

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

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

PROYECTO TÉCNICO:

**“EVALUACIÓN DE LAS SEÑALES DE VÍDEO PARA LA DETECCIÓN
DE FALLOS EN RODAMIENTOS Y ACOPLAMIENTOS EMPLEANDO
LA TÉCNICA ESPEJO”**

AUTORES:

CRISTIAN ANDRÉS CARRIÓN ALBERCA
RENÁN XAVIER MONTESINOS LOAIZA

TUTOR:

DR. RENÉ VINICIO SÁNCHEZ LOJA

CUENCA - ECUADOR

2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

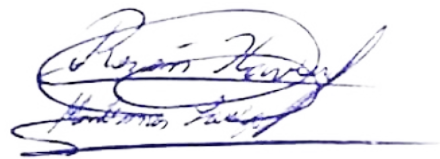
Nosotros, Cristian Andrés Carrión Alberca con documento de identificación N° 1104812860 y Renán Xavier Montesinos Loaiza con documento de identificación N° 1105390908 manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DE LAS SEÑALES DE VÍDEO PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS Y ACOPLAMIENTOS EMPLEANDO LA TÉCNICA ESPEJO”**, 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 nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio de 2021.



Cristian Andrés Carrión Alberca
C.I. 1104812860



Renán Xavier Montesinos Loaiza
C.I. 1105390908

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DE LAS SEÑALES DE VÍDEO PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS Y ACOPLAMIENTOS EMPLEANDO LA TÉCNICA ESPEJO”**, realizado por Cristian Andrés Carrión Alberca y Renán Xavier Montesinos Loaiza, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, julio de 2021.



Dr. René Vinicio Sánchez Loja

C.I. 0103409587

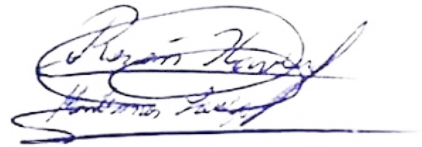
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Cristian Andrés Carrión Alberca con documento de identificación N° 1104812860 y Renán Xavier Montesinos Loaiza con documento de identificación N° 1105390908, autores del trabajo de titulación: **“EVALUACIÓN DE LAS SEÑALES DE VÍDEO PARA LA DETECCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS Y ACOPLAMIENTOS EMPLEANDO LA TÉCNICA ESPEJO”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, julio de 2021.



Cristian Andrés Carrión Alberca
C.I. 1104812860



Renán Xavier Montesinos Loaiza
C.I. 1105390908

DEDICATORIA

Este proyecto dedico primeramente a Dios por brindarme la sabiduría para continuar cada día.

A mi madre y a mi padre, que gracias a su apoyo incondicional esta meta se ha logrado.

Cristian Andrés

DEDICATORIA

Dedico este proyecto: Principalmente a Dios por haberme dado salud y vida para hacer posible que cada una de mis metas se plasmen en la realidad, por haberme brindado sabiduría para sobrellevar cada actividad planteada.

A mis padres: Alvarito y Amparito, por ser ese ejemplo de lucha, perseverancia y haberme brindado un apoyo incondicional, un apoyo que rebasa fronteras a lo largo de esta etapa de formación académica.

A mis hermanos; Ander, Jayden, Melissa, por ser mi espejo y estar ahí siempre motivándome.

A mis abuelitos: Arturo y Marthita; Alonzo y Graciela, por brindarme su apoyo incondicional y darme esos consejos sabios que han influido directamente en mi trayectoria como ser humano.

A mis tíos; Laura, Carlos, Daniel, Damaris, Mayra, Astrid, Yhesty, Fredi, Stalin, Danny, por todo su cariño y motivación.

Renán Xavier

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Victoria y Salvador, que gracias a su esfuerzo y apoyo se ha logrado este objetivo.

Al Dr. Vinicio Sánchez, por brindar su guía y conocimientos para el éxito de este proyecto. A los miembros del GIDTEC; Cristian Torres; Mauricio Villacis; Jean Carlo Macancela; Julio Siguenza, quienes brindaron su apoyo y conocimiento.

Al Dr. Thierry Erbesd presidente del grupo Erbesd Instruments y al Ing. Luis Sabido quienes aportaron con el software y sus conocimientos para el desarrollo de este proyecto.

Cristian Andrés

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Alvarito y Amparito, ya que con su sacrificio me ayudaron a llegar hasta este punto de mi vida, por su constante estímulo, por su apoyo incondicional, por ese amor que solo los Padres están dispuestos a dar a sus hijos, gracias a ellos que son mi principal motor y razón de ser en la vida.

Al director de proyecto, Dr. Vinicio Sánchez, por ser el mentor quien con disciplina, esfuerzo, paciencia y compromiso desde el inicio supo aportar, impulsar y brindar las facilidades para la realización de este proyecto. A los miembros del GIDTEC; Jean Carlo Macancela, Cristian Torres, Julio Sigüencia; quienes a lo largo de este tiempo estuvieron ahí extendiendo la mano para el éxito de este proyecto.

Al laboratorista y miembro del GIDTEC, Mauricio Villacis por su amistad y conocimiento, quien siempre estuvo ahí resolviendo nuestras dudas y ayudándonos a resolver las inquietudes presentadas en el desarrollo de este proyecto.

A mis amigos: Andersón, Mayra, Ariel, Cristian CJ, Gabriel por haberme brindado ese apoyo día a día a lo largo de mi carrera universitaria.

Al Dr. Thierry Erbesd presidente del grupo Erbesd Instruments y al Ing. Luis Sabido, por ser quienes aportaron sus conocimientos para dar respuestas a las inquietudes desarrolladas a lo largo del desarrollo de la experimentación de nuestro proyecto.

Renán Xavier

RESUMEN

El presente trabajo de investigación trata de la “Evaluación de las señales de vídeo para la detección de fallos en rodamientos y acoplamientos empleando la técnica espejo”. Dos metodologías son propuestas como solución para la detección de fallos en rodamientos y acoplamientos; la primera metodología trata de la adquisición y procesamiento de señales y la segunda permite evaluar la técnica de señales de video con respecto a la técnica tradicional que es el monitoreo de vibraciones mediante acelerómetro. Esto con el propósito de brindar un aporte para el estudio de diagnóstico de fallos en rodamientos y acoplamientos mediante el análisis de señales para el monitoreo de la condición.

El capítulo 4, constituye los fundamentos teóricos que aborda el proyecto donde se trata temas relevantes como: mantenimiento basado en la condición, monitoreo de la condición, conceptos fundamentales de vibración, revisión bibliográfica de rodamientos y acoplamientos, para terminar con revisión bibliográfica de señales de video. En el cual se considera contenidos como monitoreo de señales de video y tipos de fallos que es posible detectar. Así mismo para el procesamiento de las señales de video se realiza mediante el software DragonVision® el cual emplea la técnica espejo, este software puede llegar a tener un amplio campo investigativo dentro del monitoreo de la condición aplicado a maquinaria rotativa.

El capítulo 5, presenta el desarrollo del marco experimental; se plantea una metodología para la adquisición de señales de video y señales de vibración. Para ello se parte de la caracterización del banco de vibraciones para luego plantearse el proceso y procedimiento experimental que conlleva a la adquisición de señales. Las señales adquiridas fueron exportadas a los softwares de procesamiento donde a través de un proceso y procedimiento ordenado se realizó el levantamiento de la línea base de ambas técnicas, con la finalidad de establecer una base de datos en condiciones normales y fallo para señales de vibración y video. En la sección 6, se muestra a detalle la metodología aplicada para la evaluación de resultados, al igual que la disposición de los ejes del acelerómetro triaxial que se considera para la comparación con los espectros de vibración obtenidos mediante las señales de video. Por último, en esta sección, se presenta información de la evaluación de las señales con los distintos fallos implantados en el banco de vibraciones. Finalmente, se presenta la discusión de resultados, conclusiones y recomendaciones que han sido realizadas acorde a los objetivos planteados, de igual manera trabajos futuros que pueden desarrollarse siguiendo esta metodología.

ABSTRACT

The present research work deals with the “Evaluation of video signals for the detection of failures in bearings and couplings using the mirror technique”. Two methodologies are proposed as a solution for the fault detection in bearings and couplings; the first methodology deals with the acquisition and processing of signals and the second one allows to evaluate the video signal technique regarding to the traditional technique of vibration monitoring through accelerometer. This with the purpose of providing a contribution for the study of fault diagnosis in bearings and couplings through the analysis of signals for condition monitoring.

Chapter 4, constitutes the theoretical foundations of the project where are introduced relevant topics such as: condition based maintenance, condition monitoring, fundamental concepts of vibration, bibliographic review of bearings and couplings, to finish with a bibliographic review of video signals. In the video signals, contents such as video signal monitoring, types of failures that can be found, because the processing of signals through DragonVision® software is a new technique with a wide research field within the condition monitoring applied to rotating machinery.

Chapter 5 presents the development of the experimental framework; a methodology for the acquisition of video signals and vibration signals is proposed, starting with the characterization of the vibration bank and then, the process and experimental procedure that led to the acquisition of signals is proposed. The acquired signals were exported to the processing software where, through an orderly process and procedure, the baseline of both techniques was carried out in order to establish a database under normal and fault conditions for vibration and video signals. In section 6, the methodology applied for the evaluation of results is shown in detail, as well as the arrangement of the triaxial accelerometer axes considered for the comparison with the vibration spectra obtained by means of the video signals: Spectra plots, frequency values and observations that provide information from the evaluation of the signals with the different faults implemented in the vibration bench. Finally, the discussion of results, conclusions and recommendations that have been made according to the objectives set out are presented, as well as future works that can be developed following this methodology, since it guarantees the repeatability of acquisition and evaluation of vibration and video signals.

ÍNDICE DE CONTENIDO

SECCIÓN	PÁGINA
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	III
CERTIFICACIÓN	IV
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD	V
DEDICATORIA	VII
AGRADECIMIENTOS	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XVIII
ÍNDICE DE TABLAS	XXI
LISTA DE ACRÓNIMOS	XXII
1 INTRODUCCIÓN	1
2 PROBLEMA	3
2.1 Planteamiento del Problema	3
2.1.1 Antecedentes	3
2.1.2 Importancia y Alcance	5
2.1.3 Delimitación	6
3 OBJETIVOS	7
3.1 Objetivo General	7
3.2 Objetivos Específicos	7
4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
4.1 Mantenimiento basado en la condición	8
4.2 Monitoreo de la condición	9
4.3 Vibración	10

4.3.1	Tipos de vibraciones	11
4.3.1.1	Vibración Simple	11
4.3.1.2	Vibración compuesta	11
4.3.1.3	Caracterización de las vibraciones	11
4.4	Señales de vibración	12
4.4.1	Señales de vibración en el dominio del tiempo	12
4.4.2	Señales de vibración en el dominio de la frecuencia	13
4.4.3	Transformada de Fourier	15
4.5	Rodamientos	16
4.5.1	Introducción	16
4.5.2	Ventajas y limitaciones de los rodamientos	16
4.5.3	Mantenimiento de rodamientos	17
4.5.4	Partes de los rodamientos	18
4.5.5	Clasificación y tipos de rodamientos	19
4.5.6	Rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3	19
4.5.7	Fallos en rodamientos	20
4.5.7.1	Selección y caracterización de fallos en rodamientos	21
4.5.7.2	Fallo en pista interna	21
4.5.7.2.1	Revisión bibliográfica de la construcción del fallo en pista interna	22
4.5.7.2.2	Fallos propuestos en pista interna	24
4.5.7.3	Fallos en pista externa	24
4.5.7.3.1	Revisión bibliográfica de la construcción del fallo en pista externa	24
4.5.7.3.2	Fallos propuestos en pista externa	26
4.5.7.4	Fallos en elementos rodantes	26
4.5.7.4.1	Revisión bibliográfica de la construcción del fallo en elementos rodantes	26
4.5.7.4.2	Fallos propuestos en elementos rodantes	28
4.5.8	Efectos que producen los fallos en los rodamientos	28
4.6	Acoplamientos	30
4.6.1	Partes de los acoplamientos	31
4.6.2	Tipos de acoplamientos	31
4.6.3	Ventajas y limitaciones de los acoplamientos	32

4.6.4	Mantenimiento de acoplamientos	32
4.6.5	Selección de acoplamientos	33
4.6.6	Acoplamiento Lovejoy L090	35
4.6.7	Fallos en acoplamientos	35
4.6.7.1	Selección y caracterización de fallos en acoplamientos	36
4.6.7.2	Revisión bibliográfica de la construcción de los fallos en acoplamientos	36
4.6.7.3	Desalineación paralela	38
4.6.7.3.1	Fallos propuestos para desalineación paralela	38
4.6.7.4	Desalineación angular	38
4.6.7.4.1	Fallos propuestos para desalineación angular	39
4.6.8	Efectos que producen los fallos en acoplamientos	39
4.7	Carta de Charlotte	40
4.8	Señales de video	42
4.8.1	Monitoreo de señales de video	42
4.8.2	Técnicas de procesamiento de señales de video	42
4.8.2.1	Técnica subpíxel	43
4.8.2.2	Técnica espejo	43
4.8.3	Tipos de fallos detectados con el monitoreo de señales de video	45
4.9	Resumen del capítulo	45
5	MARCO EXPERIMENTAL: ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE MONITOREO DE LA CONDICIÓN	47
5.1	Metodología para la adquisición de señales de video y señales de vibración	47
5.1.1	Banco de vibraciones	47
5.2	Proceso y procedimiento experimental	49
5.2.1	Proceso experimental	49
5.2.2	Procedimiento experimental	50
5.2.2.1	Acondicionamiento del banco de Vibraciones	50
5.2.2.2	Instrumentación y condiciones de operación	51
5.2.2.3	Emplazamiento de sensores	52
5.2.2.3.1	Acelerómetro	52
5.2.2.3.2	Cámara de video	53
5.2.2.4	Acondicionamiento para la adquisición de datos	55

5.2.2.4.1	Acondicionamiento del software de adquisición de datos de vibración	55
5.2.2.4.2	Acondicionamiento de la cámara de video y la iluminación	56
5.2.2.5	Adquisición de señales	56
5.2.2.6	Exportación de las señales de vibración al software matemático (Matlab) y transferencia de video al software de procesamiento de señales de video DragonVision® . .	57
5.2.2.6.1	Exportación de señales de vibración Matlab . .	57
5.2.2.6.2	Transferencia de video hacia el software DragonVision®	60
5.2.2.7	Acondicionamiento del software de procesamiento de datos	60
5.2.2.7.1	Acondicionamiento del software de procesamiento de señales de vibración (Matlab)	60
5.2.2.7.2	Acondicionamiento del software de procesamiento de señales de video DragonVision®	63
5.2.2.8	Levantamiento de la línea base para señales de vibración y de video	70
5.2.2.8.1	Validación de línea base	70
5.2.2.8.2	Verificación visual	70
5.2.2.8.3	Verificación de ruidos extraños	70
5.2.2.8.4	Verificación de frecuencias características	71
5.2.2.8.5	Resultados de línea base en condiciones normales	73
5.2.2.9	Base de datos de las señales de vibración y video en condición normal y con fallo	74
5.2.2.9.1	Codificación de elementos mecánicos	76
5.2.2.9.2	Codificación de rodamientos	76
5.2.2.9.3	Codificación de acoplamientos	76
5.3	Resumen capítulo.	78
6	EVALUACIÓN DE RESULTADOS	80
6.1	Procedimiento de evaluación de señales de vibración y video	80
6.1.1	Etapa 1	80
6.1.2	Etapa 2 y 3	81
6.1.3	Etapa 4	81

6.1.4	Etapa 5	82
6.2	Dirección de los ejes	83
6.3	Tablas para la evaluación de señales de vibración y video	83
6.3.1	Tablas para la evaluación de señales de vibración y video con fallo en elementos rodantes	84
6.3.2	Tablas para la evaluación de señales de vibración y video con fallo en pista interna	86
6.3.3	Tablas para la evaluación de señales de vibración y video con fallo en pista externa	89
6.3.4	Tablas para la evaluación de señales de vibración y video con fallo de desalineación angular	91
6.3.5	Tablas para la evaluación de señales de vibración y video con fallo de desalineación paralela	93
6.4	Resumen de resultados	95
6.5	Resumen capítulo	97
7	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	98
	CONCLUSIONES	101
	RECOMENDACIONES	102
	TRABAJOS FUTUROS	102
	REFERENCIAS	110
A	Anexos	111

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Técnicas para el monitoreo de la condición	3
Figura 2	Pasos en la estrategia del mantenimiento basado en la condición.	8
Figura 3	Técnicas del monitoreo de la condición.	9
Figura 4	Vibración simple.	11
Figura 5	Vibración compuesta.	11
Figura 6	Caracterización de la vibración.	12
Figura 7	Sistema masa-resorte	13
Figura 8	Onda sinusoidal sistema masa-resorte	13
Figura 9	Dominio de tiempo Vs dominio de frecuencia	14
Figura 10	Señales de vibración	15
Figura 11	Causas de falla en rodamientos.	17
Figura 12	Partes de un rodamiento	18
Figura 13	Partes de un rodamiento	18
Figura 14	Clasificación de los rodamientos	19
Figura 15	Tipos de rodamientos	19
Figura 16	Rodamiento SKF 1207 KTN9/C3	20
Figura 17	Clasificación de fallos en rodamientos según la norma ISO 15243.	21
Figura 18	Fallo en pista interna	22
Figura 19	Espectro de un rodamiento de bolas sin fallos	29
Figura 20	Espectro de un rodamiento en mal estado	29
Figura 21	Acoplamiento tipo mordaza	30
Figura 22	Partes de un Acoplamiento	31
Figura 23	Tipos de acoplamientos.	32
Figura 24	Acoplamiento Lovejoy L090.	35
Figura 25	Dimensiones acoplamiento Lovejoy L090.	35
Figura 26	Fallos en acoplamientos.	36
Figura 27	Desalineación paralela.	38
Figura 28	Desalineación angular.	39
Figura 29	Acoplamiento desalineación Angular.	40
Figura 30	Acoplamiento desalineación paralela.	40
Figura 31	Carta ilustrada de diagnostico de vibración.	41
Figura 32	Software con la técnica espejo	44
Figura 33	Resumen del capítulo	46

Figura 34	Banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana. . .	47
Figura 35	Banco de vibraciones del GIDTEC.	48
Figura 36	Proceso experimental para la adquisición de señales vibración y de video	50
Figura 37	Secuencia de conexión del sistema de adquisición de señales de vibración	53
Figura 38	Emplazamiento del acelerómetro en el banco de vibraciones . . .	53
Figura 39	Secuencia de conexión del sistema de adquisición de señales de video	54
Figura 40	Emplazamiento de la cámara de video en el banco de vibraciones	54
Figura 41	Partes de la interfaz gráfica del programa de adquisición de señales.	55
Figura 42	Proceso para la exportación de la señal de vibración al software matemático Matlab	58
Figura 43	Ventana de Inicio del software Matlab	58
Figura 44	Ventana principal del software matemático (Matlab) donde se carga el programa de análisis de señales de vibración	59
Figura 45	Cargar base de datos a analizar en el software Matlab.	59
Figura 46	Secuencia de transferencia del video al software de procesamiento de señales de video	60
Figura 47	Archivo cargado en el software de procesamiento de señales de vibración	60
Figura 48	Base de datos de vibración	61
Figura 49	Ejes de análisis de la señal de vibración.	61
Figura 50	Espectro de vibración del eje a analizar en el software Matlab. .	61
Figura 51	Carga del archivo en el eje X.	62
Figura 52	Procesamiento de la vibración en el software Matlab.	62
Figura 53	Gráficas resultantes del procesamiento del espectro de vibración en el software matemático Matlab.	63
Figura 54	Calibración de Software DragonVision® para los datos de video	63
Figura 55	Software DragonVision® para los datos de video	64
Figura 56	Pestaña Análisis del software DragonVision®	64
Figura 57	Proceso experimental para el acondicionamiento del software DragonVision®	66
Figura 58	Videos almacenados en el computador	67
Figura 59	Ventana Principal del software DragonVision®	67

Figura 60	Video cargado listo para ir a la función “Buscar Objetivos”.	67
Figura 61	Selección de objetivos en un área específica mediante el icono “Añadir Objetivos”.	68
Figura 62	Selección de los fotogramas por segundo a lo que es capturado el video en el icono “Velocidad de Fotogramas”.	68
Figura 63	Procesamiento del video.	69
Figura 64	Espectros resultantes del procesamiento del video en el software DragonVision®.	69
Figura 65	Proceso a seguir para la validación de la línea base.	70
Figura 66	Estructura de la base de datos del banco de vibraciones del GIDTEC.	75
Figura 67	Codificación para la identificación de los rodamientos	76
Figura 68	Codificación para la identificación de los acoplamientos	77
Figura 69	Resumen del capítulo	79
Figura 70	Metología para la evaluación de las señales de vibración y video	80
Figura 71	Proceso de aplicar FFT a las señales de vibración y video	81
Figura 72	Proceso para comparar las frecuencias características con las señales de vibración y video	81
Figura 73	Proceso para la evaluación de las señales de vibración y video	82
Figura 74	Dirección de los ejes en el emplazamiento del acelerómetro triaxial.	83
Figura 75	Tabla de evaluaciones	84
Figura 76	Resumen capítulo	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Ventajas y limitaciones del monitoreo de la condición	10
Tabla 2	Ventajas y limitaciones de rodamientos	17
Tabla 3	Dimensiones del rodamiento SKF 1207 KTN9/C3	20
Tabla 4	Caracterización fallos en pista interna	23
Tabla 5	Fallos propuestos en pista interna	24
Tabla 6	Caracterización de fallos en pista externa	25
Tabla 7	Fallos propuestos en pista externa	26
Tabla 8	Caracterización de fallos en elementos rodantes	27
Tabla 9	Fallos propuestos en elementos rodantes	28
Tabla 10	Ventajas y limitaciones de acoplamientos	32
Tabla 11	Selección del elastómero.	34
Tabla 12	Dimensiones acople Lovejoy L090.	35
Tabla 13	Caracterización de fallos en acoplamientos.	37
Tabla 14	Fallos propuestos desalineación paralela.	38
Tabla 15	Fallos propuestos desalineación angular.	39
Tabla 16	Parámetros óptimos para la adquisición de señales de video	45
Tabla 17	Especificación del equipo mecánico.	48
Tabla 18	Valores de los parámetros de operación del motor Siemens 1LA7 096-6YA60	49
Tabla 19	Datos técnicos de Banco de Vibraciones del GIDTEC	51
Tabla 20	Parámetros ambientales requeridos para la operación del banco de pruebas	52
Tabla 21	Especificaciones del acelerómetro triaxial PCB 356A15	52
Tabla 22	Descripción interfaz gráfica	56
Tabla 23	Adquisición de señales de vibración y video en el banco de vibraciones del GIDTEC	57
Tabla 24	Descripción de los botones de la ventana principal del software DragonVision®	65
Tabla 25	Descripción de los botones del menú análisis del software DragonVision®	66
Tabla 26	Frecuencias características del banco de vibración	72
Tabla 27	Línea base en condiciones normales del banco de vibraciones . . .	73
Tabla 28	Resultados de línea base en el eje horizontal (X)	74

Tabla 29	Resultados de línea base del eje vertical (Y)	74
Tabla 30	Base de datos de señales de video y de vibración	77
Tabla 31	Comparación de las frecuencias características con las frecuencias obtenidas de las señales de vibración y video	82
Tabla 32	Comparación de señales de vibración y de video con fallo severo en Elementos rodantes el rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3	85
Tabla 33	Tabla comparativa de frecuencias para señales de vibración y video con fallo en elementos rodantes del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3. Fuente: Autor.	86
Tabla 34	Tabla de observaciones para señales de vibración y video con fallo en elementos rodantes del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3	86
Tabla 35	Comparación de señales de vibración y de video con fallo severo en Pista interna del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3	87
Tabla 36	Tabla comparativa de frecuencias para señales de vibración y video con fallo en pista interna del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3	88
Tabla 37	Tabla de observaciones para señales de vibración y video con fallo en pista interna del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3	88
Tabla 38	Comparación de señales de vibración y de video con fallo severo en pista externa del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3	89
Tabla 39	Tabla comparativa de frecuencias para señales de vibración y video con fallo en pista externa del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3	90
Tabla 40	Tabla de observaciones para señales de vibración y video con fallo en pista externa del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3	90
Tabla 41	Comparación de señales de vibración y de video con desalineación angular en el acoplamiento	91
Tabla 42	Tabla comparativa de frecuencias para señales de vibración y video con fallo de desalineación angular en el acoplamiento	92
Tabla 43	Tabla de observaciones para señales de vibración y video con fallo de desalineación angular en el acoplamiento	92
Tabla 44	Comparación de señales de vibración y de video con desalineación paralela en el acoplamiento	93
Tabla 45	Tabla comparativa de frecuencias para señales de vibración y video con fallo de desalineación paralela en el acoplamiento	94

Tabla 46	Tabla de observaciones para señales de vibración y video con fallo de desalineación paralela en el acoplamiento	94
Tabla 47	Resumen de resultados de las señales de vibración y video	95

LISTA DE ACRÓNIMOS

GIDTEC	Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales
MC	Monitoreo de la Condición
IC	Indicador de Condición
MBC	Mantenimiento Basado en la Condición
AFCM	Análisis de la firma de corriente del motor
FFT	Transformada Rápida de Fourier
T	Periodo: es el recíproco de la frecuencia o el tiempo necesario para que un ciclo completo de vibración pase en un punto específico.
F	Frecuencia: es el número de veces que se repite un evento en determinado tiempo.
RMS	Valor eficaz
A	Amplitud de la forma de onda
FT	Transformada de Fourier
TDF	Transformada Discreta de Fourier
CPM	Ciclos por minuto
EDM	Mecanizado por descarga eléctrica
ANN	redes neuronales artificiales
SOM	Mapas autoorganizados
CWT	Transformadas de ondas continuas
BPFO	Frecuencia de pista externa
BPMI	Frecuencia de pista interna
fps	Frames por segundo
BNC	Bayonet Neill-Concelman
LabVIEW	Software de programación gráfica

Lux (Lx) Unidad de iluminancia o nivel de iluminación

dBA Unidad de medida de la intensidad sonora

rhamonic Derivado de Armónico

HD Resolución de imagen de 720p (1.280 x 720 píxeles - aproximadamente 1 millón de píxeles).

Full HD Resolución de imagen de 1080p (1.920 x 1.080 píxeles - aproximadamente 2 millones de píxeles).

rpm revoluciones por minuto

Hz Unidad de frecuencia del sistema Internacional

TWF/FFT Forma de onda en el tiempo/ Transformada Rápida de Fourier

1. INTRODUCCIÓN

En la industria la maquinaria rotativa generalmente opera bajo una variedad de condiciones, como por ejemplo: cambios frecuentes de carga y altas velocidades. Estos cambios dan como resultado una degradación del rendimiento, así como fallos mecánicos que se pueden presentar durante su funcionamiento [1]. Es por eso que al diagnóstico se lo debe realizar de manera rápida y precisa, debido a que es crítico en la industria para mejorar la efectividad y confiabilidad del sistema [2,3]. Por lo tanto, se ha buscado en la industria sistemas de monitoreo efectivos que minimicen las fallas inesperadas reduciendo los costos de servicio y el tiempo de inactividad no programado; es por eso que, en las últimas décadas se han empleado diversos sensores para medir las respuestas dinámicas que se presentan en la maquinaria rotativa [4]. Estos pueden usarse para monitorear el estado del equipo, así como también la vibración mecánica, la temperatura, la corriente eléctrica y campo magnético [5]. Debido a esto, actualmente existe un gran interés en los métodos inteligentes de diagnóstico de fallas capaces de estimar las condiciones de la máquina con alta precisión y en poco tiempo [6].

La vida útil de un componente se puede estimar mediante el análisis de la señal de vibración [6]. Con esta técnica se pueden identificar diferentes tipos de fallos que se pueden detectar a través de mediciones realizadas utilizando sensores junto con sistemas de adquisición de datos. Al emplear un sistema de diagnóstico de fallas basado en el análisis de vibraciones, los operadores de motores eléctricos pueden reducir o incluso prevenir fallas inesperadas en rodamientos como en acoplamientos [7].

El análisis de vibraciones es una de las técnicas más potentes y fiables del monitoreo de la condición para determinar fallos durante el funcionamiento de la maquinaria rotativa [8]. Al analizar el espectro de vibraciones, es posible detectar desalineaciones e identificar fallas de desbalanceo [6], siendo una actividad clave tanto para fines de seguridad como de mantenimiento. Para realizar el análisis de vibraciones se basa en acelerómetros, este resulta ser más complejo en su instalación como en su procesamiento debido a la necesidad de identificar un punto de referencia cerrado a la estructura bajo prueba, los cuales pueden ser mejoradas o sustituidas por dispositivos basados en video. El desarrollo de sistemas basados en señales de vídeo permite utilizar este tipo de dispositivos para la estimación remota de la vibración, simplificando la instalación del sistema de medición en el caso de estructuras o motores [9–11].

En el presente trabajo se va a evaluar las señales de video procesadas mediante un software llamado DragonVision®, el cual fue proporcionado al grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Industriales (GIDTEC) a través de Erbesd Instruments. Para ello se parte de una comparación de las señales de vibración adquiridas mediante un acelerómetro y las señales de video adquiridas mediante una cámara de video; aplicado a fallos realizados en rodamientos y acoplamientos, que proporcionan información en una línea base en condiciones normales y condiciones de fallo en los elementos antes mencionados.

2. PROBLEMA

2.1. Planteamiento del Problema

2.1.1. Antecedentes

El mantenimiento predictivo es empleado para advertir fallas en los equipos, indicando cuándo una parte o componente del equipo puede fallar. Es así como, una parte importante de este tipo de mantenimiento es el Monitoreo de la Condición (MC) que permite obtener indicadores de condición (IC). Estas variables proveen información para la detección de un fallo [12], logrando así aumentar la fiabilidad de los sistemas de mantenimiento, por lo que en el GIDTEC se trabaja en proyectos sobre mantenimiento basado en la condición de maquinaria rotativa.

El mantenimiento basado en la condición (MBC) es una estrategia de mantenimiento que recomienda tomar decisiones de mantenimiento basadas en la información recopilada a través del monitoreo de la condición, de hecho, consiste en tres pasos principales: adquisición de datos, procesamiento de datos y toma de decisiones de mantenimiento [13]. A nivel industrial, es conocido que al aplicarse estas técnicas de monitoreo en tiempo real se reduce las paradas no programadas manteniendo la maquinaria operativa el mayor tiempo posible, de tal forma que el coste de operación disminuye [14]. En la Figura 1, se muestran las diferentes técnicas empleadas en el monitoreo de la condición (MC).

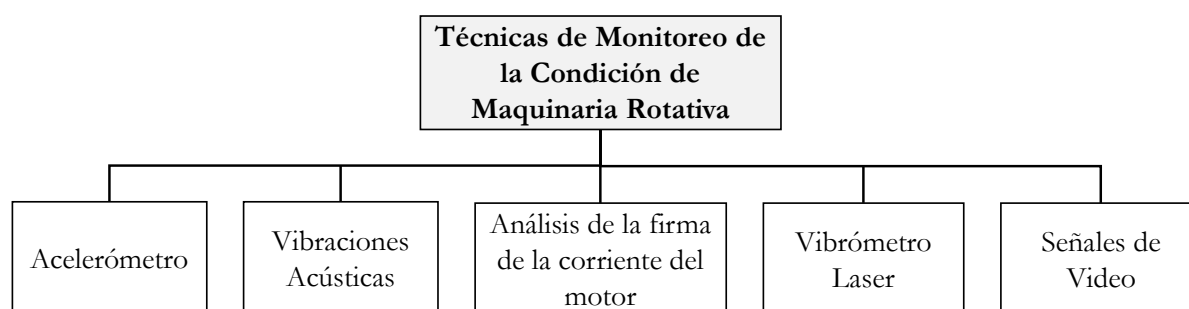


Figura 1: Técnicas para el monitoreo de la condición. **Fuente:** [Autor].

En el GIDTEC, se han realizado proyectos de titulación para el grado de Ingeniero Mecánico tales como, “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” [15], “Adquisición de señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de severidad de fallos en maquinaria rotativa” [16], “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” [17], “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 ” [18], los cuales se han enfocado en el levantamiento de una base de datos de señales de vibración con diferentes fallos.

Los proyectos antes mencionados han empleado diferentes técnicas de MC, como son el acelerómetro y emisiones acústicas, estas técnicas necesitan estar en contacto con la superficie o maquina a analizar. De igual manera se utilizan otras técnicas no invasivas, como vibrómetro láser el cual tiene un elevado costo de implementación. Por otra parte, el análisis de la firma de corriente del motor (AFCM) tiene el inconveniente que la frecuencia de los fallos puede sobreponerse con la frecuencia de la fuente de alimentación, lo cual dificulta la detección del fallo. Por lo tanto, surge la necesidad de aplicar el análisis de vibraciones mediante señales de video el cual emplea la técnica espejo. Para ello se utiliza un programa de análisis de vibraciones que permite evaluar el comportamiento de la maquinaria sin entrar en contacto con la misma [19].

2.1.2. Importancia y Alcance

En la industria los rodamientos y acoplamientos son uno de los componentes más críticos, debido a las condiciones de operación a las que se encuentran expuestos, como; sobrecargas, lubricación inadecuada, y mal montaje. Cualquier fallo en estos elementos mecánicos ocasionará una desviación en el estado normal de la maquinaria rotativa, como también disminución en la precisión, reducción de productividad e incluso incremento en los riesgos de seguridad [20].

Los métodos tradicionales de monitoreo de la condición se basan esencialmente en la medición y diagnóstico de fallas mediante sensor monomodal (acelerómetro o micrófono), estos sensores tienden a estar expuestos a interferencias externas y ruido, haciendo que estos métodos no sean lo suficientemente adecuados para tomar una decisión confiable acerca del diagnóstico de fallas en rodamientos y acoplamientos [21]; es por eso que en este trabajo se aborda la detección de fallos en rodamientos y acoplamientos empleando la técnica espejo, la cual es una técnica no invasiva y con un campo investigativo amplio que servirá de soporte para el monitoreo de la condición en maquinaria rotativa en tiempo corto.

Se propone comparar los espectros obtenidos para la detección de fallos en rodamientos y acoplamientos mediante la adquisición de señales de vibración y de video. Las señales de video se procesan mediante un software especializado el cual emplea la técnica espejo y para las señales de vibración se procesan mediante la transformada de Fourier, con la finalidad de identificar el tipo de fallo.

