de funcionamiento [63].

5.5.3.1. El motor de inducción

Un motor de inducción se define como un motor asíncrono que convierte la energía eléctrica en energía mecánica, comprende un circuito magnético el cual se vincula con dos circuitos eléctricos, rotando uno con respecto al otro, en el cual la potencia es transferida de un circuito al otro por inducción electromagnética [68]. Está formado por un rotor y un estator, tal como se indica en la Figura 34. El estator está rodeado por la carcasa donde se encuentra la base de fijación, está formado por un apilamiento de chapas de acero al silicio que disponen de unas ranuras en su periferia interior en las que se sitúa un devanado trifásico distribuido. El rotor está constituido por un conjunto de chapas apiladas, formando un cilindro, que tienen unas ranuras en la circunferencia exterior, donde se coloca el devanado [17].

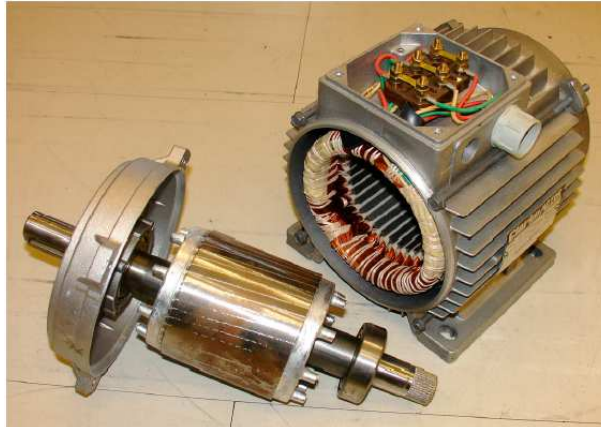


Figura 34. Rotor y estator de un motor de inducción [17].

5.5.3.2. Análisis de firma de la corriente del motor (AFCM)

El método AFCM se basa en el monitoreo de la corriente del motor, que consiste en realizar un análisis frecuencial de las corrientes de estator del motor. Es un método no invasivo mediante el cual, es posible detectar fallos antes de que puedan ser detectados mediante el análisis acústico y de vibraciones [17].

5.5.3.3. Fallos en rodamientos de máquinas eléctricas

La mayoría de maquinaria rotativa dispone de rodamientos sobre los cuales apoyan los extremos del eje que sustenta la parte móvil. Dado que, estos elementos están sometidos a una continua fricción y movimiento. Los rodamientos son los elementos con una tasa de fallos más elevada [17]. Los fallos de rodamientos representan más del 41% de todos los fallos de motores, los voltajes y corrientes de eje son recursos para fallos en rodamientos [68].

En la Tabla 12 se manifiesta las expresiones para encontrar los armónicos que indican la presencia de alguno de los fallos detallados anteriormente.

Tabla 12. Frecuencias de fallo [17].

Fallo	Frecuencia
Barras rotas	$f_{brb} = f_1 \left[l \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm s \right]$

f_1 = frecuencia de alimentación
 $l/p = 1,5,7,11,13,\dots$
 p = número de pares de polos del motor
 s = deslizamiento en tanto por uno

Fallo	Frecuencia	
Excentricidad	$f_{ecc} = f_1 \left[1 \pm m \left(\frac{1-s}{p} \right) \right]$	$m = 1,2,3,\dots$
Rodamientos	$f_{bng} = f_1 \pm m f_{i,o} $ Frecuencias de vibración características: $f_{i,o} = \frac{n_b}{2} f_r \left[1 \pm \frac{bd}{pd} \cos \beta \right]$	n_b = número de bolas del rodamiento f_r = velocidad mecánica de rotor en Hz bd = diámetro de la bola pd = diámetro del rodamiento β = ángulo de contacto de las bolas
Espira cortocircuitada	Frecuencias medias $f_{sth} = f_1 \left[1 \pm m Z_2 \left(\frac{1-s}{p} \right) \right]$ Frecuencias bajas $f_{stl} = f_1 \left[\frac{m}{p} (1-s) \pm k \right]$	Z_2 = número de ranuras o barras de rotor $k = 0,1,3,5,\dots$

5.5.3.4. Medición de corriente

Para llevar a cabo el monitoreo mediante el método AFCM es necesario medir las corrientes del motor. Se pueden utilizar diferentes métodos para medición de corrientes como son: técnicas basadas en resistencia Shunt, sensores de efecto Hall, transformadores de corrientes y bobinas Rogowski [40].

A continuación, en la Tabla 13 se muestra una comparación entre los diferentes sensores para medición de corrientes, cabe mencionar que en el presente trabajo se considera el sensor de efecto Hall para la adquisición de las señales de corriente:

Tabla 13. Tabla comparativa sensores de corriente [17].

Tecnología del sensor	Resistencia Shunt	Sensor de efecto Hall	Transformador de corriente	Bobina Rogowski
Coste	Muy bajo	Alto	Medio	Bajo
Linealidad en el intervalo de medición	Muy buena	Pobre	Regular	Muy buena
Capacidad de medir altas corrientes	Muy pobre	Buena	Buena	Muy buena

Tecnología del sensor	Resistencia Shunt	Sensor de efecto Hall	Transformador de corriente	Bobina Rogowski
Consumo de energía	Alto	Medio	Bajo	Muy bajo
Problemas de saturación por DC o altas corrientes	No	Si	Si	No
Deriva de la salida con la temperatura	Medio	Alto	Bajo	Muy bajo
Problemas de saturación e histéresis	No	Si	Si	No

5.5.3.4.1. Sensor de efecto Hall

El efecto Hall es una forma de detectar el campo magnético alrededor de un conductor portador de corriente. Para introducir una corriente en el dispositivo semiconductor Hall se requiere una fuente de alimentación externa [69]. Existen dos tipos principales de sensores de efecto Hall: lazo abierto (*open loop*) y de lazo cerrado (*close loop*). El segundo ofrece mejor precisión, pero a un costo mayor, y la mayoría de sensores de efecto Hall que se encuentran en medidores de energía emplean el diseño de lazo abierto para minimizar costos. Estos sensores tienen una excelente respuesta a frecuencia y están capacitados para medir corrientes muy altas. En la práctica, se presenta en forma de pinzas amperimétricas como se indica en la Figura 35.



Figura 35. Pinza amperimétrica de efecto Hall [10].

5.5.3.4.2. Pinza amperimétrica

El equipo de adquisición de señales de corriente del motor del compresor en el laboratorio de vibraciones mecánicas es una pinza amperimétrica CA/CC i30s como se presenta en la Figura

35, este instrumento de medición puede ser utilizado con analizadores, multímetros y osciloscopios para obtener medidas de corriente (CC) o (CA). La Tabla 14 presenta las características técnicas de la pinza amperimétrica.

Tabla 14. Características técnicas de la pinza amperimétrica

Características técnicas pinza amperimétrica	
Rango de corriente	20 A CA rms o CC
Rango de medida	± 30 A
Sensibilidad de salida	100 mV/A
Precisión (a +25 °C)	$\pm 1\%$ de lectura ± 2 mA
Resolución	± 1 mA
Impedancia de carga	> 10 k Ω y ≤ 100 pF
Sensibilidad de la posición del conductor	$\pm 1\%$ respecto a lectura central
Rango de frecuencias	CC a 100 kHz (-0,5 dB)
Coefficiente térmico	$\pm 0,01\%$ de lectura/°C
Alimentación eléctrica	9 V alcalina, MN1604/PP3, 30 horas, indicador de batería baja
Tensión de servicio	300 V CA rms o CC

5.5.3.5. Equipo de adquisición de señales de corriente

Para el proceso de adquisición de señales de corriente se debe ubicar entre las tenazas de la pinza amperimétrica el conductor, que es por donde fluye la corriente a la entrada del motor de inducción, se cuenta además con un módulo de adquisición NI 9234 de 4 canales, para realizar mediciones de alta precisión, y un chasis NI cDAQ-9188 que permite registrar los datos de los experimentos realizados en el laboratorio, la comunicación es vía Ethernet para la entrega de datos de alta velocidad hacia una PC o laptop, donde se desplegará un sistema de prueba distribuido a través del entorno de programación NI LabVIEW, y por último, obtener los espectros de las señales de corriente eléctrica que serán analizadas mediante el procesamiento digital de señales, empleando las técnicas siguientes: transformada rápida de Fourier (*FFT*), envolvente y cepstrum. Los equipos para la adquisición de datos de señales de corriente son presentados en la Figura 36.

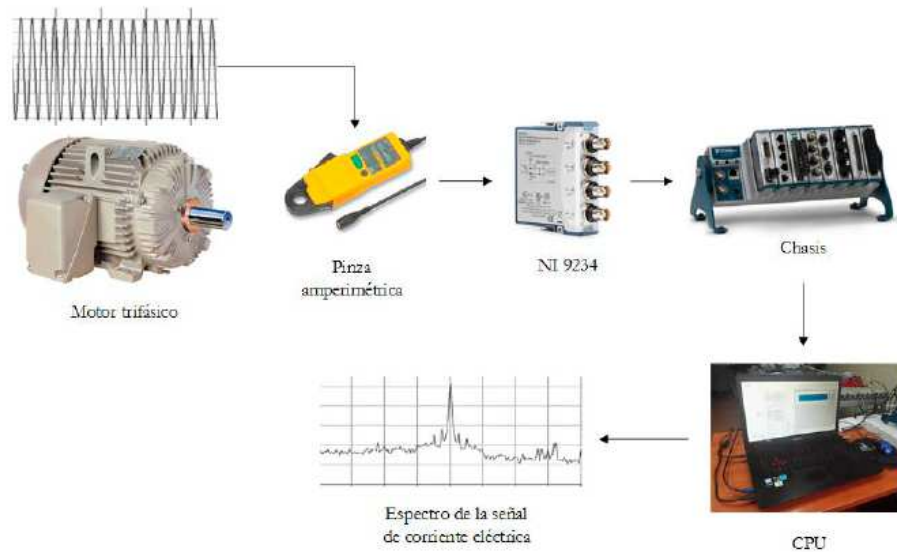


Figura 36. Proceso de adquisición de datos de la señal de corriente [10].

5.5.3.6. Normas para análisis de firma de la corriente del motor

Para el análisis de las señales de corriente se requiere de diferentes normas que se detallan a continuación:

ISO 20958:2013: Condition monitoring and diagnostics of machine systems: Electrical signature analysis of three-phase induction motors.

Establece las directrices para las técnicas en línea, recomendados a los efectos de la condición de control y diagnóstico de máquinas eléctricas con base en el análisis de la firma eléctrica. Es aplicable a motores de inducción trifásicos [70].

IEC 61000-4-30: Testing and Measurement Techniques – Power Quality Measurement Methods.

La norma IEC 61000-4-30 define los procedimientos de medida de cada uno de los parámetros eléctricos en base a los cuales se determina la calidad del suministro eléctrico para así obtener resultados fiables, repetibles y comparables [71].

ISO/IEC 17025:2005: Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración.

La norma ISO/IEC 17025 comprende pruebas y calibraciones realizadas con método estándar, no estándar y desarrollados en laboratorio como parte de la inspección y certificación de productos [72].

IEC 61010-031:2015: Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio. Parte 31: Requisitos de seguridad para sondas manuales para medidas y ensayos eléctricos.

Esta norma se ocupa de la seguridad de los conjuntos de sondas portátiles y manuales. Son para su uso en la interfaz entre un fenómeno eléctrico y los equipos de ensayo o medición [73].

IEEE Standard 519:2014: Práctica recomendada y requisitos para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica.

En esta norma se establece las formas de onda de voltaje y corriente que pueden existir en todo el sistema. Hace referencia también a la calidad de la energía que se proporciona en el punto de acoplamiento común [74].

NEMA MG1:2016

Esta norma proporciona acceso a las pruebas fundamentales, así como a los criterios dimensionales y de aplicación relativos a la maquinaria rotativa. El estándar asiste a los usuarios en la correcta selección y aplicación de motores y generadores [75].

5.6. Adquisición de señales

El procedimiento general para la adquisición de datos consiste en tomar mediciones y compararlas con las tendencias históricas, los datos de referencias o los datos representativos de las mismas o máquinas similares [76]. Los datos son las medidas relacionadas con la máquina que detectan algún fenómeno físico. Estos datos pueden ser: vibración, acústicos, corriente, análisis de aceite, emisión acústica, presión, temperatura, entre otros [38]. En el caso de varias técnicas de monitoreo de la condición, se dispone de sistemas informáticos que ayudan a la gestión de la adquisición de datos, las rutas de recopilación de datos, el registro y la tendencia de las mediciones [76]. Para realizar las mediciones se han diseñado diversos sensores, tales como acelerómetros, sensores de proximidad, sensores ultrasónicos, sensores de corriente, sensores de emisión acústica, entre otros. Las señales que se adquieren con estos sensores por lo general son muy variables, por lo que, el proceso de adquisición de datos de calidad requiere una planificación que incluye el conocimiento de la máquina en condiciones normales y de fallo, selección y localización adecuada del sensor a utilizar, y validación de la señal adquirida [38].

5.7. Procesamiento de las señales

El procesamiento de la señal consiste en procesar la información contenida en una variedad de formatos; utiliza representaciones matemáticas, estadísticas, computacionales, heurísticas y/o lingüísticas, formalismos, técnicas de modelado y algoritmos para generar, transformar, transmitir y aprender de señales analógicas o digitales. El procesamiento de la señal puede implicar filtrado, recuperación, realzamiento, traslado, detección y descomposición de la misma [38].

Los enfoques de procesamiento de la señal suelen realizarse en dos etapas: extracción de características de la señal y toma de decisiones basada en estas características [77]. La extracción de características es un proceso de obtención de atributos o parámetros, ya sea por lectura directa desde sensores de velocidad de rotación del eje leída desde un tacómetro, de temperatura o a través del procesamiento de datos de forma de onda que tienen las señales de corriente, vibración o acústica [38]. La toma de decisiones se basa en la relación entre las condiciones del proceso de la maquinaria y las señales que poseen estas características (índices de monitoreo). Se puede analizar las señales en el dominio del tiempo y la frecuencia, de este análisis se debe obtener parámetros que manifiesten la condición de la máquina para realizar el diagnóstico.

5.7.1. Análisis en el dominio del tiempo

El análisis en el dominio del tiempo es conocido también como el análisis de la forma de onda. Las señales de corriente, vibración o acústica recogidas de la maquinaria mediante los sensores se encuentran por lo general en el dominio del tiempo. En la práctica, las señales de vibración suelen incluir un gran conjunto de respuestas de varias fuentes en la maquinaria rotativa y algo de ruido de fondo. Esto hace que sea un reto manejar directamente las señales de vibración adquiridas para el diagnóstico de fallos de la máquina, ya sea mediante la inspección manual o la supervisión automática. El enfoque común consiste en computar ciertos atributos de la señal bruta que pueden describir la señal en esencia. En la comunidad de aprendizaje de máquinas, estos atributos también se denominan características, firmas o rasgos [78].

5.7.2. Análisis en el dominio de la frecuencia

El análisis en el dominio de la frecuencia, también llamado análisis espectral, tiene la capacidad de presentar información basada en características de la frecuencia que no son fáciles de observar

en el dominio del tiempo. Las señales de vibración medidas en el dominio del tiempo suelen ser generadas por varios componentes de la maquinaria rotativa, por ejemplo, los rodamientos, el eje, los engranajes, entre otros, donde un solo movimiento de un componente produce una onda sinusoidal de una sola frecuencia y amplitud y otros componentes añaden otras frecuencias. Es decir, cada componente de una máquina rotativa produce una frecuencia única. Sin embargo, no vemos estas frecuencias producidas individualmente en la señal medida, lo que se observa es una suma de las señales que el sensor midió. El espectro de los componentes de frecuencia generados a partir de las formas de onda en el dominio del tiempo hace más fácil ver cada fuente de vibración [78]. En la Figura 37, se presenta la forma de onda en el dominio del tiempo, lo que significa la señal compleja y sus componentes en el dominio de la frecuencia representan la descomposición de la onda compleja.

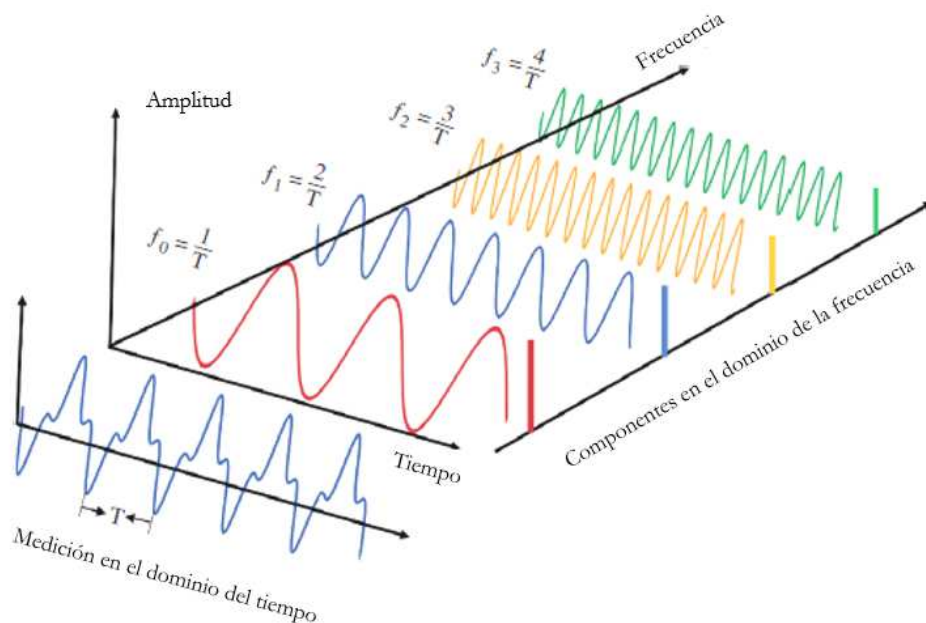


Figura 37. Medición en el dominio del tiempo vs medición en el dominio de la frecuencia [78].

5.8. Técnicas de procesamiento de señales

Se han desarrollado varias técnicas de procesamiento de señales para analizar e interpretar datos de forma de onda y componentes espectrales con el objetivo de extraer información útil para el monitoreo de la condición de maquinaria rotativa. En este trabajo se emplean las técnicas que se mencionan a continuación: transformada rápida de Fourier (*FFT*), análisis envolvente y Cepstrum.

5.8.1. Transformada Rápida de Fourier (*FFT*)

Para entender la *FFT* es importante definir primero el concepto de transformada de Fourier (TF), la cual se utiliza para pasar una señal al dominio frecuencial y así obtener información que no es evidente en el dominio temporal. Matemáticamente una señal periódica se puede descomponer en una suma de senos y cosenos formando una base ortogonal. El conjunto de constantes que multiplican a cada frecuencia forman el espectro de frecuencias [79]. La expresión matemática de la TF de una señal $x(t)$ está dada por la Ecuación 13:

$$x(w) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (13)$$

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

Cuando la señal es discreta, solo se puede usar la transformada discreta de Fourier (TDF). Es decir, a menudo se requieren métodos discretos para la implementación y el análisis computarizado [78]. La TDF se puede expresar de manera más eficiente mediante la Ecuación 14:

$$X_{TDF}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk}, k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (14)$$

Donde:

$$W_N = e^{-\frac{j2\pi}{N}} = \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) - j\text{sen}\left(\frac{2\pi}{N}\right)$$

Aquí, k es el índice y N es la longitud de la señal. La inversa de la TDF que transforma $X_{TDF}(k)$ de nuevo en $x(n)$ se expresa usando la Ecuación 15:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_{TDF}(k) W_N^{-nk}, n = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (15)$$

Para calcular la TDF de una señal de longitud N se necesita multiplicaciones complejas de N^2 , esto limita su uso práctico para señales con gran número de muestras.