2.1.3. Delimitación

El banco de vibraciones del GIDTEC, permite emular diferentes fallos en elementos mecánicos como son: fallos en rodamientos (pista externa, pista interna y elementos rodantes) y acoplamientos (desalineación angular y desalineación paralela) que afectan la condición operativa del mismo que permite tener una apreciación real de lo que sucede en la industria.

Con los fallos planteados en el presente trabajo de investigación se pretende establecer una base de datos que permita evaluar las señales de video con respecto a las señales de vibración, que aporte información sistematizada y sirva de soporte investigativo para la mejora de esta técnica no invasiva aplicada a maquinaria rotativa dentro del monitoreo de la condición, para el procesamiento de las señales de video es necesario realizar una calibración en el software DragonVision® misma que se basa en el uso de la distancia de una parte del elemento a analizar, para poder establecer los valores en la amplitud del espectro. El GIDTEC se encargará del estudio para la realización de trabajos futuros con miras a implementarlo en la industria donde se requiera y se necesite aplicar monitoreo de la condición sin entrar en contacto directo con el equipo a analizar.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

- Evaluar las señales de video para la detección de fallos en rodamientos y acoplamientos empleando la técnica espejo.

3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar la técnica espejo en el procesamiento de las señales de video para la detección de fallos en rodamientos y acoplamientos.
- Establecer una metodología para la detección de fallos en rodamientos y acoplamientos mediante la técnica espejo en el procesamiento de señales de video.
- Implementar y evaluar la metodología para la detección de fallos en rodamientos y acoplamientos mediante la técnica espejo en el procesamiento de las señales de video.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1. Mantenimiento basado en la condición

El MBC, es un programa que se encuentra dentro de la estrategia de mantenimiento predictivo para la toma de decisiones. Está basado en el diagnóstico en tiempo real de fallos inminentes y el pronóstico de la salud futura de los activos [22] mediante el proceso de monitoreo de la condición [23]. El MC permite recopilar, analizar y presentar los datos de los equipos por medio de tendencias espectrales, mismos que se utilizan para proyectar los fallos del equipo. Una vez que se conoce el momento en que se produce el fallo, se pueden tomar medidas para evitar o retrasar el fallo; en consecuencia, la confiabilidad del equipo aumenta.

El MBC, utiliza varios parámetros de proceso como: presión, temperatura, vibración, flujo y muestras de materiales (aceite y aire), que permiten controlar las condiciones de operación del equipo. Con los parámetros y muestras, el MBC obtiene indicadores de estado que indican rendimiento e integridad, proporcionando información para programar acciones de corrección oportunas; disminuyendo costos de producción y paradas inesperadas [24, 25].

Como indica Córdova *et al.* [16] y S. Kumar *et al.* [26] para la aplicación de un correcto programa de MBC se tiene que seguir tres pasos fundamentales como se observa en la Figura 2.

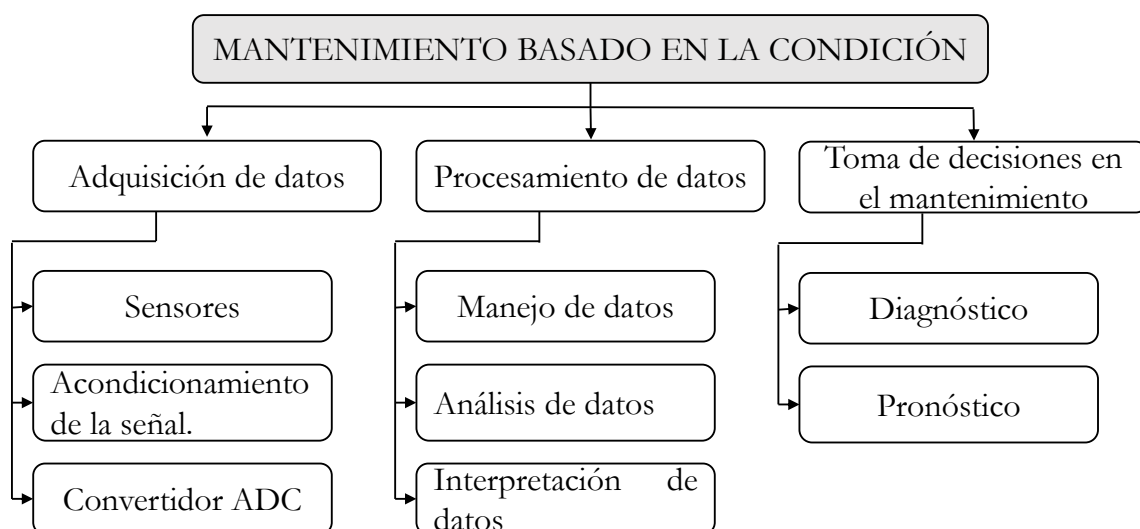


Figura 2: Etapas del programa de mantenimiento basado en la condición. **Fuente:** [26].

4.2. Monitoreo de la condición

El Monitorio de la condición (MC), se puede definir como un proceso que permite determinar la condición de la máquina y prevenir una falla de la misma, sugiriendo acciones de mantenimiento cuando sea oportuno [23]. El MC consiste en recopilar datos del sistema o equipo por medio de varios sensores que permiten captar vibración, para luego procesarlos a fin de obtener información significativa, brindando así, una evaluación de la condición completa y detallada del elemento del equipo a analizar; diversas técnicas del MC(ver Figura 3) se pueden utilizar para determinar la condición de fallo, el monitoreo de condición es un medio de implementación del mantenimiento basado en la condición [23, 27, 28].

Las técnicas de monitoreo de la condición consisten en varios procedimientos que se aplican a una tarea en específico, en este caso a adquirir información de la condición operativa en la que se encuentra la máquina; es por ello que la adquisición de datos se realiza mediante diferentes técnicas, las cuales se presentan en la Figura 3.

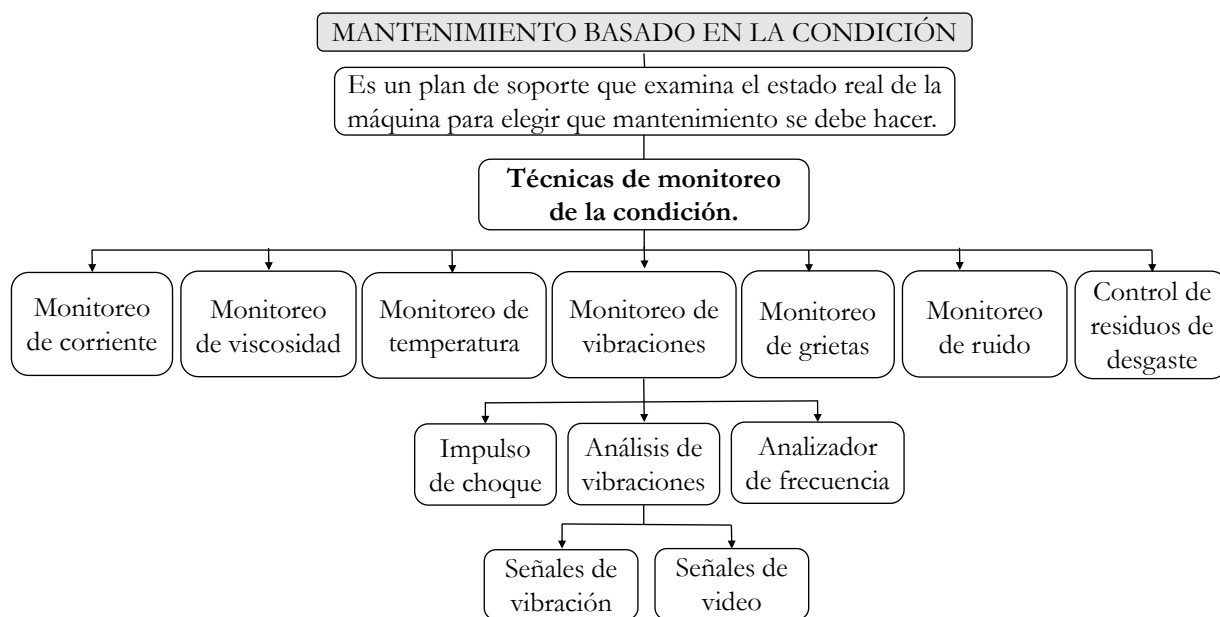


Figura 3: Técnicas del monitoreo de la condición. **Fuente:** [Autor].

El monitoreo de vibración es un procedimiento de naturaleza no destructiva que permite monitorear el estado de la máquina en funcionamiento. En efecto, varias vibraciones de este tipo se encuentran conectadas a eventos ocasionales en el funcionamiento de la máquina, tal es el caso de: ejes giratorios, dientes de engranajes de mallado, campos eléctricos giratorios, entre otros [29]. El análisis del monitoreo de vibraciones se basa fundamentalmente en la firma de vibración, donde la amplitud que se genera da una señal,

de la gravedad de la falla, mientras que la frecuencia indica la fuente de imperfección del problema [30].

En consecuencia, los métodos basados en condiciones se pueden utilizar tanto para el control de calidad como para la planificación del mantenimiento. Este último se utiliza como un sistema de alerta temprana donde las paradas no planificadas son un problema [31]. La desventaja del MC es que se requiere una inversión inicial demasiado elevada. Sin embargo, las ventajas que brinda son diversas entre ellas: el ahorro de costos de producción, minimizar tiempos de inactividad y maximizar la vida útil de los elementos del equipo. Por lo tanto, la seguridad y fiabilidad aumentan [27]. A continuación en la Tabla 1, se presenta las ventajas y limitaciones del MC de manera sistematizada.

Tabla 1: Ventajas y limitaciones del monitoreo de la condición. **Fuente:** [32].

Ventajas	Limitaciones
Diagnosticar fallos con problemas específicos.	El costo inicial de implementar este sistema y la adquisición de instrumentos para el diagnóstico es inicialmente alto.
Pronosticar la vida útil de la maquinaria.	Requiere de personal especializado para la operación de equipos e instrumentos.
Pronosticar el tiempo que podría funcionar el equipo sin riesgo de fallo.	Requiere capacitación constante en las técnicas de interpretación y diagnóstico.
Permitir el análisis paramétrico de funcionamiento.	

4.3. Vibración

Glen White [12], define a la vibración como: “La oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio, la cual llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero. Este tipo de vibración se llama de cuerpo entero, es decir que todas las partes del elemento se mueven en la misma dirección”.

De manera simple, un sistema vibratorio involucra la transferencia de energía potencial a energía cinética de manera alternativa y viceversa, en respuesta oscilante de los cuerpos a perturbaciones, como una fuerza externa existente en el sistema desde su posición de equilibrio; de ahí que todo cuerpo que tiene masa y una rigidez finita tiene la capacidad de vibrar [33, 34].

4.3.1. Tipos de vibraciones

4.3.1.1. Vibración Simple

La base principal de las señales de vibración en el dominio del tiempo son las ondas sinusoidales. Como se muestra en la Figura 4, estas son las más simples y son la representación de las oscilaciones puras [35].

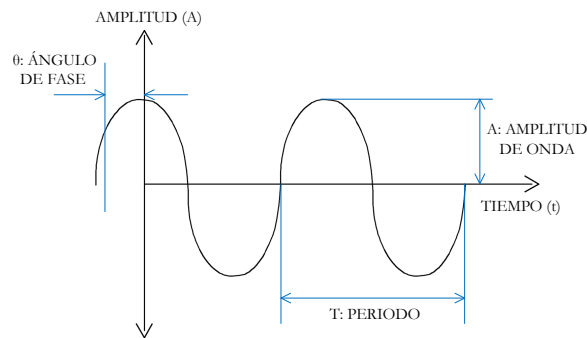


Figura 4: Vibración simple. **Fuente:** [35].

4.3.1.2. Vibración compuesta

En la Figura 5, se muestra una vibración compuesta; misma que es la sumatoria de varias señales sinusoidales que comprenden cada uno de los componentes que se encuentran en la máquina, mas todos los golpeteos y vibraciones aleatorias [35].

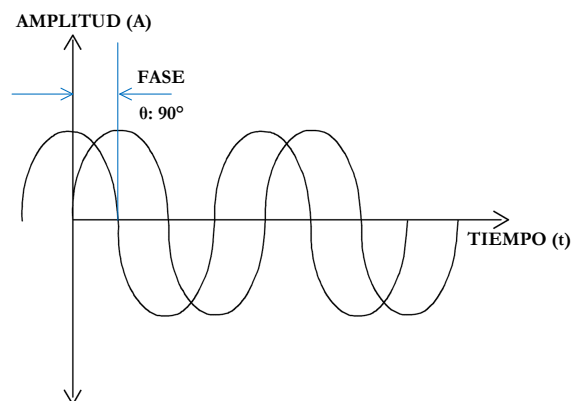


Figura 5: Vibración compuesta. **Fuente:** [35].

4.3.1.3. Caracterización de las vibraciones

En la Figura 6, se presenta el movimiento sinusoidal; el cual está conformado por las características que se mencionan a continuación [36]:

- Periodo (T): es el tiempo necesario para que la onda realice un ciclo, su unidad de medida es el segundo.
- Frecuencia (F): es el número de veces que se realiza el ciclo completo de oscilación en un segundo, su unidad de medida es el Hz.
- Valor eficaz (RMS): Este valor es igual a 0.707 del valor pico, se lo utiliza para medir la energía que brinda la forma de onda.
- Amplitud de la vibración (A): es la aceleración siendo su unidad de medida el m/s^2 .
- Ejes de vibración: se producen en el eje X, eje Y, y eje Z.

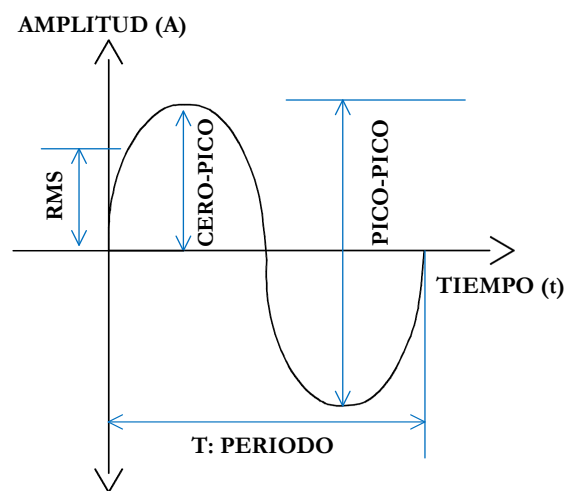


Figura 6: Caracterización de la vibración. **Fuente:** [35].

4.4. Señales de vibración

Señal de vibración es toda información de magnitud física variable que se convierte a magnitud eléctrica mediante un transductor. Cabe recalcar que esta información es extraída de un movimiento oscilatorio de pequeña amplitud [35].

Las señales de vibración se pueden representar en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. A continuación, se presenta a detalle cada una de ellas.

4.4.1. Señales de vibración en el dominio del tiempo

En la Figura 7, se presenta físicamente una oscilación pura. Las señales de vibración en el dominio del tiempo tienen como base a las ondas sinusoidales, estas son las más simples y son quienes representan a la oscilación pura [35].

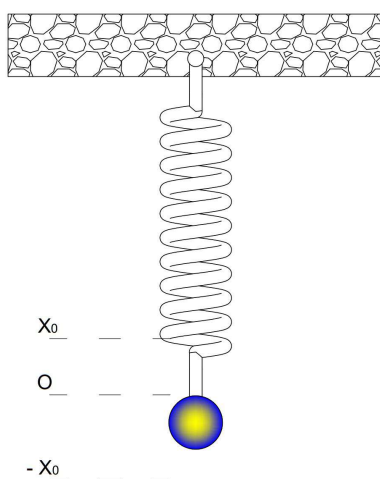


Figura 7: Sistema masa-resorte. **Fuente:** [Autor].

Nótese en la Figura 7, si la masa del sistema se suelta desde una distancia (O) en condiciones ideales, se producirá un movimiento armónico simple que tendrá una amplitud X_0 , ahora sí a la masa vibrante se le adiciona un lápiz y una hoja en la parte posterior; de manera que pueda marcar su posición al mover el papel a velocidad constante hacia el lado izquierdo se formará una gráfica tal como se indica en la Figura 8:

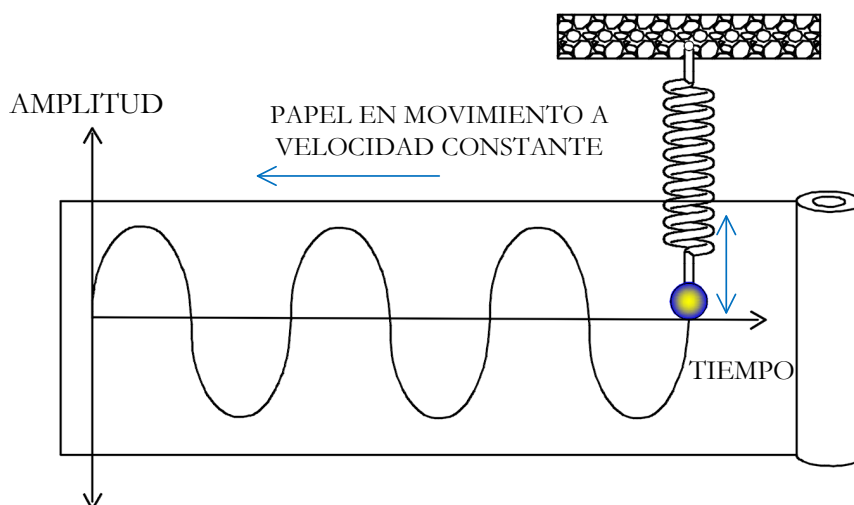


Figura 8: Onda sinusoidal sistema masa-resorte. **Fuente:** [35].

4.4.2. Señales de vibración en el dominio de la frecuencia

La frecuencia es una característica simple y de mucho interés en análisis de vibraciones, se define como el número de ciclos que ocurren en un segundo; las unidades en las que se mide son los Hz o los CPM (ciclos por minuto) [12, 37].

El análisis de señales en el dominio de la frecuencia admite descubrir aspectos de la señal que resulta muy difícil o imposible de observar a partir de su representación en el

dominio del tiempo. Por lo tanto, cuando estas componentes se grafican en el dominio de la frecuencia se detectan fácilmente debido a que no quedan cubiertas o envueltas por señales de gran amplitud [38].

Glen White [12, p. 33] sostiene que; “Algunos eventos que se traslapan y que son confusos en el dominio del tiempo están separados en componentes individuales en el dominio de la frecuencia”. De tal modo, al tener la onda en el dominio de la frecuencia se puede comparar el pico de vibración con la frecuencia característica que otorga el fabricante de la máquina, por ejemplo, en la Figura 9 se observa la diferencia que existe entre analizar en el dominio de la frecuencia versus analizar en el dominio del tiempo.

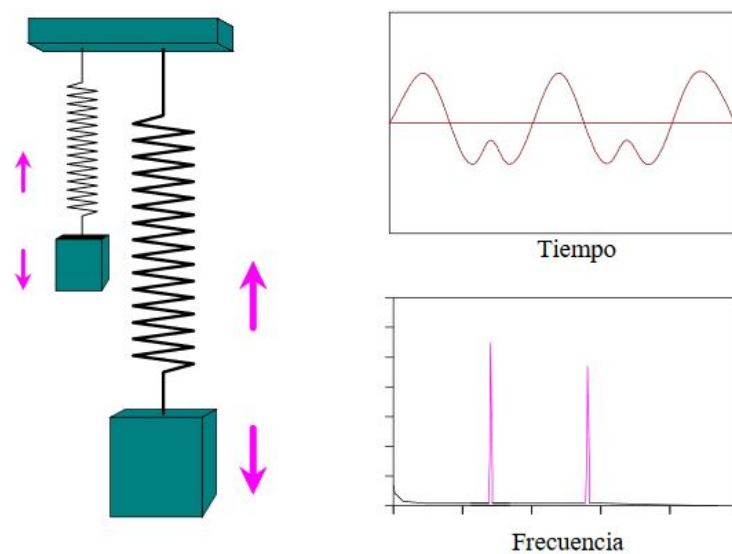


Figura 9: Dominio de tiempo Vs dominio de frecuencia. **Fuente:** [12].

La forma de onda de vibración contiene una gran cantidad de información que no es evidente [12], es por eso que se analiza el espectro de la señal. En la Figura 10 se define que es una señal de vibración, cómo se mide, sus características y los términos de la forma de onda.

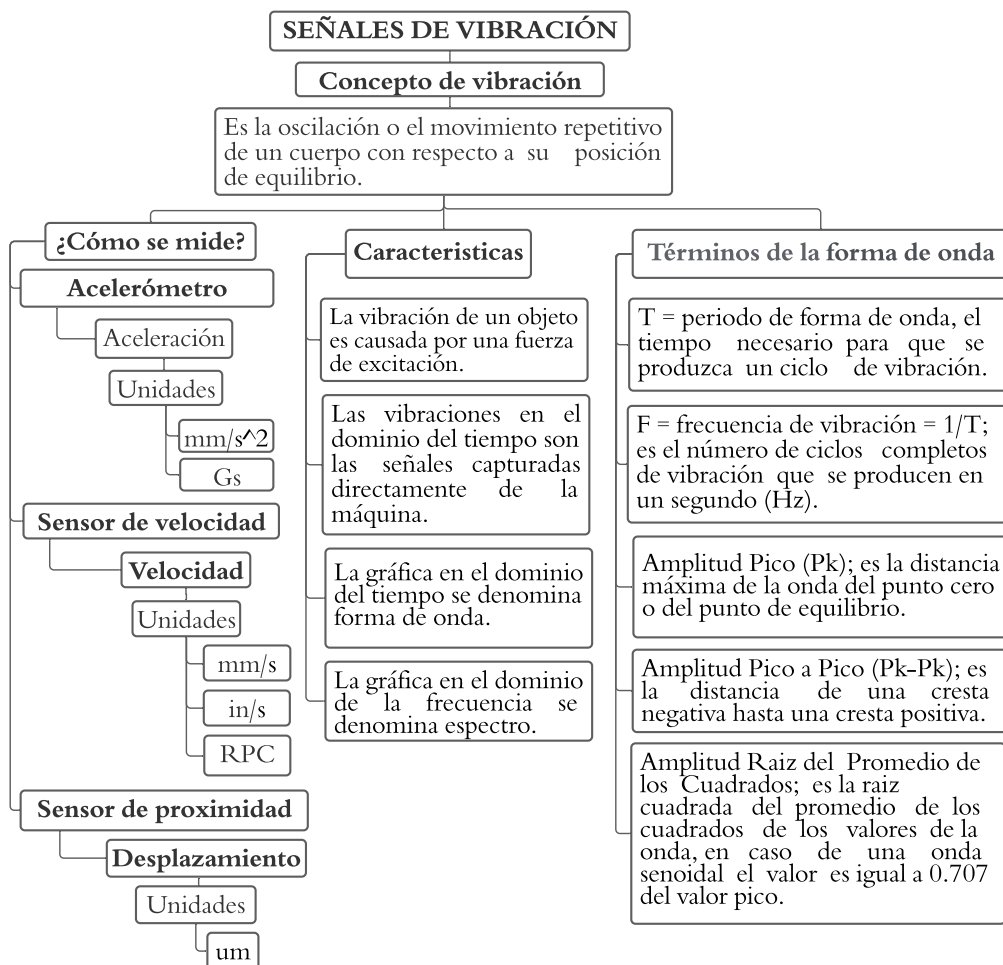


Figura 10: Señales de vibración. **Fuente:** [Autor].

4.4.3. Transformada de Fourier

Para comprender la transformada rápida de Fourier (FFT), es importante primero definir el concepto de Transformada de Fourier (FT). Nelson Arias y Jorge Ortiz [39] definen a la FT como: “El procedimiento matemático que descompone una función en las frecuencias que le forman de la misma manera que un prisma descompone la luz en los diferentes colores y longitudes de onda”. Matemáticamente se demuestra que una señal periódica se puede descomponer en una suma de senos y cosenos formando una base ortogonal, de esta forma, señales como la voz o las ondas se pueden descomponer en una sumatoria de señales trigonométricas [40]. Dicho de otra manera, la transformada de Fourier permite conocer las diferentes componentes frecuenciales presentes en una señal estacionaria, debido al hecho que permite a un evento que abarca un periodo de tiempo corto extenderse sobre un largo rango de frecuencias o viceversa. [12, 41].

Sea $x(t)$ una señal continua; se define la transformada de Fourier de x , denotada con

$X(\omega)$, como se muestra en la ecuación 1:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

Donde $\omega = \frac{2\pi}{T}$, que representa la frecuencia.

La FFT es un algoritmo de computadora que calcula la transformada discreta de Fourier (TDF) de manera rápida y eficaz, aunque pone algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante [12, 17].

4.5. Rodamientos

4.5.1. Introducción

Los rodamientos son elementos normalizados que se utilizan fundamentalmente en máquinas rotativas, como elementos capaces de permitir la rotación y transmisión de carga entre componentes rotatorios de los elementos mecánicos en la máquina [42, 43]; el rodamiento consta de dos aros concéntricos con caminos de rodadura en la mayoría esféricos, sobre los que se desplazan unos cuerpos rodantes ya sea bolas o rodillos, mismos que permiten la movilidad de la parte giratoria respecto de la fija [44].

Generalmente los rodamientos pueden ser utilizados hasta el final de su vida útil, si es que se usan de manera apropiada; sin embargo, muchos de estos todavía fallan debido a un fallo prematuro causado por: una mala selección, manejo inadecuado, lubricación y/o montaje del rodamiento [45]. Los rodamientos operan inadecuadamente durante el servicio cuando son sometidos a vibraciones y/o sobrecargas que se producen por errores en el montaje tal como es el caso del desbalanceo, desalineamiento de ejes, mal montaje de poleas o por una selección inadecuada de estos, es decir, que el rodamiento no cumpla las condiciones de diseño [46].

4.5.2. Ventajas y limitaciones de los rodamientos

Los rodamientos presentan las siguientes ventajas y limitaciones, como se muestra en la Tabla 2:

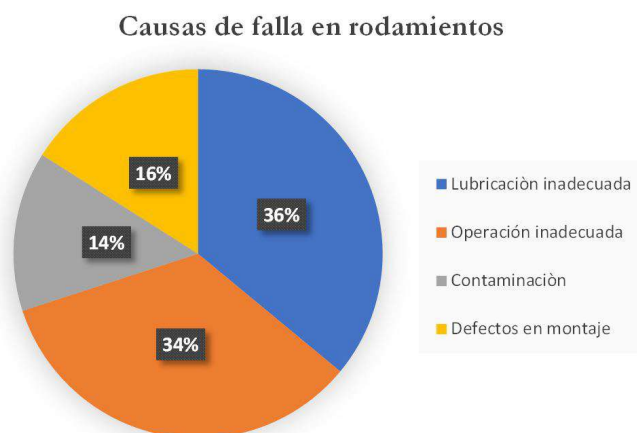
Tabla 2: Ventajas y limitaciones de rodamientos. **Fuente:** [Autor].

Ventajas	Limitaciones
Rozamiento insignificante, sobre todo en el arranque	Sensibles a choques o posibles sobrecargas.
Gran capacidad de carga	Sensibles a errores de montaje.
Desgaste prácticamente nulo durante el funcionamiento	Imposibilidad de reparación.
Facilidad de recambio, dado que son elementos normalizados.	
Precios discretos, dado que los lotes de fabricación son de cantidades considerables.	

4.5.3. Mantenimiento de rodamientos

Generalmente se estima que más del 90 % de todas las máquinas giratorias contienen rodamientos. Los rodamientos desafortunadamente son susceptibles a una multitud de deficiencias como: la inadecuada lubricación, el incorrecto montaje, la contaminación. Es por ello que menos del 10 % de los rodamientos alcanzan la vida útil esperada [47].

Los rodamientos deben inspeccionarse regularmente durante su funcionamiento. Esta inspección es básica, además muy necesaria, ya que cualquier fallo en un rodamiento puede aumentar el deterioro del rodamiento y otros componentes mecánicos pudiendo llegar a ocasionar la parada de la máquina. Esta inspección puede realizarse a través de cuatro procedimientos: escuchar ruidos anormales, comprobar temperatura, vigilar escapes y fugas de lubricación; a fin de, definir la causa de la falla (ver Figura 11) [48].

**Figura 11:** Causas de falla en rodamientos. **Fuente:** [49].

La aparición de fallos en rodamientos ha llevado a los especialistas en mantenimiento a realizar numerosas investigaciones, de las cuales han surgido gran cantidad de métodos para la detección predictiva de fallos incipientes. Sin embargo, en el ámbito industrial se requieren métodos de mantenimiento con costos reducidos y de resultados satisfactorios, siendo el método denominado análisis de vibraciones el cual ha encontrado gran implementación en la industria; este a su vez centra su estudio en velocidades y aceleraciones mecánicas que presenta el motor cuando está en condiciones normales y de fallo [50, 51]. En consecuencia, se puede detectar y diagnosticar fallos antes que se desarrollen completamente tomando de esta manera todas las medidas correctivas con antelación y realizándolas en el momento más conveniente solo con los elementos estrictamente necesarios, esto conlleva a la reducción en el costo de reparación y en el tiempo de detención [51].

4.5.4. Partes de los rodamientos

Los rodamientos tienen las siguientes partes como se observa en la Figura 12 y Figura 13 :

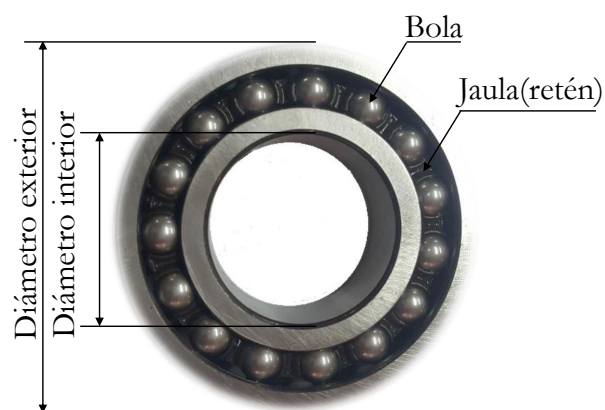


Figura 12: Partes de un rodamiento rígido de bolas. **Fuente:** [Autor].



Figura 13: Partes de un rodamiento rígido de bolas. **Fuente:** [Autor].

4.5.5. Clasificación y tipos de rodamientos

Cada tipo de rodamiento presenta características especiales de acuerdo con la finalidad de su aplicación y con sus elementos constituyentes [48]. A continuación, en la Figura 14 se presenta la clasificación de los rodamientos según NSK Europe y en la Figura 15 se indican los tipos de rodamientos más utilizados en la industria:

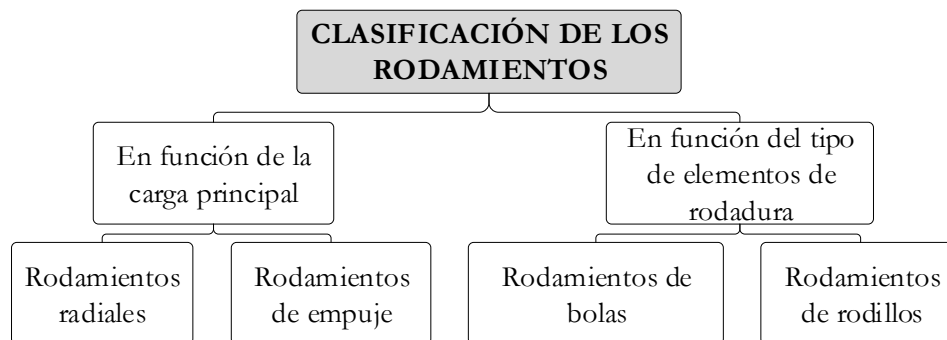


Figura 14: Clasificación de los Rodamientos. **Fuente:** [52].

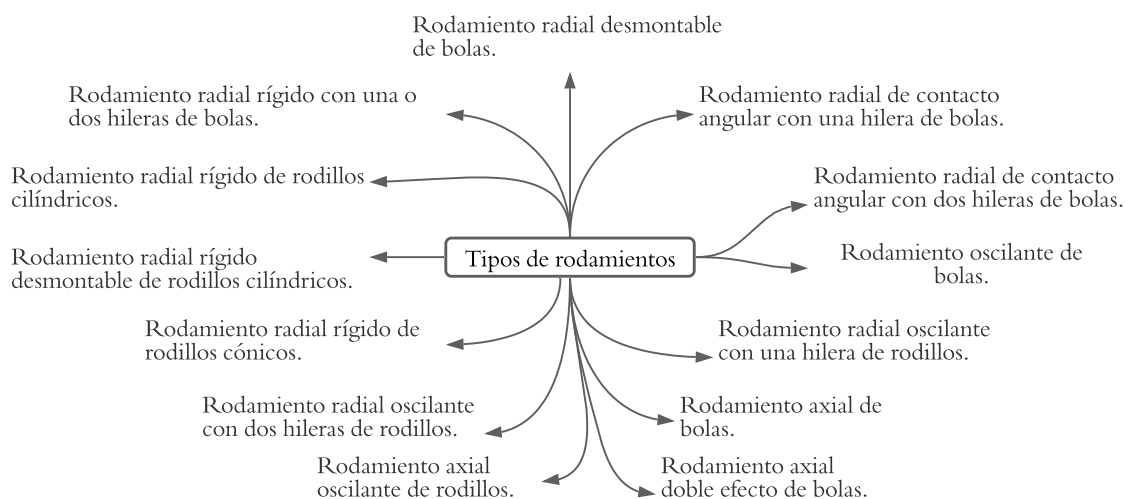


Figura 15: Tipos de Rodamientos. **Fuente:** [Autor].

4.5.6. Rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3

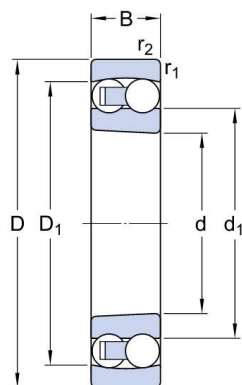
En la Figura 16, se aprecia el rodamiento de bolas a rótula marca SKF 1207 EKTN9/C3 utilizado en la experimentación, este tipo de rodamiento tiene dos hileras de bolas, un camino de rodadura esférico común en el aro exterior y dos ranuras profundas continuas en los caminos de rodadura del aro interior. Por lo general se encuentran disponibles abiertos o sellados [53].



Figura 16: Rodamiento SKF 1207 KTN9/C3. **Fuente:** [54].

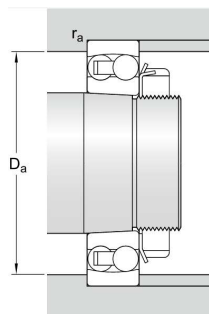
En la Tabla 3 se aprecia las dimensiones correspondientes al rodamiento SKF 1207 KTN9/C3.

Tabla 3: Dimensiones del rodamiento SKF 1207 KTN9/C3. **Fuente:** [54].



Dimensiones

d	35 mm
D	72 mm
B	17 mm
d ₁	≈ 47 mm
D ₁	≈ 60.9 mm
r _{1,2}	min. 1.1 mm
agujero cónico, cónico	



Dimensiones del alojamiento

D _a	máx. 65 mm
r _a	máx. 1.1 mm

4.5.7. Fallos en rodamientos

Los tipos de fallos que se pueden dar en los rodamientos se presentan en la Figura 17.

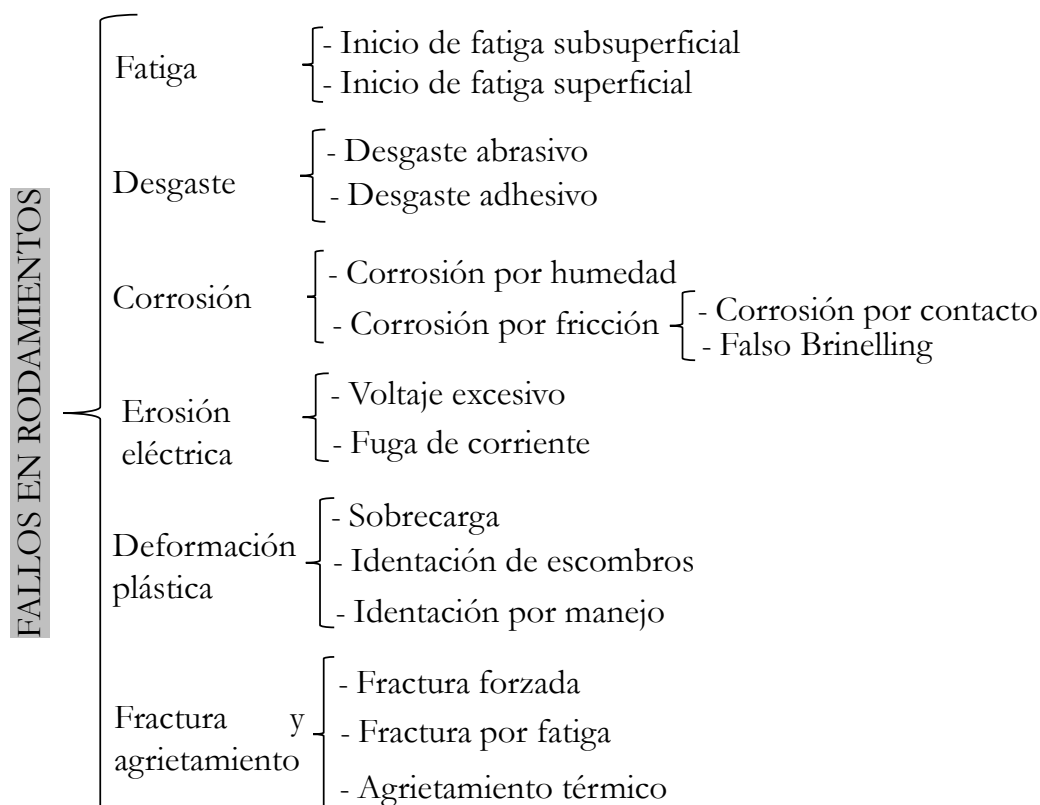


Figura 17: Clasificación de fallos en rodamientos según la norma ISO 15243. **Fuente:** [55].

4.5.7.1. Selección y caracterización de fallos en rodamientos

Los rodamientos pueden fallar por: errores en el montaje, lubricación inadecuada, defectos internos en la fabricación, desalineamiento o mala selección. Los defectos en los rodamientos se pueden clasificar como distribuidos (rugosidades superficiales) y localizados (grietas, hendiduras, resaltes, picaduras y descascaramiento) [56].

La falla podría empezar en alguna de las partes del rodamiento, dependiendo en donde se presente la falla, esta podría crecer progresivamente ya sea lenta o aceleradamente, de acorde a la condición operativa en la que se encuentre la máquina [57].

4.5.7.2. Fallo en pista interna

Los principales fallos en pista interna (ver Figura 18) de los rodamientos son agrietamiento o desastillamiento del material, generados por: errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, incrustación de partículas externas o lubricación deficiente [58].

Dentro de los armónicos los picos predominantes 1X y 2X RPS representan la frecuencia de falla en pista interna en dirección radial. Así mismo, el contacto metal-metal entre los

elementos rodantes y las pistas generan pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 kHz [58].



Figura 18: Fallo en pista interna. **Fuente:** [59].

4.5.7.2.1. Revisión bibliográfica de la construcción del fallo en pista interna

Los fallos en pista interna de un rodamiento son los más estudiados. Por lo general se presentan en forma de desprendimiento que va desde un pequeño porcentaje del ancho de la pista interna hasta ocupar todo el ancho. En algunos casos los fallos en pista interna se ocasionan artificialmente mediante electroerosión, mecanizado por descarga eléctrica (EDM) entre otros.

E. E. Pacheco Córdova [60] presenta una revisión bibliográfica de los fallos en pista interna de un rodamiento, los cuales se muestran en la Tabla 4, indicando principalmente una descripción del artículo, método de construcción y las dimensiones de los fallos introducidos.




Tabla 4: Caracterización fallos en pista interna. **Fuente:** Adaptado de: [60].

Referencia	Descripción del artículo	Imagen del fallo	Método de construcción	Dimensiones	Nivel de severidad
[61]	En el presente artículo se muestra un estudio para analizar las vibraciones relacionadas a cuatro condiciones en los rodamientos, fallos en pista interna, fallos en pista externa y en los elementos rodantes		Inducida artificialmente por una pluma eléctrica	Picadura de: $\varnothing 2mm$	Moderado: 40 %
[62]	En el presente artículo se presenta el estudio de una nueva técnica de procesamiento de señales, el análisis del espectro de wavelet, para el diagnóstico incipiente de fallos en rodamientos. Para la experimentación se consideran cuatro niveles de severidad: rodamientos sanos, rodamientos con fallos en pista interna, rodamientos con fallos en pista externa, rodamientos con fallas en los elementos rodantes.		Electroerosión	Picadura de: 0,41 mm. 0,47 mm. 0,56 mm.	Bajo: 10 %
[63]	En el presente artículo se muestra un estudio comparativo entre técnicas de computación blanda, redes neuronales artificiales (ANN) y mapas autoorganizados (SOM) que utilizan transformada de ondas continuas (CWT) para el diagnóstico de fallas de rodamientos de elementos rodantes.		Se simulan a diferentes velocidades del rotor 250, 500, 1000, 1500 y 2000 rpm.	Desprendimiento de material. Long: 10 mm Ancho: 5 mm Profundidad: 3mm	Severo: 100 %
[64]	En el presente estudio se utiliza el acelerómetro uniaxial y el sensor acústico para identificar el defecto en el rodamiento. Los datos tanto del sensor acústico como del acelerómetro se utilizan y fusionan para tener una mayor información en la identificación del tipo de defecto y la estimación de la anchura.		Mecanizado de descarga eléctrica (EDM).	Ranura de: 0,94 mm de ancho en dirección axial.	Leve: 20 %
[65]	En el presente artículo se busca ampliar la comprensión actual y establecer una correlación entre la señal de vibración y el alcance real en el que las fallas se propagan. Los rodamientos con fallos se sometieron a diferentes velocidades y diferentes cargas para posteriormente ser analizadas mediante microscopía de escaneo láser.		Mecanizado de descarga eléctrica (EDM).	Ranura de: 0,4 mm \times 0,15 mm (ancho \times profundidad).	Leve: 16 %

4.5.7.2.2. Fallos propuestos en pista interna

E. E. Pacheco Córdova [60] presenta los fallos propuestos en pista interna para el rodamiento, los cuales se presentan en la Tabla 5. Para lo cual se analiza tres niveles de severidades en los rodamientos.

Tabla 5: Fallos propuestos en pista interna. **Fuente:** [60].

Dimensiones	Código	Imagen
Ancho= 0,4 mm Profundidad= 0,30 mm Longitud= 0,605 mm Severidad= 5,0 %	IR_1	
Ancho= 1,75 mm Profundidad= 0,30 mm Longitud= 3,025 mm Severidad= 25 %	IR_2	
Ancho= 2,50 mm Profundidad= 0,30 mm Longitud= 6,050 mm Severidad= 50 %	IR_3	

4.5.7.3. Fallos en pista externa

Los principales fallos en pista externa de un rodamiento se caracterizan por el agrietamiento o desastillamiento del material en la pista, generados principalmente por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente [58].

4.5.7.3.1. Revisión bibliográfica de la construcción del fallo en pista externa

E. E. Pacheco Córdova [60] presenta una revisión bibliográfica de los fallos en pista externa de un rodamiento, los cuales se muestran en la Tabla 6, en donde se indica principalmente una descripción del artículo, método de construcción y las dimensiones de los fallos introducidos.




Tabla 6: Caracterización de fallos en pista externa. **Fuente:** Adaptado de: [60].

Referencia	Descripción del artículo	Imagen del fallo	Método de construcción	Dimensiones	Nivel de severidad
[61]	En el artículo se presenta un estudio para analizar las vibraciones características relacionadas con cuatro condiciones de fallo en un rodamiento, incluyendo las normales, falla en pista interna, pista externa y elementos rodantes.		El fallo fue creado artificialmente con una pluma eléctrica.	Una picadura con diámetro de 2mm.	Moderado
[63]	El artículo presenta un estudio comparativo entre las técnicas de redes neuronales artificiales y mapas auto-organizados, para el diagnóstico de fallos en rodamientos.		Se simula el fallo a diferentes velocidades de rotor (250, 500, 1000, 1500 y 2000 rpm).	<i>Spalling</i> Long: 10mm Ancho: 5mm Profundidad: 3mm	Severo: 100 %
[66]	El rodamiento de prueba es ubicado en uno de los bordes del eje para facilitar el montaje y desmontaje y se carga radialmente. El rodamiento de prueba fue de rodillos cilíndricos, donde los niveles de severidad se miden para el ancho de la fisura, ya que la longitud y profundidad es constante.		Se realizan las fisuras artificialmente a través de mecanizado por electroerosión.	Longitud: 13mm Profundidad: 1mm Ancho: 0.2 mm 0.5 mm 1 mm 1.5 mm 2 mm	Leve: 4, 10 y 20 % Moderado: 30-40 %

4.5.7.3.2. Fallos propuestos en pista externa

E. E. Pacheco Córdova [60] presenta los fallos propuestos en pista externa para el rodamiento, los cuales se presentan en la Tabla 7. Para lo cual se analiza tres niveles de severidades en los rodamientos.

Tabla 7: Fallos propuestos en pista externa. **Fuente:** [60].

Dimensiones	Código	Imagen
Ancho= 0,4 mm Profundidad= 0,30 mm Longitud= 0,85 mm Severidad= 5,0 %	OR_1	
Ancho= 1,25 mm Profundidad= 0,30 mm Longitud= 4,25 mm Severidad= 25 %	OR_2	
Ancho= 2,50 mm Profundidad= 0,30 mm Longitud= 8,50 mm Severidad= 50 %	OR_3	




4.5.7.4. Fallos en elementos rodantes

Los fallos en elementos rodantes se presentan como picaduras(pitting), las mismas que son producidas por factores externos como una lubricación deficiente o la presencia de partículas extrañas dentro del aceite y corrosión [60].

4.5.7.4.1. Revisión bibliográfica de la construcción del fallo en elementos rodantes

E. E. Pacheco Córdova [60] presenta una revisión bibliográfica de los fallos en elementos rodantes de un rodamiento, los cuales se muestran en la Tabla 8, indicando principalmente una descripción del artículo, método de construcción y las dimensiones de los fallos introducidos.

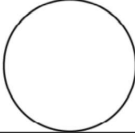
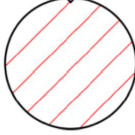
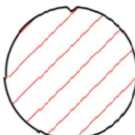
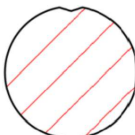
Tabla 8: Caracterización de fallos en elementos rodantes. **Fuente:** Adaptado de: [60].

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

4.5.7.4.2. Fallos propuestos en elementos rodantes

E. E. Pacheco Córdova [60] presenta los fallos propuestos en elementos rodantes para el rodamiento, los cuales se presentan en la Tabla 9. Para lo cual se analiza tres niveles de severidades en los fallos en elementos rodantes.

Tabla 9: Fallos propuestos en elementos rodantes. **Fuente:** [60].

Dimensiones	Código	Imagen
Buenas condiciones Peso= 2,70473 gr Diámetro= 8,65 mm	N	
N. elementos= 1 Peso= 2,70417 gr Diámetro del fallo= 0,6 mm Profundidad= 0,30 mm	RE_1	
N. elementos= 1 Peso= 2,70353 gr Diámetro del fallo= 0,8 mm Profundidad= 0,30 mm	RE_2	
N. elementos= 1 Peso= 2,70103 gr Diámetro del fallo= 1,0 mm Profundidad= 0,50 mm	RE_1	

4.5.8. Efectos que producen los fallos en los rodamientos

La vida de un rodamiento se puede ver gravemente afectada debido a los siguientes efectos de falla [69]:

- Incremento del ruido.
- Vibraciones.
- Aumento anormal de temperaturas.
- Virutas metálicas.
- Una disminución de su rendimiento.
- Desgaste.
- Fatiga.
- Corrosión.

- Fractura.

En la Figura 19, se presenta un espectro donde se observa la frecuencia de deterioro de la pista exterior de un rodamiento. Esta carece claramente de las frecuencias características de cualquier falla; sin embargo, debido a la ondulación del anillo, se pueden ver picos en la frecuencia de RPM y sus múltiplos.

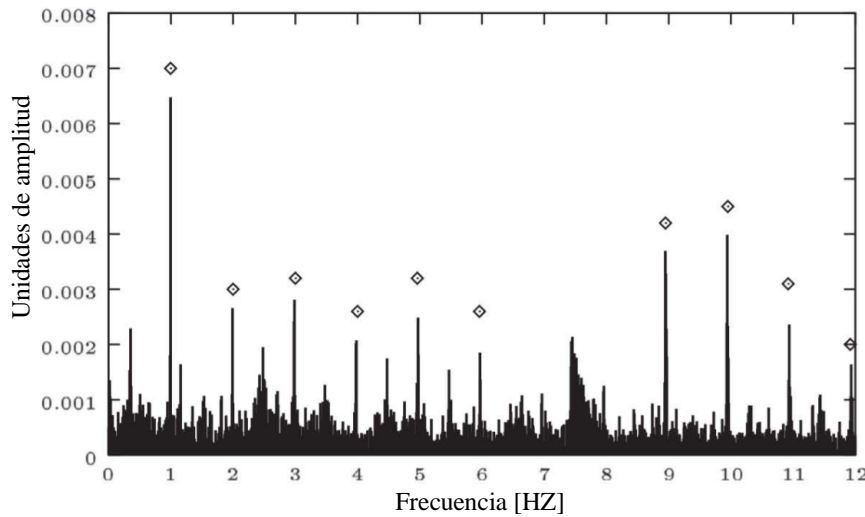


Figura 19: Espectro de un rodamiento de bolas sin fallos. **Fuente:** [70].

En la Figura 20 se aprecia que la medición confirma la presencia de las mismas frecuencias características. Además de frecuencia de deterioro de la pista exterior de un rodamiento (BPFO), como resultado de las deformaciones del anillo; el espectro presenta picos aumentados a la velocidad del eje y bandas laterales en BPFO.

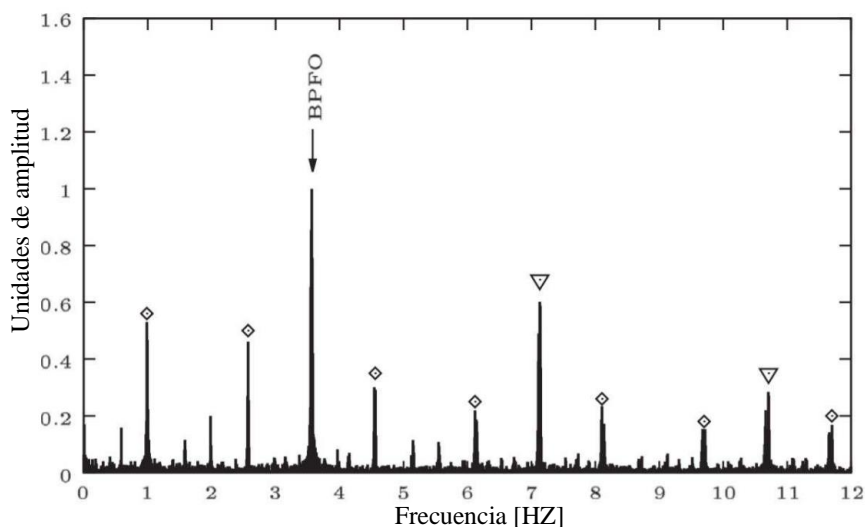


Figura 20: Espectro de un rodamiento en mal estado. **Fuente:** [70].

4.6. Acoplamientos



Figura 21: Acoplamiento tipo mordaza. **Fuente:** [71].

Un acoplamiento es aquel elemento que permite unir o acoplar (ver Figura 21), proporcionando el movimiento entre dos ejes en línea recta con dirección paralela, inclinada o en planos diferentes [48]. La principal función de un acoplamiento es transmitir potencia (asociada a la rotación) entre los ejes que acopla, facilitando el diseño modular de máquinas [72].

Una correcta alineación entre los equipos genera que los acoplamientos funcionen adecuadamente y que cumplan con las exigencias de operación del sistema, sin nombrar que se eliminan otro tipo de problemas como ruido y vibraciones [73].

La maquinaria rotativa que se instala por medio de acoplamientos se denominan conductoras o conducidas. Al igual que el alineamiento interno, los ejes de dos máquinas en una condición unida deben estar lo más alineado posible durante el funcionamiento normal, puesto que la colinealidad de los ejes no está garantizada cuando se utilizan acoplamientos que permiten rangos de libertad al alinear; este es el caso de los ejes que tienen agujeros considerables [74].

Las funciones generales de un acoplamiento en cualquier diseño de maquinaria, mecanismo o cualquier proyecto mecánico son [75]:

- Transmitir torque.
- Permitir algunos valores de desalineación angular y/o paralela.
- Permitir fácil ensamble y desensamble.
- Amortiguar las fuerzas inherentes en el sistema
- Ser capaz de aceptar cargas de choque, picos de carga de hasta un 200%.
- Permitir o compensar los efectos de eje flotante y expansión térmica.
- Conservar la rigidez entre la masa y el eje.
- Soportar las fluctuaciones de temperatura.
- Proteger el sistema contra sobrecargas de la máquina accionada.

- Minimizar las fuerzas de desbalanceo.
- Proveer baja inercia y minimizar los efectos a velocidades críticas.

4.6.1. Partes de los acoplamientos

En la Figura 22 se presenta las partes de un acoplamiento, el cual consta de dos cubos y un elemento elastomérico denominado elemento intermedio de unión tipo estrella; por lo general, las mazas son de metal sinterizado aunque también se fabrican de aluminio, bronce, acero, acero inoxidable y hierro dúctil; de igual manera el elemento elastómero se encuentra disponible en los siguientes materiales: Caucho NBR SOX, uretano, Hytrel y bronce [76,77].

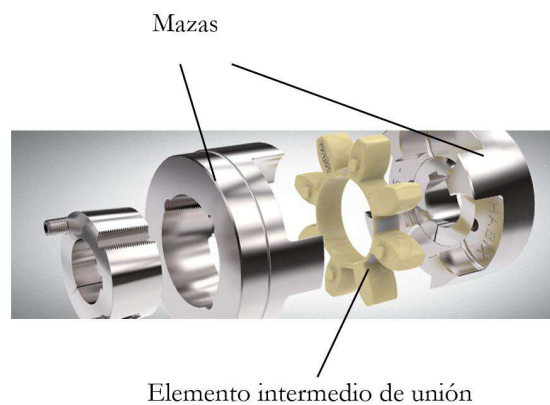


Figura 22: Partes de un acoplamiento. **Fuente:** [77].

En el acoplamiento de estrella el elastómero es el elemento de compensación, es decir es quien permite que el par se transmita sin holgura ni vibraciones entre el motor y el eje acoplado [77].

4.6.2. Tipos de acoplamientos

Los acoplamientos se clasifican según el método que utilizan para absorber la desalineación en: rígidos, flexibles y especiales o articulados (ver Figura 23), esto debido al grado de alineación que se requiere entre los elementos de la máquina. El acoplamiento rígido se caracteriza por unir dos ejes de manera ajustada con la finalidad de que no se genere movimiento entre ellos, maximizando así el rendimiento de la máquina. Sin embargo, los acoplamientos flexibles permiten mayor flexibilidad en los ejes, se utilizan para transmitir torque cuando los ejes se encuentren desalineados entre sí. Estos por lo regular pueden acomodar hasta tres grados de desalineación: angular, radial y axial [78].

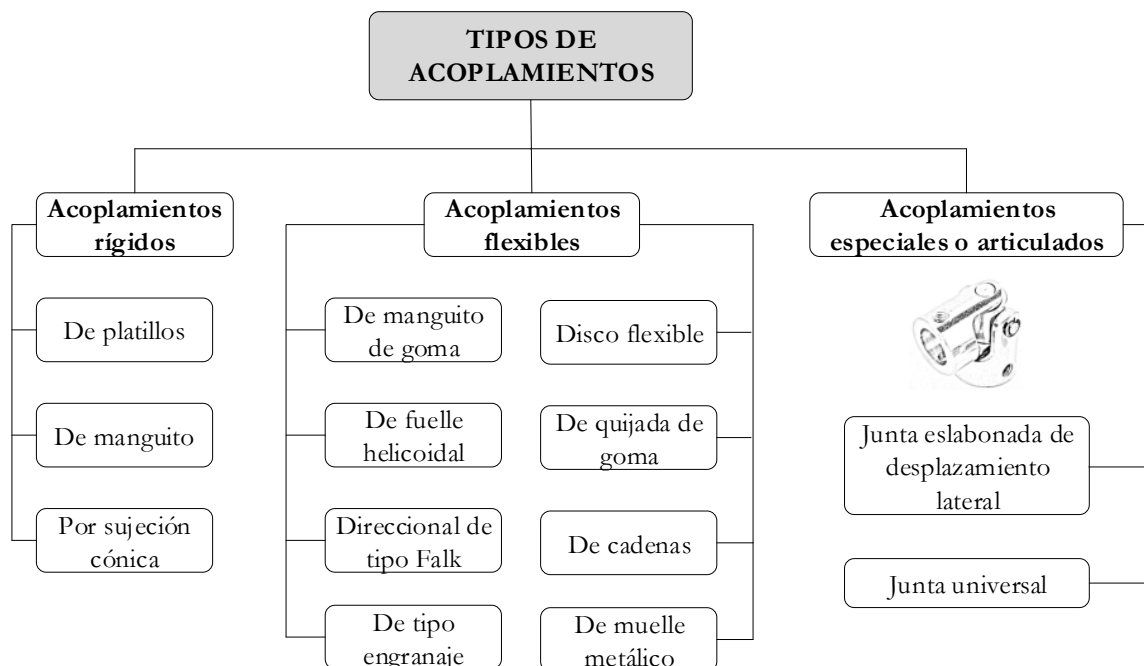


Figura 23: Tipos de acoplamientos. **Fuente:** [Autor].

4.6.3. Ventajas y limitaciones de los acoplamientos

En la Tabla 10, se presenta las ventajas y limitaciones de los acoplamientos:

Tabla 10: Ventajas y limitaciones de Acoplamientos. **Fuente:** [76, 79].

Ventajas	Limitaciones
Comunicación de movimiento entre dos ejes.	Sensibles a errores de montaje.
Transmisión directa de par.	Alineación cuidadosa.
Amortiguar y reducir golpes de funcionamiento.	Sensible a choques o posibles sobrecargas.
Resistentes a altas temperaturas de operación.	Imposibilidad de reparación.

4.6.4. Mantenimiento de acoplamientos

El mantenimiento de los acoplamientos consiste básicamente en: inspeccionar, relubricar y alinear los ejes; en cuanto a inspección se busca detectar daños en las piezas y controlar el desgaste que se produce al acumular horas de funcionamiento. En lo que se refiere a relubricación de un acoplamiento que requiere estar lubricado para que pueda brindar un servicio satisfactorio, se debe vigilar el estado y la cantidad del lubricante periódicamente.

De igual manera, para alinear los ejes en un acoplamiento se debe evitar la desalineación, ya que es un defecto mecánico que se define como la falta de coincidencia espacial entre los ejes geométricos correspondientes a dos árboles (o ejes) de transmisión acoplados [72].

Se ha demostrado que el 50% de fallas en maquinaria rotativa se produce por la desalineación entre ejes acoplados [74]; una máquina mal alineada puede costarle a cualquier fábrica más del 30% o 40% en tiempo de inactividad, gasto en piezas de repuesto y consumo de energía [80]. Para la corrección del desalineamiento los métodos más utilizados han sido tradicionalmente la regleta, hilo de construcción o los indicadores de carátula; los cuales resultan complicados de utilizar y generalmente consumen mucho tiempo, es por ello que actualmente para la detección del desalineamiento en acoplamientos el análisis de vibraciones espectral (FFT), ofrece un diagnóstico detallado de la condición de la máquina; en consecuencia, como método de corrección se utiliza el sistema láser óptico, el cual resulta ser un método fácil, rápido y preciso de corrección [74].

La desalineación entre ejes se presenta de dos maneras distintas ya sea angular o paralela [81]; estas presentan una serie de inconvenientes que afectan al normal funcionamiento de un accionamiento eléctrico. Los acoplamientos permiten ciertos márgenes de desalineación; sin embargo, si sobrepasa el rango permisible la vida útil del accionamiento se reduce significativamente a raíz de los esfuerzos adicionales que debe soportar, como consecuencia se produce un incremento de temperatura y por ende un deterioro en el rendimiento [82].

4.6.5. Selección de acoplamientos

La selección de un acoplamiento adecuado se basa en la capacidad de transmisión de potencia de los diversos tamaños que tenga. Pero se debe correlacionar la capacidad de transmisión de potencia con la velocidad de giro, porque la variable real es el par torsional al que se somete el acoplamiento [83].

Para seleccionar un acoplamiento se debe considerar una serie de factores, los cuales se mostrarán a continuación:

- Condiciones del medioambiente, como es la temperatura y la posible corrosión que pueda existir.
- Características del eje a emplear y la geometría del mismo.
- Lugar de instalación del acoplamiento.

- Diámetro externo e interno del acoplamiento a emplear.
- Tipo de desalineación a la que va a estar sometido, ya sea angular o paralela.
- Propiedades como el momento, torque nominal y RPM.

Para el caso de estudio y según la casa comercial Lovejoy se selecciona el acoplamiento según el torque nominal:

$$\text{Nominal torque} = \frac{HP \times 63025}{RPM} \quad (2)$$

A continuación, se calculará el torque de diseño según la ecuación 3 :

$$\text{Torque de diseño} = \text{Nominal torque} \times \text{Factor de servicio} \quad (3)$$

$$\therefore \text{Factor de servicio} = 1,25$$

Seleccionar el torque máximo del elastómero según la Tabla 11 y se verifica si se cumple la siguiente condición:

Torque del elastómero \geq torque de diseño.

Tabla 11: Selección del elastómero. **Fuente:** [Autor].

Max Bore		Spider Material								
		SOX (NBR)			Urethane		Hytrel®		Bronze	
Size	in	mm	in-lbs	Nm	in-lbs	Nm	in-lbs	Nm	in-lbs	Nm
L035	0.375	9	3.5	0.4	—	—	—	—	—	—
L050	0.625	16	26.3	3	39	4.5	50	5.6	50	5.6
L070	0.75	19	43.2	4.9	65	7.3	114	12.9	114	12.9
L075	0.875	22	90	10.2	135	15.3	227	25.6	227	25.6
L090	1	25	144	16.3	216	24.4	401	45.3	401	45.3
L095	1,125	28	194	21.9	291	32.9	561	63.4	561	63.4
L099	1,188	30	318	35.9	477	53.9	792	89.5	792	89.5
L100	1,375	35	417	47.1	626	70.7	1.134	128	1.134	128
L110	1,625	42	792	89.5	1.188	134	2.268	256	2.268	256
L150	1,875	48	1.24	140	1.86	210	3.708	419	3.706	419
L190	2,125	55	1.728	195	2.592	293	4.68	529	4.68	529
L225	2,625	65	2.34	264	3.51	397	6.228	704	6.228	704
L276	2,875	73	4.716	533	—	—	—	—	12.5	1412

4.6.6. Acoplamiento Lovejoy L090

En la Figura 24, se observa el acoplamiento flexible de tipo mandíbula denominado Jaw Type Couplings de Lovejoy-inc Company. El acoplamiento seleccionado ofrece una conexión estándar de eje a eje para aplicaciones industriales generales. Los materiales estándar del cubo de acoplamiento tipo L son hierro sinterizado [84].

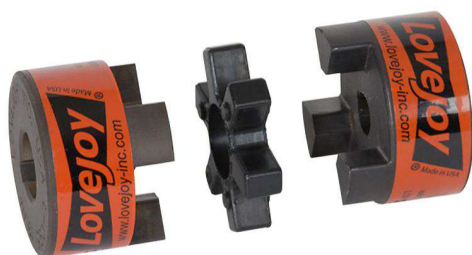


Figura 24: Acoplamiento Lovejoy L090. **Fuente:** [84].

En la Figura 25, se muestra la vista frontal del acoplamiento con las dimensiones que se especifican en la Tabla 12.

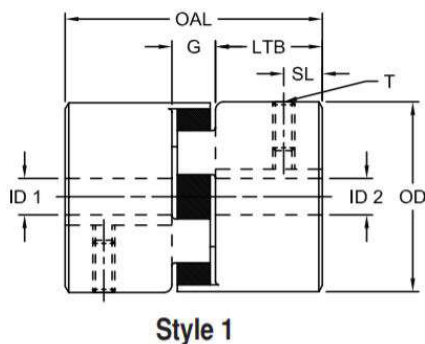


Figura 25: Dimensiones acoplamiento Lovejoy L090. **Fuente:** [84].

Tabla 12: Dimensiones acople Lovejoy L090. **Fuente:** [84].

Size	Style N°	OAL	G	LTB	SL	CL	T	ID1 - ID2				OD	CD	HD	Weight		Moment of inertia [lb-in]
								Min bore		Max bore					Min bore lbs	Max bore lbs	
								in	mm	in	mm						
L090	1	2,15	0,52	0,82	0,44	N/A	1/4-20	0,25	6	1	25	2,11	N/A	2,11	1,5	1,2	0,772

4.6.7. Fallos en acoplamientos

En la Figura 26, se presentan los tipos de fallos que se pueden dar en los acoplamientos, estos pueden presentarse ya sea por el uso normal del mismo o por una deficiencia en el montaje.

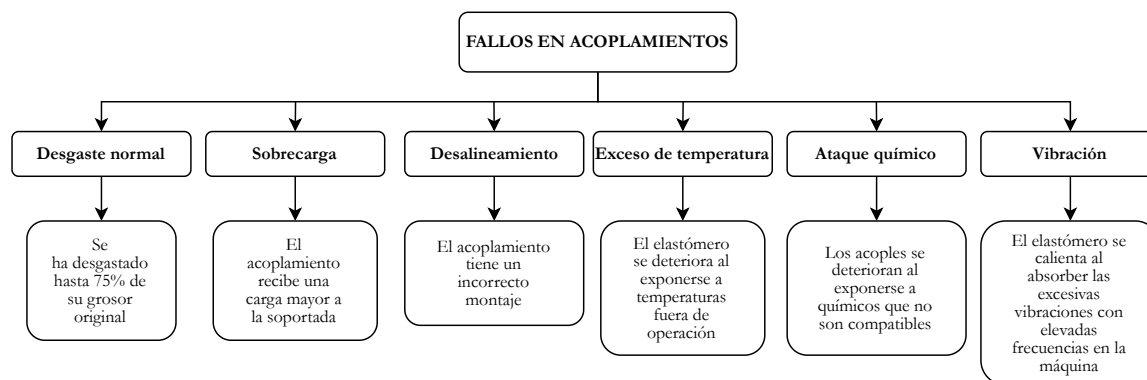


Figura 26: Fallos en acoplamientos. **Fuente:** [Autor].

Otra causa para que se dé un fallo en los acoplamientos es la selección inadecuada del mismo, lo que ocasiona desalineaciones paralelas y angulares [85].

4.6.7.1. Selección y caracterización de fallos en acoplamientos

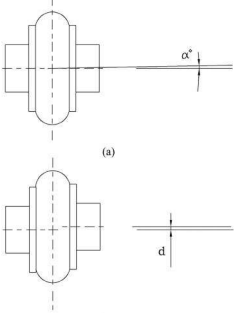
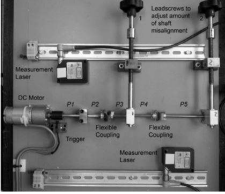

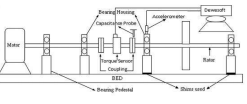
Los acoplamientos generalmente presentan síntomas similares a la desalineación. Los problemas de acoplamientos producirán componentes de vibración 1X más fuertes que los que producen u ocasiona la desalineación [12].

En caso de que el acoplamiento no sea verdadero, donde las caras de las bridas no son paralelas, se produce una vibración similar a la desalineación angular. Por lo general el problema más común de los acoplamientos es que presentan desalineación que da como resultado componentes altos 1X y 2X ya sean radiales y tangenciales [12].

4.6.7.2. Revisión bibliográfica de la construcción de los fallos en acoplamientos

En la Tabla 13, se muestra la revisión bibliográfica en la que se presentan los diferentes tipos de fallos de desalineación angular y paralela en acoplamientos.

Tabla 13: Caracterización de fallos en acoplamientos. **Fuente:** [Autor].