La transformada rápida de Fourier (*FFT*), es una herramienta fundamental en el procesamiento digital de señales. Ante todo, debe quedar claro que la *FFT* no es una nueva transformada, sino que se trata de un algoritmo para el cálculo de la TDF. Su importancia radica en el hecho que elimina una gran parte de los cálculos repetitivos a que está sometida la TDF, por lo tanto, se

logra un cálculo más rápido. Además, la *FFT* generalmente permite una mayor precisión en el cálculo de la TDF disminuyendo los errores de redondeo [80]. En otras palabras, la *FFT* calcula la TDF de una señal de longitud N usando multiplicaciones complejas de $N \log_2 N$ en lugar de multiplicaciones complejas N^2 [78].

Supongamos que tenemos una señal de serie temporal discreta x con puntos de muestra de longitud N , donde N se elige como una potencia de dos, es decir, $N = 2^m$. La longitud N es separada en dos partes: (x_0, x_2, x_4, \dots) , compuesta de puntos pares; y (x_1, x_3, x_5, \dots) , compuesta de puntos impares. Cada uno tiene la mitad del total de puntos muestreados $N/2$ [78]. Basado en esto, la Ecuación 14 puede reescribirse como la Ecuación 16:

$$X_{TDF}(k) = \sum_{n-par=0}^{N-2} x(n)W_N^{nk} + \sum_{n-imp=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} \quad (16)$$

Sustituyendo n por $2m$ en el índice par y n por $2m + 1$ en el índice impar, donde $m = 0, 1, 2, \dots, \frac{N}{2} - 1$, entonces la Ecuación 16 puede reescribirse como se presenta en la Ecuación 17:

$$\begin{aligned} X_{TDF}(k) &= \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2m)W_N^{2mk} + \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2m+1)W_N^{(2m+1)k} \\ &= \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2m)(W_N^2)^{mk} + \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2m+1)(W_N^2)^{mk}W_N^k \end{aligned} \quad (17)$$

Donde, W_N^2 puede ser simplificado a:

$$W_N^2 = W_{N/2}$$

Reemplazando la expresión anterior en la Ecuación 17, obtenemos la Ecuación 18:

$$X_{TDF}(k) = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2m)(W_{N/2})^{mk} + \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x(2m+1)(W_{N/2})^{mk} W_N^k \quad (18)$$

Basado en x_{n-par} y $x_{n-impar}$, la TDF de una señal $x(n)$ se puede presentar por la Ecuación 19:

$$56 \quad (19)$$

$$X_{TDF}(k) = TDF_{N/2}\{x_{par}(m), k\} + W_N^k \cdot TDF_{N/2}\{x_{impar}(m), k\}, k = 0, 1, \dots, N - 1$$

La mayoría de analizadores *FFT* permiten la transformación de 512, 1024, 2048 o 4096 muestras. El rango de frecuencias que abarca el análisis *FFT* depende de la cantidad de muestras almacenadas y de la proporción de muestreo. La proporción de muestreo en muestras por segundo multiplicado por la duración de la grabación en tiempo *T* en segundos es igual al número de muestras *N*. El algoritmo *FFT* operando en *N* muestras de tiempo producirá un número de líneas de frecuencia igual a *N/2*. Una grabación de 512 muestras producirá un espectro de 256 líneas [61].

5.8.1.1. Aplicación de la *FFT* para detección de fallos en rodamientos

La *FFT* es un método de análisis en tiempo real que permite calcular los espectros de un conjunto de datos. Transforma información del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia [81]. En la Figura 38 se presenta una señal de vibración en el dominio del tiempo, con fallo en la pista interna de un rodamiento.

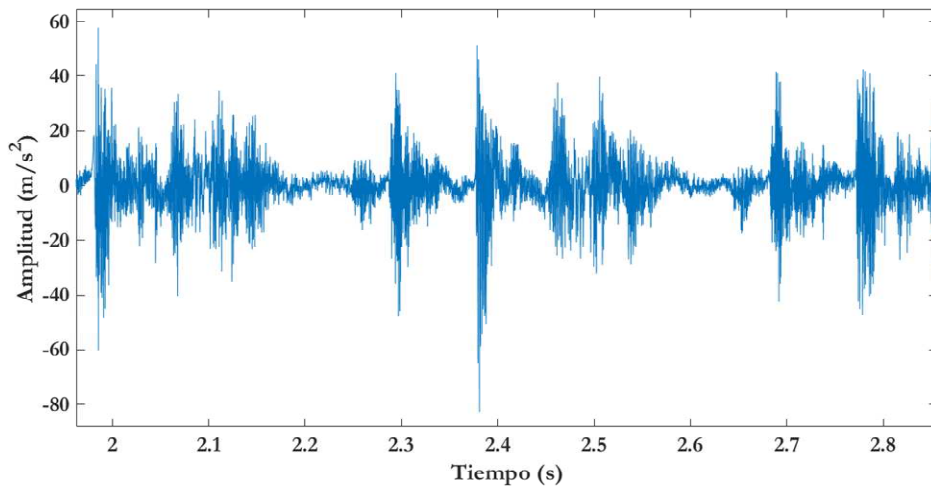


Figura 38. Señal de vibración en el dominio del tiempo con fallo en la pista interna de un rodamiento.

Al aplicar la *FFT* a la señal en el dominio del tiempo se obtiene el espectro de la Figura 39, lo que permite visualizar de manera más clara las frecuencias fundamentales, es decir, la frecuencia de rotación y las frecuencias características del rodamiento. Por lo tanto, el análisis en el dominio de la frecuencia brinda una estimación precisa de la ubicación de los fallos en rodamientos.

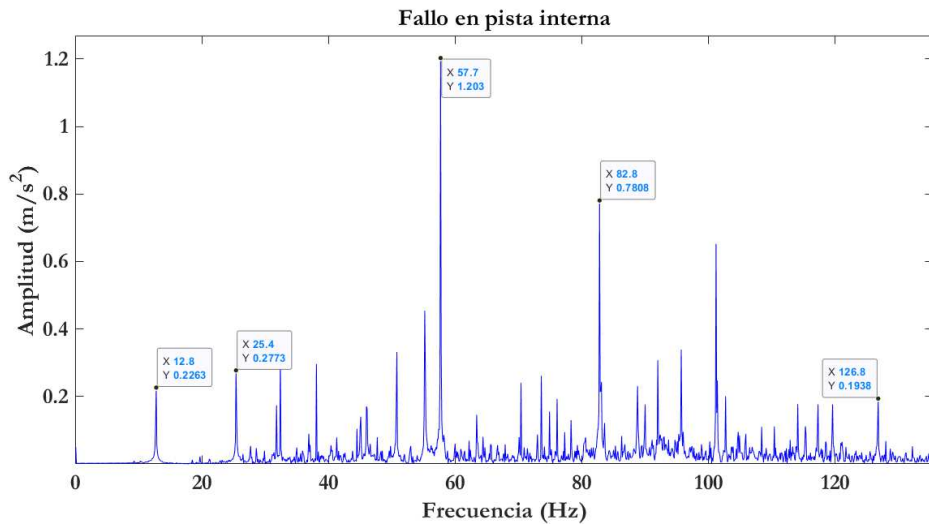


Figura 39. Espectro de vibración de un rodamiento con fallo en la pista interna.

5.8.2. Análisis Envolvente

El análisis envolvente, llamado también análisis de resonancia de alta frecuencia o demodulación, permite extraer las frecuencias de interés a partir de la definición de señal modulada. Este proceso comienza con la eliminación de componentes de baja frecuencia asociadas a otras condiciones de la maquinaria rotativa, como desbalanceo o desalineamiento. Posteriormente, se demodula la señal a través de la transformada de Hilbert, encargada de rectificar la señal y determinar la señal envolvente. Como última etapa se eliminan las altas frecuencias y se obtiene el espectro de la señal resultante, mostrando picos de amplitud obvios que no son fáciles de visualizar mediante la *FFT*. La frecuencia de interés en la detección de fallos en rodamientos es la frecuencia de modulación, la cual corresponde a los valores de las frecuencias características de los rodamientos [82].

Supongamos que tenemos un rodamiento con un fallo en la pista exterior. Cada vez que un elemento rodante pasa sobre el fallo, genera un pequeño impacto que excitará varias resonancias del rodamiento y la estructura circundante. Si, por ejemplo, la frecuencia de paso de la pista exterior (*BPFO*, del inglés *bearing pass frequency outer race*) del rodamiento es 6.2, es decir, pasan 6.2 bolas sobre el fallo en cada revolución del eje, tenemos 6.2 impactos por revolución. Si medimos la vibración en el rodamiento durante una revolución completa del eje se obtiene una forma de onda como la representada en color rojo en la Figura 40 [63].

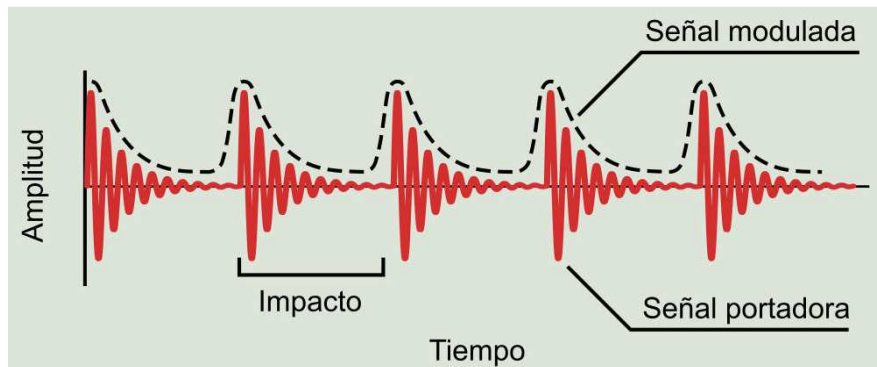


Figura 40. Forma de onda registrada en un rodamiento con fallo [63].

Al analizar el espectro de vibración medido en el rodamiento, se encuentra picos armónicos de la *BPFO*, que están directamente relacionados con el fallo en el rodamiento. Estos armónicos se presentan en el espectro ilustrado en la Figura 41.

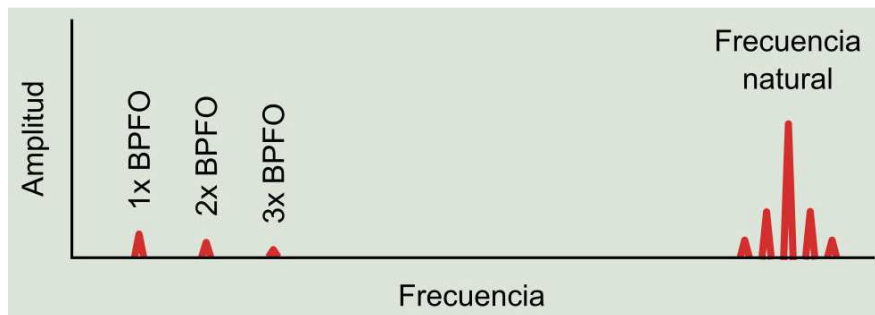


Figura 41. Espectro estándar [63].

La estructura formada por el rodamiento, la caja y el eje de la máquina, todos en conjunto actúan como una campana en resonancia. El sonido generado por un elemento rodante que impacta un fallo corresponde a una frecuencia alta, denominada frecuencia natural o de resonancia, comprendida en un rango entre 1 y 20 kHz, que queda concentrada en bandas de frecuencia. El efecto de variación en la amplitud de la frecuencia natural se conoce como modulación de amplitud y se puede apreciar en la Figura 40, donde la frecuencia natural actúa como señal portadora y la señal *BPFO* actúa como señal modulada. El proceso de demodulación consiste en conseguir a partir de la vibración original una nueva señal que contenga exclusivamente la señal modulada, como se representa en la Figura 42. Esta nueva señal se conoce como envolvente de la señal original [63].

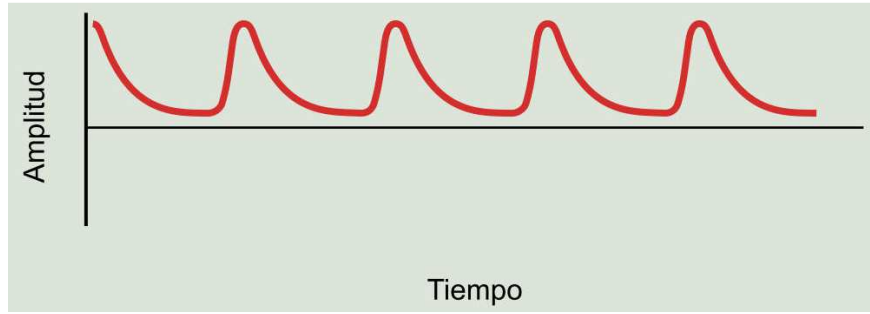


Figura 42. Forma de onda demodulada [63].

El espectro de la señal demodulada se denomina espectro de demodulación que se presenta en la Figura 43 y contiene picos armónicos a la frecuencia *BPFO* de la señal de vibración original.



Figura 43. Espectro de demodulación [63].

El tono de alta frecuencia de la resonancia del rodamiento está modulado por los impactos de los elementos rodantes contra el fallo en la pista exterior. Con el fin de aislar las zonas resonantes, se debe aplicar un filtro pasa alto o pasa banda en la señal temporal, luego a través de un rectificador a diodo o detector, se rectifica la señal modulada, donde los picos negativos se conviertan en picos positivos; al pasar la señal a través de un filtro pasa bajo, se quita la oscilación debido a la resonancia y solo queda la envolvente de la señal. La señal envolvente tiene una proporción de repetición, que es igual a la frecuencia de paso del elemento rodante, pero tiene mucha más energía en la frecuencia fundamental, ya que los pulsos son más anchos o más largos en duración. El proceso de rectificación y filtrado es una demodulación de amplitud; a la señal demodulada se le puede realizar un análisis de frecuencias y la frecuencia de paso del elemento rodante será el componente más grande en el espectro. La ventaja más significativa de la demodulación de amplitud es que el espectro demodulado no contiene ningún ruido contaminante, lo que implica una mejora importante de la proporción señal ruido [61]. En la Figura 44, se ilustra el procedimiento de demodulación.

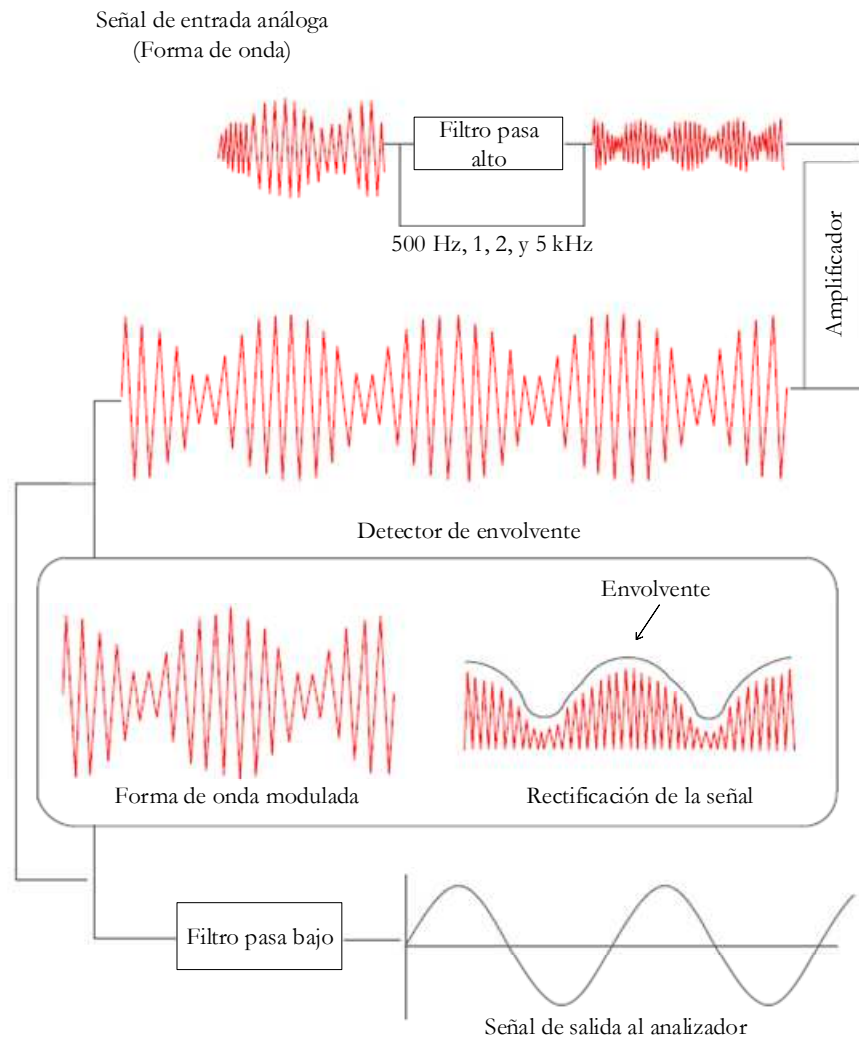


Figura 44. Proceso de demodulación [82].

5.8.3. Análisis Cepstrum

El Cepstrum se define como la transformada inversa de Fourier del logaritmo del espectro [83].

El Cepstrum de un espectro de frecuencia $f(t)$ se determina usando la Ecuación 20:

$$C(q) = TF^{-1}\{\log[TF(f(t))]\} \quad (20)$$

Donde:

La abscisa q es conocida como “*Quefreny*”, TF^{-1} y TF son la transformada inversa de Fourier y la transformada de Fourier respectivamente.

En el análisis Cepstrum se trata a un espectro como si fuera una forma de onda y se hace otro espectro a partir del primero. El eje horizontal del Cepstrum está relacionado con el tiempo, pero no es tiempo en el sentido convencional, se podría llamar tiempo periódico y su unidad de medida es en segundos [61].

El Cepstrum es una especie de “espectro del espectro”. El Cepstrum está relacionado con la función de autocorrelación; si el espectro no se hace a una escala logarítmica, el cálculo del Cepstrum producirá la autocorrelación. La Ecuación 21 representa la función autocorrelación:

$$R_{xx} = TF^{-1}\{F_{xx}(f)\} \quad (21)$$

Donde:

$F_{xx}(f)$ es el espectro en potencia.

Por lo tanto, la característica distintiva del Cepstrum es la conversión logarítmica en el espectro.

5.8.3.1. Terminología Cepstral

La palabra Cepstrum es simplemente la palabra *spectrum* (espectro), con las primeras letras en orden inverso. Los diferentes parámetros del Cepstrum se mencionan en la Tabla 15.

Tabla 15. Terminología Cepstral [83].

Definición en dominio de la frecuencia	Definición en dominio quefrequency
SPECtrum	CEPStrum
FREQUency	QUEFRency
HARmonic	RAHmonic
MAGnitude	GAMnitude
PHASe	SAPHe
FILter	LIFter
Low pass filter	Short pass lifter
Frequency analysis	Quefrequency alanalysis

La *Quefrequency* es el eje horizontal del Cepstrum y tiene unidades de tiempo periódico. *Rahmonic* son componentes cepstrales que se localizan a incrementos de tiempo equivalentes.