Referencia	Descripción del artículo	Imagen del fallo	Método de construcción	Dimensiones	Nivel de severidad
[86]	En el presente artículo se da a conocer la aplicabilidad de dos técnicas para detectar fallas a partir del análisis de las variables eléctricas del motor. Las técnicas se basan en el análisis de firma de corriente del motor (MCSA) y el análisis de firma de par de carga (LTSA), para ello se estudia un mecanismo en el que la transmisión de potencia entre el motor y la carga se realiza mediante diversos tipos de acoplamientos, mostrando así que los resultados extraídos para un acoplamiento no son necesariamente aplicables a otros.		Se realiza con una desviación angular entre el eje del motor y la carga. El grado de desalineación está representado por el ángulo α entre los dos ejes. Se lo realiza utilizando calzas asimétricas.	Los niveles de desalineación angular varían de $0,5^\circ$ a 1° y la desalineación radial hasta 1.5 mm.	Bajo
[87]	En el presente documento se expone un método para el monitoreo en tiempo real de desalineación del eje, el cuál es un problema común en la maquinaria rotativa. Un método basado en láser sin contacto se utiliza para monitorear los cambios posicionales de un eje giratorio en tiempo real mientras está funcionando.		Se realiza ajustando tornillos de plomo en la plataforma de prueba, así desfasando al eje de su posición de equilibrio.	Los niveles de desalineación son de hasta 10° y desalineación de desplazamiento de 2.6 mm.	Alto
[88]	El presente Artículo se enfoca a la detección de fallos en acoples, introduciendo como variable las características del acoplamiento utilizado. Así mismo se presenta un modelo matemático que permite deducir el modo en que la desalineación se manifiesta en el torque eléctrico del motor y la corriente del estator.		Se lo realiza ajustando pernos situados en el banco de pruebas que son los que producen la desalineación del eje.	Desalineación angular de 1° y desalineación paralela de 1,6 mm.	Medio
[89]	En el presente artículo se da a conocer las mediciones de par aplicadas al diagnóstico de desalineación, para ello se utiliza un sensor para los diferentes tipos de desalineación a varias frecuencias de operación, como técnica se utiliza la transformada rápida de Fourier y wavelet para detectar el fallo.		Se introduce utilizando la disposición de cuña asimétrica.	Para diferentes casos de desalineación paralela (0, 150, 250, 400 y 550 μm) se registran las señales de vibración y par. La desalineación angular (0.01, 0.022, 0.034 y 0.048 radianes).	Alto

4.6.7.3. Desalineación paralela

En la Figura 27, se observa un esquema del fallo. Este tipo de desalineación provoca que el espectro de vibración normal presente un índice de vibración elevada. Si este tipo de desalineación es grave, se generan picos elevados en los armónicos de la frecuencia [90].

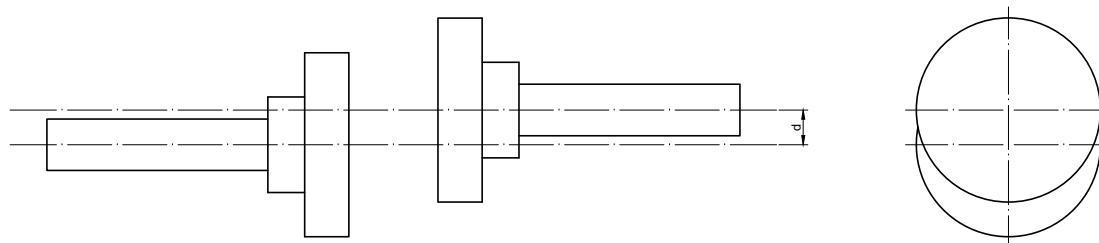


Figura 27: Desalineación paralela. **Fuente:** [Autor].

4.6.7.3.1. Fallos propuestos para desalineación paralela

En la Tabla 14, se presenta la descripción, codificación, esquema de los fallos propuestos de desalineación paralela que se utiliza en el presente trabajo de investigación.

Tabla 14: Fallos propuestos desalineación paralela. **Fuente:** [Autor].

Descripción	Imagen
Desalineación paralela, desfase de 0.1 mm del eje de transmisión con relación al eje del motor.	
Desalineación paralela, desfase de 0.25 mm del eje de transmisión con relación al eje del motor.	
Desalineación paralela, desfase de 0.5 mm del eje de transmisión con relación al eje del motor.	

4.6.7.4. Desalineación angular

En la Figura 28, se observa un esquema del fallo de desalineación angular. Este tipo de desalineación se da cuando las líneas de los ejes se separan, dando lugar a la formación de un ángulo; generalmente esta desalineación se caracteriza por las bajas amplitudes que se aprecia en los armónicos de velocidad de giro del eje [90].

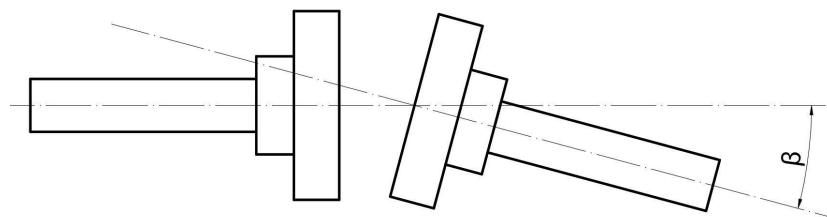


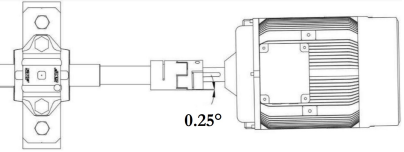
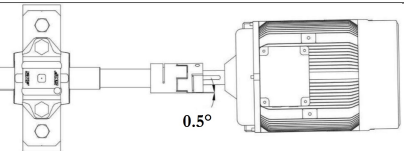
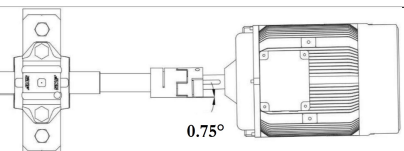
Figura 28: Desalineación angular. **Fuente:** [Autor].

Uno de los métodos para analizar este tipo de desalineaciones es el espectro de Fourier convencional (es decir, FFT) que es empleado para analizar la naturaleza direccional de las vibraciones que surgen de fallas del rotor [85].

4.6.7.4.1. Fallos propuestos para desalineación angular

En la Tabla 15, se presenta la descripción, codificación y esquema de los fallos propuestos de desalineación angular que se utiliza en el presente trabajo de investigación.

Tabla 15: Fallos propuestos desalineación angular. **Fuente:** [Autor].

Descripción	Imagen
Desalineación angular, este fallo consiste en la desviación de 0.25° del eje de transmisión con relación al eje del motor.	
Desalineación angular, este fallo consiste en la desviación de 0.5° del eje de transmisión con relación al eje del motor.	
Desalineación angular, este fallo consiste en la desviación de 0.75° del eje de transmisión con relación al eje del motor.	

4.6.8. Efectos que producen los fallos en acoplamientos

La desalineación en los acoplamientos puede generar una alta vibración en sentido axial y radial. Siempre que exista una alta vibración en ambos sentidos donde la axial sea mayor que la mitad de la radial se presenta un problema de desalineación o ejes deformados [56].

La desalineación en acoplamientos también puede llegar a precipitar fallos en la maquinaria como, por ejemplo: la degradación de los rodamientos, el desgaste de los

tacos del acoplamiento, la rotura de pernos y sobrecalentamiento excesivo del sistema conductor por un aumento del consumo eléctrico [91].

En la Figura 29 se presenta un espectro de un acoplamiento con fallo de desalineación angular.

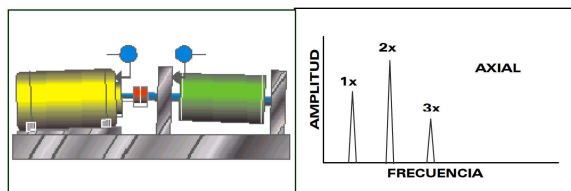


Figura 29: Acoplamiento desalineación Angular. **Fuente:** [35].

En la Figura 30 se presenta un espectro de un acoplamiento con fallo de desalineación paralelo.

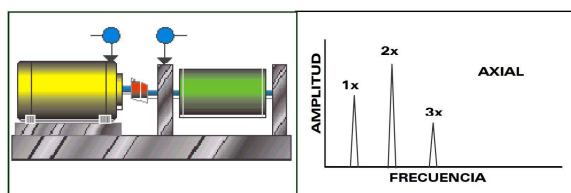


Figura 30: Acoplamiento con desalineación paralela. **Fuente:** [35].

Las firmas de vibración muestran patrones de fallo que van desde el inicio, progreso y fin del daño. Estas firmas de vibración pueden extraer características como una medida de la condición del componente, con la finalidad de predecir la seguridad restante de la vida útil del mismo; estas características advierten de posibles fallas que pueden ocurrir para así realizar el mantenimiento según sea necesario en contraposición al mantenimiento programado tradicional. Hay varios métodos basados en vibraciones para diagnosticar fallos en los acoplamientos que se pueden clasificar en análisis en: dominio del tiempo, dominio de frecuencia y tiempo-frecuencia [92].

4.7. Carta de Charlotte

Esta carta es un medio que se presenta como una tabla ilustrada empleada para el diagnóstico de señales de vibración donde se da a conocer la fuente del problema y el espectro típico, detallando las frecuencias fundamentales y los componentes espectrales que deben estar presentes en las señales adquiridas; de igual manera, brinda los parámetros necesarios para proceder a realizar el respectivo análisis de las señales de

vibración. Como se muestra en la Figura 31, existen 4 etapas de fallos en los rodamientos [93].

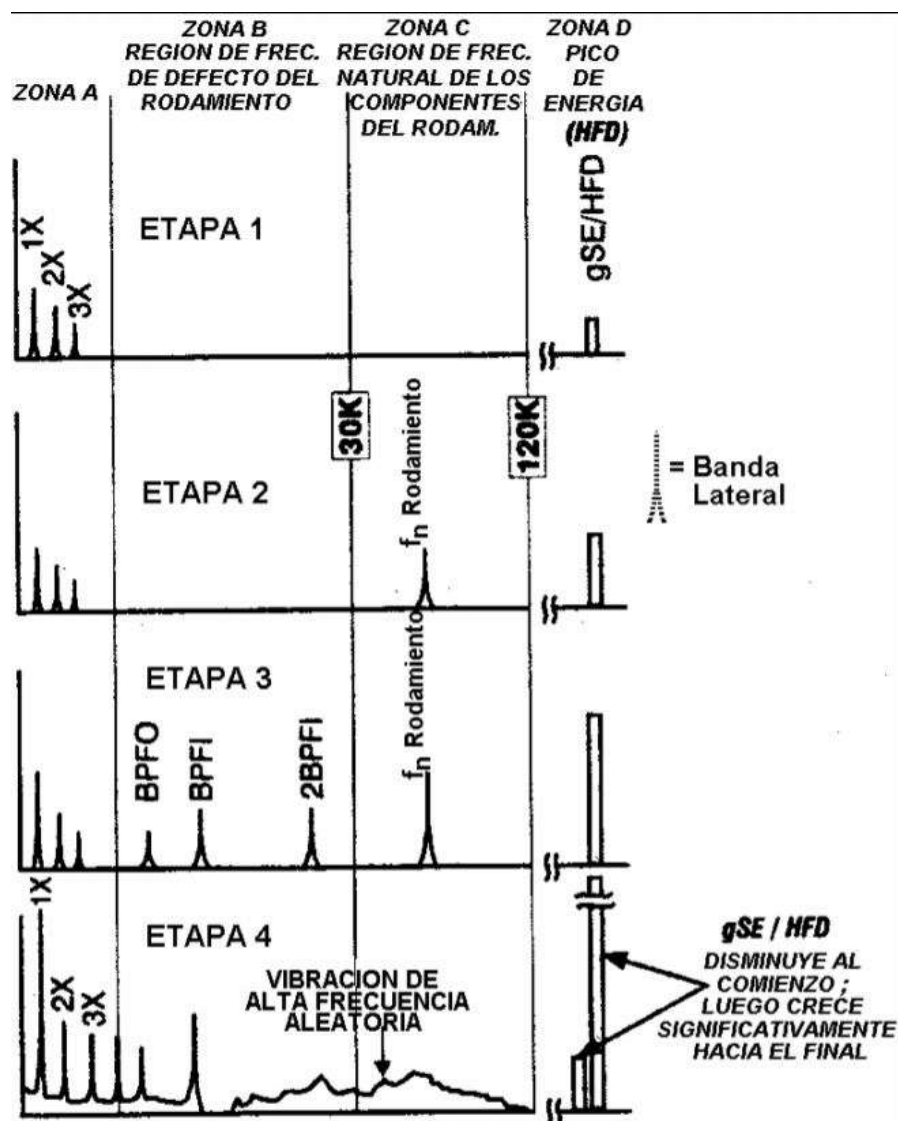


Figura 31: Carta ilustrada de diagnóstico de vibración. Fuente: [93].

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 [93].

En la etapa 2, ligeros fallos del rodamiento comienzan a tener un ruido en las frecuencias naturales (f_n) 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 y el rodamiento empieza a experimentar desgaste, pero aún no es necesario realizar el cambio [93].

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. 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 [93].

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 fallos discretos 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 [93].

4.8. Señales de video

4.8.1. Monitoreo de señales de video

Las señales de vídeo son grabaciones ordinarias que mediante un software permite analizar cada uno de los cuadros del vídeo, detectando pequeños cambios en el desplazamiento de puntos específicos, para convertirlos posteriormente en señales de vibración [94].

La adquisición de señales de video se realiza con un medio electrónico estándar, los vídeos se pueden grabar fácilmente mediante un teléfono móvil; por tanto, el método tiene aplicaciones potenciales en la detección de fallos de sistemas de rodamientos y acoplamientos que se encuentran en áreas remotas donde los instrumentos especializados no están disponibles o son limitados [95].

Una de las ventajas es que se puede detectar fallos, principalmente aquellos relacionadas con las bajas frecuencias y fase [94], por ejemplo:

- Desbalanceo.
- Desalineación.

Una de las limitaciones de las señales de video va relacionado con la dependencia de la luz del entorno para que el video sea de buena calidad [94].

4.8.2. Técnicas de procesamiento de señales de video

La información obtenida se traduce en señales de vibración que pueden ser estudiadas por su forma de onda de FFT, fase o tiempo. Existen muchos casos en los que la masa de un acelerómetro en las señales de vibración cambia completamente el comportamiento de

la vibración, tal es el caso de la vibración de un cable, motores muy pequeños, aviones de radiocontrol, entre otros. Esto se debe, al simple hecho de que, al añadir la masa del sensor, se modifican las frecuencias naturales de las partes. En cambio, las señales de video elimina completamente este problema, al no ser necesario agregar equipos adicionales para el análisis de la vibración y permitiendo que la estructura se deforme naturalmente [94].

4.8.2.1. Técnica subpíxel

La técnica subpíxel permite aumentar la resolución nominal de los sensores de imagen. Básicamente, estas técnicas consisten en capturar y procesar digitalmente escenas que contienen objetivos de forma conocida. Estos objetivos son reconocidos y extraídos de la escena. Luego, a través de la interpolación inteligente de sus diferentes características, es posible disminuir la incertidumbre en la posición del objeto, incluso por debajo de la unidad básica de píxeles; por lo tanto, un método de seguimiento totalmente automatizado con una precisión de subpíxel incluye dos pasos básicos reconocimiento del objetivo y ubicación a través de la extracción de características. En ambas tareas, el reconocimiento de objetivos es el más complicado, ya que requiere un análisis y una segmentación adecuados de la imagen. Este proceso puede simplificarse y acelerarse mediante el uso de objetivos específicos que son fáciles de reconocer. Entre todos los objetivos posibles, generalmente se prefieren los objetos elípticos, incluidos los círculos, ya que su forma se conserva bajo desplazamientos y rotaciones laterales [96].

4.8.2.2. Técnica espejo

La técnica del espejo es el método que emplea Erbesd Instruments que se utiliza para obtener señales de vibración a partir de una grabación de video. Este es un método de análisis de vibraciones que utiliza un algoritmo de seguimiento de micro movimientos en archivos de video propiedad de Erbesd Instruments. De hecho, hoy en día se utiliza para detectar y medir vibraciones de miles de puntos simultáneamente con una sola grabación de video [94].

La técnica espejo es empleada en el procesamiento de señales de video del software DragonVision®[®], el cual detecta la vibración a través de una grabación de video con una resolución de gran calidad. A través de complejos algoritmos de análisis de video hacen posible la detección de micro movimientos y convierten estos movimientos en miles de señales de vibración. Esta técnica analiza cada uno de los cuadros del video detectando pequeños cambios en el movimiento de puntos específicos, para convertirlos

posteriormente en señales de vibración. De hecho, puede detectar miles de puntos de vibración en un solo video. El principio de este método se basa en que antes de que un objeto se mueva de un píxel a otro, crea un pequeño cambio de color en el siguiente píxel. De hecho, el color de ambos píxeles cambia progresivamente hasta que el objeto ocupa por completo en el siguiente sensor de píxeles [94].

La técnica espejo empleada en las señales de video miden el cambio en la cantidad de color de cada píxel. Primero, el software identifica patrones de color dentro de pequeñas áreas predefinidas. Estos patrones deben tener importantes diferencias de color para poder distinguirlos del resto de patrones. El software encuentra automáticamente las áreas objetivo y el usuario solo puede modificar algunos parámetros de calidad y superficie. En segundo lugar, para cada fotograma de video, el software identificará los cambios de color promedio en los puntos objetivo y su área correspondiente. De esta manera, se puede rastrear pequeños cambios en cada cuadro con gran precisión [97].

Existen muchos casos en los que la masa de un acelerómetro cambia completamente el comportamiento de la vibración. Tal es el caso de la vibración de un cable o en motores muy pequeños. Esto se debe, entre otras cosas, al simple hecho de que al añadir la masa del sensor, se modifican las frecuencias naturales de las partes. La técnica espejo elimina completamente este problema, ya que no es necesario agregar nada para el análisis de la vibración y permitiendo que la estructura no se vea alterada por una técnica invasiva. Con la técnica espejo esto se facilita porque sólo hace falta seleccionar un área de referencia para que automáticamente estas vibraciones sean sustraídas del resto de los puntos [97].

En la Figura 32 se muestra como el software interpreta cada punto de la máquina a analizar, para su posterior procesamiento. Estos puntos son detectados como vibración, que se puede procesar como espectro para la interpretación de resultados.

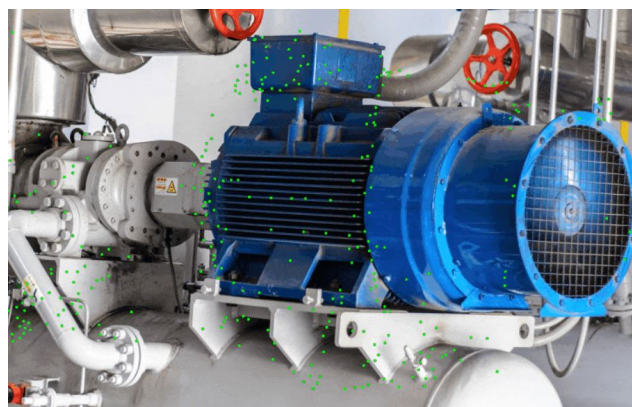


Figura 32: Software con la técnica espejo. **Fuente:** [94].

Los parámetros óptimos para la adquisición de señales de video empleando la técnica espejo se muestran en la Tabla 16:

Tabla 16: Parámetros óptimos para la adquisición de señales de video. **Fuente:** [Autor].

PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE VIDEO	
Factores	Samsung S20+
Frecuencia de muestreo	240fps
Resolución	Full HD 1920x1080 píxeles
Tipo de exportación	MP4
Tiempo	3 segundos
Iluminación	4997 Lux
Distancia	0.5 m

4.8.3. Tipos de fallos detectados con el monitoreo de señales de video

Con el monitoreo de señales de video se pueden detectar diferentes tipos de fallos los cuales se mencionan a continuación:

- Desbalanceo.
- Desalineación.
- Soltura Mecánica.
- Eje Torcido.
- Excentricidad.
- Resonancia.
- Frecuencias Naturales (Mediante prueba de golpe).
- Ruido Eléctrico.

4.9. Resumen del capítulo

En la Figura 33 se presenta un cuadro resumen del capítulo.

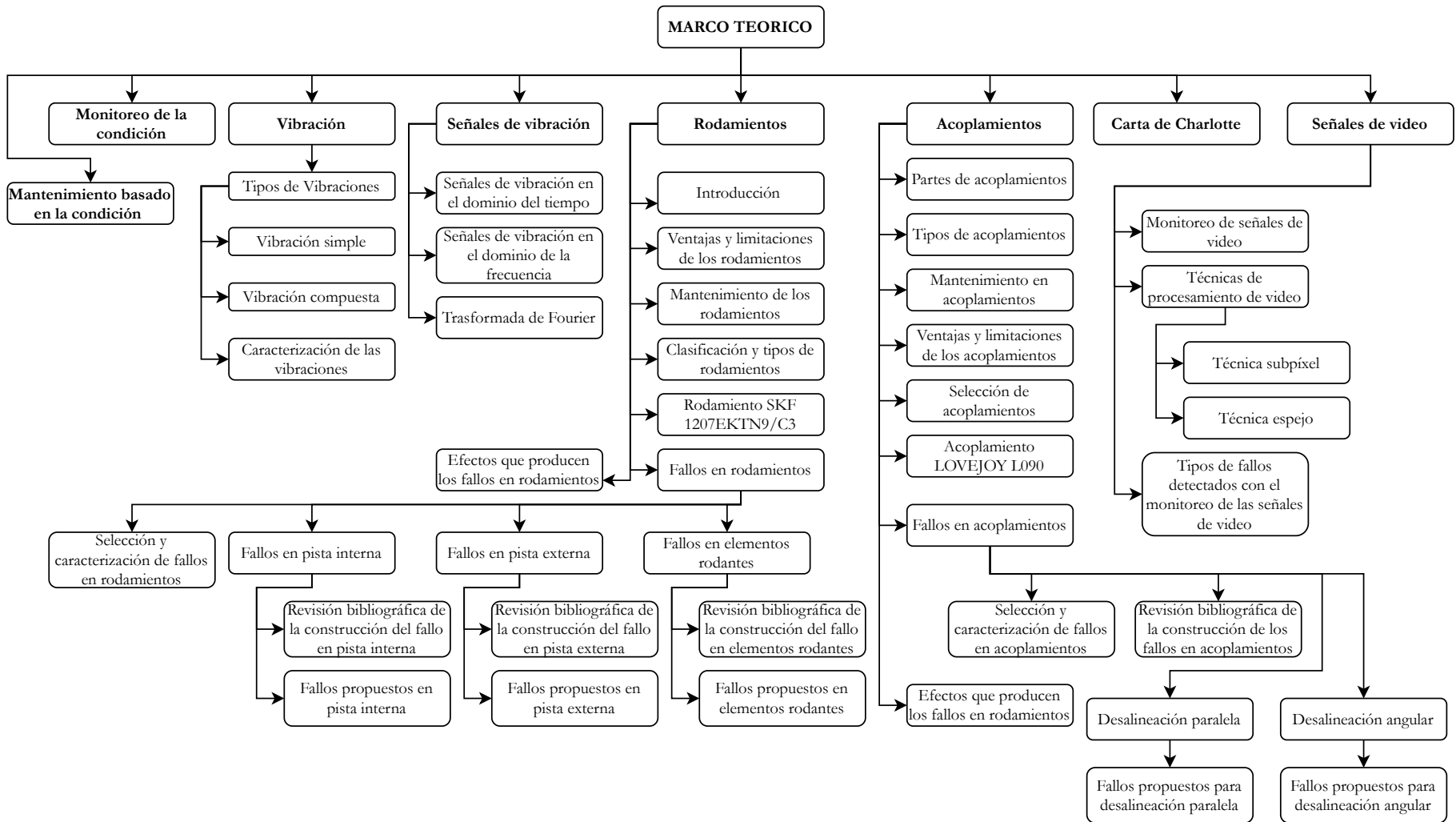


Figura 33: Resumen del capítulo. Fuente: [Autor].

5. MARCO EXPERIMENTAL: ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE MONITOREO DE LA CONDICIÓN

5.1. Metodología para la adquisición de señales de video y señales de vibración

5.1.1. Banco de vibraciones

La experimentación para la investigación se ha desarrollado en el laboratorio del grupo de investigación y desarrollo en tecnologías industriales (GIDTEC) de la Universidad Politécnica Salesiana, que dispone de varios equipos para el monitoreo de la condición en maquinaria rotativa. Como elemento de análisis se tiene el banco de vibraciones en donde se realizará el emplazamiento del sensor y la grabación de video para la adquisición de datos de señales de vibración.

En la Figura 34, se presenta las unidades principales que conforman el banco, estas son:

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

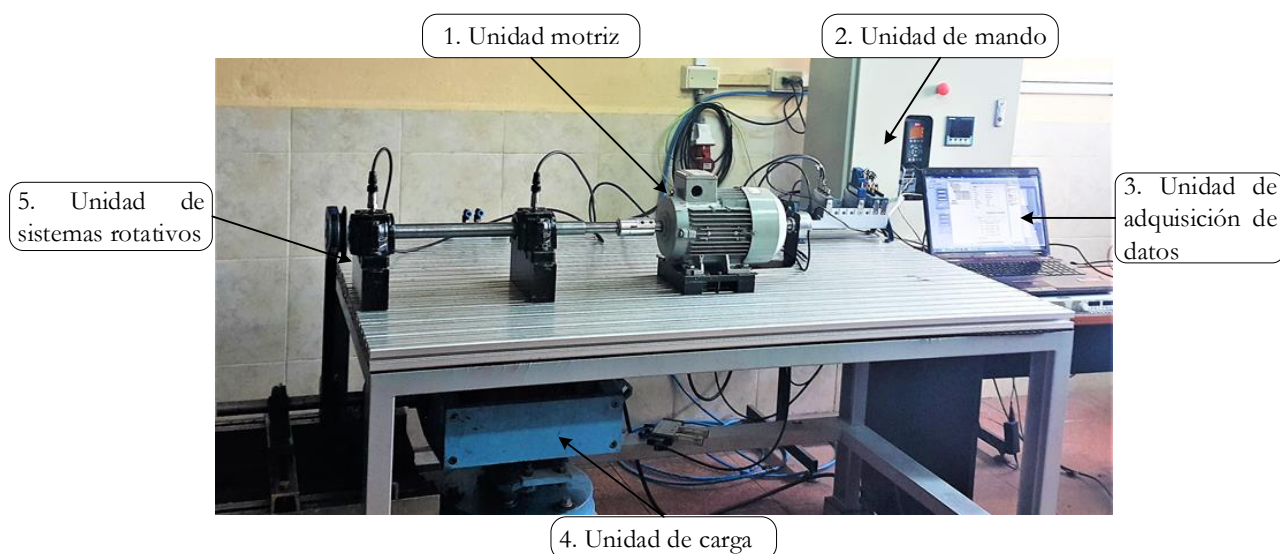


Figura 34: Banco de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana. **Fuente:** [Autor].

El banco de vibración que se indica en la Figura 35, consta de un motor de inducción de 2,0HP. El cual está conectado a un acoplamiento tipo mordaza con un diámetro de 24 mm a un eje con dos carcasas de bloque de plomero de rodamientos. Cada uno cuenta con un rodamiento de bolas de doble fila autoalineables, este eje se conecta con un freno magnético a través de dos poleas y una correa en V.

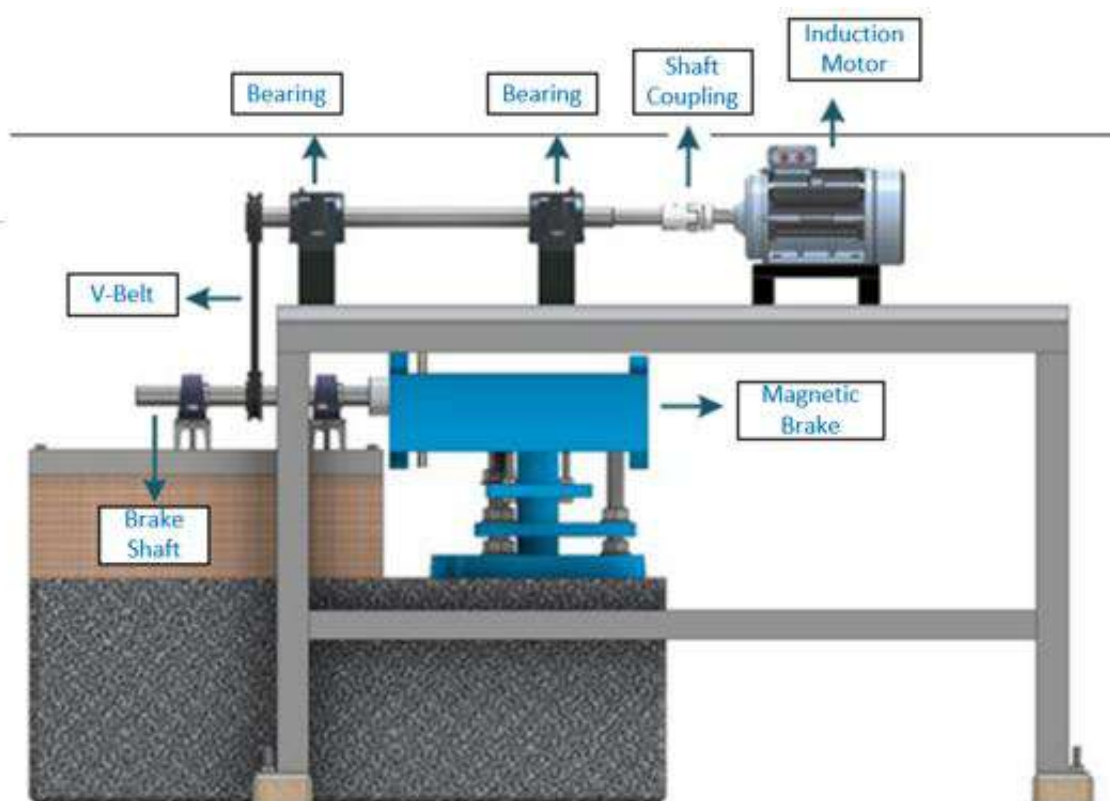


Figura 35: Banco de vibraciones del GIDTEC. **Fuente:** [Autor].

En la Tabla 17, se presenta la especificación de los elementos mecánicos del banco de vibraciones.

Tabla 17: Especificación del equipo mecánico. **Fuente:** [Autor].

Especificación del equipo mecánico	
Motor A:	Siemens 1LA7 096-6YA60 2HP
Acoplamiento:	Acoplamiento
Rodamientos:	Rodamiento de bolas a rotulas 1207 EKTN9/ C3
Alojamiento de rodamientos:	Plummer dividido SKF SNL 507-606
Tipo de carga:	Electromagnético mediante transmisión
Tipo de transmisión:	Polea-correa
Relación de reducción:	1:1

Los instrumentos de medición empleados son: un alineador de ejes manual conformado por dos relojes comparadores, un calibrador, un acelerómetro triaxial y un encoder láser. Algunos de estos instrumentos son conectados a un ordenador portátil a través de un chasis de adquisición de datos (DAQ, NI cDAQ), cabe mencionar que estas señales de vibración se analizan en un programa desarrollado por los miembros del grupo de investigación. En cambio las señales de video se analizan mediante el software DragonVision®, el cual fue donado por la empresa Erbesd Instruments.

Por otra parte, en la Tabla 18 se presentan, los parámetros de operación del motor de inducción que está ensamblado en el banco de vibraciones.

Tabla 18: Valores de los parámetros de operación del motor Siemens 1LA7 096-6YA60.
Fuente: [Autor].

Parámetro	Unidad	Valor
Frecuencia de suministro	Hz	60
Velocidad del motor	rpm	1200
Alimentación del motor	V	220
Potencia del motor	HP	2
Tipo de transmisión	-	polea-correas V

5.2. Proceso y procedimiento experimental

5.2.1. Proceso experimental

La experimentación se plantea de acorde a un proceso establecido previamente en el GIDTEC, este proceso consta de ocho etapas que garantizan la repetibilidad de la adquisición de datos para las señales de vibración y de video. En la Figura 36, se muestra el proceso de cómo se adquieren los datos de las señales de vibración y video.

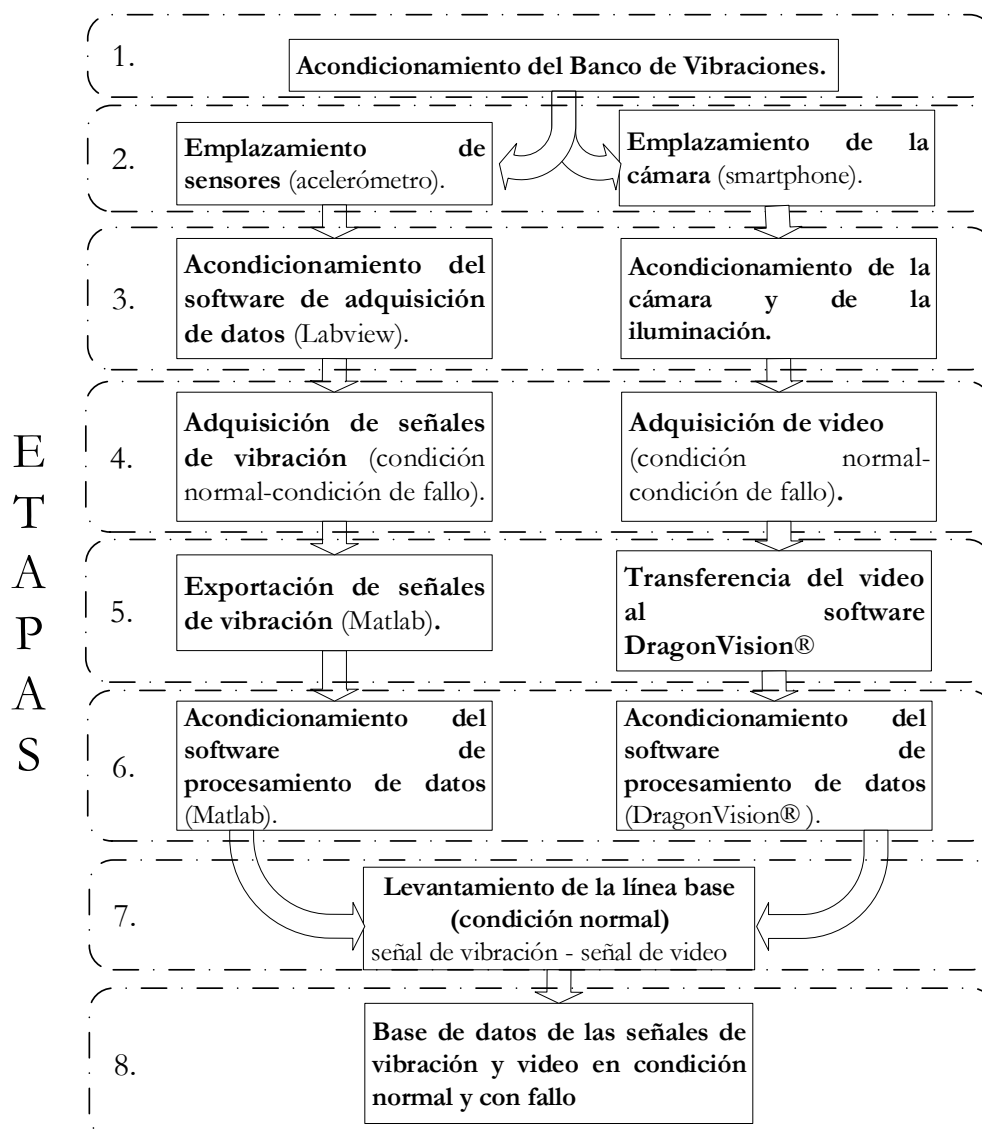


Figura 36: Proceso experimental para la adquisición de señales vibración y de video.
Fuente: [Autor].