5.8.3.2. Aplicación del Cepstrum para la detección de fallos en rodamientos

El Cepstrum sirve para detectar estructuras periódicas en el espectro como: armónicos y bandas laterales. Es una herramienta muy útil para la detección de fallos en rodamientos cuando estos generan armónicos discretos en el espectro. Robert Randall uno de los principales impulsores en cuanto a la posibilidad de usar Cepstrum para detectar y cuantificar familias de componentes espectrales espaciadas periódicamente, observó que no solo detectaba familias de armónicos, sino también familias de bandas laterales moduladas igualmente espaciadas. La mayoría de bandas laterales son accesibles solamente en un espectro con una escala de amplitud logarítmica, por lo tanto, el Cepstrum es una forma ideal para recoger la información de un gran número de bandas laterales en un número relativamente pequeño de *rahmonics* [83].

La Figura 45 presenta una señal de vibración en el dominio del tiempo y la frecuencia de un rodamiento con fallo en la pista interna a una velocidad constante de 2000 rpm y una carga de 50 Nm. La Figura 45a muestra picos altos repetidos periódicamente que representan los impactos del rodamiento, que se repiten aproximadamente cada 0.03 segundos (frecuencia de rotación 33.33 Hz), los armónicos del rodamiento se indican en el dominio de la frecuencia en la gama de alta frecuencia como se presenta en la Figura 45b [84].

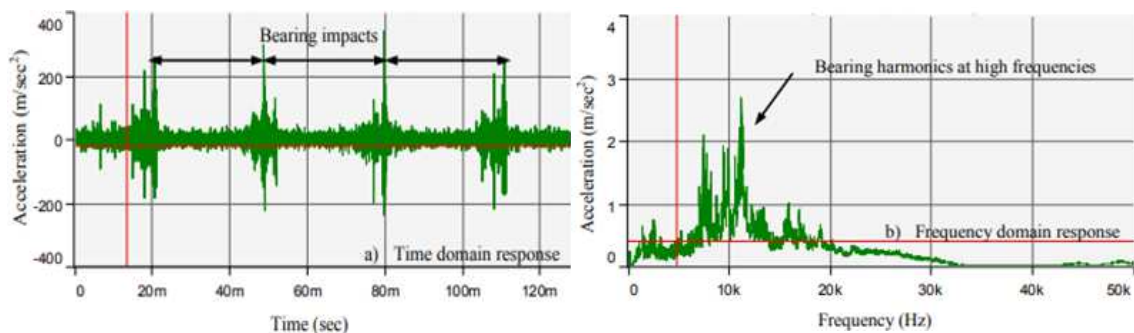


Figura 45. Señal de vibración de un rodamiento con fallo en pista interna, velocidad de entrada 2000 rpm y carga 50 Nm [84].

La Figura 46 presenta de manera más clara la severidad del fallo en el rodamiento, al aplicar el análisis Cepstrum se puede visualizar algunos grupos de armónicos que se repiten a la frecuencia de rotación (33.33 Hz) y los armónicos aproximadamente cada 2.829 ms (353.5 Hz), valor que representa la frecuencia de fallo en pista interna del rodamiento, localizado en el eje de entrada de una caja de cambios de un vehículo [84].

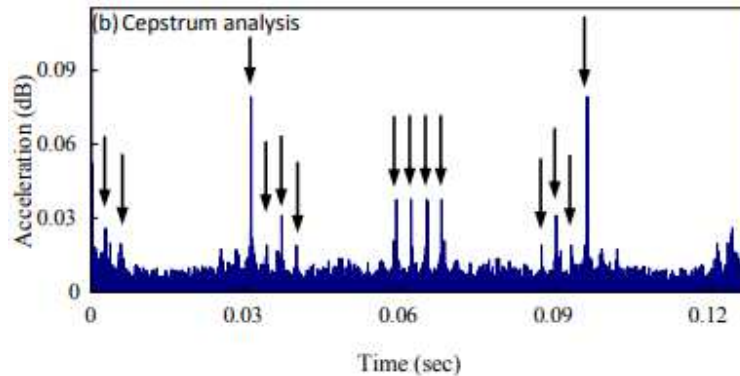


Figura 46. Análisis Cepstrum aplicado a una señal de un rodamiento con fallo en pista interna, con velocidad de rotación 2000 rpm y carga 50 Nm [84].

5.8.3.3. Ventajas del Cepstrum comparado con el análisis frecuencial

Una ventaja directa del Cepstrum hace referencia a la posición de los sensores, un cambio no influye mayormente, debido a la propiedad donde convierte en suma la convolución entre la función fuerza y función respuesta. En cambio, en el análisis frecuencial, un cambio en la posición del sensor podría modificar la forma general del espectro e influir en los armónicos o bandas laterales [83].

Otra ventaja resulta del hecho de que toda familia de bandas laterales se reduce básicamente a una línea en el Cepstrum, facilitando el monitoreo. En la práctica, suelen aparecer más de un *rahmonic* por familia de banda lateral, espaciados a la misma *quefreny*. Después de haber reconocido una serie de *rahmonics*, es suficiente considerar el primero o *rahmonic* fundamental que contiene la información de la altura media significativa de la banda lateral, mientras que los demás *rahmonics* representan la distorsión del *rahmonic* fundamental [83].

5.9. Rodamientos

5.9.1. Introducción

Los rodamientos son mecanismos que facilitan el movimiento relativo entre dos componentes de una máquina, empleados para orientar y minimizar la fricción de un eje en maquinaria rotativa, son vitales para el desempeño de la máquina por su gran capacidad de carga y confiabilidad. La detección y diagnóstico en etapas incipientes de fallo, es importante para evitar el mal funcionamiento y la aparición de fallos durante su operación [15].

5.9.2. Estructura de un rodamiento

Los rodamientos están formados por cuatro componentes fundamentales: pista interna, pista externa, jaula y elementos rodantes, como se presenta en la Figura 47.



Figura 47. Componentes de un rodamiento.

A continuación, se presenta una breve descripción de cada componente de un rodamiento:

- Pista interna: esta componente tiene la tarea de asegurar el rodamiento sobre el eje.
- Pista externa: la tarea principal es de fijar el eje y a la vez permitirle girar con libertad.
- Elementos rodantes: permiten el movimiento entre la pista interna y externa, pueden ser: bolas, esferas, agujas, rodillos cilíndricos o cónicos, se mantienen separados y guiados por la jaula.
- Jaula: tiene la tarea de mantener los elementos rodantes separados y guiados.

5.9.3. Tipos de rodamientos

La Figura 48 ilustra la clasificación de los rodamientos según el elemento rodante y su forma de trabajo.

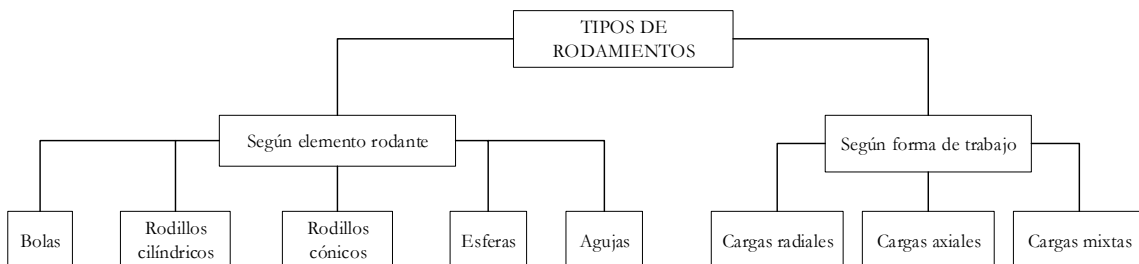


Figura 48. Esquema de clasificación de rodamientos.

Los rodamientos según el elemento rodante tienen una clasificación muy extensa, cabe mencionar que en este proyecto se trabaja con rodamientos de rodillos cónicos. En la Figura 49, se presenta un esquema de clasificación de los tipos de rodamientos de rodillos cónicos.

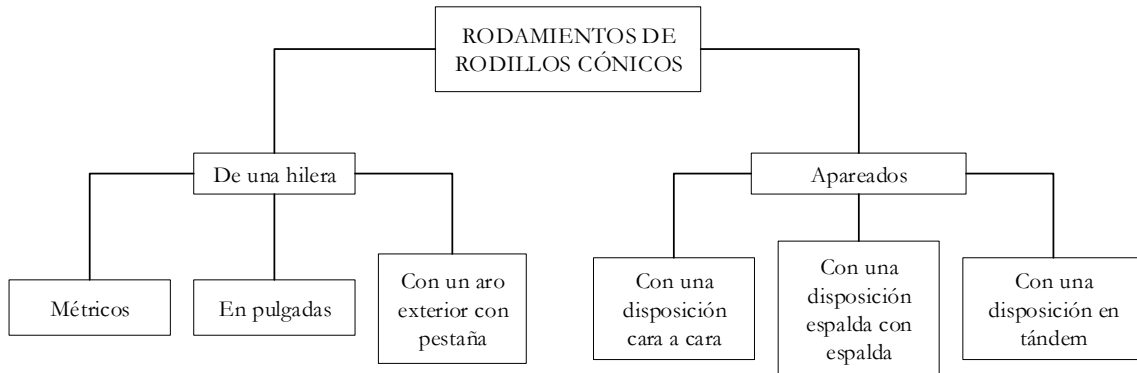


Figura 49. Esquema de clasificación de rodamientos de rodillos cónicos.

5.9.4. Rodamientos de rodillos cónicos

5.9.4.1. Características

Los rodamientos de rodillos cónicos se han diseñado para soportar cargas combinadas, es decir, cargas que actúan de modo radial y axial simultáneamente. Las líneas de proyección de los caminos de rodadura convergen en un mismo punto en el eje del rodamiento, tal como se observa en la Figura 50, para proporcionar una rodadura precisa y una fricción reducida. La capacidad de carga axial de los rodamientos de rodillos cónicos aumenta cuando se incrementa el ángulo de contacto α [85].

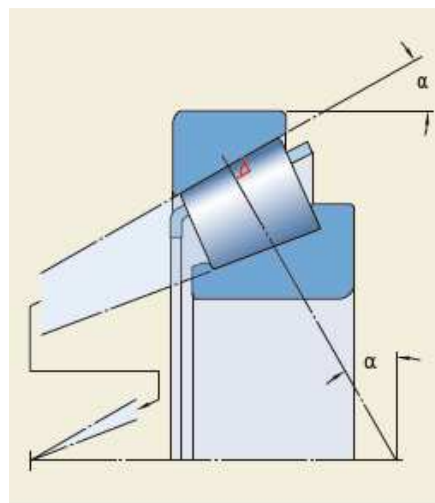


Figura 50. Líneas de proyección de los caminos de rodadura [85].

5.9.4.2. La Jaula

Las jaulas son uno de los elementos críticos en un rodamiento, tienen como misión mantener una distancia adecuada entre los elementos rodantes, con el objetivo de que exista mínimo rozamiento para evitar la generación de calor en el rodamiento. Estas jaulas son de tipo ventana, centrada respecto del rodillo. Generalmente son producidas con acero estampado, pero también son fabricadas con material polimérico poliamida 66 y PEEK reforzada con fibra de vidrio [85].

5.9.5. Frecuencias características en los rodamientos

Las frecuencias características pueden ser determinadas a partir de la geometría del rodamiento y su velocidad de rotación, pero dependen principalmente de su ubicación, estas frecuencias son designadas como: frecuencia de paso de elementos rodantes en la pista externa (*BPFO*, del inglés *ball pass frequency outer race*), frecuencia de paso de elementos rodantes en la pista interna (*BPFI*, del inglés *ball pass frequency inner race*), frecuencia de giro de los elementos rodantes (*BSF*, del inglés *ball spin frequency*) y frecuencia fundamental de la jaula (*FTF*, del inglés *fundamental train frequency*), es posible calcular estas frecuencias de manera analítica o mediante el empleo de algún software comercial [15], [83]. Las frecuencias características de los rodamientos se determinan por la Ecuación 22, 23, 24 y 25 como se presenta a continuación:

$$BPFO = \frac{f * n}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (22)$$

$$BPFI = \frac{f * n}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (23)$$

$$BSF = \frac{f * D}{2d} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right] \quad (24)$$

$$FTF = \frac{f}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right) \quad (25)$$

Donde:

- f es la velocidad de rotación del eje.
- n es el número de elementos rodantes.
- d es el diámetro del elemento rodante.
- D es el diámetro de paso del rodamiento, y
- α el ángulo de contacto.

5.10. Fallos en rodamientos

Los fallos en los rodamientos se clasifican estrictamente de acuerdo a sus causas primarias. Sin embargo, no siempre es fácil distinguir entre causas y características (síntomas). En la norma internacional ISO 15243:2017, los modos de fallo son clasificados en seis grupos principales y varios subgrupos [86], que se presentan en la Figura 51.

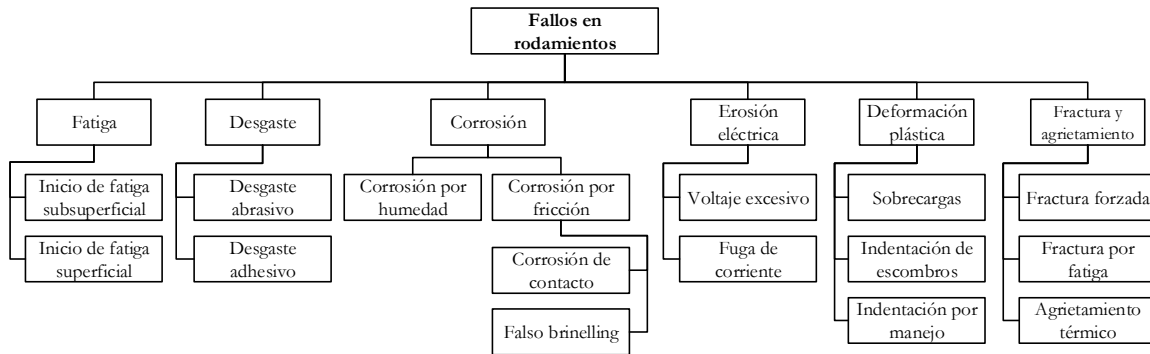


Figura 51. Clasificación de fallos en rodamientos según la norma ISO 15243 [86].

6. MARCO METODOLÓGICO

6.1. Metodología para la adquisición de señales acústicas, vibracionales y de corriente

6.1.1. Banco de pruebas experimentales

La experimentación para el presente proyecto técnico se ha llevado a cabo en el laboratorio de vibraciones mecánicas de la Universidad Politécnica Salesiana, que consta de diferentes equipos para el monitoreo de la condición en maquinaria rotativa; pero para este caso se implementa un compresor recíprocante EBG250 en el cual se ubicarán los sensores para la adquisición de las señales acústicas, vibracionales y de corriente.

El banco consta de tres unidades principales: (i) unidad de mando, (ii) unidad de sistema de adquisición de datos y (iii) unidad de maquinaria recíprocante, en la Figura 52 se presenta la disposición de las unidades que conforman el banco para la experimentación.

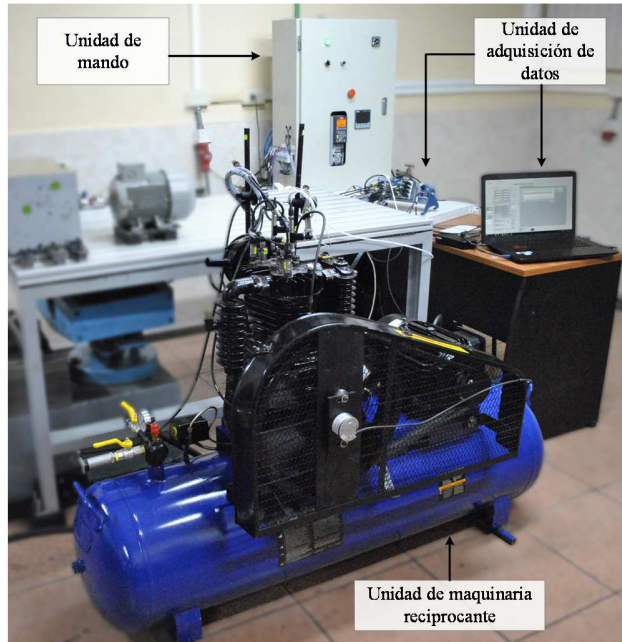


Figura 52. Banco de pruebas experimentales para compresor recíprocante.

Los elementos que conforman el banco de pruebas son los siguientes: un compresor recíprocante de dos etapas, un motor de inducción de 5.5 HP, dos poleas con correas en V y un tanque de aire de 250 litros. En cuanto a instrumentos de medición se emplean: un tacómetro, cuatro acelerómetros, tres pinzas de corriente y dos micrófonos condensadores, todos estos elementos mecánicos y eléctricos son alimentados hacia un ordenador portátil a través de un chasis de adquisición de datos (DAQ, NI cDAQ) en un programa desarrollado por los miembros del grupo de investigación.

En la Figura 53 se presenta las partes principales del compresor EBG250 de marca BP.

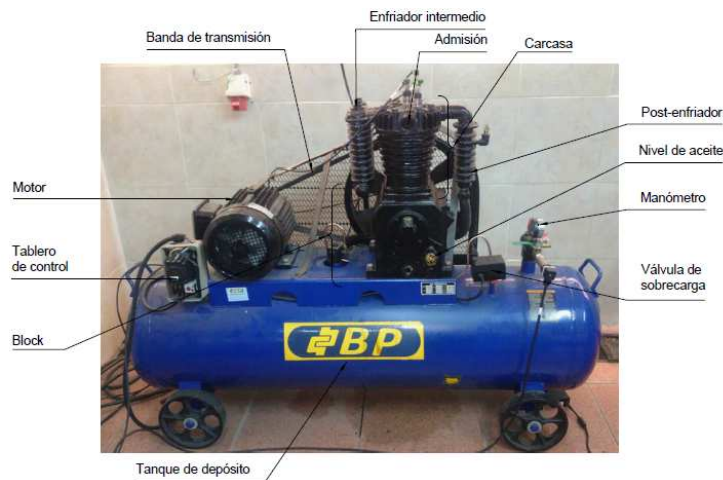


Figura 53. Partes principales del compresor recíprocante EBG250.

En la Tabla 16, se presenta los valores de los parámetros de operación del compresor EBG250.

Tabla 16. Valores de los parámetros de operación del compresor EBG250.

Parámetro	Unidad	Valor
Velocidad del motor	rpm	3470
Alimentación del motor	V	360
Potencia del motor	HP	5
Tipo de transmisión	-	Polea-correas V
Relación de transmisión	-	4,5:1
Velocidad del eje-cigüeñal	rpm	770
Capacidad del tanque	l	250
Número de cilindros	-	2
Carrera del pistón 1era etapa	mm	89
Carrera del pistón 2da etapa	mm	89
Diámetro del pistón 1era etapa	mm	105
Masa del pistón 1era etapa	g	470
Diámetro del pistón 2da etapa	mm	55
Masa del pistón 2da etapa	g	520
Longitud de la biela (1era y 2da etapa)	mm	180
Masa de la biela (1era y 2da etapa)	g	750
Diámetro muñón del cigüeñal	mm	40
Elevación máxima de la válvula de admisión	mm	1,5
Elevación máxima de la válvula de descarga	mm	1,2
Masa del plato de válvula (1era y 2da etapa)	g	6,3
Masa de resorte de válvula (1era y 2da etapa)	g	1,5
Diámetro exterior del plato de válvula (1era y 2da etapa)	mm	35
Diámetro interior del plato de válvula (1era y 2da etapa)	mm	14

6.1.2. Proceso experimental

La experimentación se plantea de acuerdo a un proceso establecido previamente que permita garantizar la reproducibilidad en la adquisición de datos para las señales acústicas, vibracionales y de corriente. La Figura 54 ilustra el proceso citado.

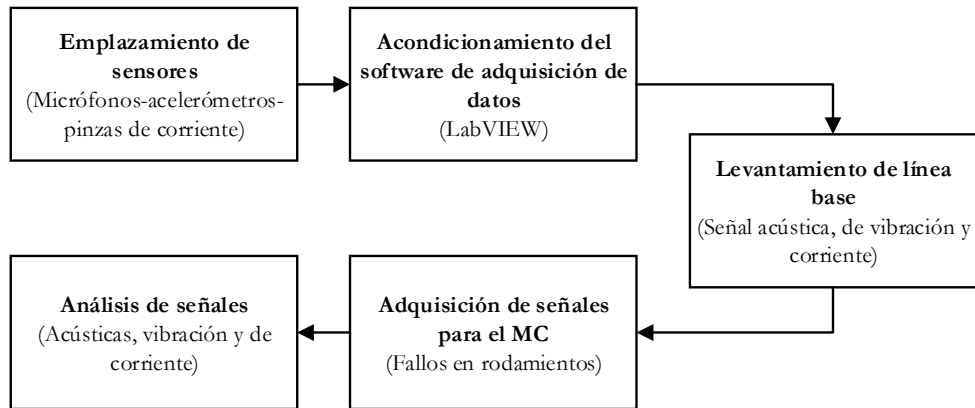


Figura 54. Proceso experimental para la adquisición de señales acústicas, vibracionales y de corriente.

6.1.2.1. Emplazamiento de sensores

6.1.2.1.1. Conexión de sensores

La secuencia de conexión de los sensores se presenta en la Figura 55, donde el micrófono y el preamplificador se compactan en un solo elemento que se conecta directamente al módulo de adquisición mediante cable con entrada y salida tipo BNC. En cambio, el acelerómetro no necesita de un preamplificador, dado que las señales tienen la amplitud suficiente para ser operadas computacionalmente y se conecta directamente al módulo de adquisición mediante cable con entrada de dos pines tipo MIL-C-5015 y salida tipo BNC. La conexión de las pinzas amperimétricas se las realiza de manera directa con conector de salida BNC.

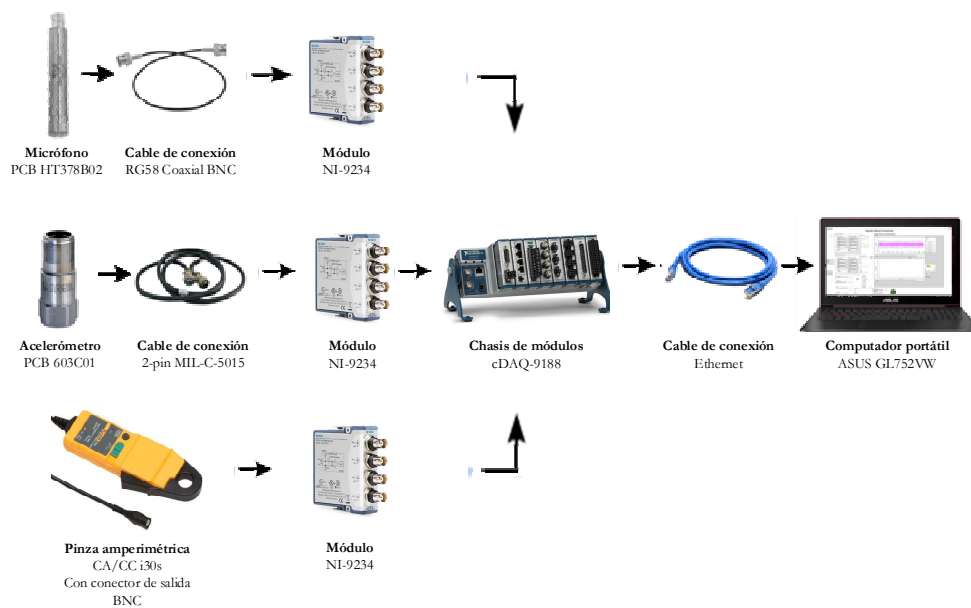


Figura 55. Secuencia de conexión del sistema de adquisición de señales para la experimentación.

El módulo de adquisición de cuatro canales NI-9234 recepta las señales de los sensores a una frecuencia de 50 kHz por cada canal y está montado directamente sobre un chasis de módulos NI cDAQ-9188, que al mismo tiempo está conectado al computador portátil mediante cable Ethernet, el cual controla la adquisición con el programa desarrollado en LabVIEW y más adelante se realiza el análisis de las señales capturadas mediante el programa desarrollado en Matlab.

6.1.2.1.2. Emplazamiento de los micrófonos

En la Figura 56 se presenta el plano de emplazamiento de los micrófonos capacitivos (Mic1 y Mic2) en el compresor EBG-250, los cuales forman un arreglo en línea con el eje del cigüeñal a 3cm de la superficie del bloque de válvulas, con el fin de recolectar de forma global las señales que se propagan verticalmente hacia arriba de los elementos críticos que producen señales acústicas cuando el compresor se encuentra en operación.

Debido a que las corrientes de aire afectan directamente la sensibilidad del micrófono y a más de eso, generan señales no deseadas (ruido acústico), se descartó la posibilidad de ubicar los micrófonos en la parte inferior del compresor, dado que esta zona es refrigerada por la corriente de aire que genera la polea tipo ventilador que transmite el movimiento rotativo hacia el cigüeñal.

Con el propósito de garantizar la estabilidad del micrófono y no adquirir ruido por vibraciones mecánicas, se debe emplear para la instalación del micrófono los accesorios adecuados como sujetador, base y pedestal.

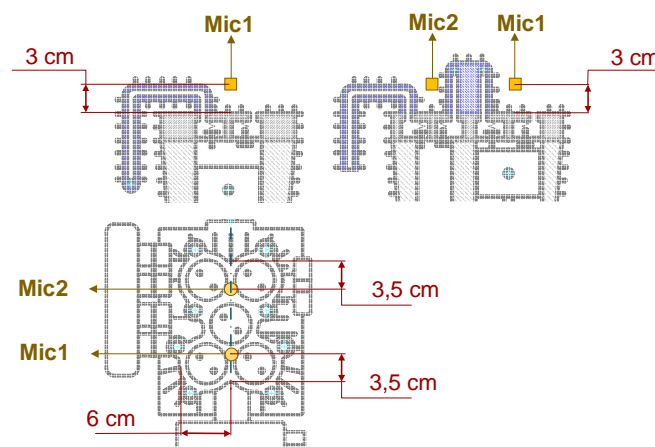


Figura 56. Plano de emplazamiento de los micrófonos capacitivos en el compresor recíprocante EBG-250.

6.1.2.1.3. Emplazamiento de los acelerómetros

Los acelerómetros son sensores de contacto, esto significa que deben ir emplazados directamente en la superficie del compresor, mientras mejor sea la sujeción la presencia de ruido será mínima. En el caso del acelerómetro empleado en este trabajo, la sujeción se realiza por medio de un prisionero con rosca de $\frac{1}{4}$ pulgada, por este motivo se han escogido puntos de localización donde la superficie sea plana (horizontal o vertical) y con espacio conveniente para emplazar el sensor.

En la Figura 57 se ilustra el plano de emplazamiento de los acelerómetros en el compresor recíprocante EBG-250, el acelerómetro 1 (A1) está localizado de forma vertical junto a la válvula de admisión de la primera etapa. El acelerómetro 2 (A2) se ubica de forma vertical junto a la válvula de descarga de la segunda etapa. Por otra parte, los acelerómetros 3 y 4 (A3, A4) están emplazados de forma vertical (a las 12:00) y horizontal (a las 3:00) respectivamente, con respecto al eje de giro del rodamiento 32208 que soporta mayor carga, dado que se encuentra en el punto donde se transmite el movimiento de la polea al cigüeñal.

La posición y ubicación para los acelerómetros, están de acuerdo a la norma internacional ISO 20816-8:2018 “*Mechanical vibration -- Measurement and evaluation of machine vibration -- Part 8: Reciprocating compressor systems*” [87].

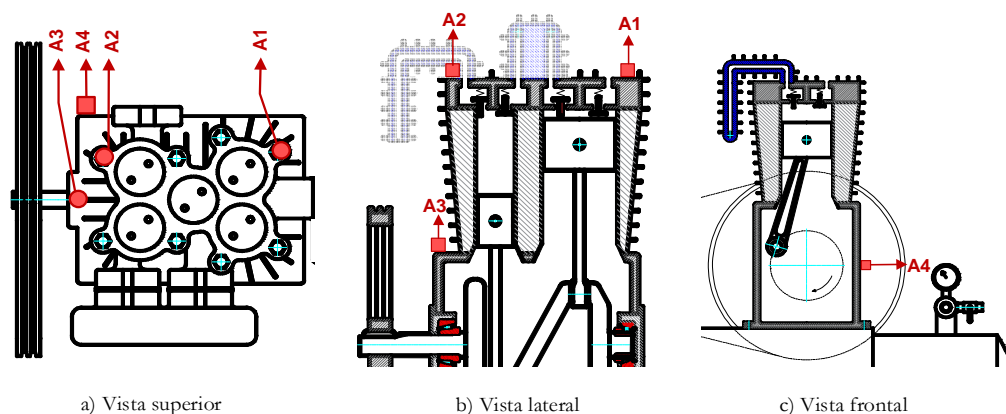


Figura 57. Plano de emplazamiento de los acelerómetros en el compresor recíprocante EBG-250.

Con el propósito de impedir la contaminación de la señal adquirida, es necesario comprobar que el cable de los acelerómetros no se encuentre en contacto con partes móviles del compresor o que reciban vibración externa.

6.1.2.1.4. Emplazamiento de las pinzas

Las tres pinzas amperimétricas con sensor de efecto Hall, sujetan entre sus tenazas el cable conductor donde se encuentran las líneas de corriente que alimentan de energía al motor de inducción del compresor, es importante resaltar que, al llevar a cabo el análisis de firma de corriente del motor, se realiza una medición de corrientes de estator del motor, por este motivo, las pinzas deben ser emplazadas al inicio del suministro de energía principal del sistema.

La Figura 58 representa el esquema de emplazamiento de las tres pinzas amperimétricas (CVC1, CVC2, CVC3, respectivamente). En la Figura 59 se puede observar la conexión real de las pinzas amperimétricas con el conductor.

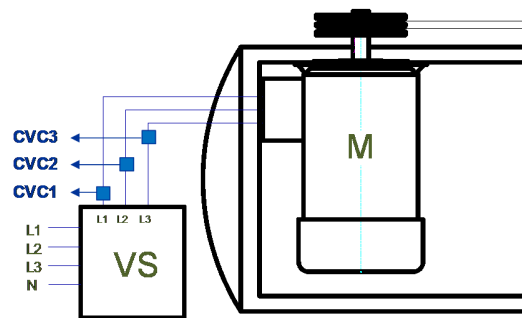


Figura 58. Esquema de conexión de las tres pinzas amperimétricas.



Figura 59. Conexión real de las tres pinzas amperimétricas.

6.1.2.2. Acondicionamiento del software de adquisición de datos

El GIDTEC ha desarrollado un programa en el software LabVIEW de adquisición de señales para el monitoreo de la condición entre las cuales se encuentran las señales acústicas, vibracionales y de corriente. En la Figura 60 se presentan las partes principales de la interfaz gráfica del programa de adquisición “*Diagnosis Manual Compressor*”.

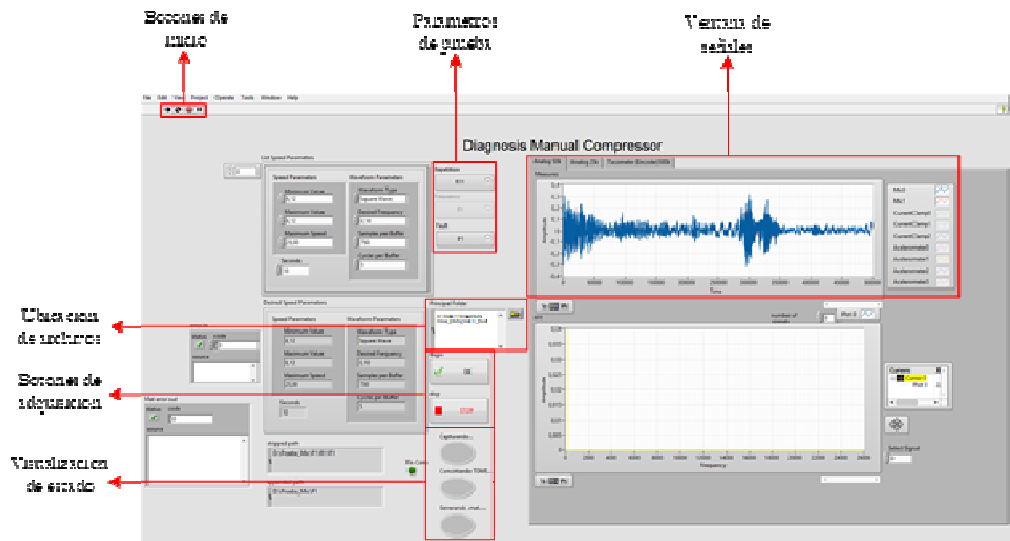


Figura 60. Partes principales de la interfaz gráfica del programa de adquisición de señales.

6.1.2.2.1. Descripción de la interfaz gráfica

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

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

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

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

Ventana de señales: en esta ventana se verifica de manera visual las señales adquiridas.

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

6.1.2.3. Línea base

La línea base consiste en el conjunto de datos medidos cuando las condiciones de funcionamiento del equipo son aceptables y estables. La línea base debe definir con precisión la condición estable inicial de la máquina, operando en su estado normal de funcionamiento. Las mediciones posteriores pueden compararse con este conjunto de datos para detectar cambios cuando los fallos sean implantados en los elementos mecánicos críticos del compresor.

6.1.2.3.1. Validación de línea base

Una vez culminado el emplazamiento de sensores y la verificación de las condiciones de operación se da paso a la validación de la línea base. Para ello, se debe llevar a cabo el proceso que se describe en la Figura 61.

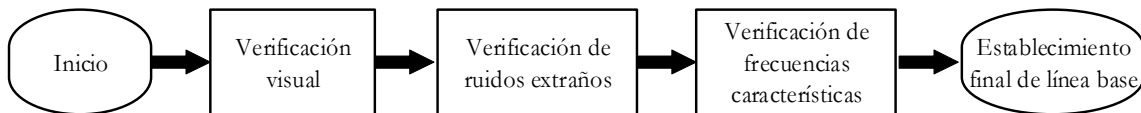


Figura 61. Proceso de validación de línea base.

6.1.2.3.1.1. Verificación visual

La verificación visual permite examinar desalineación, desajuste de pernos, mala conexión de sensores, intersección de cables, entre otros.

6.1.2.3.1.2. Verificación de ruidos extraños

El siguiente paso consiste en verificar que no se genere ruidos anormales en el instante de encendido del compresor, los cuales pueden ser un indicador de mal ensamble o fallo en algún elemento mecánico. Es indispensable para esta verificación una persona con experiencia en el mantenimiento de compresores.

6.1.2.3.1.3. Verificación de frecuencias características

Un compresor reciprocante en condiciones estables genera frecuencias características determinadas por la velocidad de giro y la relación de transmisión. Para la verificación de la línea base en este trabajo se emplea solamente la señal de vibración, debido al respaldo bibliográfico relacionado a vibración en compresores reciprocantes.

Para examinar el espectro de vibración del compresor en condiciones normales se calculan las frecuencias características empleando los datos físicos y de operación de los elementos del compresor. Las frecuencias calculadas se presentan en la Tabla 17 y en la Figura 62 se grafica la señal de vibración en el dominio de la frecuencia adquirida por el acelerómetro 3 (A3) y se marcan los valores de las frecuencias fundamentales del compresor reciprocante.

Tabla 17. Frecuencias características del compresor presentes en la señal de vibración.

Elemento	Datos	Fórmula	Frecuencia [Hz]
Motor	V_{motor} = velocidad nominal = 3470 rpm	$f_{motor} = \frac{V_{motor}}{60}$	57,83
	D_{pm} = diámetro polea motor= 90 mm		
Cigüeñal	D_{pv} = diámetro polea ventilador= 420 mm	$f_{cigüeñal} = \frac{D_{pm} * f_{motor}}{D_{pv}}$	12,75
	Cigüeñal conectado a la polea ventilador		
	$f_{cigüeñal}$ = Frecuencia cigüeñal = 12,75 Hz		
Correa	D_{pv} = diámetro polea ventilador= 420 mm	$f_{correa} = \frac{3,14 * f_{cigüeñal} * D_{pv}}{L_b}$	9,34
	L_b = longitud de la correa= 1800mm		
Pistones	N_p = número de pistones= 2	$f_{pistones} = 2 * f_{cigüeñal}$	25,5

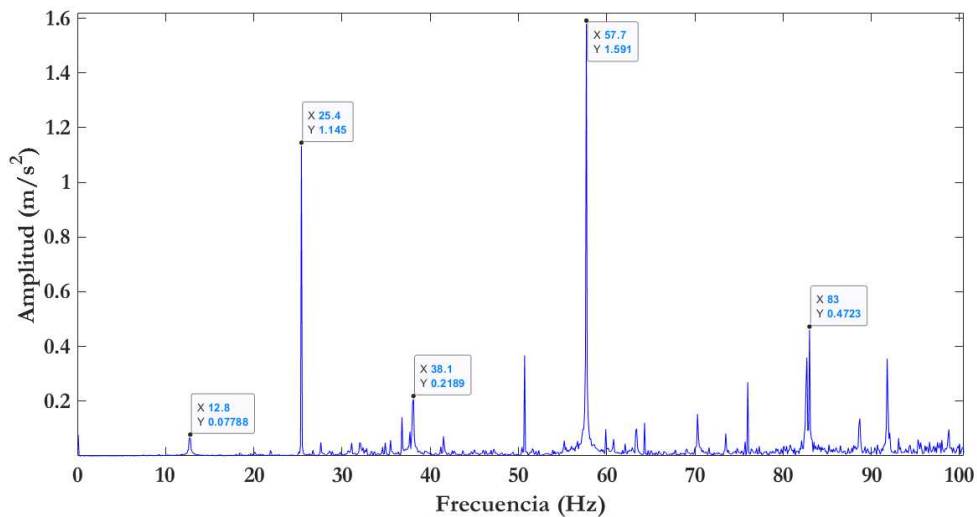


Figura 62. Señal de vibración en el dominio de la frecuencia adquirida por el acelerómetro A3.

En la Tabla 18 se presenta las características de cada punto resaltado en el espectro de vibración.

Tabla 18. Características de las frecuencias fundamentales del compresor presentes en la señal de vibración adquirida por el acelerómetro A3.

Punto	Frecuencia [Hz]	Amplitud	Denominación
1	12,8	0,07788	Giro del cigüeñal
2	25,4	1,145	Ciclos de pistón
3	38,1	0,2189	3X de giro de cigüeñal
4	57,7	1,591	Giro del motor
5	83	0,4723	Giro de motor + Ciclos de pistón

6.1.2.3.2. Resultado de línea base

El espectro de la señal acústica de la línea base se presenta en la Figura 63, el espectro de la señal de vibración en la Figura 64 y el espectro de la señal de corriente en la Figura 65. Las señales posteriores adquiridas con los fallos implantados en los rodamientos del compresor se comprueban con esta línea base, la que nos permite detectar las variaciones que se presenten en las señales, según el incremento de la severidad del fallo.