5.2.2. Procedimiento experimental

En este punto se detalla cada una de las etapas que se debe seguir para la adquisición de señales de vibración y video, ya sea con el acelerómetro o por medio de la cámara con la cual se adquiere el video para el posterior procesamiento en el software DragonVision®.

5.2.2.1. Acondicionamiento del banco de Vibraciones

- Inspeccionar que las conexiones eléctricas se encuentren correctamente empalmadas con la finalidad de evitar, cortocircuitos o corrientes de fuga que afectan al normal funcionamiento del motor.

- A continuación, se procede a verificar el montaje de los distintos elementos que conforman el banco de vibraciones, como; rodamientos, acoplamientos y elementos de transmisión.
- Posteriormente se verifica que el banco de vibraciones opere dentro de los parámetros establecidos en la Tabla 18, que presenta los valores de los parámetros de operación del motor Siemens 1LA7 096-6YA60.
- Comprobar que los elementos del banco de vibraciones se encuentren con la sujeción adecuada, a fin de evitar un juego excesivo en los mismos, sinónimo de desalineación y desbalanceo en el banco de vibraciones del GIDTEC.

5.2.2.2. Instrumentación y condiciones de operación

Para garantizar la correcta adquisición de una base de datos, las condiciones de operación del banco de vibraciones deben estar definidas; es decir, se debe asegurar que los parámetros y las variables físicas durante el funcionamiento del motor de inducción sean las mismas para todas las experimentaciones realizadas. Es así, que con la Tabla 19 se verifican los parámetros mecánicos de operación del banco de vibraciones en condiciones normales.

Tabla 19: Datos técnicos de Banco de Vibraciones del GIDTEC. **Fuente:** [Autor].

Parámetro	Valor
Velocidad de giro	1200 rpm
Frecuencia de suministro	60 Hz
Temperatura	19 °C

Antes de iniciar con la adquisición de los datos, se debe establecer que los parámetros ambientales se encuentren dentro de los valores que se presentan en la Tabla 20, para ello se utiliza un termostato y un sonómetro, debido a que si los parámetros son diferentes en cada experimento la adquisición no es aceptada.

Tabla 20: Parámetros ambientales requeridos para la operación del banco de pruebas [Autor].

Parámetro	Unidad	Rango	Valor	Observaciones
Temperatura ambiente	°C	Mín	14	Estos parámetros deben ser medidos mínimo a 0.5 m a la redonda del banco de pruebas.
Humedad relativa	Amin	42 %	
		Máx	60 %	
Ruido ambiental durante la experimentación.	dBA		48	
Luminosidad	Lux (Lx)	Max	4997	

5.2.2.3. Emplazamiento de sensores

5.2.2.3.1. Acelerómetro

El acelerómetro es un sensor de contacto, que mide la aceleración de un elemento en movimiento [98,99]; mientras más directa y mejor área de cobertura tenga el acelerómetro con la superficie a analizar del banco de vibraciones mejores serán los resultados. El acelerómetro empleado en la experimentación es de tipo capacitivo PCB 356A15, cuyas especificaciones se presentan en la Tabla 21, el mismo se emplazó en la carcasa del motor en dirección radial al eje.

Tabla 21: Especificaciones del acelerómetro triaxial PCB 356A15. **Fuente:** [100].

Características del acelerómetro triaxial PCB 356A15	
Sensibilidad	10,2 mV / (m / s ²)
Rango de medición	± 490 m / s ² paquete
Rango de Frecuencia	2 hasta 5000 Hz
Frecuencia de resonancia	≥25 kHz
Sensibilidad transversal	≤ 5 %
Rango de temperatura (en funcionamiento)	-54 hasta +121 °C
Voltaje de excitación	20 a 30 VCC

El emplazamiento empieza con la secuencia de conexión del acelerómetro (ver Figura 37), este se conecta directamente al módulo de adquisición de datos mediante un cable con entrada de cuatro pines tipo MIL-C-5015 y salida tipo BNC.



Figura 37: Secuencia de conexión del sistema de adquisición de señales de vibración. **Fuente:** [Autor].

El módulo de adquisición de cuatro canales NI-9234 recibe las señales del sensor a una frecuencia de 50 kHz/s para cada canal. Este se encuentra emplazado directamente sobre un chasis de módulos NI cDAQ-9171, que al mismo tiempo está conectado al computador portátil mediante cable Ethernet. El cual controla la adquisición de datos mediante el programa desarrollado en LabVIEW, posterior a esto se realiza el análisis de las señales de vibración mediante el programa desarrollado en Matlab.

En la Figura 38, se observa el emplazamiento del acelerómetro triaxial en el banco de vibraciones del GIDTEC.

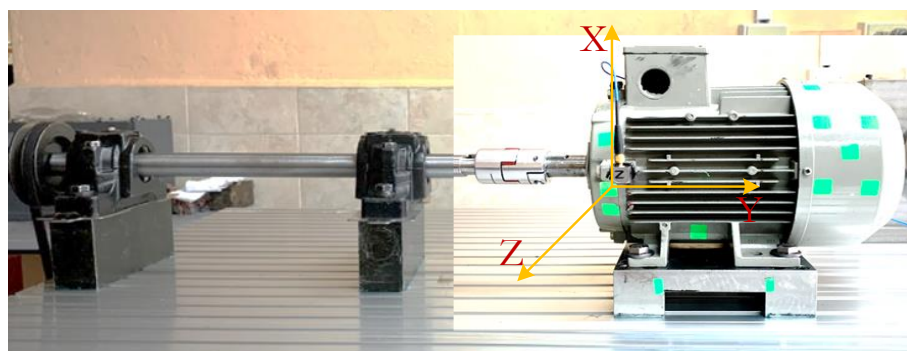


Figura 38: Emplazamiento del acelerómetro en el banco de vibraciones. **Fuente:** [Autor].

La posición y ubicación para los acelerómetros están de acuerdo con la norma internacional ISO 10816-21:2015 “Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 21: Horizontal axis wind turbines with gearbox” [55].

5.2.2.3.2. Cámara de video

Según Erbesd Intrument [94], cualquier cámara funciona para DragonVision®; sin embargo, mientras mejor resolución tenga la grabación mejores serán los resultados. Las pruebas se realizan con un dispositivo Samsung Galaxy S20 +, que permite hacer grabaciones en cámara lenta y super lenta con las características que se especifican en la

Tabla 16. Estas brindan una resolución en amplitud de 0,1 milésimas de pulgada (2,54 micrones) y una frecuencia mínima de 120 Hz (7200 CPM), lo cual es muy útil para el 95 % de la maquinaria rotativa [97].

El emplazamiento de la cámara de video empieza con la secuencia de conexión del sistema de adquisición de señales de video, la cual se presenta en la Figura 39. Para el emplazamiento de la cámara, se posiciona el kit de iluminación frente al banco de vibraciones, para luego ubicar la cámara a la distancia especificada en la Tabla 16. La cámara de video se ubica en un trípode paralelo al eje axial del motor. Una vez emplazada la cámara y el kit de iluminación se mide el nivel de luminosidad con el luxómetro L-120, debido a que se considera a la iluminación como esencial en la detección de los micro movimientos que se dan entre píxel y píxel.



Figura 39: Secuencia de conexión del sistema de adquisición de señales de video. **Fuente:** [Autor].

En la Figura 40, se presenta el plano de fijación de la cámara de video; se tiene una vista de adquisición de video (V1), que contiene el mayor número de píxeles del banco de vibraciones.

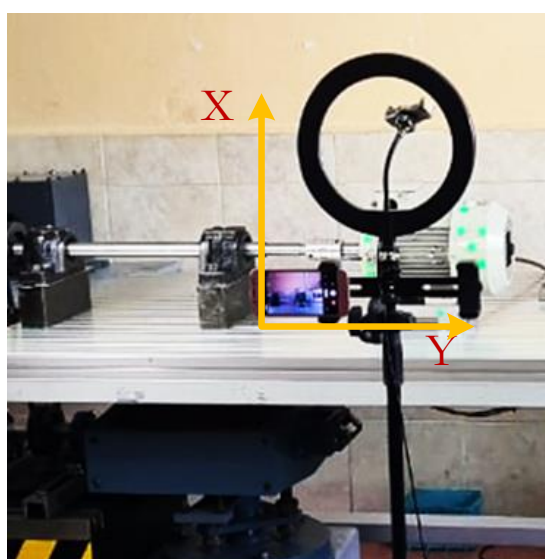


Figura 40: Plano de emplazamiento de la cámara de video en el banco de vibraciones. **Fuente:** [Autor].

5.2.2.4. Acondicionamiento para la adquisición de datos

5.2.2.4.1. Acondicionamiento del software de adquisición de datos de vibración

Dentro del grupo de investigación y desarrollo en tecnologías industriales (GIDTEC) se ha desarrollado un programa en el software LabVIEW que permite realizar la adquisición de señales para el monitoreo de la condición entre las cuales se encuentran las señales de vibración.

En la Figura 41, se presenta las partes principales de la interfaz gráfica del programa de adquisición de datos de señales de vibración.

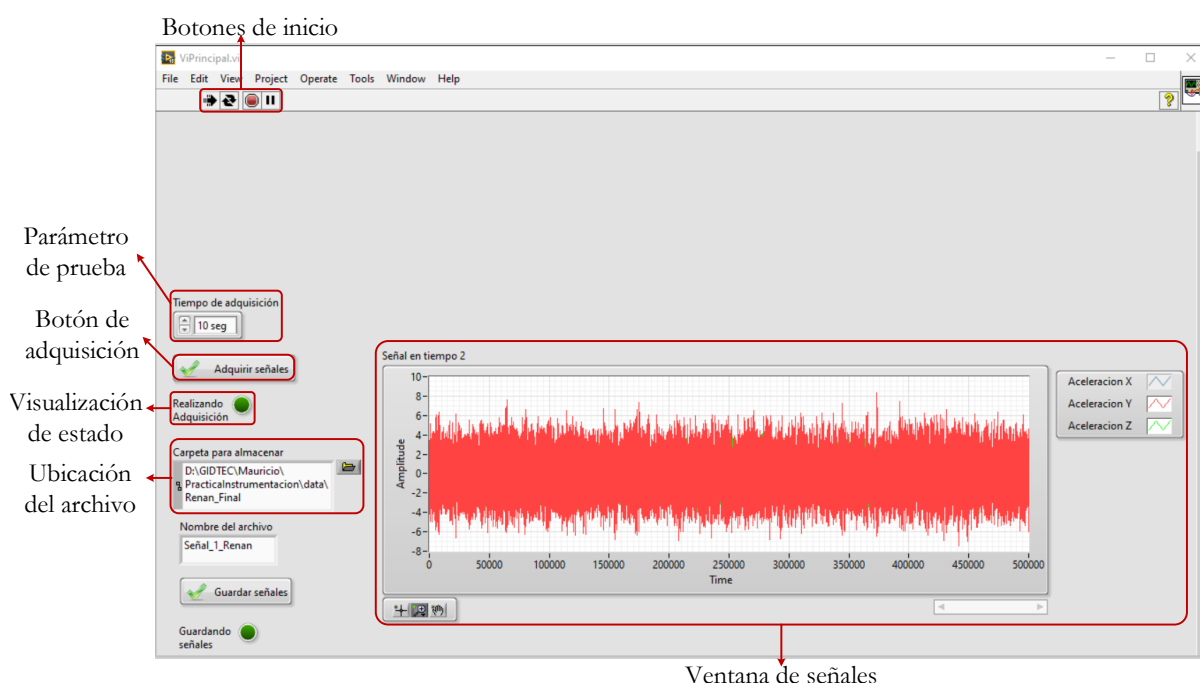


Figura 41: Interfaz gráfica del programa de adquisición de señales. **Fuente:** [Autor].

En la Tabla 22 se presenta la descripción de la interfaz gráfica del software, donde se define la función que cumple cada uno de los botones del software de adquisición de datos de señales de vibración.

Tabla 22: Descripción interfaz gráfica. **Fuente:** [Autor].

Descripción de la interfaz gráfica	
Botones de inicio:	Permiten iniciar, pausar, actualizar y detener la ejecución del programa.
Parámetros de prueba:	Se configura cuando el programa está en ejecución según la repetición y fallo.
Botones de adquisición:	Permite iniciar la adquisición de datos. Permite visualizar el proceso de captura y conversión de las señales, así como la
Visualización de estado:	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 la dirección en la que será almacenado los archivos que contienen las señales adquiridas.

5.2.2.4.2. Acondicionamiento de la cámara de video y la iluminación

El video debe ser grabado a mayor número de fotogramas por segundo sin sacrificar la resolución. El Samsung Galaxy S20+ permite grabar a 1080p @30/60/240 fps y a 720p @960 fps, para la experimentación se utiliza la opción 1080p @240 fps debido a la poca cantidad de vibración que genera el motor de inducción. Por otra parte, la iluminación es fundamental en la adquisición del video, debido a que permite una mejor detección de la variación de color entre píxel-píxel.

5.2.2.5. Adquisición de señales

La adquisición de señales de vibración y video es el resultado del plan experimental denominado: evaluación de las señales de video para la detección de fallos en rodamientos y acoplamientos empleando la técnica espejo, mismo que se encuentra en los archivos del GIDTEC.

A continuación, en la Tabla 23, se presenta un resumen de: la instrumentación, la descripción del banco y las condiciones de experimentación utilizadas para la adquisición de señales de vibración y video, de igual manera se indican los resultados y un análisis de las señales adquiridas en el plan experimental.

Tabla 23: Adquisición de señales de vibración y video en el banco de vibraciones del GIDTEC. **Fuente:** Autor.

Adquisición de señales de vibración y video		
Configuración de experimentación	Señales de vibración	Señales de video
Instrumentación	Acelerómetro PCB 356A15 Cable de conexión 4-pines MIL-C 5015. Módulo NI-9234 Chasis de módulos cDAQ-9171. Cable de conexión Ethernet. Computador portátil	Kit de iluminación PHOPIK Luxómetro LM-120 Smartphone S20+ Cable de datos USB Computador portátil
Descripción del banco	El banco de vibración del GIDTEC, consta de un motor de inducción de 2,0 HP conectado mediante un acoplamiento tipo mordaza de tamaño 24 mm a un eje con dos carcasas de bloque de plomero de rodamientos, cada uno con un cojinete de bolas de doble fila autolineables, este eje se conecta con un freno magnético a través de dos poleas y una correa en V.	
Condiciones de experimentación	Velocidad de giro: 1200 rpm Frecuencia de suministro: 60 Hz Temperatura: Ambiente: 19 °C	Luz: Led a 4997 Lux Equipo: Samsung Galaxy S20 + Distancia: 0,5 m Orientación: Horizontal Frecuencia: 240 fps Tiempo de grabación: 3s

5.2.2.6. Exportación de las señales de vibración al software matemático (Matlab) y transferencia de video al software de procesamiento de señales de video DragonVision®

5.2.2.6.1. Exportación de señales de vibración Matlab

El GIDTEC cuenta con un programa desarrollado en el software matemático Matlab, este tiene como algoritmo de análisis la Transformada de Fourier que permite analizar formas de onda de vibración en el dominio del tiempo, transformándolos en espectros de vibración en el dominio de la frecuencia donde resulta más fácil analizar los picos de vibración generados por el banco de vibraciones.

A continuación, en la Figura 42, se presenta el proceso de exportación de la señal de vibración hacia el software matemático Matlab.

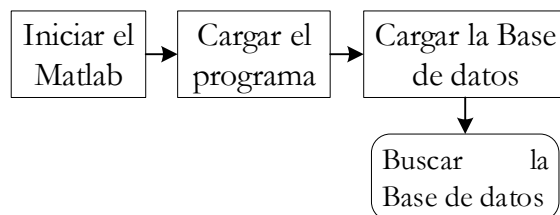


Figura 42: Proceso para la exportación de la señal de vibración al software matemático Matlab. **Fuente:** [Autor].

Por consiguiente, se detallan cada uno de los pasos que se debe seguir para exportar la señal de vibración al software Matlab.

1. En primer lugar, se inicia el software, dando clic en el icono Matlab, donde se visualiza la ventana principal del software matemático (ver Figura 43).

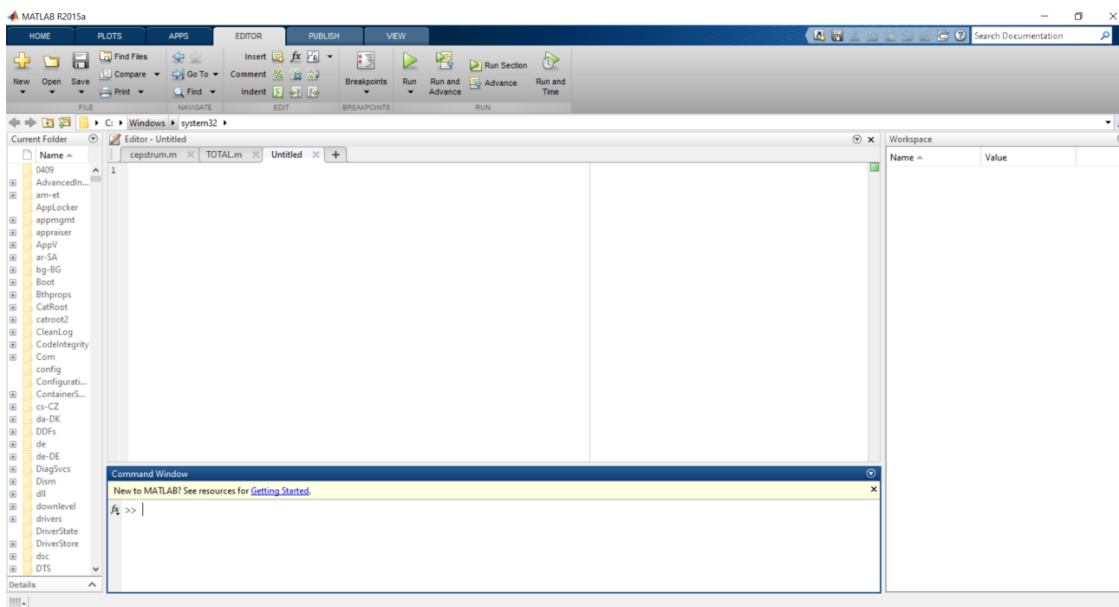


Figura 43: Ventana de Inicio del software Matlab. **Fuente:** [Autor].

2. Luego se procede a cargar el programa que se encarga del procesamiento de las señales de vibración, para ello en la ventana principal se observa un botón con el nombre “open” el cual permite cargar archivos. Cuando el usuario da clic en este botón le permite buscar el programa en cualquier directorio del computador, tal como se observa en la Figura 44.

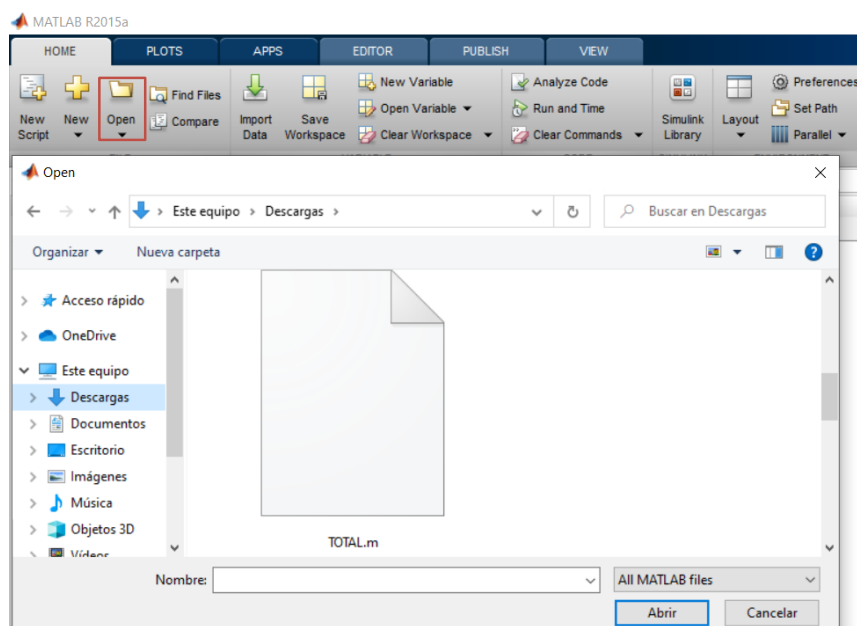


Figura 44: Ventana principal del software donde se carga el programa de análisis de señales de vibración. **Fuente:** [Autor].

3. Una vez que el programa ya se encuentre cargado en el software, se dirige a la pestaña “Home” donde se selecciona el botón “open” que permite navegar por el directorio del computador en busca de las bases de datos; una vez elegida la base de datos se da clic en abrir para cargar en el “Workspace” la base de datos que se desea analizar, así como se presenta en la Figura 45.

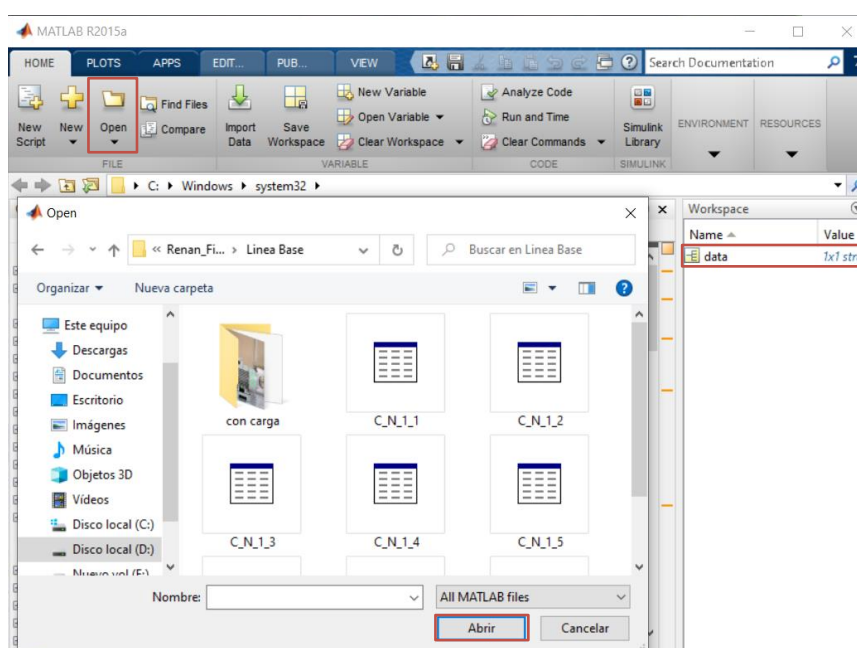


Figura 45: Cargar base de datos a analizar en el software Matlab. **Fuente:** [Autor].

5.2.2.6.2. Transferencia de video hacia el software DragonVision®

La transferencia del video al software DragonVision® inicia con la secuencia de conexión que se presenta en la Figura 46; el teléfono se conecta directamente mediante un cable USB al computador portátil el cual facilita la transferencia, es importante destacar que no se envían los videos por medio de internet, puesto que la resolución se ve afectada ocasionando resultados incorrectos.

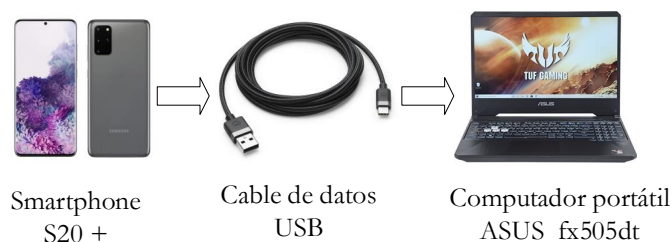


Figura 46: Secuencia de transferencia del video al software Dragon Vision®. **Fuente:** [Autor].

5.2.2.7. Acondicionamiento del software de procesamiento de datos

5.2.2.7.1. Acondicionamiento del software de procesamiento de señales de vibración (Matlab)

Una vez exportado el archivo (.mat) que contiene la señal de vibración adquirida mediante el LabView se siguen los siguientes pasos:

1. En el apartado de la programación denominado “Carga de archivo1” se copia la dirección y el nombre del archivo que se muestra en la ventana *command window* (ver Figura 47).

```

Editor - C:\Users\USUARIO\Downloads\TOTAL.m
cepstrum.m x TOTAL.m x +
1 %% ***** GRAFICA SEÑALES *****
2 %% Codigos iniciales
3 -   clc;clear all;close all;
4 %% Carga de archivo1
5 -   load 'D:\Renan_Final\Rodamiento 1\1-2\C_R1-2_1_PartSUP3.mat' %Load data
  
```

Figura 47: Archivo cargado en el software de procesamiento de señales de vibración **Fuente:** [Autor].

2. Luego se hace clic en “data” que se encuentra en la parte superior derecha en el “workspace”, tal como se puede observar en la Figura 48.

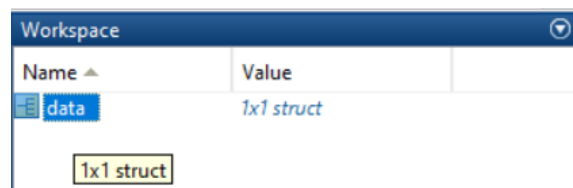


Figura 48: Base de datos de vibración **Fuente:** [Autor].

- Una vez presionado clic en “data” se despliega una subventana que contiene los datos por eje (acelerómetro triaxial), así como se observa en la Figura 49. En donde el acelerómetro 0, 1 y 2 corresponden al eje X, Y y Z, respectivamente.

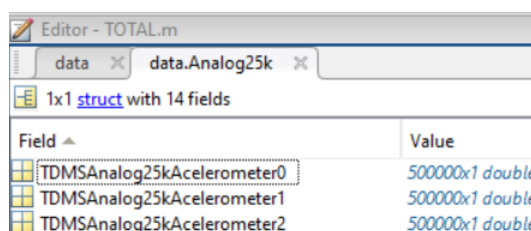


Figura 49: Ejes de análisis de la señal de vibración **Fuente:** [Autor].

- Al dar clic en el eje de vibración a analizar se despliega una serie de datos, los cuales se seleccionan y se los gráfica en la pestaña “PLOTS” dando clic en el botón “plot” con la finalidad de generar el nombre del archivo en la ventana “Command Window”, que se utilizará en el siguiente paso (ver Figura 50).

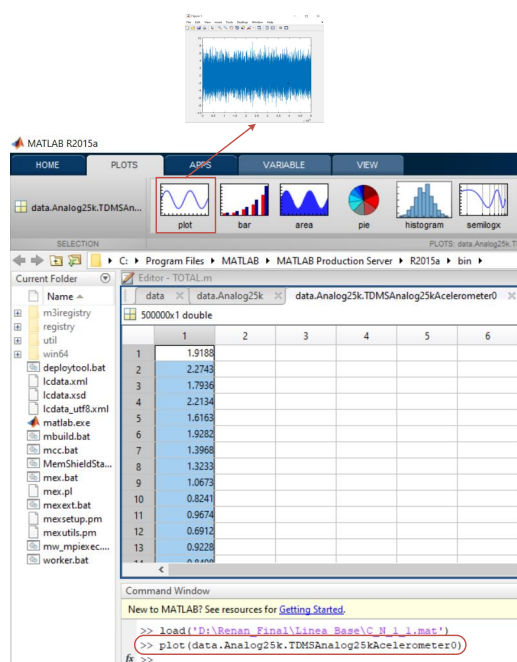


Figura 50: Espectro de vibración del eje a analizar en el software matemático (Matlab). **Fuente:** [Autor].

5. Adquisición de señales

5. A continuación, se copia el nombre generado en el “*Command Window*” y se lo pega en el apartado del programa “Carga de datos: señal-sensor” para realizar el análisis respectivo, así como se observa en la Figura 51.

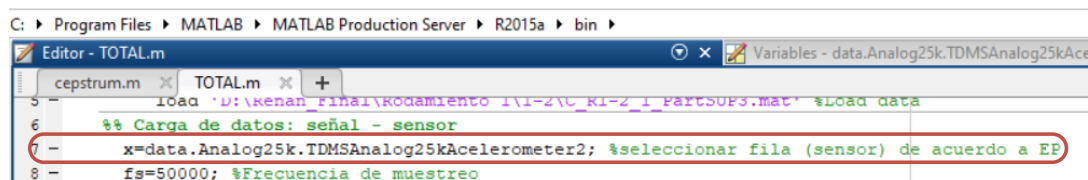


Figura 51: Carga del archivo en el eje X **Fuente:** [Autor].

6. Se procesa la vibración, para ello el usuario se dirige a la pestaña “Editor” dando clic en el botón “Run” se espera un tiempo de procesamiento en el que el programa analiza el espectro de vibración (ver Figura 52). Es importante que la frecuencia de muestreo este a la misma frecuencia en la que se adquirieron los datos.

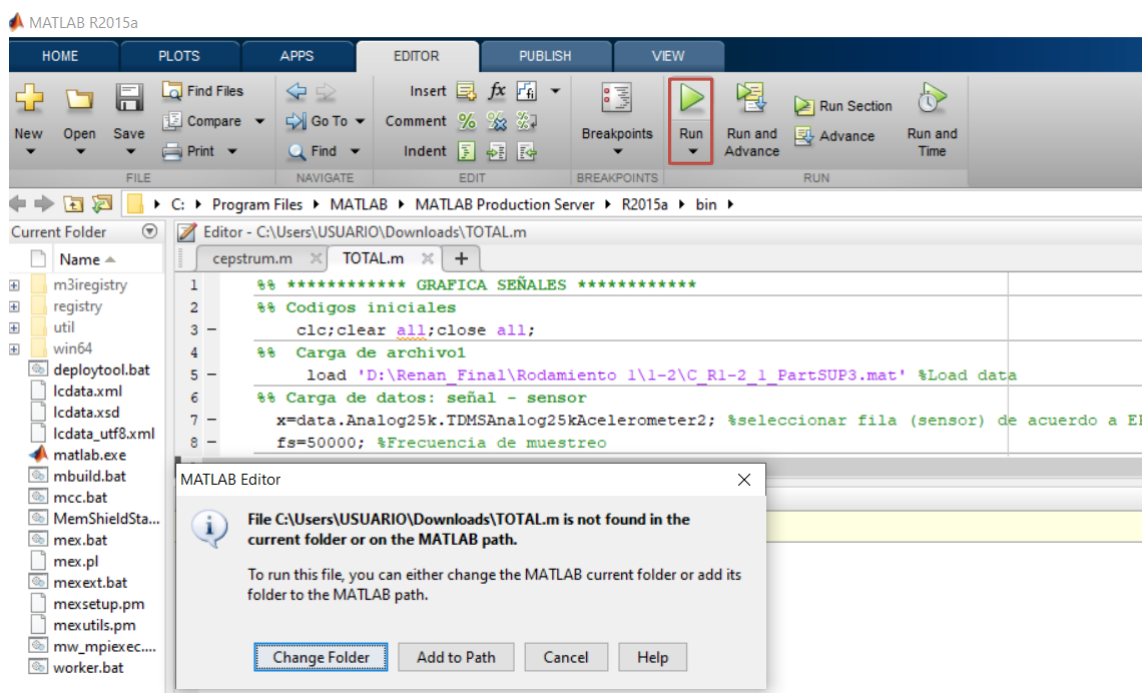


Figura 52: Procesamiento de la vibración en el software Matlab **Fuente:** [Autor].

7. Una vez que el tiempo de análisis del software haya finalizado, se procede a visualizar la ventana que indica las gráficas. Se presta atención a la gráfica que está en el dominio de la Frecuencia Vs Velocidad (ver Figura 53), en esta gráfica se puede ir visualizando cada una de las frecuencias y amplitudes del banco de vibraciones.

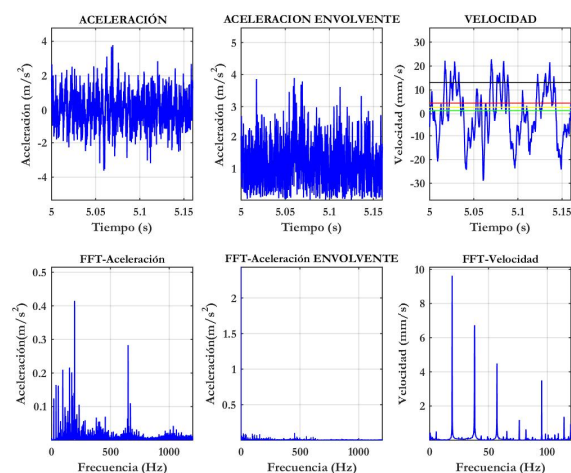


Figura 53: Gráficas resultantes del procesamiento del espectro de vibración en el software matemático Matlab **Fuente:** [Autor].

5.2.2.7.2. Acondicionamiento del software de procesamiento de señales de video DragonVision®

Para las señales de video se debe realizar la calibración del software DragonVision® mediante un patrón de vibración. La calibración de este software se puede realizar de tres formas: Distancia, RMS/Velocidad y de forma nativa donde el usuario puede grabar una firma de vibración usando cualquier recolector de datos ERBESSD INSTRUMENTS ya sea utilizando DigivibeMX o la aplicación WiSER Vibe en la tienda iOS [101].