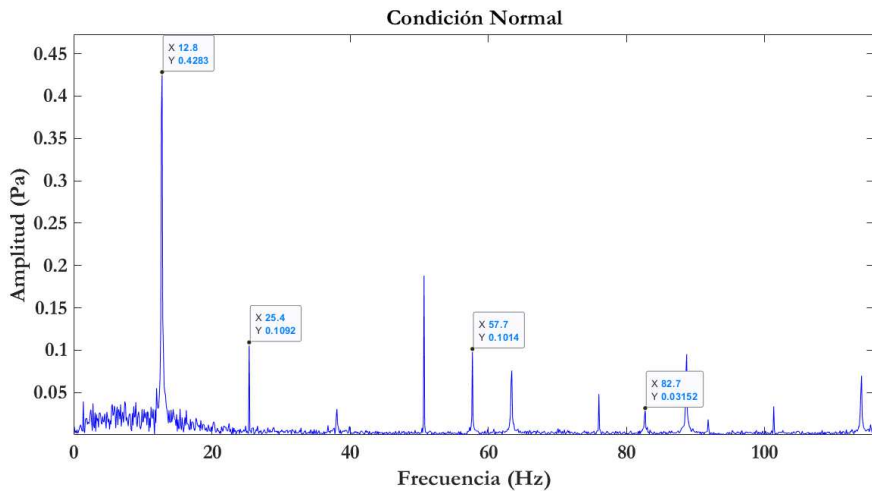


Figura 63. Señal acústica en el dominio de la frecuencia del compresor recíprocante EBG250 en condición normal; señal adquirida por el micrófono Mic1.

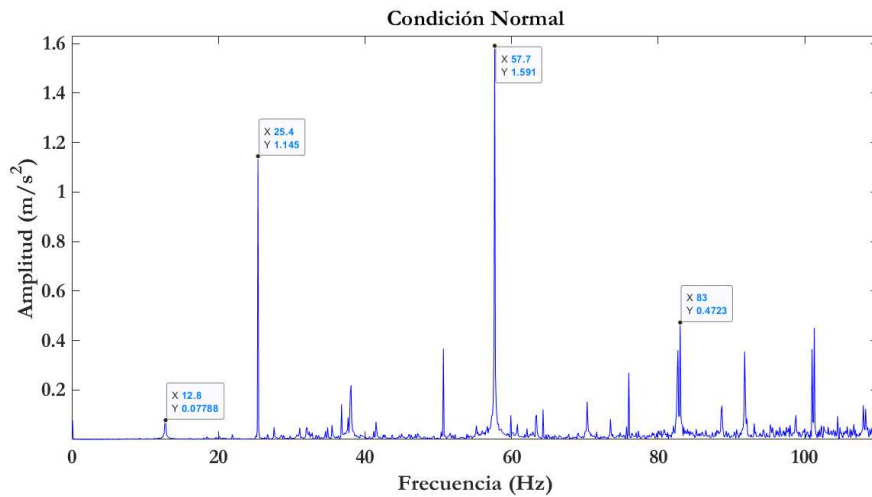


Figura 64. Señal de vibración en el dominio de la frecuencia del compresor recíprocante EBG250 en condición normal; señal adquirida por el acelerómetro A3.

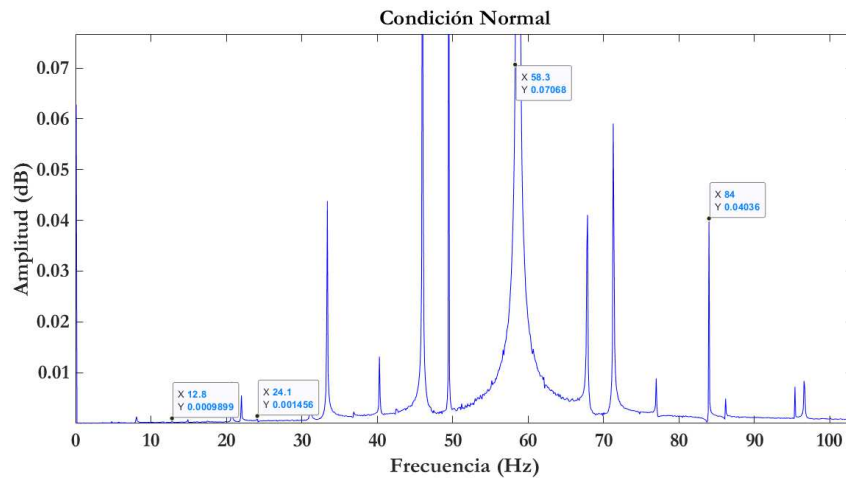


Figura 65. Señal de corriente en el dominio de la frecuencia del compresor recíprocante EBG250 en condición normal; señal adquirida por la pinza amperimétrica CVC2.

6.1.2.4. Adquisición de señales

6.1.2.4.1. Codificación de rodamientos

En el compresor EBG250 se ha implantado fallos en el rodamiento B1 del eje del cigüeñal. La codificación de los rodamientos es presentada en la Figura 66. El primer término corresponde al código interno del rodamiento (B1 o B2); el segundo término (_#) hace referencia al tipo de fallo: condición normal (N), agrietamiento en pista interna (1), agrietamiento en elemento rodante (2) y agrietamiento en pista externa (3).

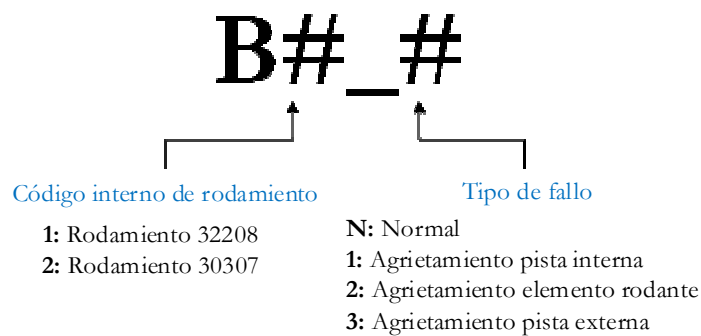


Figura 66. Codificación para el tipo de fallo en rodamientos.

6.1.2.4.2. Cálculo de frecuencias características de rodamientos

En la Tabla 19, se presenta las dimensiones del rodamiento 32208 y en la Tabla 20, las dimensiones del rodamiento 30307, estos datos permiten llevar a cabo el cálculo de las frecuencias características de los rodamientos del compresor.

Tabla 19. Datos de las dimensiones del rodamiento 32208.

Dimensiones del rodamiento 32208	
Diámetro del círculo primitivo [Dp] (mm)	63,405
Diámetro del elemento rodante [d] (mm)	9
Número de elementos rodantes [n]	17
Ángulo de contacto [θ] (grados)	13,42
Velocidad de rotación (rpm)	768

Tabla 20. Datos de las dimensiones del rodamiento 30307.

Dimensiones del rodamiento 30307	
Diámetro del círculo primitivo [Dp] (mm)	62,829
Diámetro del elemento rodante [d] (mm)	11
Número de elementos rodantes [n]	14
Ángulo de contacto [θ] (grados)	11,85
Velocidad de rotación (rpm)	768

Empleando la Ecuación 22, se obtiene la frecuencia de fallo en pista externa (*BPFO*) de los rodamientos del compresor.

$$BPFO_{32208} = \frac{f * n}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$
$$BPFO_{32208} = \frac{12,8 * 17}{2} \left(1 - \frac{9}{63,405} \cos 13,42 \right)$$
$$BPFO_{32208} = 93,778 \text{ Hz}$$

$$BPFO_{30307} = \frac{f * n}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$BPF_{30307} = \frac{12,8 * 14}{2} \left(1 - \frac{11}{62,829} \cos 11,85 \right)$$

$$\mathbf{BPF_{30307} = 74,247 Hz}$$

La Ecuación 23, da como resultado la frecuencia de fallo en pista interna (*BPF*) de los rodamientos del compresor.

$$BPF_{32208} = \frac{f * n}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$BPF_{32208} = \frac{12,8 * 17}{2} \left(1 + \frac{9}{63,405} \cos 13,42 \right)$$

$$\mathbf{BPF_{32208} = 123,822 Hz}$$

$$BPF_{30307} = \frac{f * n}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$BPF_{30307} = \frac{12,8 * 14}{2} \left(1 + \frac{11}{62,829} \cos 11,85 \right)$$

$$\mathbf{BPF_{30307} = 104,953 Hz}$$

La Ecuación 24, presenta la frecuencia de giro del elemento rodante (*BSF*) de los rodamientos del compresor.

$$BSF_{32208} = \frac{f * D}{2d} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right]$$

$$BSF_{32208} = \frac{12,8 * 63,405}{2 * 9} \left[1 - \left(\frac{9}{63,405} \cos 13,42 \right)^2 \right]$$

$$\mathbf{BSF_{32208} = 44,228 Hz}$$

$$BSF_{30307} = \frac{f * D}{2d} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right]$$

$$BSF_{30307} = \frac{12,8 * 62,829}{2 * 9} \left[1 - \left(\frac{11}{62,829} \cos 11,85 \right)^2 \right]$$

$$\mathbf{BSF_{30307} = 35,482 Hz}$$

La Ecuación 25, presenta la frecuencia fundamental de la jaula (FTF) de los rodamientos de compresor.

$$FTF_{32208} = \frac{f}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$FTF_{32208} = \frac{12,8}{2} \left(1 - \frac{9}{63,405} \cos 13,42 \right)$$

$$FTF_{32208} = 5,516 \text{ Hz}$$

$$FTF_{30307} = \frac{f}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$FTF_{30307} = \frac{12,8}{2} \left(1 - \frac{11}{62,829} \cos 11,85 \right)$$

$$FTF_{30307} = 5,303 \text{ Hz}$$


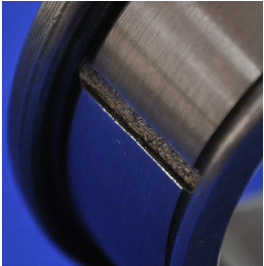

6.1.2.4.3. Plan experimental


El plan experimental por nombre “Detección de fallos en el compresor recíprocante EBG-250”, con formato establecido en el GIDTEC, presenta los parámetros para la experimentación en la detección y severidad de fallos en rodamientos del compresor recíprocante.

6.1.2.4.3.1. Patrones de fallo en el rodamiento 32208

La Tabla 21 presenta el código, modo y descripción del fallo, junto con el esquema y la foto de la localización del fallo en cada uno de los componentes del rodamiento 32208.

Tabla 21. Patrones de fallo en el rodamiento 32208.

Posición	Código de fallo	Modo de fallo	Descripción del fallo	Esquema	Foto
B1	N	Normal	Condición normal		
B1	B1_1	Agrietamiento	<p>Técnica EDM</p> <p>Posición: alineado con el eje de rotación</p> <p>Longitud: Toda la pista (interna)</p> <p>Ancho: 2,00 mm</p> <p>Profundidad: 1,00 mm</p>		
B1	B1_2	Agrietamiento	<p>Técnica EDM</p> <p>Posición: alineado con el eje de rotación</p> <p>Longitud: Todo el elemento</p> <p>Ancho: 1,00 mm</p> <p>Profundidad: 0,50 mm</p>		

Posición	Código de fallo	Modo de fallo	Descripción del fallo	Esquema	Foto
B1	B1_3	Agrietamiento	<p>Técnica EDM</p> <p>Posición: alineado con el eje de rotación</p> <p>Longitud: Toda la pista (externa)</p> <p>Ancho: 2,00 mm</p> <p>Profundidad: 1,00 mm</p>		

6.1.2.4.4. Resultado del plan experimental

Finalmente, se presentan los resultados de las señales adquiridas de acuerdo con el plan experimental 11, “Detección de fallos del compresor recíprocante EBG-250”.

Los espectros de las señales adquiridas de los fallos implantados en el rodamiento B1 (32208) se detallan en la sección 7 “ANÁLISIS DE SEÑALES ACÚSTICAS, VIBRACIONALES Y DE CORRIENTE”.

Las señales acústicas fueron adquiridas por el micrófono Mic1 y Mic2, las señales de vibración por el acelerómetro A3 y las señales de corriente por las pinzas amperimétricas CVC1, CVC2 y CVC3.

6.1.2.4.4.1. Detalles de las bases de datos

En la Tabla 22, se presenta un resumen de la base de datos # 1, en la Tabla 23 de la base de datos # 2 y en la

Tabla 24 de la base de datos # 3, pruebas que han sido realizadas para detección de fallos en rodamientos.

Tabla 22. Resumen de base de datos # 1 para fallos en rodamientos.

BASE DE DATOS # 1	
Número de carpetas	4 (P1 ... P4)
Tamaño de cada carpeta	540 MB
Archivos por carpeta	15
Tamaño de cada archivo	36.8 MB
Número de archivos	60
Tamaño de la base de datos	2.10 GB
Nombre de la base de datos sin parchar	Unpatched_Raw_Data_Bearings_Faults_DB_011
Nombre de la base de datos	Raw_Data_Bearings_Faults_DB_011

Tabla 23. Resumen de base de datos # 2 para fallos en rodamientos.

BASE DE DATOS # 2		
Nombre de base de datos	ELEMENTO RODANTE	PISTA EXTERNA
Número de carpetas	6 (P1 ... P6)	6 (P1 ... P6)
Tamaño de cada carpeta	-	-
Archivos por carpeta	20	20
Tamaño de cada archivo	-	-
Número de archivos	120	120
Tamaño de la base de datos	-	-
Nombre de la base de datos sin parchar	Raw_Data_Roller_Element_DB_012V01	Raw_Data_Outer_Race_DB_012V01
Nombre de la base de datos	Parche_Raw_Data_Roller_Element_DB_012V01	Parche_Raw_Data_Outer_Race_DB_012V01

Tabla 24. Resumen de base de datos # 3 para fallos en rodamientos.

BASE DE DATOS # 3			
Nombre de base de datos	ELEMENTO RODANTE	PISTA INTERNA	PISTA EXTERNA
Número de carpetas	7 (P1 ... P7)	8 (P1 ... P8)	8 (P1 ... P8)
Tamaño de cada carpeta	-	-	-
Archivos por carpeta	140	160	160
Tamaño de cada archivo	-	-	-
Número de archivos	1400	1600	1600
Tamaño de la base de datos	-	-	-
Nombre de la base de datos sin parchar	Unpatched_Raw_Data_Roller_Element_DB_	Unpatched_Raw_Data_Inner_Race_DB_	Unpatched_Raw_Data_Outer_Race_DB_
Nombre de la base de datos	Raw_Data_Roller_Element_DB_--	Raw_Data_Inner_Race_DB_-	Raw_Data_Outer_Race_DB_

7. ANÁLISIS DE SEÑALES ACÚSTICAS, VIBRACIONALES Y DE CORRIENTE

A continuación, se describe el proceso para llevar a cabo el análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, para obtener los resultados de la comparación de señal en condición normal con respecto a la señal con condición de fallo severo en las pistas interna, externa y elementos rodantes; los pasos a seguir se presentan en el siguiente orden:

1. En primer lugar, se realiza una comparación entre la señal en el dominio del tiempo y la señal en el dominio de la frecuencia con el fallo característico en el componente del rodamiento.
2. Luego, se presenta la comparación entre una señal en condición normal y una señal en condición de fallo severo en el componente del rodamiento, aplicando las técnicas *FFT*, envolvente y Cepstrum para las técnicas de monitoreo acústico, de vibración y corriente. Además, se presentan tablas de resultados del análisis de las señales, para cada gráfica de comparación, donde se verifican algunas observaciones realizadas a las señales acústicas, de vibración y corriente empleando las técnicas *FFT*, envolvente y cepstrum.
3. Por último, las tablas de resultados del análisis de señales se presentan en una tabla resumida, que permitirá en la sección ocho, discutir los resultados obtenidos, para determinar la técnica de monitoreo y la técnica de procesamiento de la señal que presente un desempeño satisfactorio para detección de fallos en rodamientos.

7.1. Comparación de señales en el dominio del tiempo con señales en el dominio de la frecuencia con presencia de fallo en los componentes del rodamiento.

En la Figura 67, se presenta las señales acústicas, de vibración y corriente en el dominio del tiempo del rodamiento 32208 con fallo en la pista interna, en estas señales se presenta gran cantidad de información, debido a la presencia de varios componentes en la máquina, eso dificulta poder detectar por inspección visual el fallo característico, por lo tanto, es necesario emplear las técnicas de procesamiento *FFT*, envolvente y Cepstrum para identificar las frecuencias fundamentales del compresor y detectar las frecuencias de fallo de los componentes de los rodamientos en el dominio de la frecuencia.

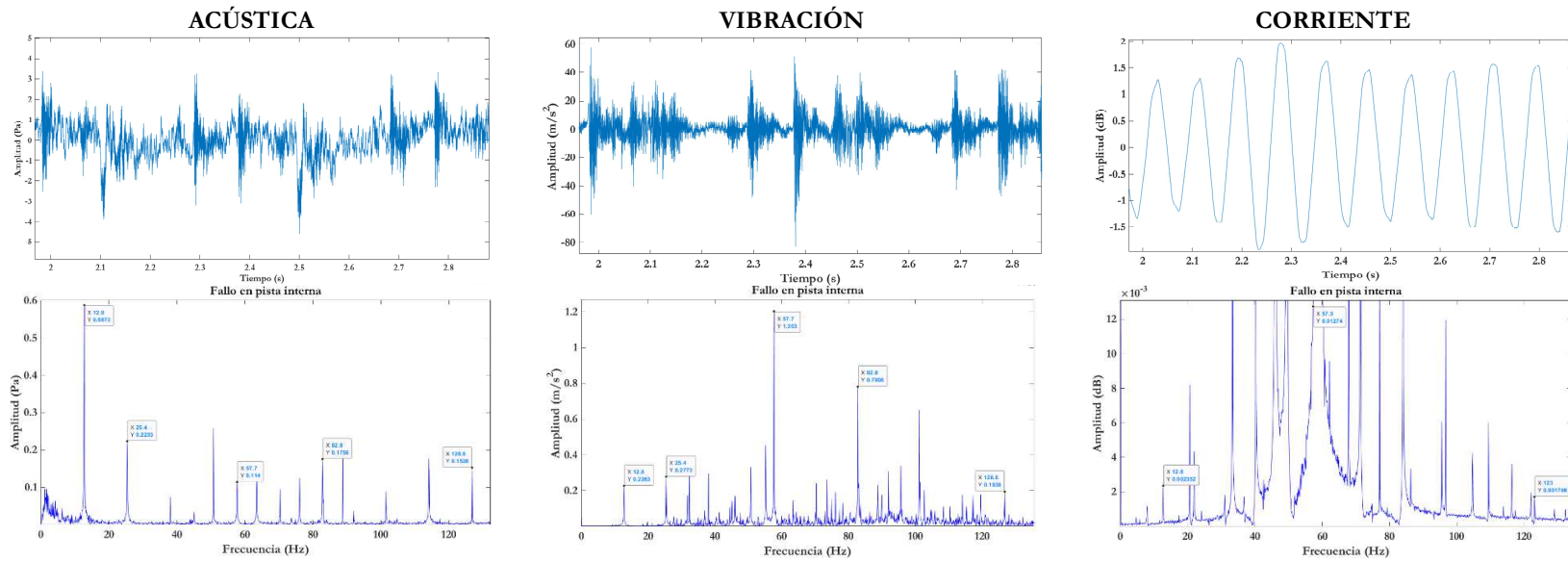


Figura 67. Señales acústicas, de vibración y corriente en el dominio del tiempo y la frecuencia para fallo en pista interna del rodamiento 32208.

En la Figura 68, se presenta las señales acústicas, de vibración y corriente en el dominio del tiempo y la frecuencia para fallo en elemento rodante del rodamiento 32208, esta comparación permite inspeccionar que de manera visual sería muy difícil localizar las frecuencias fundamentales en la señal en el dominio del tiempo, para ello es necesario emplear las técnicas de procesamiento que permiten detectar estos parámetros en el dominio de la frecuencia.

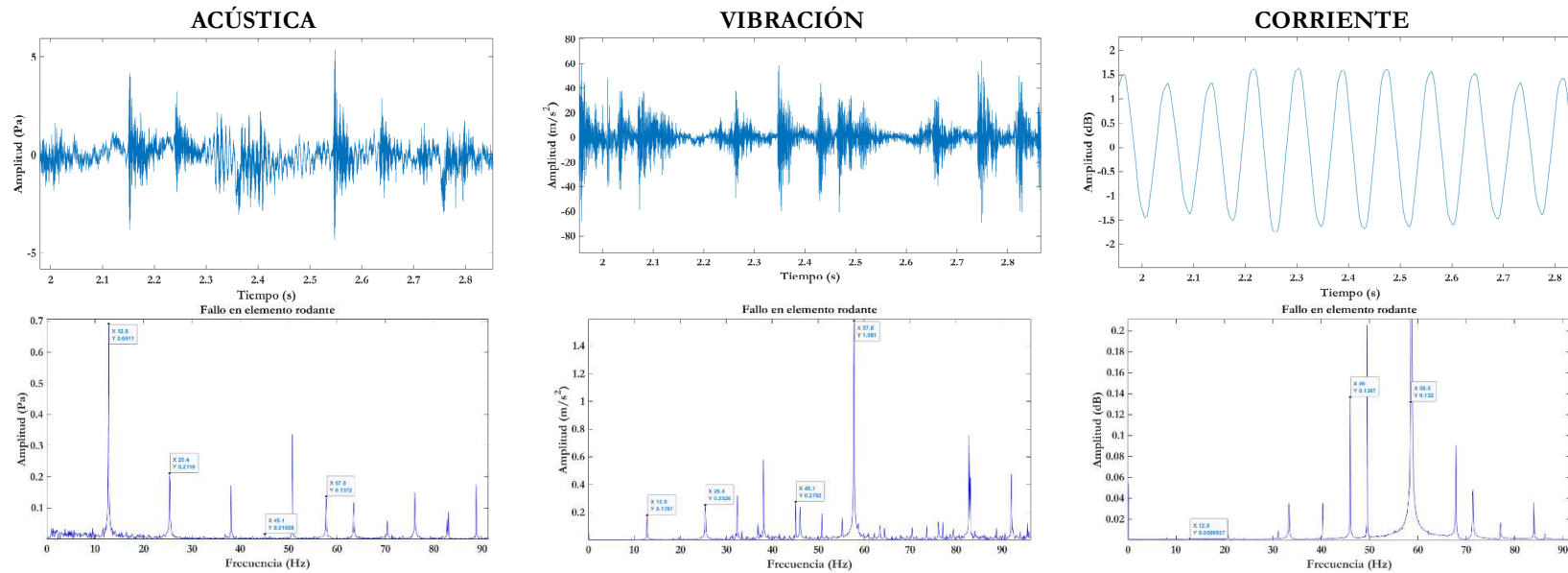


Figura 68. Señales acústicas, de vibración y corriente en el dominio del tiempo y la frecuencia para fallo en elemento rodante del rodamiento 32208.

En la Figura 69, se presenta las señales acústicas, de vibración y corriente en el dominio del tiempo y la frecuencia para fallo en pista externa del rodamiento 32208, de tal manera, se puede observar que debido a la gran información que contiene las señales en el dominio del tiempo se dificulta la detección de fallos. Para identificar las características que nos puedan determinar la severidad de un fallo es necesario transformar las señales del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, mediante las técnicas *FFT*, *Envolvente* y *Cepstrum*.

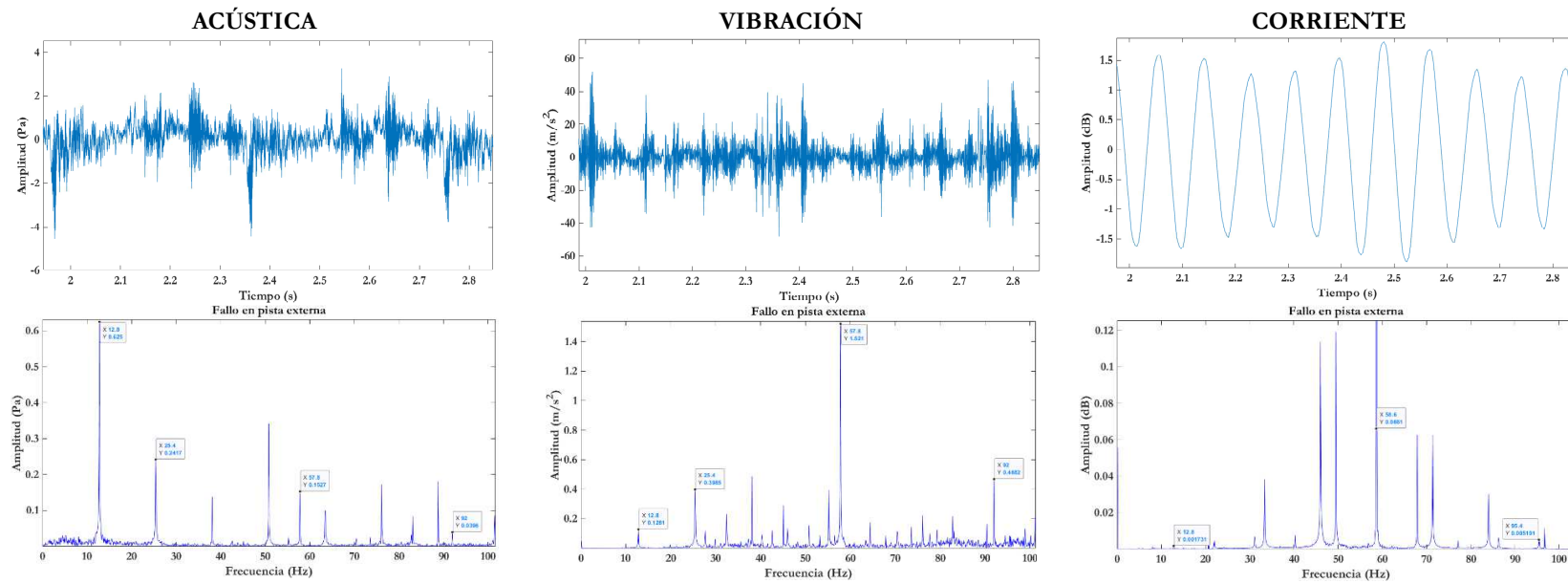


Figura 69. Señales acústicas, de vibración y corriente en el dominio del tiempo y la frecuencia para fallo en pista externa del rodamiento 32208.

7.2. Comparación entre señal en condición normal y señal en condición de fallo en los componentes del rodamiento mediante *FFT*, envolvente y cepstrum para técnicas de monitoreo acústico, vibracional y corriente.

En la Figura 70, se presenta las señales acústicas, de vibración y corriente en el dominio de la frecuencia, realizando una comparación entre una señal en condición normal (espectro color azul) y una señal en condición de fallo severo (espectro color rojo) en la pista interna del rodamiento 32208, en este caso, las señales han sido procesadas mediante la *FFT*, donde se puede observar en la señal acústica que prevalecen los picos de las frecuencias fundamentales; la frecuencia calculada para fallo en pista interna es de 123,82 Hz, en la señal acústica se identifica una frecuencia de 126,7 Hz que representa la frecuencia de fallo; en la señal de vibración se localiza también una frecuencia de 126,7 Hz, en esta señal las frecuencias fundamentales del compresor se encuentran acompañadas de gran cantidad de componentes frecuenciales (bandas laterales, armónicos) y por último, en la señal de corriente prevalece la frecuencia de rotación del motor y la frecuencia de fallo en pista interna se visualiza en magnitud muy pequeña con un valor de 122.1 Hz.

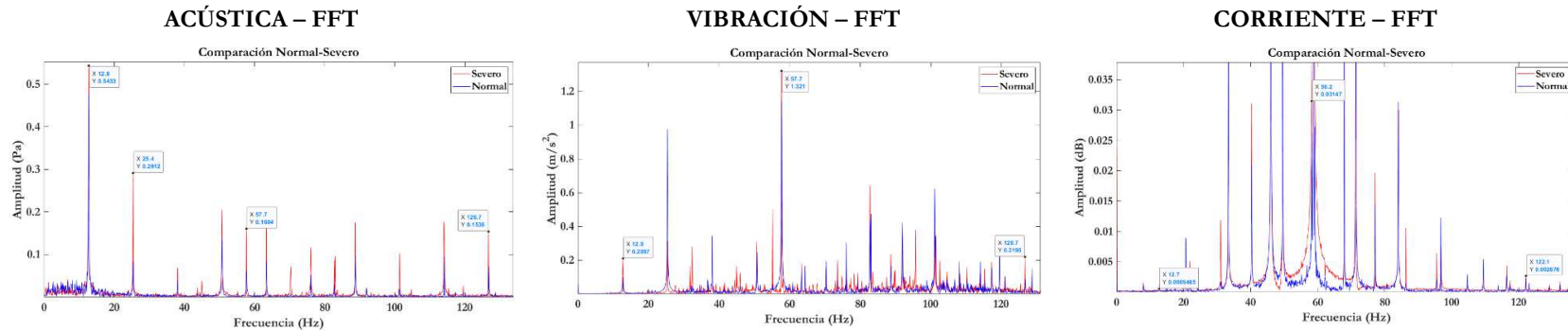


Figura 70. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica *FFT* para fallo en pista interna del rodamiento 32208.

La Tabla 25, presenta los resultados del análisis de las señales mediante la técnica *FFT* para fallo en la pista interna del rodamiento.

Tabla 25. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica *FFT* para fallo en pista interna.

OBSERVACIÓN	ACÚSTICA – FFT	VIBRACIÓN – FFT	CORRIENTE – FFT
1. Se aprecia la señal normal	SI	SI	SI
2. Se aprecia la señal con fallo	SI	SI	SI
3. Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo	SI	SI	SI
4. Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en pista interna	SI	SI	NO
5. Presencia de bandas laterales	NO	SI	NO
6. Presencia de armónicos	SI	SI	NO

La Figura 71, detalla las señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica envolvente para fallo en pista interna del rodamiento, donde se presenta incremento de las magnitudes de las frecuencias fundamentales, así como de la frecuencia de fallo, apreciándose con más claridad la condición de fallo en la señal acústica a diferencia de la señal de vibración, y en la señal de corriente la frecuencia de fallo se encuentra en el rango de magnitudes muy pequeñas.

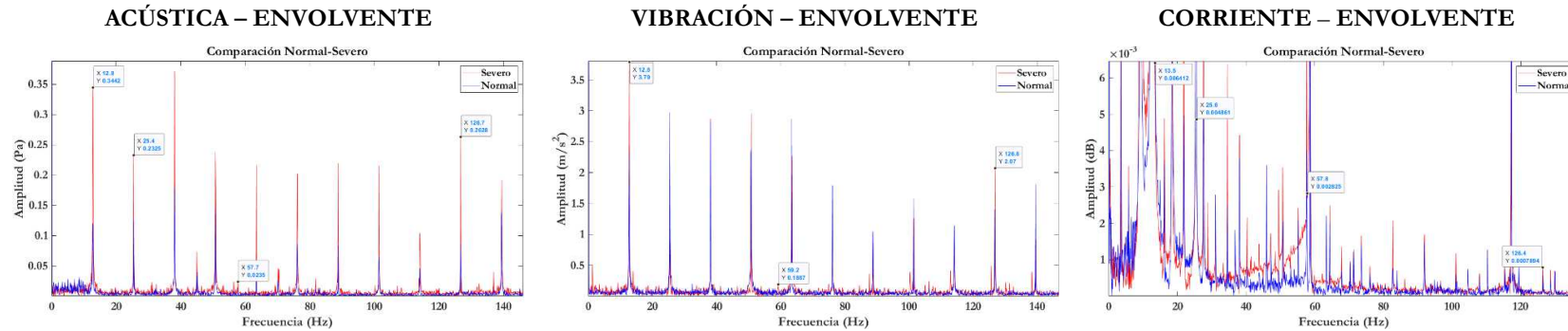


Figura 71. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica envolvente para fallo en pista interna del rodamiento 32208.

En la Tabla 26, se presenta los resultados de las señales, procesadas con la técnica envolvente para condición de fallo en pista interna.

Tabla 26. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica envolvente para fallo en pista interna.

OBSERVACIÓN	ACÚSTICA – ENVOLVENTE	VIBRACIÓN – ENVOLVENTE	CORRIENTE – ENVOLVENTE
1. Se aprecia la señal normal	SI	SI	SI
2. Se aprecia la señal con fallo	SI	SI	SI
3. Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo	SI	SI	SI
4. Se identifica de manera fácil la	SI	SI	NO

OBSERVACIÓN	ACÚSTICA – ENVOLVENTE	VIBRACIÓN – ENVOLVENTE	CORRIENTE – ENVOLVENTE
frecuencia de fallo en pista interna			
5. Presencia de bandas laterales	NO	NO	NO
6. Presencia de armónicos	SI	SI	SI

La Figura 72, presenta las señales, empleando la técnica Cepstrum, donde se visualiza que en acústica y vibración el componente de magnitud elevada representa la frecuencia de giro del cigüeñal y la frecuencia de fallo se localiza dentro de los primeros valores del dominio quefrecy, en cambio, la señal de corriente en este caso responde de mejor manera resaltando la frecuencia de fallo de manera más clara a diferencia de acústica y vibración. En la señal acústica se identifica un valor en quefrecy de 8,08 ms equivalente a 123,76 Hz; en la señal de vibración se localiza un valor en quefrecy de 8 ms equivalente a 125 Hz; y en la señal de corriente un valor en quefrecy de 8,06 ms equivalente a 124,07 Hz, estas frecuencias representan en cada técnica la frecuencia de fallo en pista interna.

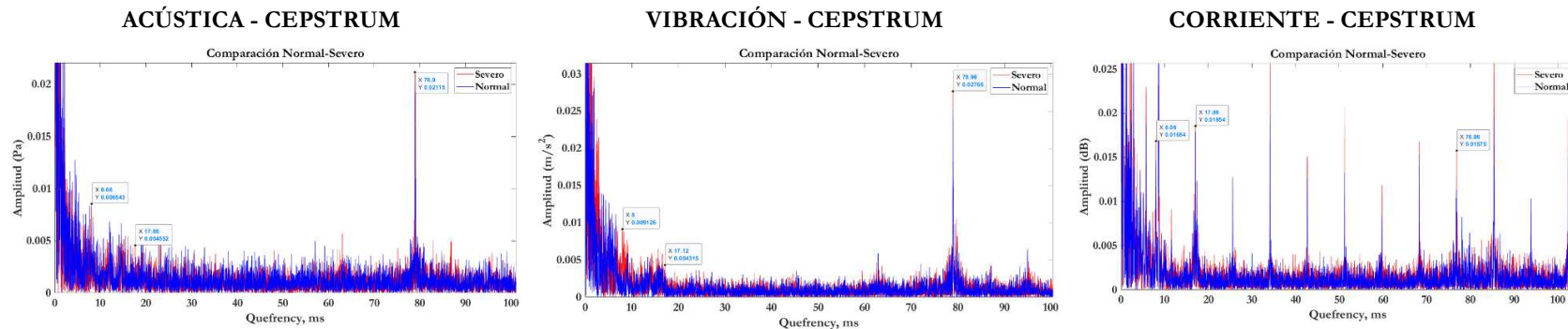


Figura 72. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica Cepstrum para fallo en pista interna del rodamiento 32208.

La Tabla 27, presenta los resultados del análisis de las señales, empleando la técnica Cepstrum para fallo en pista interna.

Tabla 27. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica Cepstrum para fallo en pista interna.

OBSERVACIÓN	ACÚSTICA - CEPSTRUM	VIBRACIÓN – CEPSTRUM	CORRIENTE - CEPSTRUM
1. Se aprecia la señal normal	SI	SI	SI
2. Se aprecia la señal con fallo	SI	SI	SI
3. Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo	SI	SI	SI
4. Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en pista interna	NO	NO	NO
5. Presencia de bandas laterales	NO	NO	NO
6. Presencia de armónicos	SI	SI	SI

La Figura 73, ilustra las señales empleando la técnica *FFT* para fallo en elemento rodante, en la señal acústica se observa la gran variación de magnitudes que existe entre la señal con fallo y la señal en condiciones normales, pero a su vez prevalecen las frecuencias fundamentales y la frecuencia de fallo es muy difícil apreciarla; en la señal de vibración se representa la frecuencia de rotación del motor con un pico de gran magnitud y la frecuencia de fallo es notable con un incremento en su magnitud, esta señal presenta menor cantidad de bandas laterales a diferencia de la señal con fallo en pista interna; por último, la señal de corriente presenta un gran incremento de la magnitud de la frecuencia de fallo, pero con muy poca diferencia en relación a la señal en condición normal. La frecuencia de fallo en elemento rodante calculada es 44,23 Hz, en la señal acústica y de vibración se localiza una frecuencia de 45,1 Hz; y en la señal de corriente se identifica una frecuencia de 46 Hz.

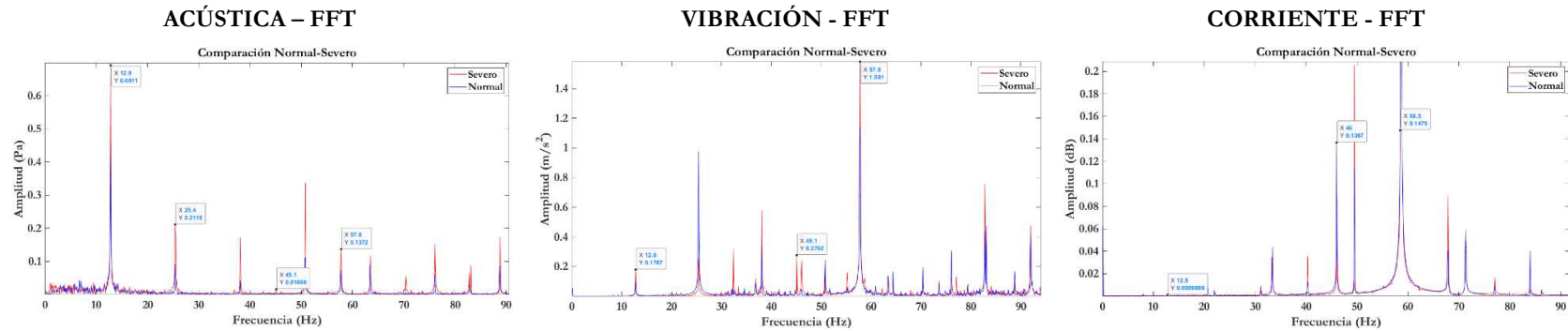


Figura 73. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica FFT para fallo en elemento rodante del rodamiento 32208.