La calibración mediante distancia que se utiliza en la presente experimentación consiste en tomar un patrón de referencia, donde se tiene un punto inicial (P_0) y un punto final (P_f) (ver Figura 54). Estos puntos deben formar una línea recta de preferencia, una vez identificados los puntos con un calibrador se mide la distancia entre puntos, esta distancia se le especifica al software en el botón añadir punto de calibración (distancia), debido a que interviene en el procesamiento del video coleccionando la profundidad y las dimensiones del banco de vibraciones.

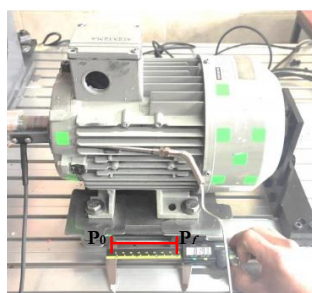


Figura 54: Calibración de Software DragonVision® para los datos de video. **Fuente:** [Autor].

5. Adquisición de señales

En la Figura 55 y en la Figura 56, se muestra la ventana principal y la pestaña análisis del software DragonVision®, respectivamente. En estas figuras se observan los botones de las pestañas del software de procesamiento de señales de video.

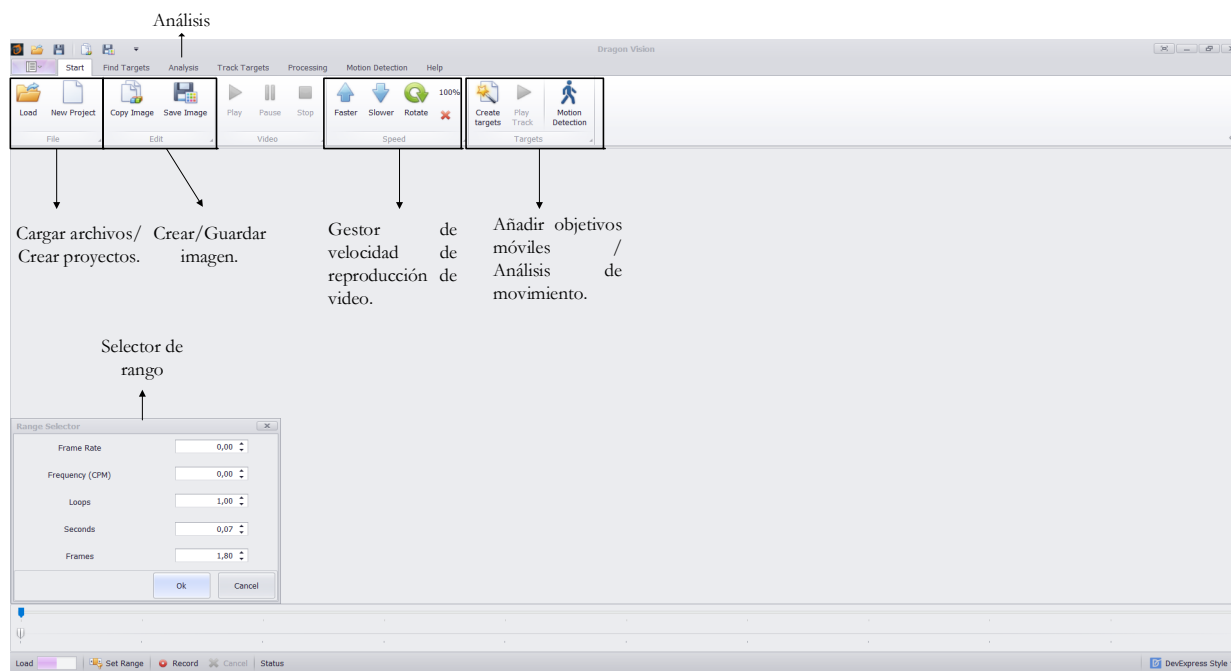


Figura 55: Software DragonVision® para los datos de video. **Fuente:** [Autor].

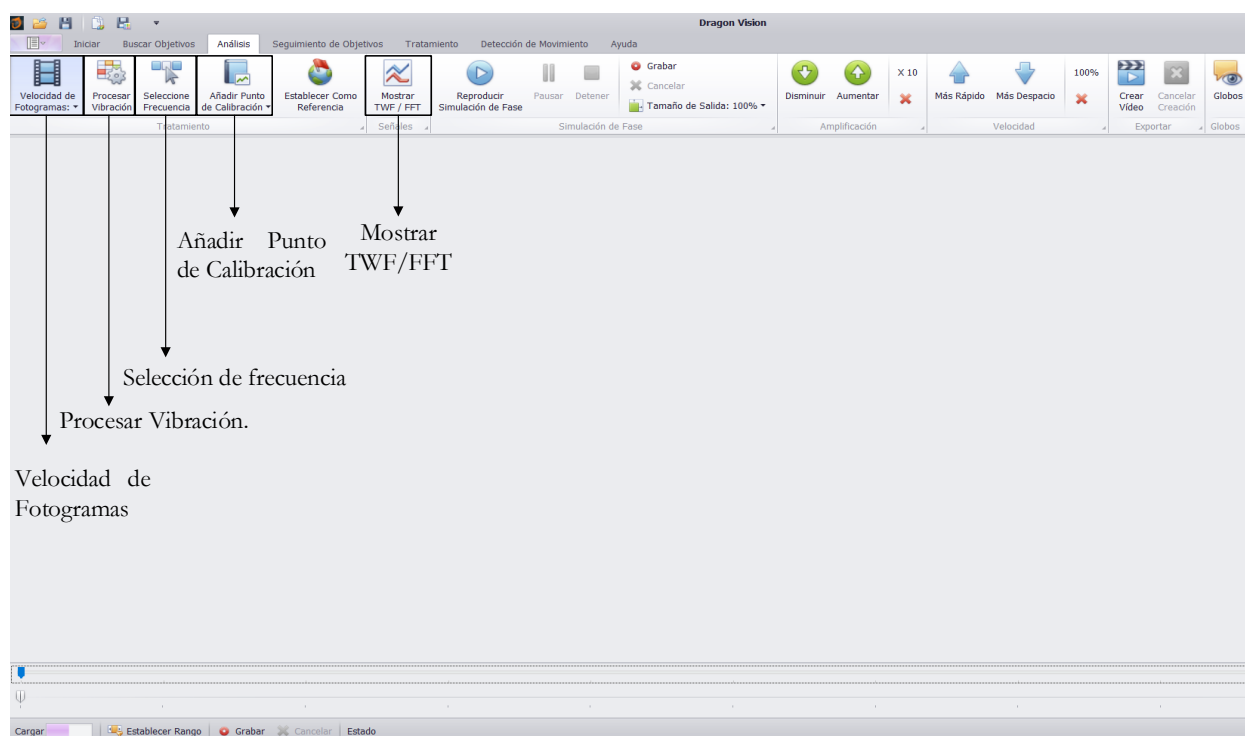


Figura 56: Pestaña análisis del software DragonVision®. **Fuente:** [Autor].

La función que cumple cada uno de los botones de la pantalla principal y del menú análisis del *software* DragonVision® se describen en la Tabla 24 y Tabla 25, respectivamente.

Tabla 24: Descripción de los botones de la ventana principal del software DragonVision®. **Fuente:** [Autor].

Ventana Principal	
Botones	Funciones
Cargar	Permite cargar cualquier archivo de video compatible con DragonVision®, escogiendo la dirección en la que se encuentra en el ordenador.
Nuevo proyecto	Una vez que el video se encuentre cargado, este botón permite al usuario crear un nuevo proyecto para su análisis.
Copiar Imagen	Permite copiar cualquier imagen en el cuadro de reproducción de video al portapapeles para usarla más tarde.
Guardar Imagen	Permite al usuario guardar cualquier imagen en el cuadro de reproducción de video en una dirección seleccionada en el dispositivo.
Cuadro de reproducción	Permite controlar la reproducción del video, pausarlo, detenerlo en el instante que el usuario lo requiera.
Gestor de velocidad de reproducción del video	Este cuadro contiene tres botones; más rápido, más lento, girar. Los dos primeros botones permiten al usuario acelerar, ralentizar la reproducción de un archivo de video procesado o sin procesar que se encuentra en el cuadro de reproducción de video y el botón girar permite al usuario rotar el video dentro del software.
Crear Objetivos	Identifica objetivos basados en la configuración de calidad definida por el usuario que se encuentra en Buscar objetivos: configuración.
Detección de movimiento:	Crea un modelo coloreado o en escala de grises que permiten visualizar el desplazamiento según el color/sombra.

Tabla 25: Descripción de los botones del menú análisis del software DragonVision®. **Fuente:** [Autor].

Menú análisis del software DragonVision®	
Botones	Funciones
Velocidad de fotogramas	Permite al usuario seleccionar los fps en lo que se grabó el video, esto con la finalidad de que el procesamiento de la vibración sea la adecuada y los resultados estén en función de los cuadros por segundo de adquisición del video.
Procesar vibración	Una vez que se hayan establecido la velocidad de fotogramas y la posición de inicio / parada del video que se analizará se procede a procesar la vibración.
Selección de frecuencia	Permite seleccionar el pico de interés dominante de frecuencia en el diagrama FFT x/y haciendo clic con el botón izquierdo dentro del gráfico y luego seleccionándolo.
Añadir punto de calibración	La calibración en este botón se encuentra de tres maneras distintas: método ANL, valor RMS y distancia. El método distancia permite al usuario seleccionar una distancia entre dos puntos con el cuadro de reproducción de video e ingresar la distancia entre los dos puntos.
Mostrar TWF/FFT	Permite revisar todos o los objetivos seleccionados por el usuario para su análisis.

Proceso experimental para el acondicionamiento del software DragonVision®

Una vez conocidas las funciones que tiene el software DragonVision® se procede a indicar el proceso de acondicionamiento que permite la reproducibilidad del procesamiento de datos para las señales de video. En la Figura 57, se muestra el proceso de cómo se acondiciona el software para el procesamiento de las señales de video.

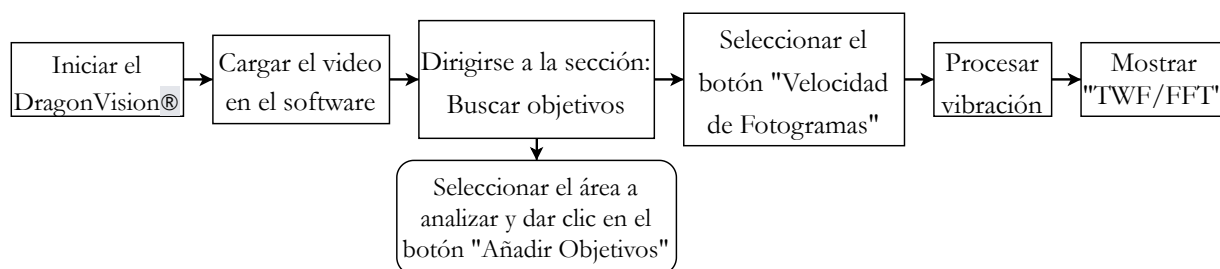


Figura 57: Proceso experimental para el acondicionamiento del software DragonVision®. **Fuente:** [Autor].

Procedimiento experimental para el acondicionamiento del software DragonVision®

A continuación, se detalla cada uno de los pasos que se debe seguir para el acondicionamiento del software de adquisición y procesamiento de señales de video denominado DragonVision®.

1. En primer lugar, se va a seleccionar el video del banco de vibraciones del GIDTEC (ver Figura 58), que se adquirió con las condiciones que se indican en la Tabla 16.



Figura 58: Videos almacenados en el computador. **Fuente:** [Autor].

2. Luego se procede a abrir el software donde se visualiza la ventana principal; se observa un icono con el nombre “cargar” el cual permite cargar los vídeos para su posterior análisis, tal como se observa en la Figura 59.

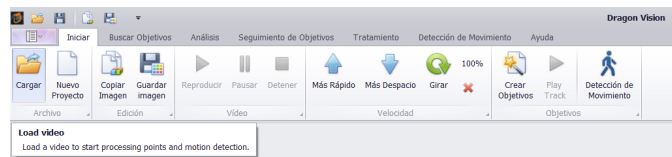


Figura 59: Ventana principal del software DragonVision®. **Fuente:** [Autor].

3. Una vez que el video ya se encuentre cargado en el software, se dirige a la sección “Buscar Objetivos”, así como se observa en la Figura 60.

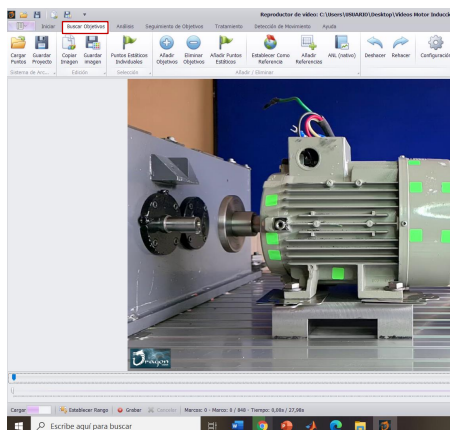


Figura 60: Video cargado listo para ir a la función “Buscar Objetivos”. **Fuente:** [Autor].

5. Adquisición de señales

4. A continuación, se selecciona el área a analizar, en la Figura 61 se indica el botón “Añadir Objetivos” (ver Tabla 24), este botón permite detectar todos los puntos que muestran una variación de movimiento entre píxel y píxel.

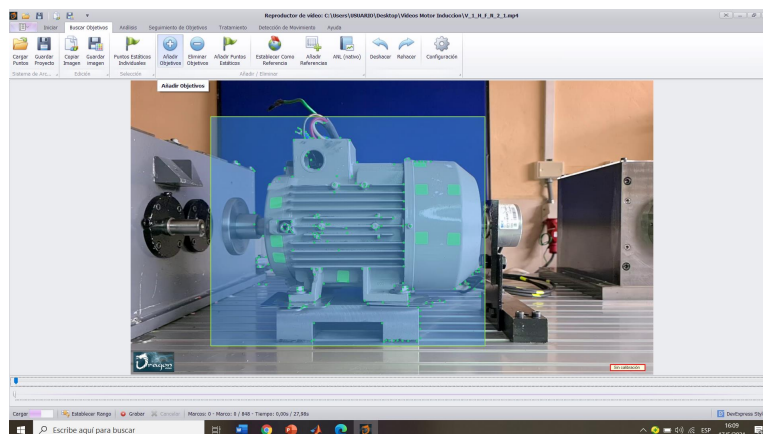


Figura 61: Selección de objetivos en un área específica mediante el icono “Añadir Objetivos”. **Fuente:** [Autor].

5. Una vez que los puntos se encuentren marcados, así como se observa en la Figura 62, se debe seleccionar el icono “Velocidad de Fotogramas”, en el cual se le va a indicar al software la velocidad de fotogramas por segundo en la que se adquirió el video (ver paso 1).

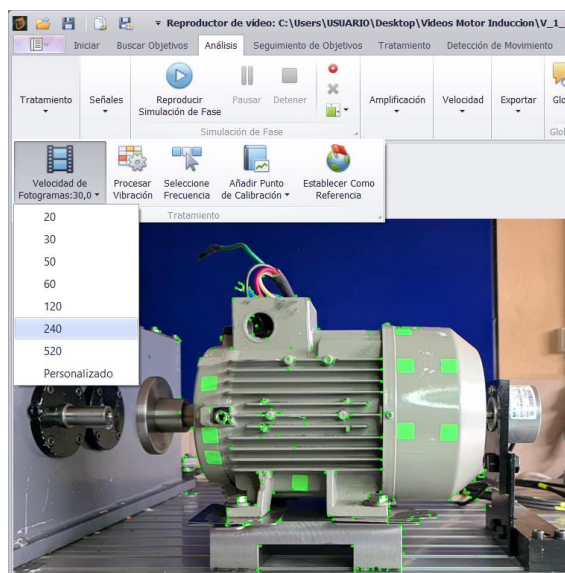


Figura 62: Selección de los fotogramas por segundo a lo que es capturado el video en el icono “Velocidad de Fotogramas”. **Fuente:** [Autor].

5. Adquisición de señales

6. A continuación, se dirige al botón que indica la función “Análisis”, ya seleccionado este botón se selecciona el icono “Procesar Vibración” (ver Figura 63) para analizar el video; se debe esperar un tiempo de procesamiento en el que el software analiza los micro movimientos entre píxel-píxel.

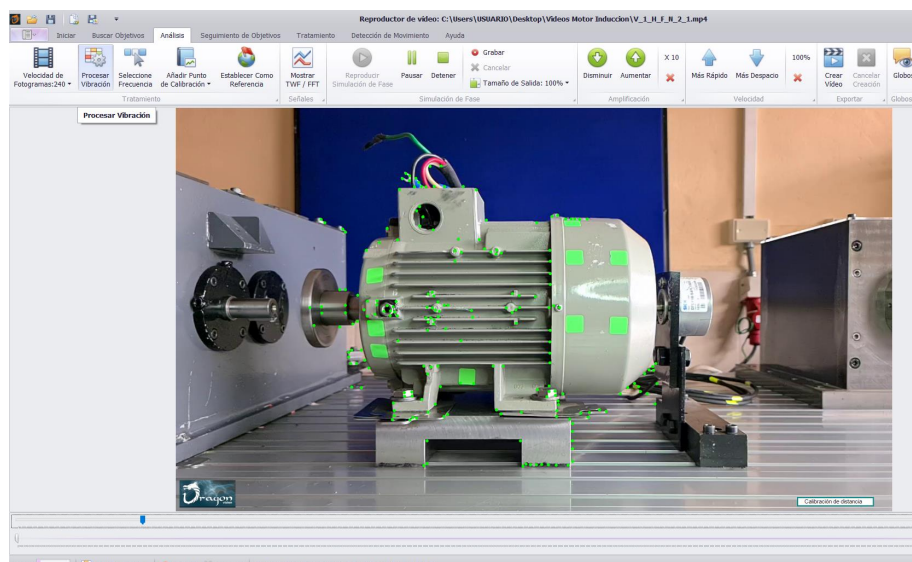


Figura 63: Procesamiento del video. Fuente: [Autor].

7. Por último, una vez concluido el procesamiento del video dentro de la misma función “Análisis” se selecciona el icono “Mostrar TWF/FFT”, donde se muestra la señal en el dominio del tiempo y el espectro de vibración en un punto determinado por el usuario. En la Figura 64, se aprecia la forma de onda en el dominio del tiempo y el espectro de vibración en un punto determinado del motor.

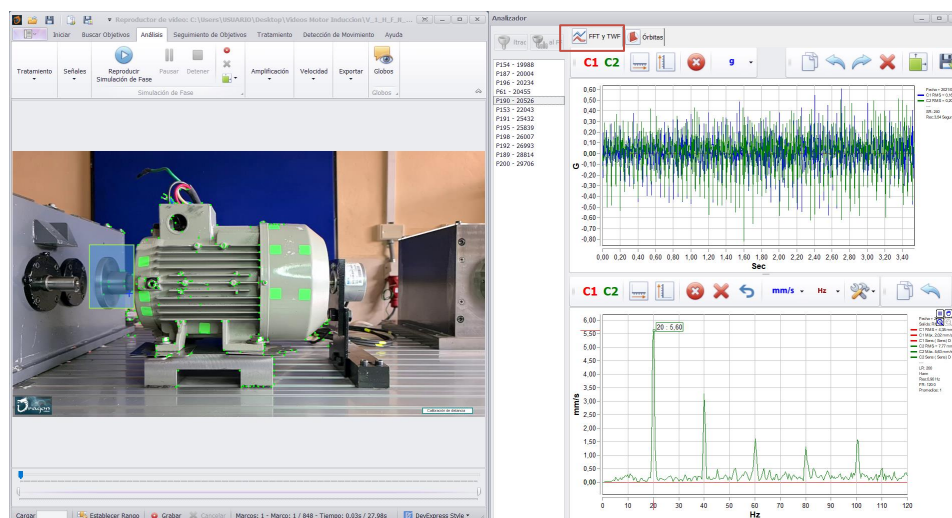


Figura 64: Espectros resultantes del procesamiento del video en el software DragonVision®. Fuente: [Autor].

5.2.2.8. Levantamiento de la línea base para señales de vibración y de video

La línea base es la primera medición de la forma de onda en el dominio del tiempo, de donde se obtiene el espectro de vibración del banco de vibraciones del GIDTEC. Esta presenta los valores de los indicadores de frecuencia y amplitud medidos cuando las condiciones de funcionamiento del equipo se encuentran aceptables y estables, con el objetivo de compararse con las señales que se van a adquirir en condiciones de fallo, a fin de localizar la variación que existe en la línea base cuando los fallos son implantados en el rodamiento y acoplamiento del banco de vibraciones.

5.2.2.8.1. Validación de línea base

Una vez concluido el emplazamiento de sensores y la verificación de las condiciones de operación se procede a la validación de la línea base. Para ello, se debe seguir el siguiente proceso que se muestra en la Figura 65.

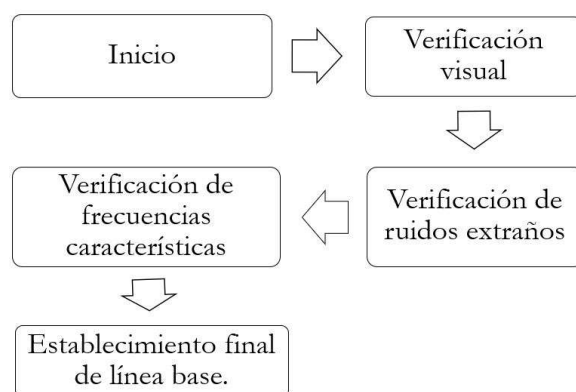


Figura 65: Proceso a seguir para la validación de la línea base. **Fuente:** [Autor].

5.2.2.8.2. Verificación visual

Este paso permite inspeccionar la desalineación en el eje, pernos desajustados, mal emplazamiento de sensores, desajuste de bandas, entre otros, mediante inspección visual.

5.2.2.8.3. Verificación de ruidos extraños

Por consiguiente, se tiene que verificar que no se escuchen ruidos anormales en el instante de encendido del motor, los cuales pueden ser un indicador de desalineación en el eje o de fallo en algún elemento mecánico. Es fundamental para este paso que una persona con experiencia sea quien analice los ruidos generados.

5.2.2.8.4. Verificación de frecuencias características

El banco de pruebas compuesto por un motor, rodamientos y un acoplamiento 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 usa la señal de vibración, debido al respaldo bibliográfico relacionado a vibración en rodamientos y acoplamientos.

Para examinar el espectro de vibración del banco de pruebas en condiciones normales se calculan las frecuencias características utilizando los datos físicos y de operación de los elementos mecánicos del banco de pruebas. Las frecuencias características obtenidas mediante fórmulas matemáticas se presentan en la Tabla 26.

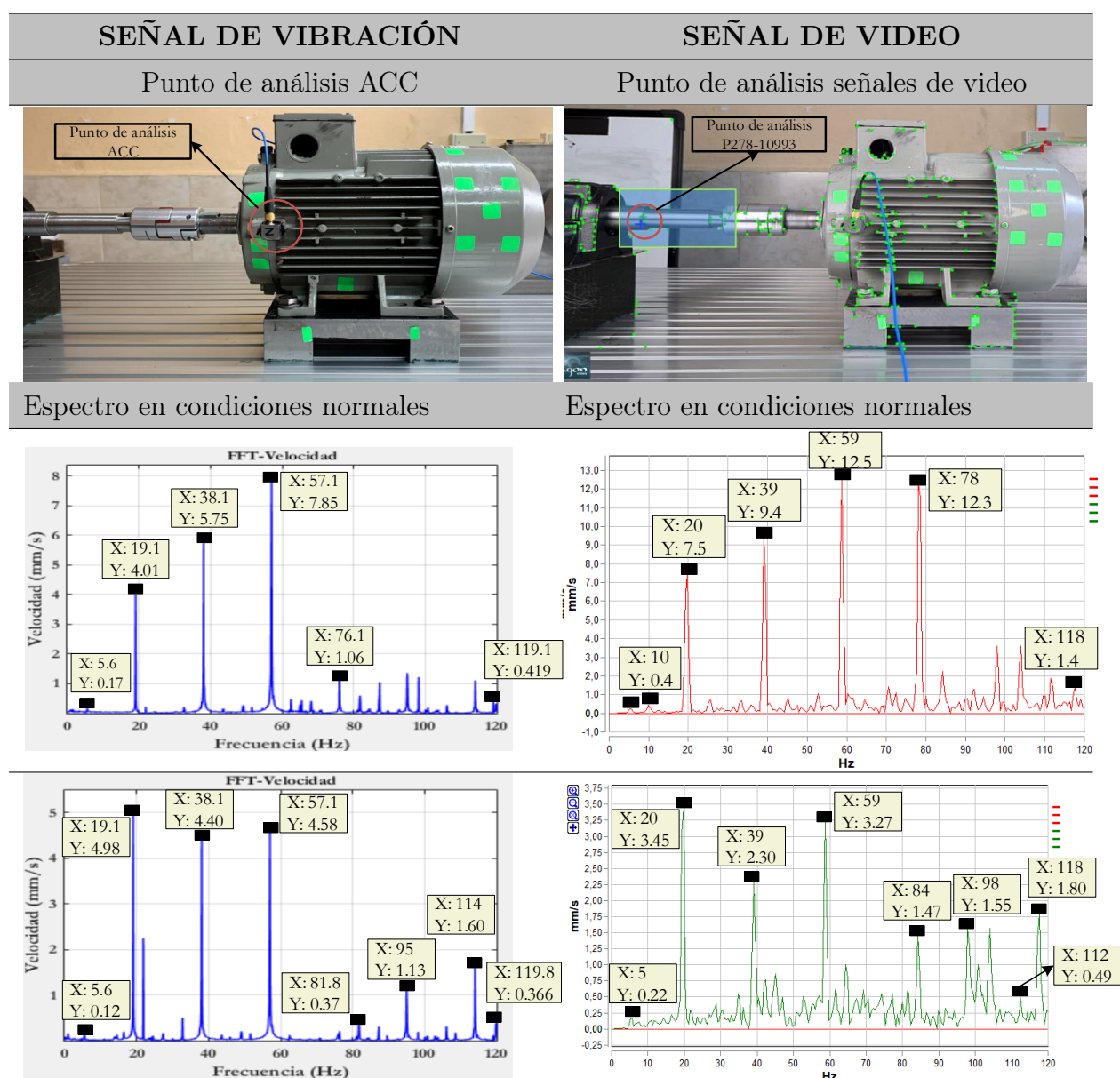
Tabla 26: Frecuencias características del banco de vibración. Fuente: [Autor].

Frecuencias Características							
Elemento	Descripción u observación	Datos	Fórmula	Velocidad (rpm)	frecuencia (Hz)	Periodo(1/F) (segundos)	
Motor	Trifásico, frecuencia de alimentación 60Hz,	Velocidad nominal(rpm) 1200	$Frecuencia = \frac{velocidad}{60}$	1200	20,00	0,050	
Acoplamiento	Tipo mordaza	Velocidad nominal(rpm) 1200	$Frecuencia = \frac{velocidad}{60}$	1200	20,00	0,050	
Paso de Alabes(BPF)	10 alabes en ventilador	Na=Numero de alabes 10	$Frecuencia = \frac{Rpm_{motor} * Na}{60}$	1200	200	0,0050	
Rodamiento 6205 ZE C3	Nb=Número de rodillos	9					
	Bd= diámetro de rodillo (mm)	7,938					
	Pd= diámetro primitivo (mm)	39,04					
	θ = ángulo de contacto (grados)	0					
	Rpm= velocidad de giro eje	1200					
	BPFI	Frecuencia de pista interna		$BPFI = \left(\frac{Nb}{2}\right) * \left(1 + \left(\frac{Bd}{Pd}\right) * (\cos \theta)\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$		108,30	0,0092
	BPFO	Frecuencia de pista externa		$BPFO = \left(\frac{Nb}{2}\right) * \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd}\right) * (\cos \theta)\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$		71,70	0,0139
BSF	Frecuencia de giro de los rodillos		$BSF = \left(\frac{Pd}{2 * Bd}\right) * \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd}\right)^2 * (\cos \theta)^2\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$		47,15	0,0212	
Defecto BSF	Frecuencia defecto BSF= El doble de la frecuencia de giro de la bola		$Defecto BSF = 2 * BSF$		94,30	0,0106	
FTF	Frecuencia de la jaula		$FTF = \left(\frac{1}{2}\right) * \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd}\right) * (\cos \theta)\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$		7,97	0,1255	
Rodamiento 1207 EKTN9	Nb=Número de rodillos	30					
	Bd= diámetro de rodillo (mm)	8,73					
	Pd= diámetro primitivo (mm)	53,3					
	θ = ángulo de contacto (grados)	0					
	Rpm= velocidad de giro eje	1200					
	BPFI	Frecuencia de pista interna		$BPFI = \left(\frac{Nb}{2}\right) * \left(1 + \left(\frac{Bd}{Pd}\right) * (\cos \theta)\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$		349,14	0,0029
	BPFO	Frecuencia de pista externa		$BPFO = \left(\frac{Nb}{2}\right) * \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd}\right) * (\cos \theta)\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$		250,86	0,0040
BSF	Frecuencia de giro de los rodillos		$BSF = \left(\frac{Pd}{2 * Bd}\right) * \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd}\right)^2 * (\cos \theta)^2\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$		59,42	0,0168	
Defecto BSF	Frecuencia defecto BSF= El doble de la frecuencia de giro de la bola		$Defecto BSF = 2 * BSF$		118,83	0,0084	
FTF	Frecuencia de la jaula		$FTF = \left(\frac{1}{2}\right) * \left(1 - \left(\frac{Bd}{Pd}\right) * (\cos \theta)\right) * \left(\frac{Rpm}{60}\right)$		8,36	0,1196	
Banda Mitsubishi	RPM polea= rpm de la polea	1200					
	Pd_banda= diámetro primitivo (mm)	100					
	L= longitud de la banda (mm)	1041					
	θ = ángulo de contacto (grados)	0					
	FFB	Frecuencia natural de la banda		$Frecuencia = \frac{(3,142) * (Rpm_{polea}) * (Pd_{banda})}{L/60}$		6,04	0,166

5.2.2.8.5. Resultados de línea base en condiciones normales

Los espectros de la señal en condiciones normales adquiridas por el acelerómetro triaxial y los espectros adquiridos mediante señales de video se presentan en la Tabla 27. En el capítulo 6, que corresponde a la evaluación de resultados, se seleccionará un eje de referencia que posibilita la comparación cuando se implementen los fallos en los elementos mecánicos del banco de vibraciones.

Tabla 27: Línea base en condiciones normales del banco de vibraciones. **Fuente:** Autor



En la Tabla 28 y en la Tabla 29, se presenta el resumen de los eventos mecánicos característicos del banco de vibraciones del GIDTEC obtenidos de la Tabla 27; se presenta la amplitud y frecuencia característica de cada elemento en dos ejes (horizontal-vertical) de estudio tanto para señales de vibración y video.

Tabla 28: Resultados de línea base en el eje horizontal (X). **Fuente:** Autor

Denominación	Frecuencias características (Hz)	Señal de vibración (Hz)	Amplitud señal de Vibración (mm/s)	Señales de video (Hz)	Amplitud señal de Video (mm/s)
Giro de motor	20	19,1	4,01	20	7,5
Frecuencia de giro de los rodillos (1207 EKTN9)	59,42	57,1	7,85	59	12,5
Frecuencia de defecto BSF (1207 EKTN9)	118,83	119,1	0,419	118	1,4
Frecuencia de jaula (1207 EKTN9)	8,36	No se visualiza	No se visualiza	10	0,4
Frecuencia natural de la banda	6,04	5,6	0,17	5	0,33

Tabla 29: Resultados de línea base en el eje vertical (Y). **Fuente:** Autor

Denominación	Frecuencias características (Hz)	Señal de vibración (Hz)	Amplitud señal de Vibración (mm/s)	Señales de video (Hz)	Amplitud señal de Video (mm/s)
Giro de motor	20	19,1	4,98	20	3,45
Frecuencia de giro de los rodillos (1207 EKTN9)	59,42	57,1	4,58	59	3,27
Frecuencia de defecto BSF (1207 EKTN9)	118,83	119,8	0,366	118	1,80
Frecuencia de jaula (1207 EKTN9)	8,36	No se visualiza	No se visualiza	No se visualiza	No se visualiza
Frecuencia natural de la banda	6,04	5,6	0,12	5	0,22

5.2.2.9. Base de datos de las señales de vibración y video en condición normal y con fallo

A continuación, se establece una base de datos que es una compilación de información que se encuentra organizada de manera sistematizada a fin de acceder, administrar y actualizar los datos que permiten obtener información del estado operativo de la máquina fácilmente. La estructura de la base de datos se presenta en la Figura 66:

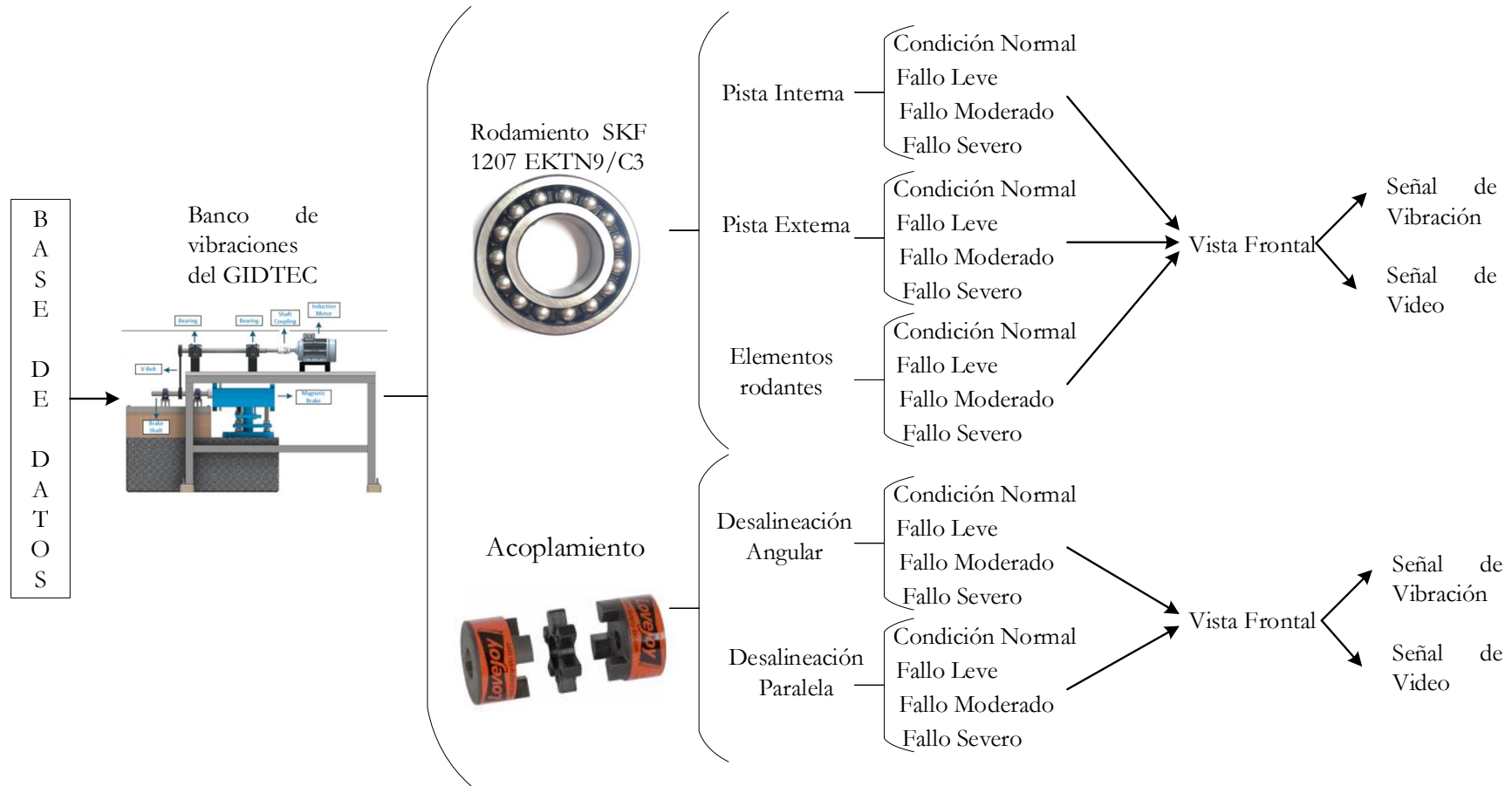


Figura 66: Estructura de la base de datos del banco de vibraciones del GIDTEC **Fuente:** [Autor].