En la Tabla 28, se presenta los resultados del análisis de las señales, empleando la técnica *FFT* para fallo en elemento rodante del rodamiento.

Tabla 28. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica *FFT* para fallo en elemento rodante.

OBSERVACIÓN	ACÚSTICA - FFT	VIBRACIÓN - FFT	CORRIENTE - FFT
1. Se aprecia la señal normal	SI	SI	SI
2. Se aprecia la señal con fallo	SI	SI	SI
3. Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo	SI	SI	SI
4. Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en elemento rodante	NO	SI	SI
5. Presencia de bandas laterales	NO	NO	NO
6. Presencia de armónicos	SI	SI	NO

En la Figura 74, se presenta las señales mediante la técnica envolvente para fallo en elemento rodante, en la señal acústica con esta técnica se incrementa notablemente la magnitud de la frecuencia de fallo a diferencia del empleo de la *FFT* en acústica, que resultó difícil la apreciación de la frecuencia de fallo; en la señal de vibración no se aprecia de manera clara la frecuencia de fallo y las frecuencias fundamentales del compresor se presentan en magnitudes elevadas; la señal de corriente con esta técnica permite visualizar la frecuencia de fallo con una gran magnitud y bastante diferencia con la señal en condición normal.

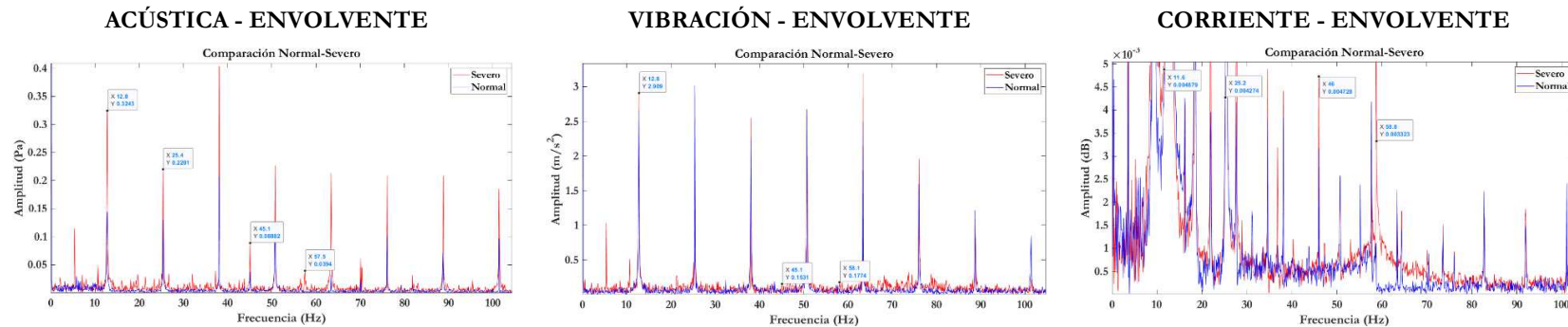


Figura 74. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica envolvente para fallo en elemento rodante del rodamiento 32208.

En la Tabla 29, se presenta los resultados del análisis de las señales, procesadas con la técnica envolvente para fallo en elemento rodante del rodamiento.

Tabla 29. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica envolvente para fallo en elemento rodante.

OBSERVACIÓN	ACÚSTICA - ENVOLVENTE	VIBRACIÓN - ENVOLVENTE	CORRIENTE - ENVOLVENTE
1. Se aprecia la señal normal	SI	SI	SI
2. Se aprecia la señal con fallo	SI	SI	SI
3. Incrementa la magnitud de los picos	SI	SI	SI

OBSERVACIÓN	ACÚSTICA - ENVOLVENTE	VIBRACIÓN - ENVOLVENTE	CORRIENTE - ENVOLVENTE
cuando se presenta el fallo			
4. Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en elemento rodante	SI	NO	SI
5. Presencia de bandas laterales	NO	NO	NO
6. Presencia de armónicos	SI	SI	SI

La Figura 75, presenta las señales empleando la técnica Cepstrum para fallo en elemento rodante, en la señal acústica se identifica de manera fácil el valor quefrequency de 23,38 ms que equivale a 42,77 Hz que representa en la señal la frecuencia del fallo; en la señal de vibración también se identifica sin dificultad el pico de la frecuencia de fallo con un valor quefrequency de 22,46 ms equivalente a 44,5 Hz; en la señal de corriente no es muy notable la frecuencia de fallo con un valor quefrequency de 23,64 ms equivalente a 42,3 Hz, en cambio, se presenta la frecuencia fundamental del motor con gran magnitud .

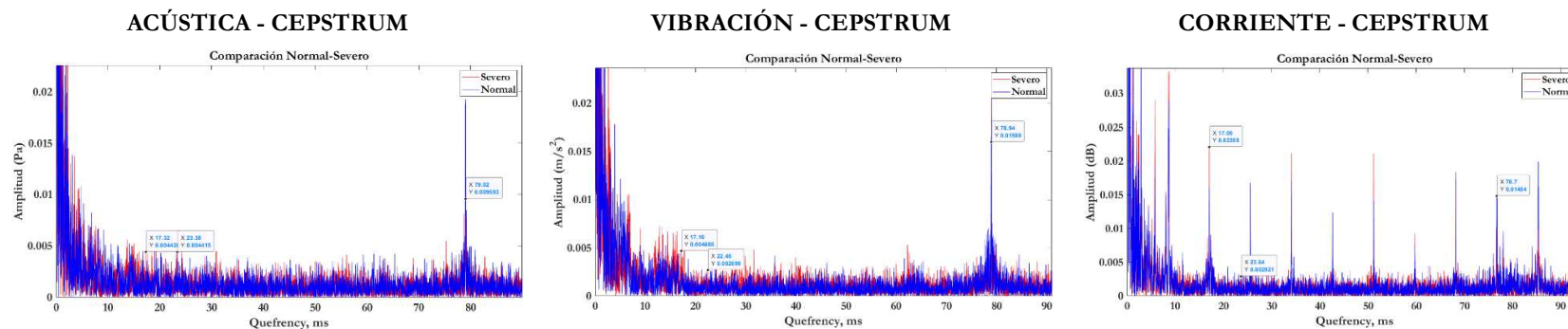


Figura 75. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica Cepstrum para fallo en elemento rodante del rodamiento 32208.

En la Tabla 30, se presenta los resultados del análisis de las señales procesadas con la técnica Cepstrum para fallo en elemento rodante.

Tabla 30. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica Cepstrum para fallo en elemento rodante.

OBSERVACIÓN	ACÚSTICA - CEPSTRUM	VIBRACIÓN – CEPSTRUM	CORRIENTE - CEPSTRUM
1. Se aprecia la señal normal	SI	SI	SI
2. Se aprecia la señal con fallo	SI	SI	SI
3. Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo	SI	SI	SI
4. Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en elemento rodante	SI	SI	NO
5. Presencia de bandas laterales	NO	NO	NO
6. Presencia de armónicos	SI	SI	SI

La Figura 76, ilustra las señales empleando la técnica *FFT* para fallo en pista externa del rodamiento, la frecuencia calculada para pista externa es 93,77 Hz, en la señal acústica se identifica una frecuencia de 92 Hz con un pico de magnitud muy pequeña; en la señal de vibración también se identifica una frecuencia a 92 Hz, con la diferencia de que en esta señal la magnitud del pico es más notable y se diferencia la señal con fallo de la señal en condición normal; en la señal de corriente se localiza una frecuencia a 95,4 Hz con una magnitud de la señal con fallo incrementada más del doble con respecto a la señal en condición normal.

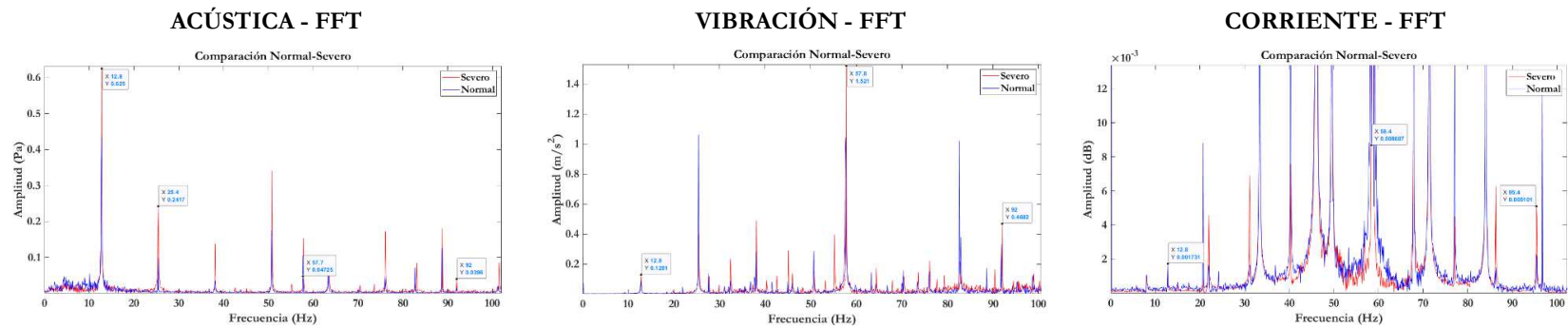


Figura 76. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica *FFT* para fallo en pista externa del rodamiento 32208.

En la Tabla 31, se presenta los resultados del análisis de las señales procesadas con la técnica *FFT* para fallo en la pista externa del rodamiento.

Tabla 31. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica *FFT* para fallo en pista externa.

OBSERVACIÓN	ACÚSTICA - FFT	VIBRACIÓN - FFT	CORRIENTE - FFT
1. Se aprecia la señal normal	SI	SI	SI
2. Se aprecia la señal con fallo	SI	SI	SI
3. Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo	SI	SI	SI
4. Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en pista externa	NO	SI	SI
5. Presencia de bandas laterales	NO	SI	NO
6. Presencia de armónicos	SI	SI	SI

La Figura 77, presenta las señales empleando la técnica envolvente para fallo en pista externa del rodamiento, la frecuencia de fallo en pista externa calculada es 93,77 Hz, en la señal acústica se localiza una frecuencia de 95,8 Hz que resulta casi imperceptible a la vista; en la señal de vibración se identifica una frecuencia de 95,7 Hz, que de la misma manera no es fácil su localización; en la señal de corriente se visualiza una frecuencia de 92 Hz con un pico de magnitud considerable que prevalece ante la señal en condición normal.

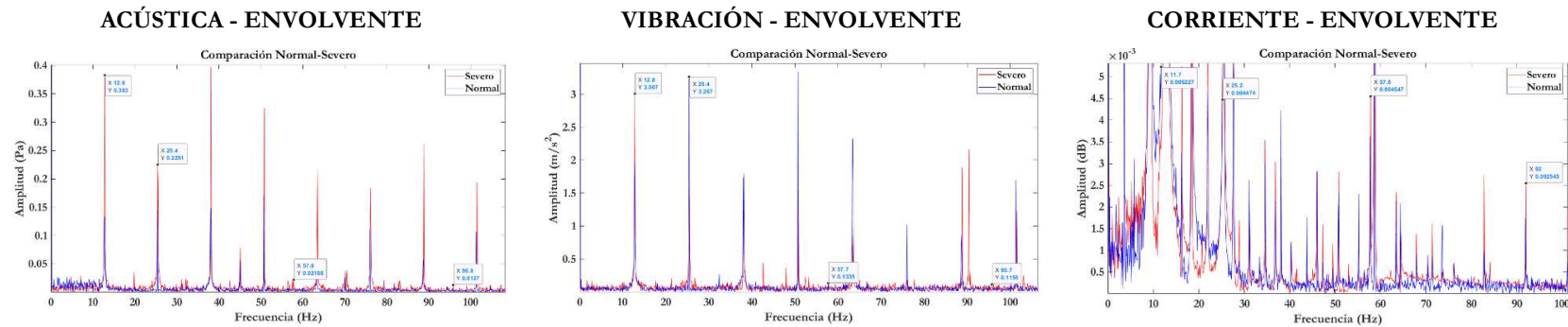


Figura 77. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica envolvente para fallo en pista externa del rodamiento 32208.

La Tabla 32, presenta los resultados del análisis de las señales empleando la técnica envolvente para fallo en pista externa.

Tabla 32. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica envolvente para fallo en pista externa.

OBSERVACIÓN	ACÚSTICA - ENVOLVENTE	VIBRACIÓN - ENVOLVENTE	CORRIENTE - ENVOLVENTE
1. Se aprecia la señal normal	SI	SI	SI
2. Se aprecia la señal con fallo	SI	SI	SI
3. Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo	SI	SI	SI
4. Se identifica de manera fácil la	NO	NO	SI

OBSERVACIÓN	ACÚSTICA - ENVOLVENTE	VIBRACIÓN - ENVOLVENTE	CORRIENTE - ENVOLVENTE
frecuencia de fallo en pista externa			
5. Presencia de bandas laterales	NO	NO	NO
6. Presencia de armónicos	SI	SI	SI

La Figura 78, presenta las señales empleando la técnica cepstrum para fallo en pista externa del rodamiento, la frecuencia de fallo calculada para pista externa es 93,77 Hz, en la señal acústica se visualiza un valor quefrequency de 10,4 ms que equivale a 96,15 Hz, esta frecuencia representa el pico más aproximado a la frecuencia calculada; en la señal de vibración se identifica un valor quefrequency de 10,62 ms lo que equivale a 94,16 Hz que representaría el pico de la frecuencia de fallo en esta señal; por último, en la señal de corriente se puede apreciar de manera un poco más clara la localización del pico de frecuencia de fallo con un valor quefrequency de 10,64 ms que equivale a 93,98 Hz.

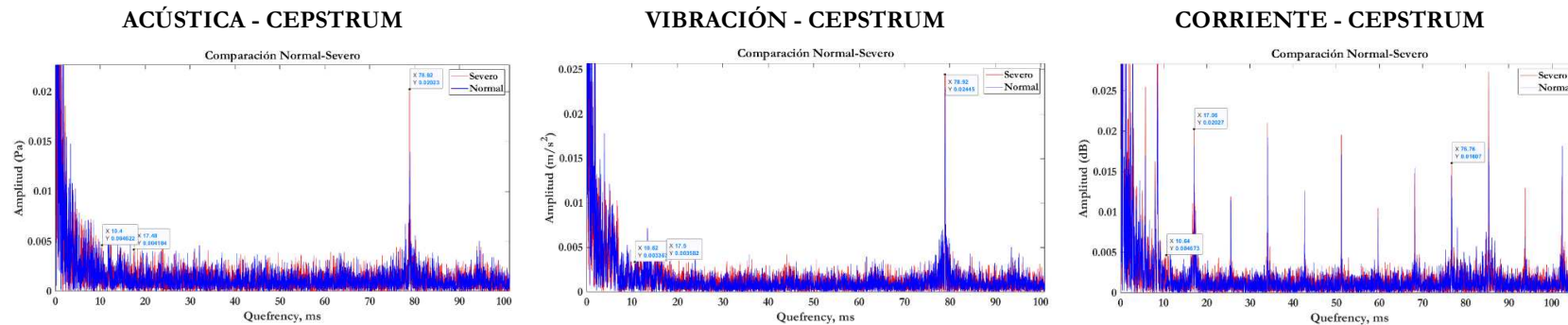


Figura 78. Señales acústicas, de vibración y corriente, empleando la técnica Cepstrum para fallo en pista externa del rodamiento 32208.

En la Tabla 33, se presenta los resultados de las señales procesadas con la técnica cepstrum para fallo en pista externa del rodamiento.

Tabla 33. Resultados del análisis de las señales acústicas, de vibración y corriente, procesadas con la técnica Cepstrum para fallo en pista externa.

OBSERVACIÓN	ACÚSTICA - CEPSTRUM	VIBRACIÓN – CEPSTRUM	CORRIENTE - CEPSTRUM
1. Se aprecia la señal normal	SI	SI	SI
2. Se aprecia la señal con fallo	SI	SI	SI
3. Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo	SI	SI	SI
4. Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en pista externa	NO	NO	NO
5. Presencia de bandas laterales	NO	NO	NO
6. Presencia de armónicos	SI	SI	SI

8. DISCUSIÓN

Con base a lo presentado en la Tabla 25, Tabla 26, y Tabla 27, en la Tabla 34 se presenta un resumen de los resultados del análisis de las señales acústicas de vibración y corriente, empleando las técnicas de procesamiento *FFT*, envolvente y cepstrum para condición de fallo en pista interna del rodamiento.

Las técnicas *FFT*, envolvente y cepstrum para acústica, vibración y corriente no presentan inconvenientes para la apreciación de las señales en condición normal y con fallo en pista interna, también permiten visualizar el incremento de los picos cuando se presenta el fallo. Es difícil identificar la frecuencia de fallo en pista interna con la técnica *FFT* y envolvente en la señal de corriente, además la técnica cepstrum no

permite identificar la frecuencia en acústica, vibración y corriente. La presencia de bandas laterales se da solamente en la señal de vibración con la técnica *FFT*. No se presentan armónicos únicamente en la señal de corriente con la técnica *FFT*.

Por lo tanto, se puede concluir que la técnica de procesamiento cepstrum no es la mejor para detección de fallos en pista interna del rodamiento, siendo así, las técnicas *FFT* y envolvente en señales acústicas y de vibración las que presentan un mejor rendimiento para detección de fallos en la pista interna del rodamiento, con la *FFT* se diferencia claramente el incremento en magnitud de la señal con fallo respecto a la señal en condición normal y con la envolvente en la señal acústica se visualiza el pico de la frecuencia de fallo con una magnitud casi duplicada respecto al pico con *FFT*, en la señal de vibración con la envolvente se identifica el pico de la frecuencia de fallo 10 veces más grande en relación al pico con *FFT*.

Tabla 34. Resumen de los resultados del análisis de señales para fallo en pista interna del rodamiento 32208.

Observación	Acústica FFT	Vibración FFT	Corriente FFT	Acústica envolvente	Vibración envolvente	Corriente envolvente	Acústica cepstrum	Vibración cepstrum	Corriente cepstrum
1. Se aprecia la señal normal	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
2. Se aprecia la señal con fallo	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
3. Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
4. Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en pista interna	SI	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO	NO
5. Presencia de bandas laterales	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO

Observación	Acústica FFT	Vibración FFT	Corriente FFT	Acústica envolvente	Vibración envolvente	Corriente envolvente	Acústica cepstrum	Vibración cepstrum	Corriente cepstrum
6. Presencia de armónicos/rahmonics	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Con relación a lo presentado en la Tabla 28, Tabla 29, y Tabla 30, en la Tabla 35 se presenta un resumen de los resultados del análisis de las señales acústicas de vibración y corriente, empleando las técnicas de procesamiento *FFT*, envolvente y Cepstrum para condición de fallo en elemento rodante del rodamiento.

La frecuencia de fallo en elemento rodante es difícil identificar en la señal acústica con la técnica *FFT*, en la señal de vibración con la técnica envolvente y en la señal de corriente con la técnica cepstrum. No existe presencia de bandas laterales en las señales acústicas de vibración y corriente para las tres técnicas de procesamiento de señales. Solamente en la señal de corriente empleando la técnica *FFT* no existe presencia de armónicos.

Entonces resulta que, las técnicas *FFT* y cepstrum en las señales de vibración son óptimas para la detección de fallos en elemento rodante, la *FFT* y envolvente en las señales de corriente permiten detectar de manera clara fallos en elemento rodante con grandes incrementos en su magnitud, por último, en las señales acústicas las técnicas de envolvente y cepstrum manifiestan un desempeño satisfactorio para detección de fallos en elemento rodante, siendo la envolvente la que permite visualizar mayor incremento en la magnitud de la señal con fallo.

Tabla 35. Resumen de los resultados del análisis de señales para fallo en elemento rodante del rodamiento 32208.

Observación	Acústica FFT	Vibración FFT	Corriente FFT	Acústica envolvente	Vibración envolvente	Corriente envolvente	Acústica cepstrum	Vibración cepstrum	Corriente cepstrum
1. Se aprecia la señal normal	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
2. Se aprecia la señal con fallo	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Observación	Acústica FFT	Vibración FFT	Corriente FFT	Acústica envolvente	Vibración envolvente	Corriente envolvente	Acústica cepstrum	Vibración cepstrum	Corriente cepstrum
3. Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
4. Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en elemento rodante	NO	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI	NO
5. Presencia de bandas laterales	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
6. Presencia de armónicos/harmonics	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Con respecto a lo presentado en la Tabla 31, Tabla 32 y Tabla 33, en la Tabla 36 se presenta un resumen de los resultados del análisis de las señales acústicas de vibración y corriente, empleando las técnicas de procesamiento *FFT*, envolvente y Cepstrum para condición de fallo en pista externa del rodamiento.

Solamente en las señales de vibración y corriente empleando la técnica *FFT* y en la señal de corriente con la técnica envolvente se puede identificar de manera fácil la frecuencia de fallo en pista externa, presentando grandes incrementos en la magnitud de la señal con fallo en relación a la señal en condición normal. De manera única, existe presencia de bandas laterales en la señal de vibración con la técnica *FFT*. En todas las señales con las tres técnicas de procesamiento se evidencia presencia de armónicos.

Por último, se obtiene de acuerdo al resumen de resultados que, con las tres técnicas de monitoreo, la técnica cepstrum no es la adecuada para detección de fallos en pista externa. La técnica envolvente para las señales acústicas y de vibración, no permite detectar de manera clara los fallos en pista externa. En las señales acústicas, empleando la técnica *FFT* también se presenta dificultades para la detección de fallos en pista externa.

Tabla 36. Resumen de los resultados del análisis de señales para fallo en pista externa del rodamiento 32208.

Observación	Acústica FFT	Vibración FFT	Corriente FFT	Acústica envolvente	Vibración envolvente	Corriente envolvente	Acústica cepstrum	Vibración cepstrum	Corriente cepstrum
1. Se aprecia la señal normal	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
2. Se aprecia la señal con fallo	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
3. Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
4. Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en pista externa	NO	SI	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO
5. Presencia de bandas laterales	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
6. Presencia de armónicos/harmonics	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

9. CONCLUSIONES

Con el desarrollo de este proyecto técnico se estableció tres bases de datos para detección de fallos en rodamientos, donde se adquirió señales acústicas, de vibración y corriente en un compresor recíprocante para brindar un aporte a la investigación enfocada en el monitoreo de la condición y se obtienen las siguientes conclusiones:

- Por medio de la recopilación y revisión de material bibliográfico, se logró caracterizar las técnicas de monitoreo acústico, de vibración y corriente, presentando de manera detallada su principio fundamental, unidades de medida, instrumentación y normas para su empleo. De esta manera, se caracterizó también a los rodamientos, en cuanto a su estructura física, tipos de rodamientos, principales características de los rodamientos de rodillos cónicos, frecuencias fundamentales y fallos más comunes que se producen en sus componentes.
- Se adquirió señales acústicas, vibracionales y de corriente en condiciones normales y con fallos de agrietamiento implantados en la pista interna, elementos rodantes y pista externa del rodamiento 32208 montado en el compresor recíprocante de doble etapa. Contribuyendo a la finalización de este proyecto con tres bases de datos para la detección de fallos en rodamientos.
- Se comparó las señales acústicas de vibración y corriente, empleando las técnicas de procesamiento *FFT*, envolvente y cepstrum, este procedimiento brinda los siguientes resultados: para la detección de fallos en pista interna, las técnicas *FFT* y envolvente en las señales acústicas y de vibración, presentan grandes incrementos en la magnitud de la frecuencia fundamental (*BPFI*) debido a la severidad del fallo. Para la detección de fallos en elemento rodante, la técnica *FFT* en la señal de vibración, la envolvente en la señal de corriente y cepstrum en la señal acústica, presentan incrementos notables en la magnitud, con respecto a las demás señales donde la frecuencia fundamental (*BSF*) es difícil identificar. Finalmente, para la detección de fallos en pista externa, la técnica *FFT* en las señales de vibración y corriente y la técnica envolvente en la señal de corriente, permiten detectar de forma clara la frecuencia fundamental (*BPFO*) al presentar gran incremento en la magnitud de la señal con fallo respecto a la señal en condición normal.

10. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que el montaje de los componentes mecánicos del compresor sea de manera precisa con los ajustes requeridos y el emplazamiento de sensores de acuerdo a los estudios previos, con el propósito de que no se genere alteraciones que puedan contaminar las señales acústicas, vibracionales y de corriente.
- Optimizar el tiempo de montaje y desmontaje de componentes con fallo, debido a que, para el cambio de rodamientos es necesario desmontar el compresor casi en su totalidad.
- En el procesamiento de las señales mediante software Matlab, establecer los rangos de tiempo y frecuencias en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia respectivamente, teniendo presente que estos coincidan con las demás señales graficadas para llevar a cabo un análisis comparativo adecuado, de lo contrario no es posible realizar la comparación.

TRABAJOS FUTUROS

- Establecer bases de datos para detección de fallos múltiples en rodamientos del compresor recíprocante a diferentes condiciones de carga.
- Establecer una base de datos empleando la metodología propuesta en este trabajo en otro tipo de compresor, por ejemplo: compresor de tornillo o compresor de diafragma.

REFERENCIAS

- [1] A. K. S. 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.
- [2] J. C. Calderón y F. I. Montalván, «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, Ecuador, 2019.
- [3] M. R. Carangui, «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, Ecuador, 2014.
- [4] R. A. Guiracochoa, «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, Ecuador, 2015.
- [5] C. E. Muñoz y Á. G. Vera, «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, Ecuador, 2015.
- [6] C. G. Ortiz y I. A. Pérez, «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, Ecuador, 2016.
- [7] E. E. Pacheco, «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, Ecuador, 2018.
- [8] F. D. Cajas y C. P. Torres, «Adquisición de señales acústicas y de vibración para el diagnóstico de fallos en un compresor recíprocante de doble etapa», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2018.
- [9] S. V. Niveló y D. J. Romero, «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, Ecuador, 2014.
- [10] D. E. Chingal, «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, Ecuador, 2018.
- [11] J. C. Calderón y F. I. Montalván, «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, Ecuador, 2019.

- [12] F. J. Lojano, «Señales acústicas y de vibración: estudio comparativo para la detección de severidad de fallos en engranes rectos», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2019.
- [13] H. F. Llivicura, «Señales de vibración: evaluación de indicadores de condición extraídos del dominio de frecuencia para el diagnóstico de fallos en cajas de engranajes rectos», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2019.
- [14] P. Gupta y M. K. Pradhan, «Fault detection analysis in rolling element bearing: A review», *Mater. Today Proc.*, vol. 4, n.º 2, pp. 2085-2094, 2017.
- [15] H. A. Blandón y Y. F. Martínez, «Desarrollo de una metodología para la detección de fallas a partir del análisis de vibraciones en rodamientos usando características de tiempo y modelos ocultos de Markov (HMM)», Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2013.
- [16] P. N. Saavedra, «La medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación», *Fac. Ing.-Univ. Concepc. Chile*, 2011.
- [17] O. Poncelas, «Diagnóstico de motores de inducción mediante la adquisición de corrientes de estator con sonda Rogowski», Tesis de Máster, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2008.
- [18] X. Jin, Fangzhou Cheng, Yayu Peng, W. Qiao, y Liyan Qu, «A comparative study on vibration and current based approaches for drivetrain gearbox fault diagnosis», en *2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2016, pp. 1-8.
- [19] W. Olarte, M. Botero, y B. Cañon, «Importancia del mantenimiento industrial dentro de los procesos de producción», vol. 1, n.º 44, pp. 354-356, 2010.
- [20] E. O. Neto, «Mantenimiento Industrial». Ilustrados, mar. 2008, Accedido: ene. 29, 2020. [En línea]. Disponible en: www.ilustrados.com.
- [21] F. J. González, *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado.*, 2da ed. Madrid, España: FC Editorial, 2005.
- [22] L. Sexto, «Tipos de mantenimiento: ¿cuántos y cuáles son?», *Electromagazine*, pp. 40-46, 2018.
- [23] F. C. Gómez, *Tecnología del mantenimiento industrial*, 1ra ed. Murcia, España: EDITUM, 1998.
- [24] D. F. Primero, J. C. Díaz, L. F. García, y A. González-Vargas, «Manual para la Gestión del Mantenimiento Correctivo de Equipos Biomédicos en la Fundación Valle del Lili», *Rev. Ing. Bioméd.*, vol. 9, n.º 18, pp. 81-87, 2015.
- [25] C. Botero, «Mantenimiento preventivo», en *Manual de mantenimiento*, 1ra ed., Bogotá, Colombia: FEDEMETAL-SENA, 1991, pp. 103-118.
- [26] A. Prajapati, J. Bechtel, y S. Ganesan, «Condition based maintenance: a survey», *JQME*, vol. 18, n.º 4, pp. 384-400, 2012.
- [27] D. Goyal, B. S. Pabla, S. S. Dhami, y K. Lachhwani, «Optimization of condition-based maintenance using soft computing», *Neural Comput. Appl.*, vol. 28, n.º S1, pp. 829-844, 2017.
- [28] 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.

- [29] R. K. Mobley, *An introduction to predictive maintenance*, 2nd ed. New York, Estados Unidos: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [30] S. Kumar, D. Goyal, R. K. Dang, S. S. Dhami, y B. S. Pabla, «Condition based maintenance of bearings and gears for fault detection – A review», *Mater. Today Proc.*, vol. 5, n.º 2, pp. 6128-6137, 2017.
- [31] G. Daza, *Vibraciones mecánicas*, 1ra ed. Valparaíso, Chile, 2007.
- [32] E. Y. Kim, A. C. C. Tan, J. Mathew, y B. S. Yang, «Condition monitoring of low speed bearings: A comparative study of the ultrasound technique versus vibration measurements», *Aust. J. Mech. Eng.*, vol. 5, n.º 2, pp. 177-189, 2008.
- [33] L. Wang y R. X. Gao, Eds., *Condition monitoring and control for intelligent manufacturing*. Londres: Springer, 2006.
- [34] A. Rastegari, «Condition Based Maintenance in the Manufacturing Industry: From Strategy to Implementation», Mälardalen University, Eskilstuna, 2017.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] W. Zhou, T. G. Habetler, y R. G. Harley, «Bearing Condition Monitoring Methods for Electric Machines: A General Review», en *2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, Cracow, Poland, 2007, pp. 3-6, Accedido: feb. 19, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/4393062/>.
- [38] R. V. Sánchez Loja, «Diagnóstico de fallos en cajas de engranajes con base en la fusión de datos de señales de vibración, corriente y emisión acústica», Tesis Doctoral, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2018.
- [39] A. Glowacz, «Acoustic based fault diagnosis of three-phase induction motor», *Appl. Acoust.*, vol. 137, pp. 82-89, 2018.
- [40] C. Xiao, L. Zhao, T. Asada, W. G. Odendaal, y J. D. van Wyk, «An overview of integratable current sensor technologies», en *38th LAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003.*, Salt Lake City, USA, 2003, vol. 2, pp. 1251-1258, Accedido: feb. 26, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1257710/>.
- [41] P. Gangsar y R. Tiwari, «Comparative investigation of vibration and current monitoring for prediction of mechanical and electrical faults in induction motor based on multiclass-support vector machine algorithms», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 94, pp. 464-481, 2017.
- [42] V. Ghorbanian y J. Faiz, «A survey on time and frequency characteristics of induction motors with broken rotor bars in line-start and inverter-fed modes», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 54-55, pp. 427-456, 2015.
- [43] P. A. Delgado Arredondo, D. Morinigo Sotelo, R. A. Osornio Rios, J. G. Avina Cervantes, H. Rostro Gonzalez, y R. de J. Romero Troncoso, «Methodology for fault detection in

- induction motors via sound and vibration signals», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 83, pp. 568-589, 2017.
- [44] M. Postema, S. Kotopoulos, y K.-V. Jenderka, *Basic physical principles of medical ultrasound*, 2nd ed. London: Dietrich, 2018.
- [45] F. Miyara, «Introducción a la acústica». 2003, Accedido: feb. 27, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.fceia.unr.edu.ar>.
- [46] A. M. Jaramillo, *Acústica: La Ciencia del Sonido*, 1ra ed. Medellín, Colombia: ITM, 2007.
- [47] F. A. Everest, *Master Handbook of Acoustics*, 4th ed. United States: McGraw Hill, 2001.
- [48] M. Möser y J. L. Barros, *Ingeniería Acústica: Teoría y Aplicaciones*, 2da ed. Berlin, Alemania: Springer Science & Business Media, 2009.
- [49] M. Rocamora, «Física del sonido», en *Apuntes de acústica musical*, Uruguay, 2006.
- [50] «Conceptos básicos del ruido ambiental», *SICA*. <http://sicaweb.cedex.es> (accedido feb. 28, 2020).
- [51] CEUPE, «¿Qué es la presión sonora?», *CEUPE*. <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-presion-sonora.html> (accedido mar. 02, 2020).
- [52] F. E. Gallegos y D. X. Montalvo, «Diseño de una cámara anecoica y una cámara reverberante», Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2008.
- [53] A. M. Domingo, «Apuntes de acústica». Creative Commons, 2014, Accedido: mar. 03, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://oa.upm.es/23098/1/amd-apuntes-acustica-v2.1.pdf>.
- [54] D. H. Bies, C. H. Hansen, y R. H. Campbell, *Engineering Noise Control. Theory and Practice*, 4th ed., vol. 100. New York, United States: Spon Press, 2009.
- [55] D. Havelock, S. Kuwano, y M. Vorländer, Eds., *Handbook of signal processing in acoustics*, vol. 1. New York, USA: Springer, 2008.
- [56] V. Menéndez, «Instrumentación acústica». 2007, Accedido: mar. 05, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://www.eoi.es>.
- [57] L. L. Beranek y T. J. Mellow, *Acoustics: sound fields and transducers*, 1st ed. Oxford, UK: Academic Press, 2012.
- [58] PCB Piezotronics, «Installation and Operating Manual: ICP Microphone System». 2014.
- [59] National Instruments, «Datasheet of NI 9234». 2014.
- [60] National Instruments, «NI cDAQ-9188 Specifications». 2014.
- [61] G. White, *Introducción al análisis de vibraciones*, 1ra ed. MA, USA: Azima DLI, 2010.
- [62] L. A. Aldaz, «Análisis espectral de señales de vibraciones mecánicas causadas por desalineación como método de mantenimiento predictivo en bombas hidráulicas centrífugas horizontales de flujo radial de 1 HP», Tesis de pregrado, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2015.
- [63] Power MI, *Manual de análisis de vibraciones*, 1ra ed. FL, USA: Maintenance Intelligence LLC, 2018.

- [64] «Movimiento armónico simple en sistemas masa-resorte», *Khan Academy*. <https://es.khanacademy.org/science/fisica-pe-pre-u/x4594717deeb98bd3:oscilaciones-y-ondas/x4594717deeb98bd3:movimiento-armonico-simple-mas/a/simple-harmonic-motion-of-spring-mass-systems-ap> (accedido jun. 21, 2020).
- [65] A. R. Toapanta, «Determinación de fallas mediante análisis vibracional en los equipos críticos del área de envasado, pasteurización y homogenización de la empresa Prolac», Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2012.
- [66] V. E. Cabrera, «Estudio de un plan de mantenimiento predictivo para ventiladores industriales, aplicando la técnica análisis de vibraciones», Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2019.
- [67] Ademinsac, «Tabla I - Carta ilustrada de diagnóstico de vibración». ARGOS, C.A, 1994, Accedido: mar. 13, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/>.
- [68] N. Mehala, «Condition monitoring and fault diagnosis of induction motor using motor current signature analysis», Tesis Doctoral, National Institute of Technology, Kurukshetra, India, 2010.
- [69] A. R. Mohanty, *Machinery Condition Monitoring: Principles and Practices*. Florida, United States: CRC Press, 2015.
- [70] ISO 20958, *Condition monitoring and diagnostics of machine systems - Electrical signature analysis of three-phase induction motors*. 2013.
- [71] IEC 61000-4-30, *Electromagnetic compatibility-Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*. 2003.
- [72] ISO/IEC 17025, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. 2005.
- [73] IEC 61010-031, *Requisitos de seguridad de equipos eléctricos de medida, control y uso en laboratorio. Parte 31: Requisitos de seguridad para sondas manuales para medidas y ensayos eléctricos*. 2015.
- [74] IEEE Std 519, *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. 2014.
- [75] NEMA, *NEMA MG 1-2016: Motors and Generators*. 2016.
- [76] ISO17359, *Condition monitoring and diagnostics of machines - General guidelines*. 2018.
- [77] A. Rai y S. H. Upadhyay, «A review on signal processing techniques utilized in the fault diagnosis of rolling element bearings», *Tribol. Int.*, vol. 96, pp. 289-306, 2016.
- [78] A. K. Nandi y H. Ahmed, *Condition monitoring with vibration signals: compressive sampling and learning algorithms for rotating machines*, 1st ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2019.
- [79] M. A. Cabañas, «Monitorización y clasificación de defectos en rodamientos de bolas. Estudio transitorio.», Tesis de pregrado, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, Madrid, 2011.
- [80] W. T. Cochran *et al.*, «¿What is the fast Fourier transform?», *Proc. IEEE*, vol. 55, n.º 10, pp. 1664-1674, 1967.
- [81] A. V. Dube, L. S. Dhamande, y P. G. Kulkarni, «Vibration Based Condition Assessment Of Rolling Element Bearings With Localized Defects», *IJSTR*, vol. 2, p. 7, 2013.

- [82] J. E. Quiroga, G. Trujillo, y S. Quintero, «Estudio de fallas incipientes en rodamientos usando la técnica de la envolvente y cepstrum», *Ingeniare Rev. Chil. Ing.*, vol. 20, n.º 3, pp. 350-359, 2012.
- [83] S. Lagos, «Estudio de vibraciones mediante Cepstrum y comparación con otras técnicas para diagnosticar fallas en rodamientos y engranajes», Tesis de pregrado, Universidad del Bío - Bío, Concepción, Chile, 2014.
- [84] M. E. Morsy y G. Achtenova, «Rolling bearing fault diagnosis techniques - autocorrelation and cepstrum analyses», en *2015 23rd Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, Malaga, Spain, 2015, pp. 328-334, Accedido: oct. 05, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org>.
- [85] SKF, «Rodamientos». Grupo SKF, 2015, Accedido: nov. 01, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.skf.com>.
- [86] ISO 15243, *Rolling bearings - Damage and failures - Terms, characteristics and causes*. 2017.
- [87] ISO 20816-8, *Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 8: Reciprocating compressor systems*. 2018.