5.2.2.9.1. Codificación de elementos mecánicos

En el banco de vibraciones donde se realizan las pruebas experimentales del GIDTEC se han generado planes experimentales para lograr montar los rodamientos y acoplamientos con fallos; donde se monta fallos en el rodamiento B2, así como en el acoplamiento C1. Estos fallos tienen una codificación establecida tanto para señales de vibración adquiridas mediante acelerómetro y mediante video, tal como se presenta a continuación.

5.2.2.9.2. Codificación de rodamientos

Para la identificación de las señales de vibración adquiridas mediante acelerómetro y señales de video adquiridas por medio del dispositivo móvil en rodamientos se ha desarrollado la codificación presentada en la Figura 67. El primer término de la codificación corresponde al código interno del rodamiento (B1 o B2); el segundo término ($_#$) corresponden al tipo de señal: señal de vibración ($_A$) y señal de video ($_V$); el tercer término ($_#$) corresponden al tipo de fallo: agrietamiento en pista interna ($_1$), agrietamiento en elemento rodante ($_2$) y agrietamiento en pista externa ($_3$); finalmente, el cuarto término ($_#$) corresponde a la severidad del fallo: leve ($_1$), moderado ($_2$) y severo ($_3$).

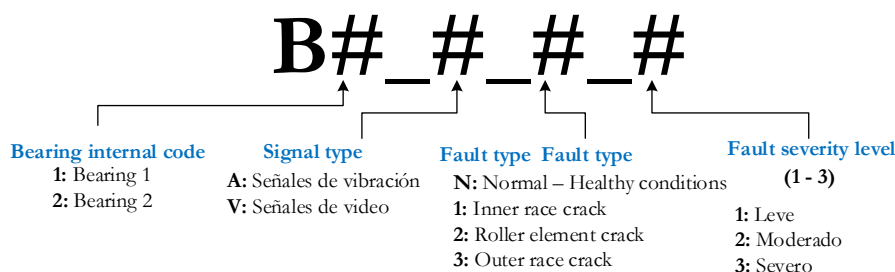


Figura 67: Codificación para la identificación de los rodamientos [Autor].

5.2.2.9.3. Codificación de acoplamientos

Para la identificación de las señales de vibración adquiridas mediante acelerómetro y señales de video adquiridas por medio del dispositivo móvil en acoplamientos se ha desarrollado la codificación presentada en la Figura 68. El primer término de la codificación corresponde al código interno del acoplamiento (C); el segundo término ($_#$) corresponden al tipo de señal: señal de vibración ($_A$) y señal de video ($_V$); el tercer término ($_#$) corresponden al tipo de fallo: condición normal del acoplamiento ($_N$), desalineación angular ($_1$) y desalineación paralela ($_2$); finalmente, el cuarto término ($_#$) corresponde al nivel de la severidad de desalineación.

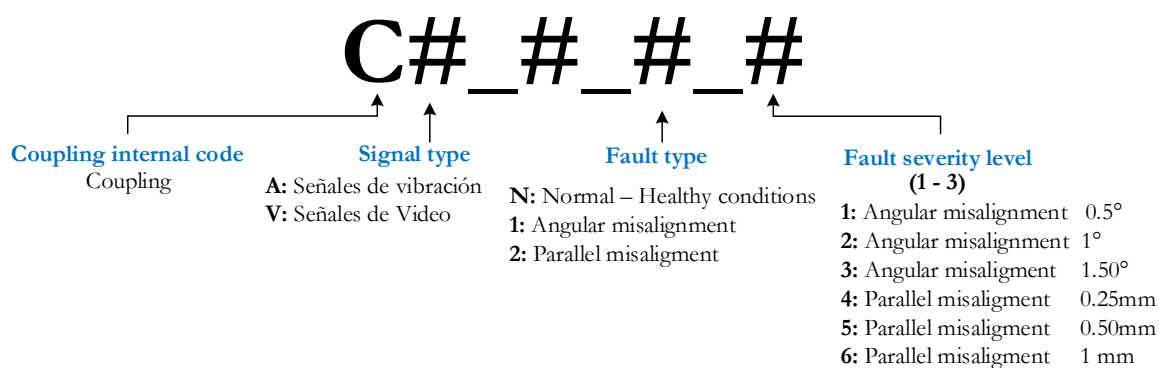


Figura 68: Codificación para la identificación de los acoplamientos [Autor].

Una vez establecida la codificación para rodamientos y acoplamientos se procede a presentar un resumen de la base de datos, tal como se observa en la Tabla 30:

Tabla 30: Base de datos de señales de video y de vibración

Nombre de la base de datos							
GIDTEC vibration bench bearing and coupling failure detection.							
Peso total		2,59 GB					
Nro. carpetas		10					
Nro. archivos		200					
ACC							
Nombre de la base de datos	Reps.	Rodamiento B1	Rodamiento B2	Acoplamiento	Condiciones de fallo	Nro. de muestras	Nro. de Carpetas
Elementos Rodantes	5	N	N	N	Condición normal	20	1
	5	N	B2_A_2_1	N	Leve		
	5	N	B2_A_2_2	N	Moderado		
	5	N	B2_A_2_3	N	Severo		
Pista interna	5	N	N	N	Condición normal	20	1
	5	N	B2_A_1_1	N	Leve		
	5	N	B2_A_1_2	N	Moderado		
	5	N	B2_A_1_3	N	Severo		
Pista Externa	5	N	N	N	Condición normal	20	1
	5	N	B2_A_3_1	N	Leve		
	5	N	B2_A_3_2	N	Moderado		
	5	N	B2_A_3_3	N	Severo		
Desalineación angular	5	N	N	N	Condición normal	20	1
	5	N	N	CA_1_1	Leve		
	5	N	N	CA_1_2	Moderado		
	5	N	N	CA_1_3	Severo		
Desalineación paralela	5	N	N	N	Condición normal	20	1
	5	N	N	CA_2_4	Leve		
	5	N	N	CA_2_5	Moderado		
	5	N	N	CA_2_6	Severo		

5. Adquisición de señales

VIDEO							
Nombre de la base de datos	Reps.	Rodamiento B1	Rodamiento B2	Acoplamiento	Condiciones de fallo	Nro. de muestras	Nro. Carpetas
Elementos Rodantes	5	N	N	N	Cond. normal	20	1
	5	N	B2_V_2_1	N	Leve		
	5	N	B2_V_2_2	N	Moderado		
	5	N	B2_V_2_3	N	Severo		
Pista interna	5	N	N	N	Cond. normal	20	1
	5	N	B2_V_1_1	N	Leve		
	5	N	B2_V_1_2	N	Moderado		
	5	N	B2_V_1_3	N	Severo		
Pista Externa	5	N	N	N	Cond. normal	20	1
	5	N	B2_V_3_1	N	Leve		
	5	N	B2_V_3_2	N	Moderado		
	5	N	B2_V_3_3	N	Severo		
Desalineación angular	5	N	N	N	Cond. normal	20	1
	5	N	N	CV_1_1	Leve		
	5	N	N	CV_1_2	Moderado		
	5	N	N	CV_1_3	Severo		
Desalineación paralela	5	N	N	N	Cond. normal	20	1
	5	N	N	CV_2_4	Leve		
	5	N	N	CV_2_5	Moderado		
	5	N	N	CV_2_6	Severo		

5.3. Resumen capítulo.

En la Figura 69 se presenta un cuadro resumen del capítulo.

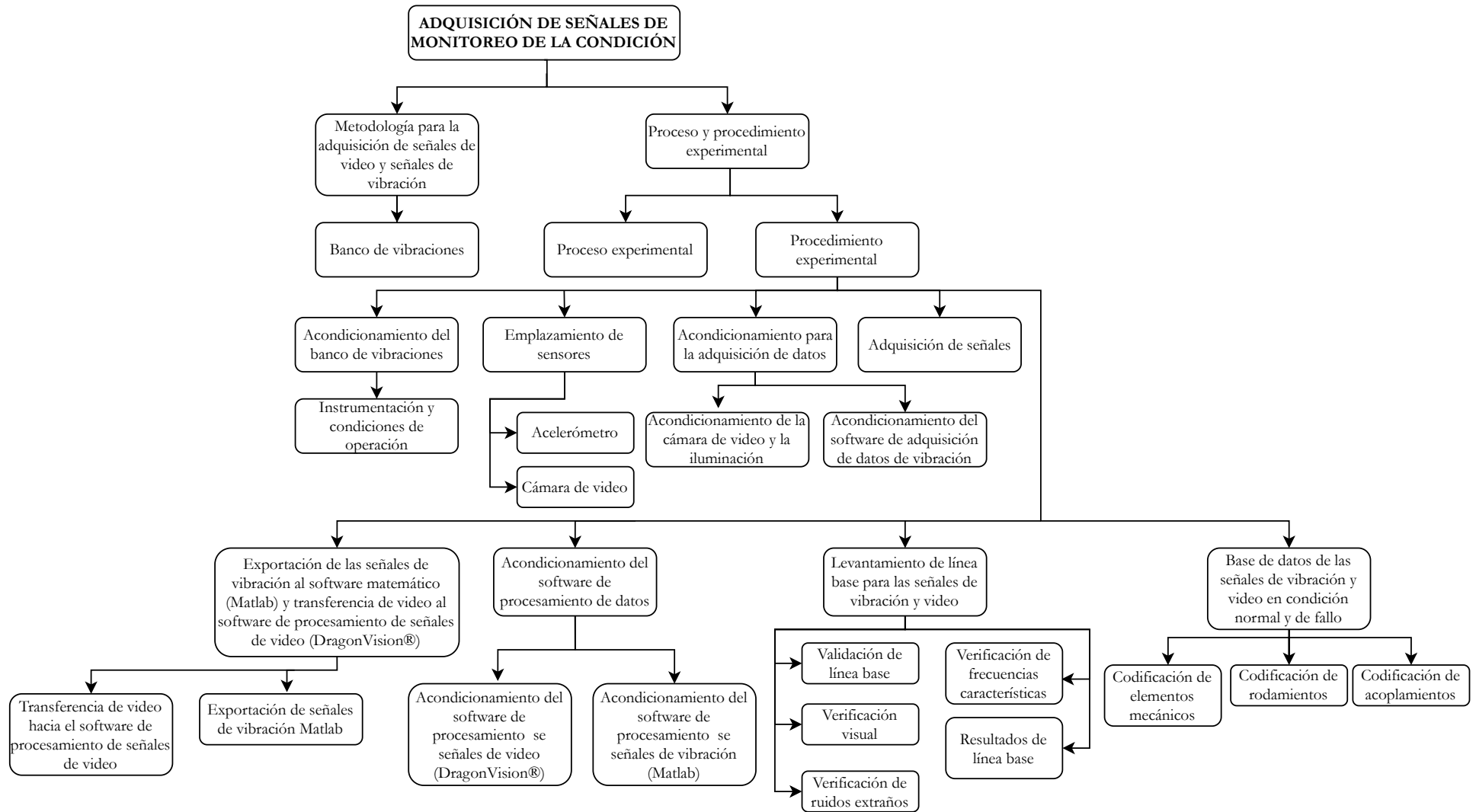


Figura 69: Resumen del capítulo. Fuente: [Autor].

6. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

Para la evaluación de las señales de video y de vibración se plantea el proceso que se muestra en la Figura 70, la cual consta de cuatro etapas que permiten evaluar ambas técnicas de manera sistematizada.

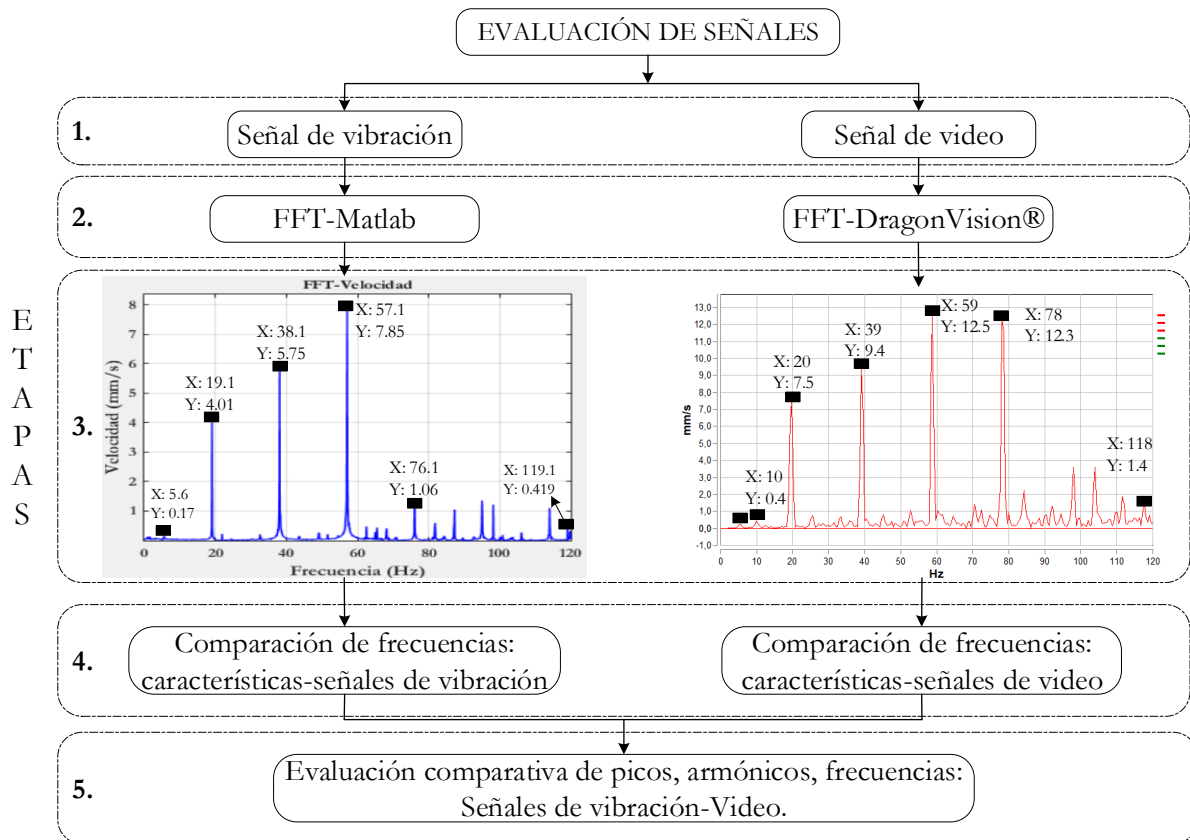


Figura 70: Metodología para la evaluación de las señales de vibración y video. **Fuente:** [Autor].

6.1. Procedimiento de evaluación de señales de vibración y video

El procedimiento que permite evaluar las señales de vibración y video se detalla a continuación:

6.1.1. Etapa 1

En la etapa 1, se ingresa las señales de vibración al Matlab y las señales de video al software DragonVision® de las bases de datos presentadas en la Tabla 30, denominada como base de datos de señales de video y de vibración.

6.1.2. Etapa 2 y 3

La etapa 2, corresponde al procesamiento de las señales adquiridas con el acelerómetro y el video. En la Figura 71 a), se ingresa la señal de vibración al software matemático Matlab y en Figura 71 b), se exporta las señales de video al software DragonVision®.

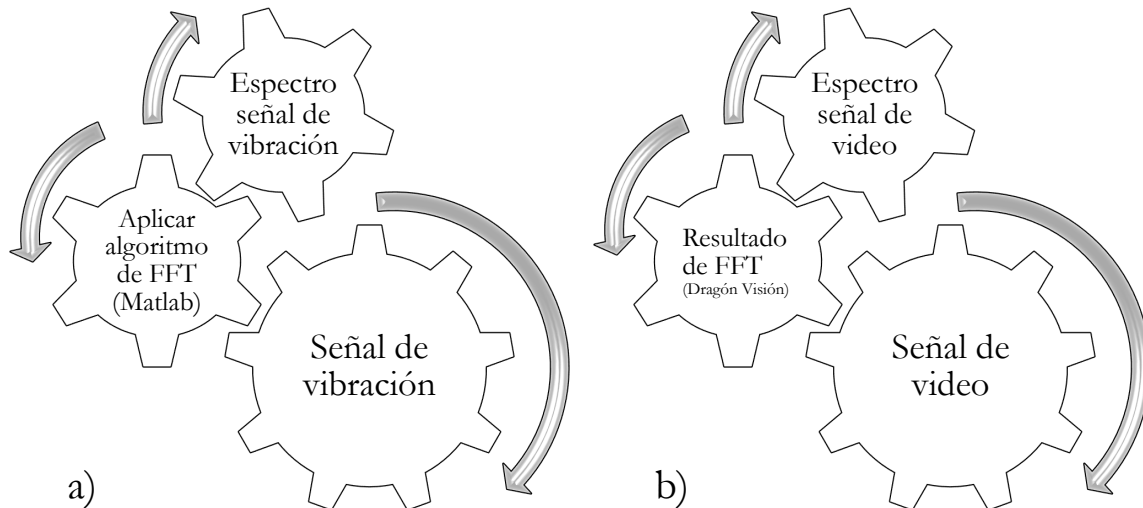


Figura 71: Proceso de obtención del espectro de las señales de vibración y video. **Fuente:** [Autor].

6.1.3. Etapa 4

Para verificar la validez de las señales de vibración y de video adquiridas en la experimentación, se procede a comparar las señales en condiciones normales con las frecuencias características las cuales se muestran en la Tabla 26, la cual se denomina "Frecuencias características del banco de vibración". El proceso que permite la comparación se muestra en la Tabla 31. Para la comparación de las frecuencias características del banco de vibraciones con las frecuencias obtenidas de las señales de vibración y video se muestra en la Figura 72:

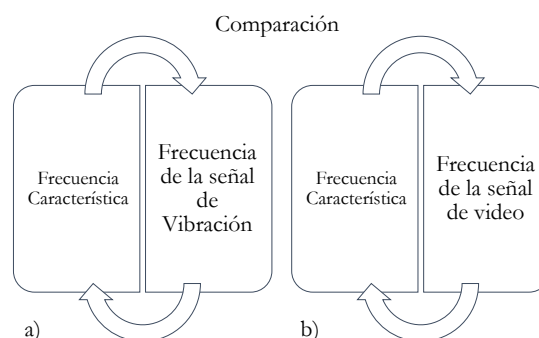


Figura 72: Proceso para comparar las frecuencias características con las señales de vibración y video. **Fuente:** [Autor].

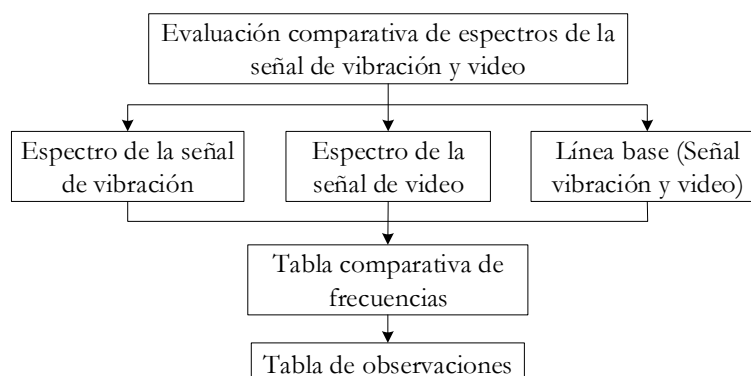
Tabla 31: Comparación de las frecuencias características con las frecuencias obtenidas de las señales de vibración y video. **Fuente:** [Autor].

Elementos	Frecuencias característica (Hz)	Señales de vibración (Hz)	Diferencia: Característica - Señal de Vibración (Hz)	Señales de video (Hz)	Diferencia: Característica - Señal de Video (Hz)
Giro de Motor	20	19,1	0,9	20	0
Frecuencia de giro de los rodillos (1207 EKTN9)	59,42	57,1	2,32	59	0,42
Frecuencia de defecto BSF (1207 EKTN9)	118,83	119,8	-0,97	118	0,83
Frecuencia de jaula (1207 EKTN9)	8,36	No se visualiza	10	-1,64
Frecuencia natural de la banda	6,04	5,6	0,44	5	1,04

Como se observa en la Tabla 31, la diferencia que existe entre las frecuencias características y las frecuencias obtenidas de las señales de vibración no son representativas. Es importante destacar que esta comparación sirve para la etapa siguiente donde se va a evaluar las señales de vibración y video con fallo en rodamientos y acoplamientos del banco de vibraciones del GIDTEC.

6.1.4. Etapa 5

En esta etapa se procede a realizar la evaluación de las señales con condiciones de fallo, para ello se sigue el proceso que se presenta en la Figura 73, en el cual se compara las señales de vibración y video en condiciones normales respecto a las señales en condiciones de fallo en elementos rodantes, para las siguientes señales se tiene una tabla de comparación por cada condición de fallo que involucra la señal de vibración y video únicamente, teniendo en cuenta a la línea base para la comparación en la tabla de frecuencias y amplitudes.

**Figura 73:** Proceso para la evaluación de las señales de vibración y video. **Fuente:** [Autor].

6.2. Dirección de los ejes

La dirección de los ejes (ver Figura 74) del acelerómetro triaxial en la experimentación son importantes debido a que indican en qué dirección se está dando la vibración. Esta puede medirse en dirección axial (Y), radial (X), o en el eje Z; dependiendo de cómo está emplazado el acelerómetro. Al procesar las señales de vibración se tiene como resultado tres gráficas correspondientes a los tres ejes, en cambio al procesar las señales de video se obtienen dos gráficas correspondientes al sentido en el que se ubica la cámara respecto a la máquina, esta puede ser: radial (X) y axial (Y) o viceversa.

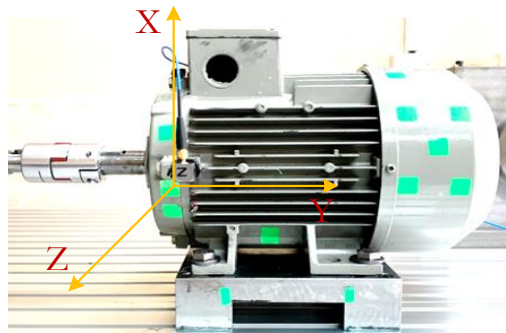


Figura 74: Dirección de los ejes en el emplazamiento del acelerómetro triaxial. **Fuente:** [Autor].

6.3. Tablas para la evaluación de señales de vibración y video

Para la evaluación de los resultados de las señales de vibración y video, se adquirieron cinco señales con fallo en rodamientos (elementos rodantes, pista interna, pista externa) y acoplamientos (desalineación angular, desalineación paralela) con tres niveles de severidad cada una; sin embargo, se presenta la evaluación de las señales con el nivel máximo de severidad, puesto que el comportamiento gráfico y numérico es similar para los otros niveles de severidad.

En la Figura 75, se presenta la distribución de las tablas para la evaluación de señales de vibración y video; primeramente, se hace una comparación gráfica de espectros, donde se extrae información de frecuencias, misma que es recopilada en una tabla para posteriormente dar observaciones que determina la validez de la técnica aplicando señales de video con respecto a la técnica de señales de vibraciones mediante acelerómetro.

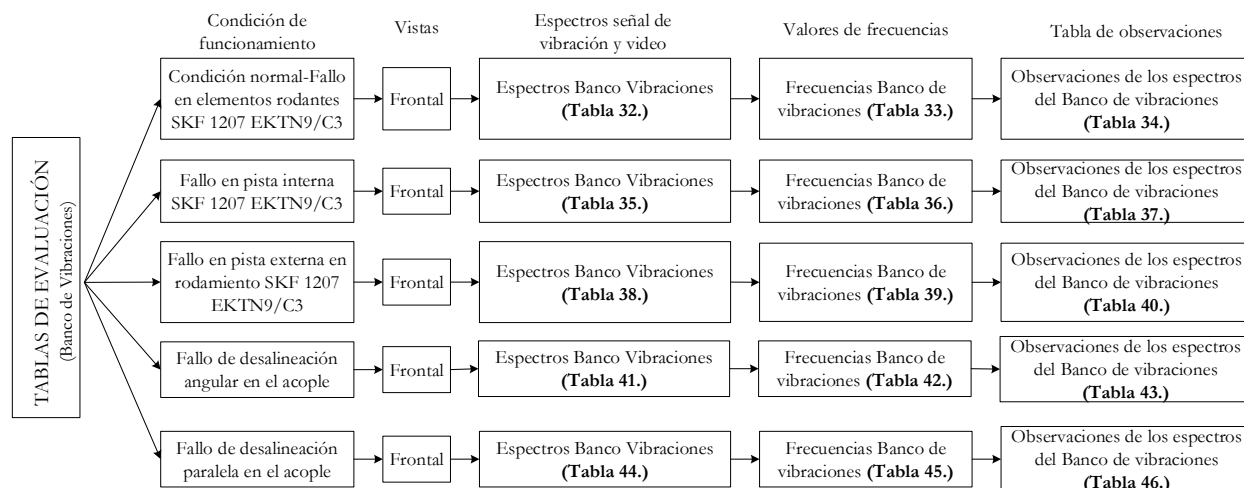


Figura 75: Distribución de tablas para la evaluación de las señales de vibración y video del banco de vibraciones del GIDTEC. **Fuente:** [Autor].

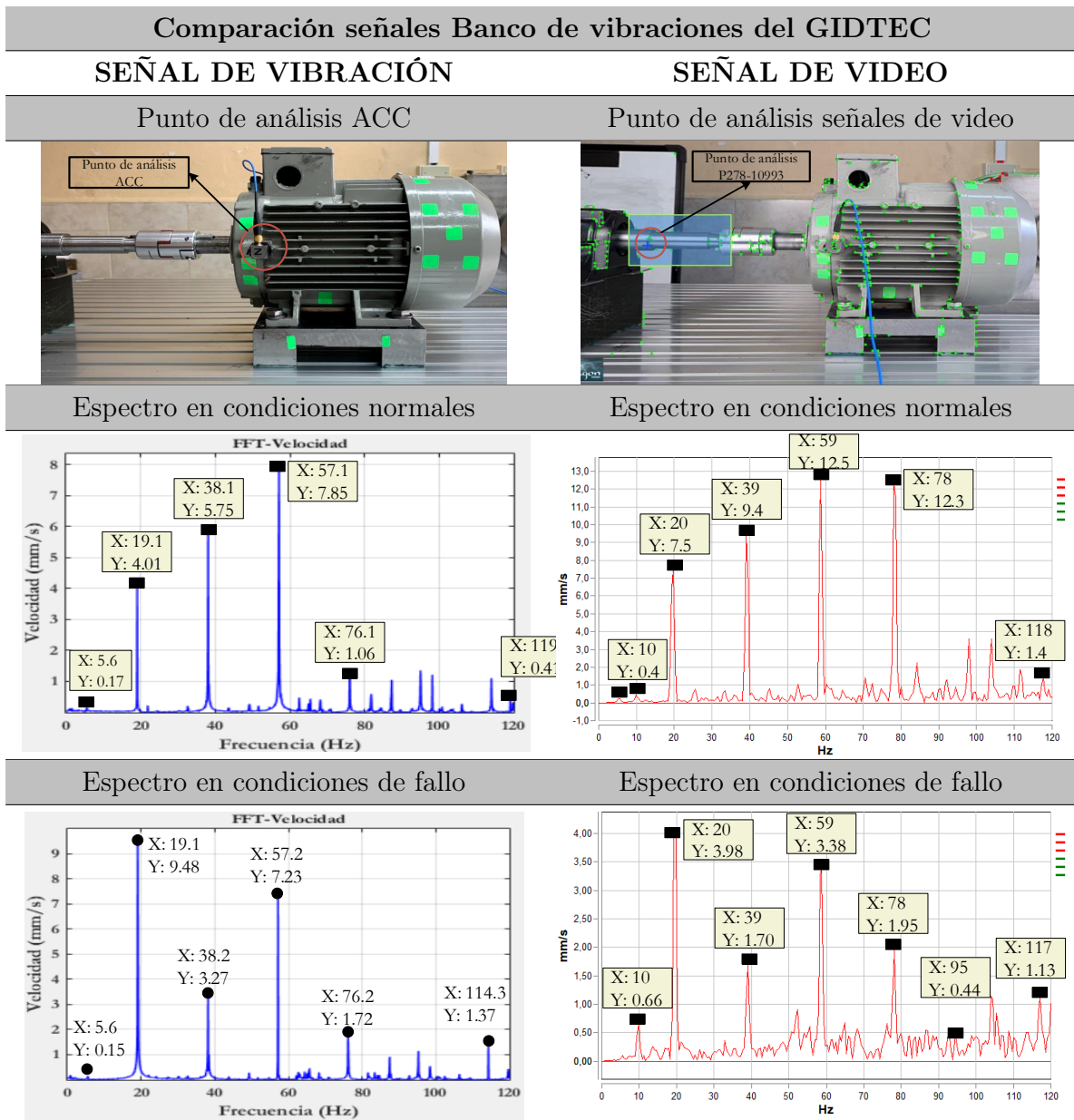
6.3.1. Tablas para la evaluación de señales de vibración y video con fallo en elementos rodantes

En la Tabla 32, se presenta la comparación de las señales de vibración y video en el dominio de la frecuencia en condiciones normales y con las señales en condiciones de fallo en elementos rodantes del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3. De igual manera se indica el punto de análisis de donde se adquirieron las señales. El comportamiento de los espectros en condiciones de fallo en elementos rodantes para las señales de vibración respecto a las señales en condiciones normales tienden a incrementar su amplitud en lo que respecta al armónico 1X; sin embargo, en los armónicos 2X y 3X la amplitud disminuye indicando que existe fallo en este elemento mecánico.

Por otra parte para señales de video en condiciones normales y condiciones de fallo la amplitud no es relevante, puesto que esta depende del desplazamiento entre pixel y pixel que se da entre puntos identificados por el software, es decir tiene relación directa con el punto que el usuario identifique como válido; si el punto de análisis se desplaza a mayor magnitud mayor va a ser la amplitud y al ser una técnica de monitoreo de la condición nueva aun los fabricantes del software no han logrado determinar un factor que relacione a esta técnica con la técnica convencional de vibración adquirida mediante acelerómetro. Es por lo que solo la comparación se hace gráfica y frecuentemente, se busca que la gráfica obtenida por medio de señales de video en un punto tenga el comportamiento espectral similar a las señales de vibración.

6. Evaluación de Resultados

Tabla 32: Comparación de señales de vibración y de video con fallo severo en Elementos rodantes del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3. **Fuente:** Autor.



Valores de frecuencia de la señal de vibración y video del banco de vibraciones correspondiente a la base de datos B2_A_2_3 y B2_V_2_3 respectivamente, con fallo en los elementos rodantes

De la comparación gráfica que se muestra en la Tabla 33, se selecciona los valores de la frecuencia que permiten evaluar la validez de las señales de video dentro del monitoreo de la condición a maquinaria rotativa. La frecuencia de pista interna y pista externa no se logra visualizar debido a la limitante del rango de frecuencias en el eje de las abscisas, mismo que viene determinado por los fps de la cámara de video. Esto debido a que los

6. Evaluación de Resultados

fps de la cámara de video determina el rango de frecuencia de muestreo.

Tabla 33: Tabla comparativa de frecuencias para señales de vibración y video con fallo en elementos rodantes del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3. **Fuente:** Autor.

Denominación	Línea Base (señal de vibración)	Señales de vibración (Cond. Fallo)	Línea Base (señal de video)	Señales de video (Cond. Fallo)
	Frecuencias (LB)	Frecuencias (CF)	Frecuencias (LB)	Frecuencias (CF)
Giro de Motor	19.1	19.1	20	20
Pista interna	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza
Pista externa	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza
Frecuencia de giro de los rodillos	57.1	57.2	59	59
Frecuencia de defectos BSF	119	114.3	118	117
Frecuencia de jaula	no se visualiza	no se visualiza	10	10
Frecuencia natural de la banda	5.6	5.6	5	no se visualiza

En la Tabla 34, se presenta las observaciones que se obtuvieron de la comparación numérico y gráfica de las señales de vibración y video con fallo en elementos rodantes.

Tabla 34: Tabla de observaciones para señales de vibración y video con fallo en elementos rodantes del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3. **Fuente:** Autor.

Observaciones	Dragon Vision	Acc
1 Se aprecia la señal FFT en condición normal.	Si	Si
2 Se aprecia la señal FFT en condición con fallo.	Si	Si
3 Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo en los rodamientos y acoplamientos.	Si	Si
4 Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en los elementos	Si	Si
5 Presencia de bandas laterales	Si	Si
6 Presencia de armónicos	Si	Si

6.3.2. Tablas para la evaluación de señales de vibración y video con fallo en pista interna

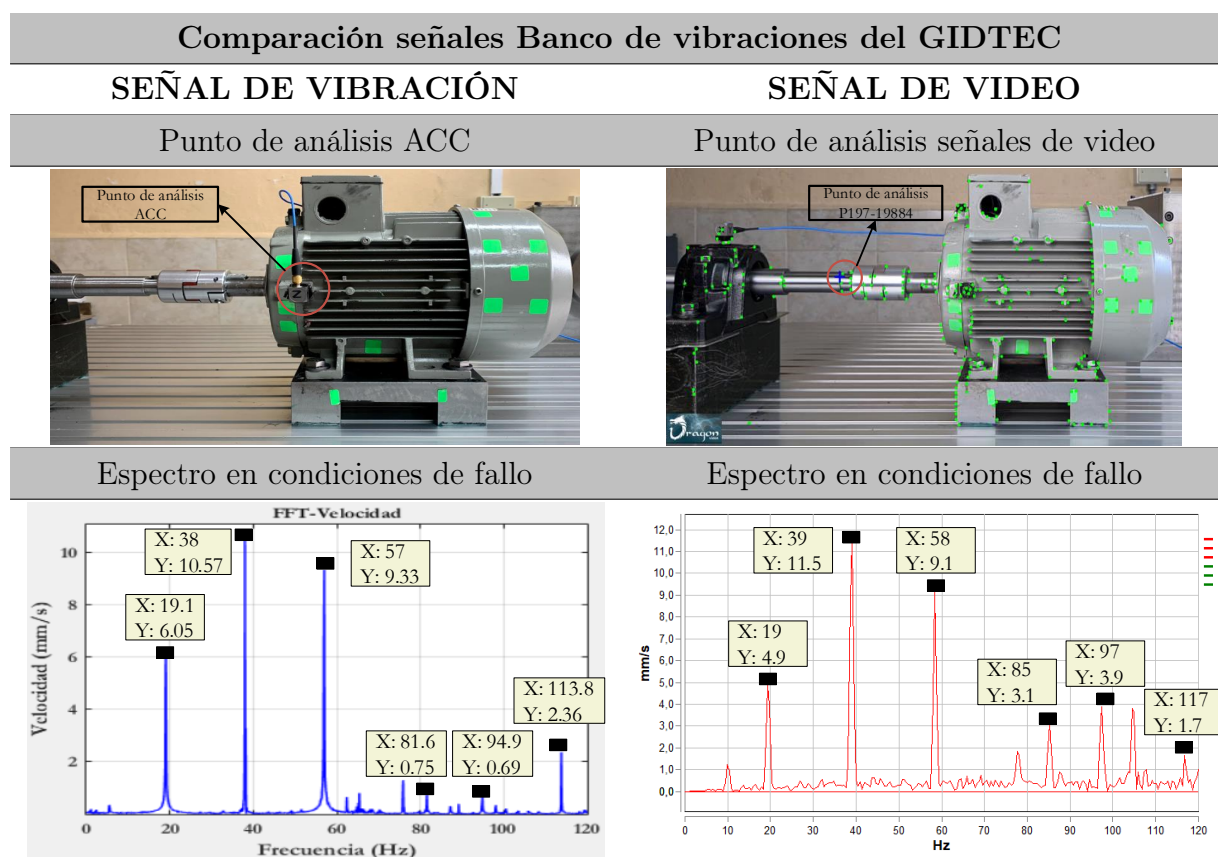
En la Tabla 35, se muestra la comparación de las señales de vibración y video con fallo en pista interna del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3, el comportamiento espectral que

6. Evaluación de Resultados

tiene la señal de vibración frente a la señal de video es similar; en lo que respecta a señales de vibración al comparar estos espectros con los espectros en condiciones normales se identifica que la amplitud aumenta en los armónicos 1X, 2X, 3X, 6X; sin embargo, la amplitud en el armónico 4X disminuye al presentarse este fallo en el rodamiento.

Para las señales de video las amplitudes no son comparables, debido a que esta viene determinada por el punto de análisis que establece el usuario. Este punto está relacionado directamente con el desplazamiento que se da entre píxel-píxel en los puntos identificados por el software DragonVision®.

Tabla 35: Comparación de señales de vibración y de video con fallo severo en pista interna del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3. **Fuente:** Autor.



Valores de frecuencia de señal de vibración y video del banco de vibraciones correspondiente a la base de datos B2_A_1_3 y B2_V_1_3 respectivamente, con fallo en pista interna

De la comparación en la Tabla 35 y considerando los espectros en condiciones normales, se obtiene los valores que se presentan en la Tabla 36, mismos que permiten evaluar la validez de las señales de video dentro del monitoreo de la condición de los rodamientos con fallo en pista interna. La frecuencia de pista interna y pista externa no se logra visualizar

debido a la limitante del rango de frecuencias en el eje de las abscisas, mismo que viene determinado por los fps de la cámara de video. Esto debido a que los fps de la cámara de video determina el rango de frecuencia de muestreo.

Tabla 36: Tabla comparativa de frecuencias para señales de vibración y video con fallo en pista interna del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3. **Fuente:** Autor.

Denominación	Línea Base	Señales de vibración	Línea Base	Señales de video
	(señal de vibración)	(Cond. Fallo)	(señal de video)	(Cond. Fallo)
	Frecuencias (LB)	Frecuencias (CF)	Frecuencias (LB)	Frecuencias (CF)
Giro de Motor	19.1	19.1	20	19
Pista interna	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza
Pista externa	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza
Frecuencia de giro de los rodillos	57.1	57	59	58
Frecuencia de defectos BSF	119	113.8	118	117
Frecuencia de jaula	no se visualiza	no se visualiza	10	10
Frecuencia natural de la banda	5.6	5.6	5	no se visualiza

En la Tabla 37, se muestran las observaciones que se obtuvieron de la comparación numérico-gráfica de las señales de vibración y video con fallo en pista interna del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3. Se nota la presencia de armónicos y de bandas laterales y un cambio en la amplitud de los espectros.

Tabla 37: Tabla de observaciones para señales de vibración y video con fallo en pista interna del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3. **Fuente:** Autor.

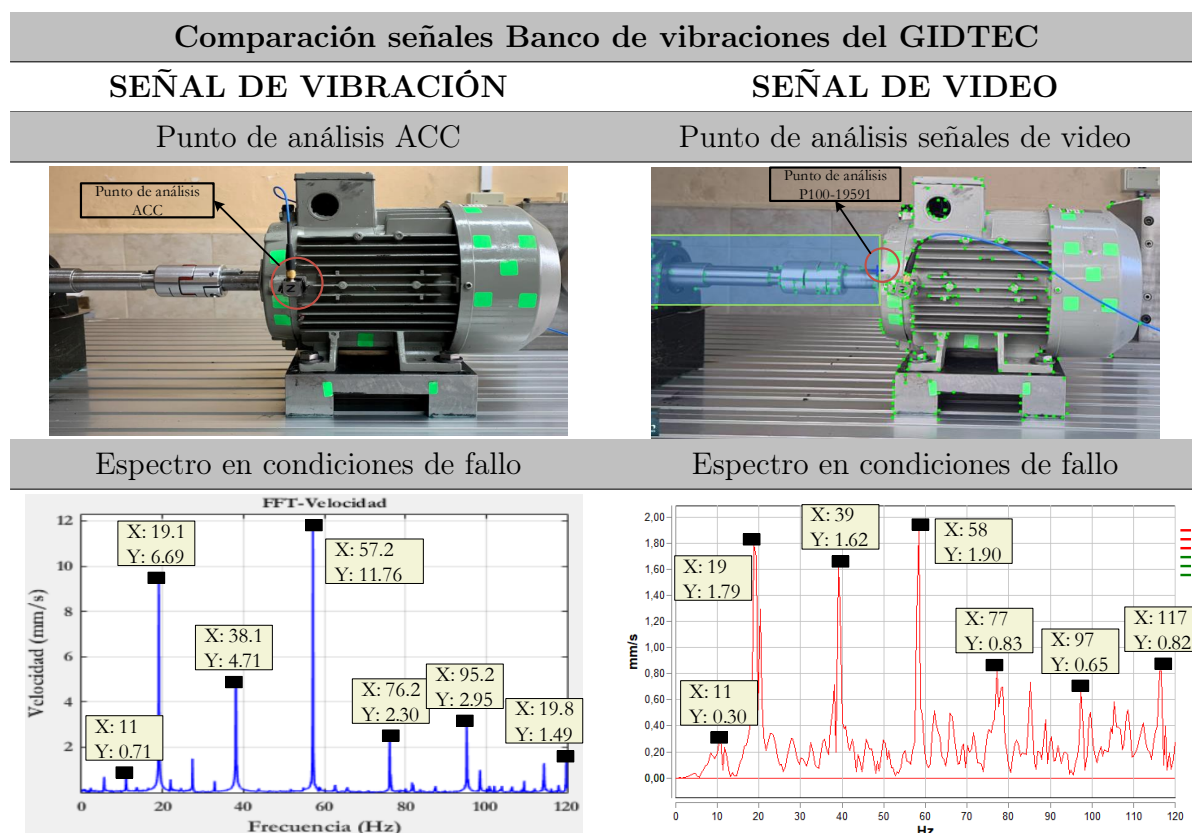
	Observaciones	Dragon Vision	Acc
1	Se aprecia la señal FFT en condición normal.	Si	Si
2	Se aprecia la señal FFT en condición con fallo.	Si	Si
3	Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo en los rodamientos y acoplamientos.	Si	Si
4	Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en los elementos	Si	Si
5	Presencia de bandas laterales	Si	Si
6	Presencia de armónicos	Si	Si

6.3.3. Tablas para la evaluación de señales de vibración y video con fallo en pista externa

En la Tabla 38, se muestra la comparación de las señales de vibración y video con fallo en pista externa del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3. El comportamiento espectral que tiene la señal de vibración frente a la señal de video es similar, en lo que respecta a señales de vibración al comparar estos espectros con los espectros en condiciones normales se evidencia que la amplitud aumenta en los armónicos 1X, 3X, 4X, 6X; sin embargo la amplitud en el armónico 2X disminuye al presentarse este fallo en el rodamiento.

Para las señales de video las amplitudes no son comparables, únicamente se analiza el espectro gráficamente donde se observa que los picos siguen la misma tendencia espectral con respecto a las señales de vibración. Como se ha mencionado en las explicaciones de las tablas anteriores las amplitudes de las señales de video dependen del desplazamiento que se da entre píxel y píxel, esto debido a que no todos los puntos identificados se desplazan con las mismas amplitudes.

Tabla 38: Comparación de señales de vibración y de video con fallo severo en pista externa del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3. **Fuente:** Autor.



Valores de frecuencia de señal de vibración y video del banco de vibraciones correspondiente a la base de datos B2_A_3_3 y B2_V_3_3 respectivamente, con fallo en pista externa

En la Tabla 39 se presentan los valores de las frecuencias de las señales de vibración y video que se indican en la Tabla 38, estas frecuencias corresponden a cada elemento mecánico que conforman el banco de vibraciones del GIDTEC.

Tabla 39: Tabla comparativa de frecuencias para señales de vibración y video con fallo en pista externa del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3. **Fuente:** Autor.

Denominación	Línea Base (señal de vibración)	Señales de vibración (Cond. Fallo)	Línea Base (señal de video)	Señales de video (Cond. Fallo)
	Frecuencias (LB)	Frecuencias (CF)	Frecuencias (LB)	Frecuencias (CF)
Giro de Motor	19.1	19.1	20	19
Pista interna	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza
Pista externa	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza
Frecuencia de giro de los rodillos	57.1	57.2	59	58
Frecuencia de defectos BSF	119	119.8	118	117
Frecuencia de jaula	no se visualiza	11	10	11
Frecuencia natural de la banda	5.6	5.4	5	no se visualiza

En la Tabla 40, se presenta las observaciones que se obtuvieron de la comparación numérico-gráfica de las señales de vibración y video con fallo en pista externa.

Tabla 40: Tabla de observaciones para señales de vibración y video con fallo en pista externa del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3. **Fuente:** Autor.

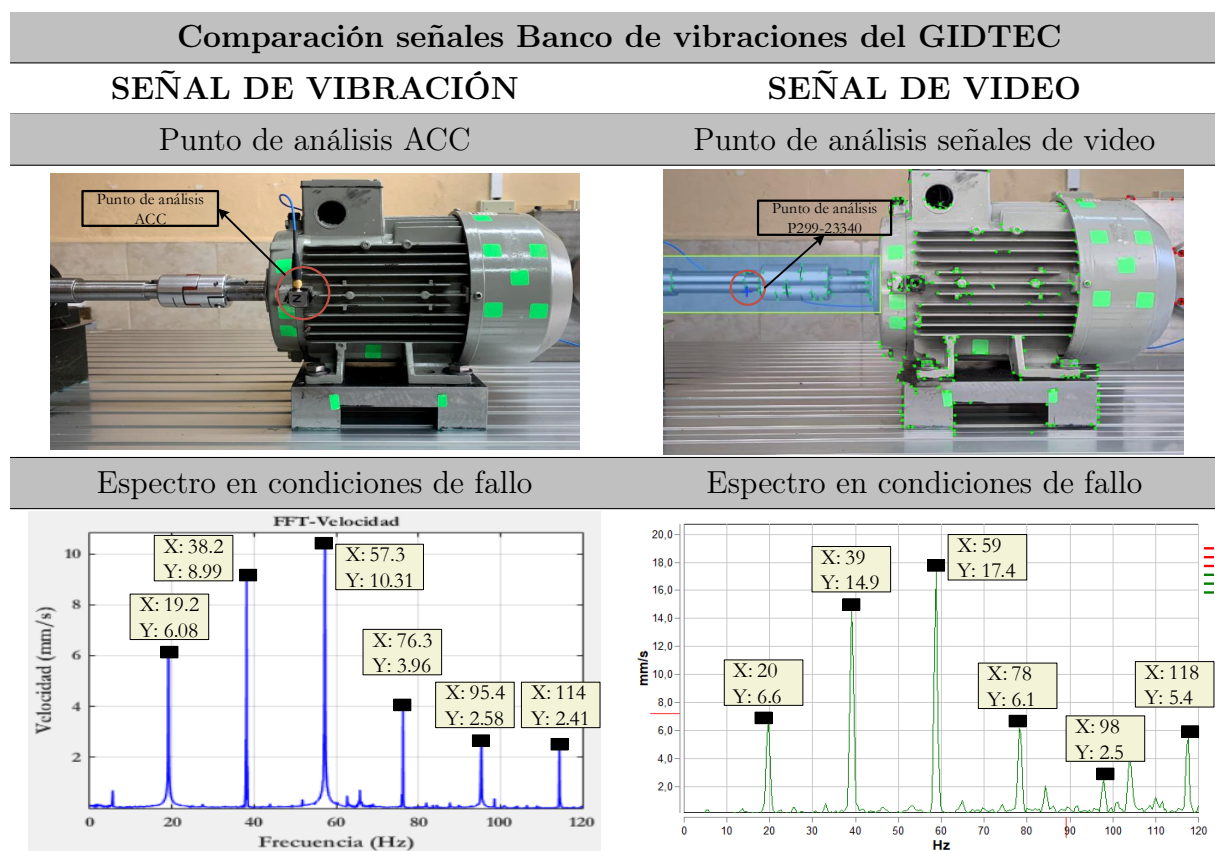
Observaciones	Dragon Vision	Acc
1 Se aprecia la señal FFT en condición normal.	Si	Si
2 Se aprecia la señal FFT en condición con fallo.	Si	Si
3 Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo en los rodamientos y acoplamientos.	Si	Si
4 Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en los elementos	Si	Si
5 Presencia de bandas laterales	Si	Si
6 Presencia de armónicos	Si	Si

6.3.4. Tablas para la evaluación de señales de vibración y video con fallo de desalineación angular

En la Tabla 41, se muestra la comparación de las señales de vibración y video con fallo de desalineación angular en el acoplamiento. El comportamiento espectral que tiene la señal de vibración frente a la señal de video es similar. En lo que respecta a señales de vibración al comparar estos espectros con los espectros en condiciones normales se evidencia que la amplitud aumenta en todos los armónicos; lo particular de la desalineación angular tanto para señales de vibración y señales de video es que desde el primer pico de frecuencia tiene un orden creciente hasta el armónico 3X y desde el armónico 4X hasta el armónico 6X un orden decreciente.

Se observa que muchos armónicos de 1XRPM presentan cambios, debido a una alta vibración en sentido axial que es provocado por este fallo; gráficamente el espectro en condiciones de fallo sigue el mismo patrón de la línea base en condiciones normales con un incremento en la amplitud.

Tabla 41: Comparación de señales de vibración y de video con desalineación angular en el acoplamiento. **Fuente:** Autor.



Valores de frecuencia de señal de vibración y video del banco de vibraciones correspondiente a la base de datos CA_1_3 y CV_1_3 respectivamente, con fallo de desalineación angular

Los valores de las frecuencias de la Tabla 41, se presentan en la Tabla 42, estas frecuencias corresponden a cada elemento mecánico que conforman el banco de vibraciones del GIDTEC.

Tabla 42: Tabla comparativa de frecuencias para señales de vibración y video con fallo de desalineación angular en el acoplamiento. **Fuente:** Autor.

Denominación	Línea Base	Señales de vibración	Línea Base	Señales de video
	(señal de vibración) Frecuencias (LB)	(Cond. Fallo) Frecuencias (CF)	(señal de video) Frecuencias (LB)	(Cond. Fallo) Frecuencias (CF)
Giro de Motor	19.1	19.2	20	20
Pista interna	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza
Pista externa	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza
Frecuencia de giro de los rodillos	57.1	57.3	59	59
Frecuencia de defectos BSF	119	114	118	118
Frecuencia de jaula	no se visualiza	no se visualiza	10	no se visualiza
Frecuencia natural de la banda	5.6	5.6	no se visualiza	no se visualiza

En la Tabla 43, se presenta las observaciones que se obtuvieron de la comparación numérico-gráfica de las señales de vibración y video con fallo de desalineación angular en el acoplamiento.

Tabla 43: Tabla de observaciones para señales de vibración y video con fallo de desalineación angular en el acoplamiento. **Fuente:** Autor.

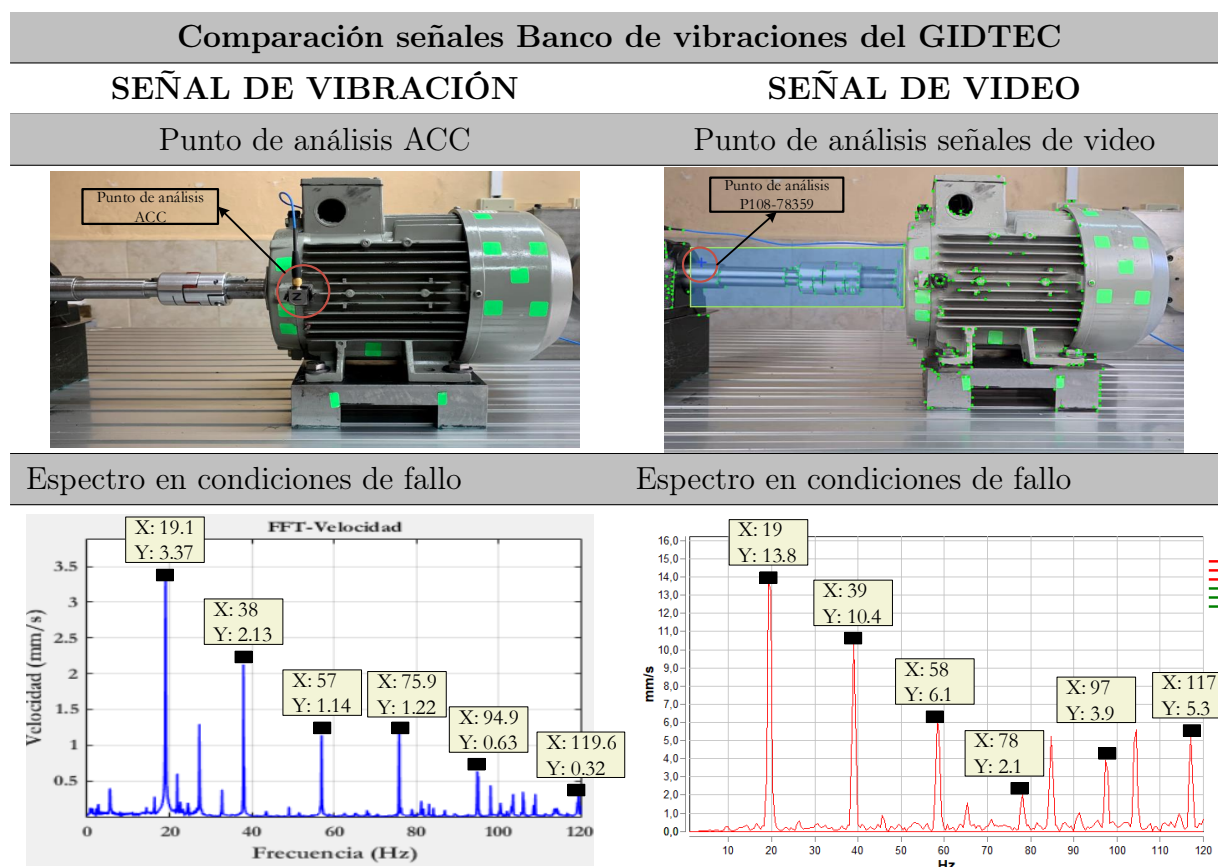
Observaciones	Dragon Vision	Acc
1 Se aprecia la señal FFT en condición normal.	Si	Si
2 Se aprecia la señal FFT en condición con fallo.	Si	Si
3 Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo en los rodamientos y acoplamientos.	Si	Si
4 Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en los elementos	Si	Si
5 Presencia de bandas laterales	Si	Si
6 Presencia de armónicos	Si	Si

6.3.5. Tablas para la evaluación de señales de vibración y video con fallo de desalineación paralela

De los espectros que se muestran en la Tabla 44, se obtiene que son similares a la desalineación angular, con la única diferencia que indica una alta vibración radial. Los espectros no presentan un incremento del ruido en el piso espectral. El comportamiento de los espectros de señales de vibración y señales de video son similares y por tanto son comparables gráficamente; entre ambas técnicas se aprecia que los espectros tienden a decrecer desde el 1X hasta el 6X.

Por otra parte, comparando los espectros de la señal de vibración en condición de fallo de desalineación paralela respecto a línea base en condiciones normales, se aprecia que el pico 1X disminuye su amplitud, pero es el pico predominante en el espectro. Lo mismo sucede en las señales de video pese a que en amplitudes no son comparables por el desplazamiento de los puntos que el software identifica.

Tabla 44: Comparación de señales de vibración y de video con desalineación paralela en el acoplamiento. **Fuente:** Autor.



Valores de frecuencia de señal de vibración y video del banco de vibraciones correspondiente a la base de datos CA_2_6 y CV_2_6 respectivamente, con fallo de desalineación paralela

Los valores de las frecuencias de la Tabla 44, se presentan en la Tabla 45. Estas frecuencias corresponden a cada elemento mecánico que componen el banco de vibraciones del GIDTEC.

Tabla 45: Tabla comparativa de frecuencias para señales de vibración y video con fallo de desalineación paralela en el acoplamiento. **Fuente:** Autor.

Denominación	Línea Base	Señales de vibración	Línea Base	Señales de video
	(señal de vibración) Frecuencias (LB)	(Cond. Fallo) Frecuencias (CF)	(señal de video) Frecuencias (LB)	(Cond. Fallo) Frecuencias (CF)
Giro de motor	19.1	19.1	19.1	19
Pista interna	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza
Pista externa	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza	no se visualiza
Frecuencia de giro de los rodillos	57.1	57	59	58
Frecuencia de defectos BSF	119	114	118	118
Frecuencia de jaula	no se visualiza	no se visualiza	10	no se visualiza
Frecuencia natural de la banda	5.6	5.6	no se visualiza	no se visualiza

En la Tabla 46, se presenta las observaciones que se obtuvieron de la comparación numérico-gráfica de las señales de vibración y video con fallo de desalineación paralela en el acoplamiento.

Tabla 46: Tabla de observaciones para señales de vibración y video con fallo de desalineación paralela en el acoplamiento. **Fuente:** Autor.

Observaciones	Dragon Vision	Acc
1 Se aprecia la señal FFT en condición normal.	Si	Si
2 Se aprecia la señal FFT en condición con fallo.	Si	Si
3 Incrementa la magnitud de los picos cuando se presenta el fallo en los rodamientos y acoplamientos.	Si	Si
4 Se identifica de manera fácil la frecuencia de fallo en los elementos	Si	Si
5 Presencia de bandas laterales	Si	Si
6 Presencia de armónicos	Si	Si

6.4. Resumen de resultados

En este resumen de resultados se presenta los valores de las señales de vibración y video que brindaron información de la condición operativa del banco de vibraciones. Se consideraron los ejes del acelerómetro y la posición en la que se ubicó la cámara de video.

Tabla 47: Resumen de resultados de las señales de vibración y video. **Fuente:** Autor.

Condición normal banco de vibraciones							
Denominación	Vista	Posición	Eje	Valor frecuencia	Valor frecuencia	Código espectro de vibración	Código espectro de video
				señal de vibración (Hz)	señal de video (Hz)		
Giro de motor	Frontal	Horizontal	x	19.1	20		
Frecuencia de giro de los rodillos	Frontal	Horizontal	x	57.1	59		
Frecuencia de defecto BSF	Frontal	Horizontal	x	119	118		
Pista externa	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	no se visualiza		
Pista interna	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	no se visualiza	B2_A_N	B2_V_N
Frecuencia de Jaula	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	10		
Frecuencia natural de la banda	Frontal	Horizontal	x	5.6	5		
Condición de fallo elementos rodantes del rodamiento B2 (SKF 1207 EKTN9/C3)							
Giro de motor	Frontal	Horizontal	x	19.1	20		
Frecuencia de giro de los rodillos	Frontal	Horizontal	x	57.2	59		
Frecuencia de defecto BSF	Frontal	Horizontal	x	114.3	117		
Pista externa	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	no se visualiza		
Pista interna	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	no se visualiza	B2_A_2_3	B2_V_2_3
Frecuencia de Jaula	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	10		
Frecuencia natural de la banda	Frontal	Horizontal	x	5.6	no se visualiza		
Condición de fallo pista interna del rodamiento B2 (SKF 1207 EKTN9/C3)							
Giro de motor	Frontal	Horizontal	x	19.1	19		
Frecuencia de giro de los rodillos	Frontal	Horizontal	x	57	58		
Frecuencia de defecto BSF	Frontal	Horizontal	x	113.8	117		
Pista externa	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	no se visualiza		
Pista interna	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	no se visualiza	B2_A_1_3	B2_V_1_3
Frecuencia de Jaula	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	10		
Frecuencia natural de la banda	Frontal	Horizontal	x	5.6	no se visualiza		
Condición de fallo pista externa del rodamiento B2 (SKF 1207 EKTN9/C3)							
Giro de motor	Frontal	Horizontal	x	19.1	19		
Frecuencia de giro de los rodillos	Frontal	Horizontal	x	57.2	58		

6. Evaluación de Resultados

Frecuencia de defecto BSF	Frontal	Horizontal	x	119.8	117		
Pista externa	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	no se visualiza		
Pista interna	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	no se visualiza		
Frecuencia de Jaula	Frontal	Horizontal	x	11	11	B2_A_3_3	B2_V_3_3
Frecuencia natural de la banda	Frontal	Horizontal	x	5.4	no se visualiza		
Desalineación angular del acoplamiento							
Giro de motor	Frontal	Horizontal	x	19.2	20		
Frecuencia de giro de los rodillos	Frontal	Horizontal	x	57.3	59		
Frecuencia de defecto BSF	Frontal	Horizontal	x	114	118		
Pista externa	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	no se visualiza		
Pista interna	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	no se visualiza	CA_1_3	CV_1_3
Frecuencia de Jaula	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	no se visualiza		
Frecuencia natural de la banda	Frontal	Horizontal	x	5.6	no se visualiza		
Desalineación paralela del acoplamiento							
Giro de motor	Frontal	Horizontal	x	19.1	19		
Frecuencia de giro de los rodillos	Frontal	Horizontal	x	57	58		
Frecuencia de defecto BSF	Frontal	Horizontal	x	114	118		
Pista externa	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	no se visualiza		
Pista interna	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	no se visualiza	CA_2_6	CV_2_6
Frecuencia de Jaula	Frontal	Horizontal	x	no se visualiza	no se visualiza		
Frecuencia natural de la banda	Frontal	Horizontal	x	5.6	no se visualiza		

Como se puede apreciar la Tabla 47 contiene todos los valores de frecuencias de las señales de vibración y video; sin embargo, la frecuencia de pista externa y pista interna del rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3 no se puede identificar en los picos, debido al rango visible del espectro de la señal de video.

La metodología de adquisición y evaluación para señales de vibración y video propuesta en el trabajo de investigación resulta adecuada para maquinaria rotativa, lo particular de los fallos incipientes en rodamientos en comparación con los fallos del acople es el comportamiento que existe en los picos de frecuencias. En estos últimos solo se puede apreciar tres picos de frecuencia que van en orden creciente y decreciente según sea el fallo en este elemento mecánico.

6.5. Resumen capítulo

En la Figura 76 se presenta un cuadro resumen de los temas abordados en este capítulo.

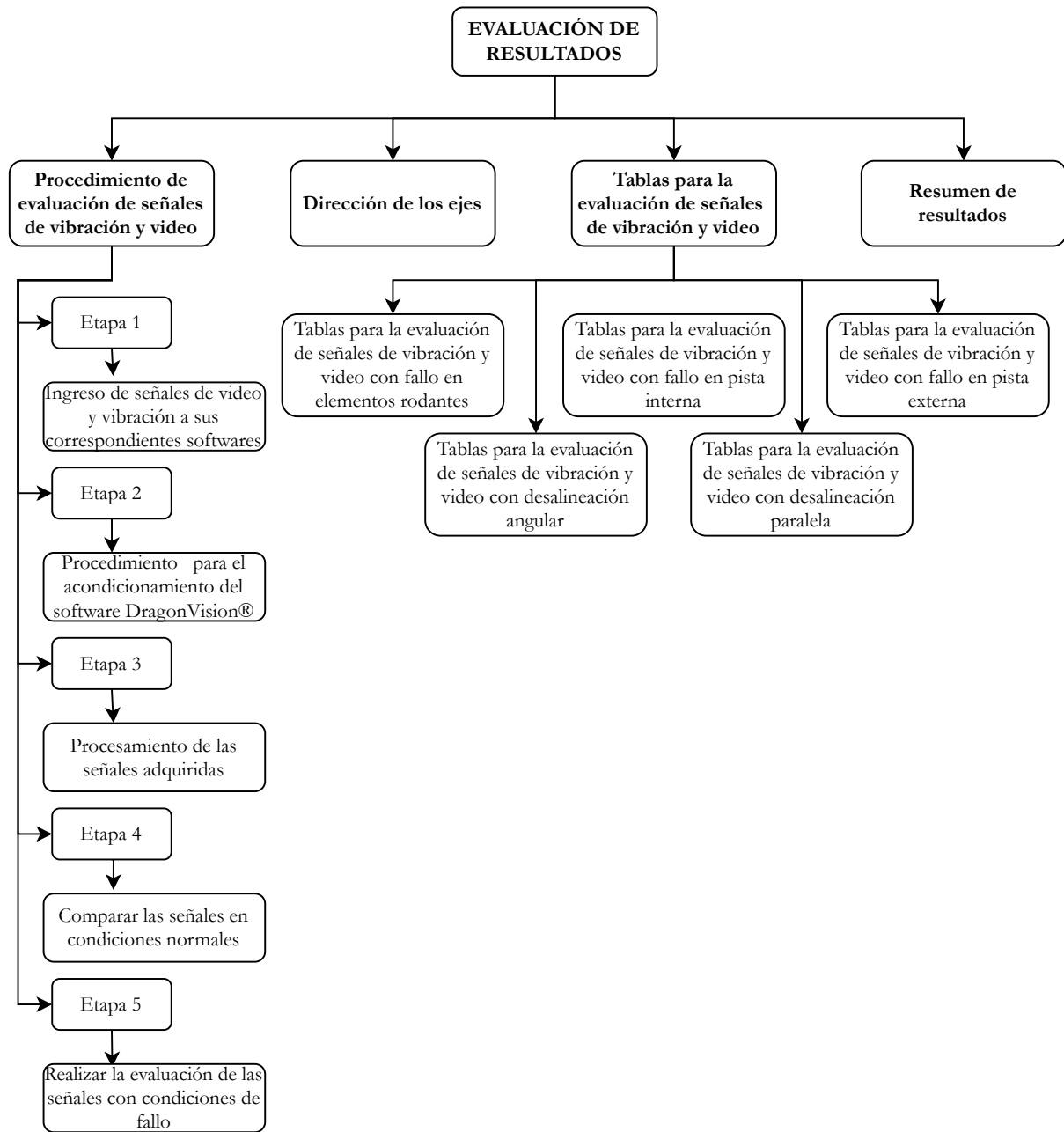


Figura 76: Resumen capítulo. **Fuente:** [Autor].

7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para el pronóstico y detección de fallos en rodamientos y acoplamientos se han efectuado diversos estudios tales como: “Estudios de casos recientes en detección y pronóstico de fallas en rodamientos” en donde se ha creado un sistema impulsado por análisis y extracción de características que integra datos de emisión acústica/vibración de alta frecuencia, recopilados mediante acelerómetros y otros sensores, para evaluar el estado de los rodamientos [102]. Así como también “Un completo sistema de monitoreo de vibraciones de alta frecuencia para la detección de fallas incipientes y el aislamiento de engranajes, rodamientos y ejes/acoplamientos en motores de turbina y accesorios” en el cual se realiza un proceso para detectar y aislar el comportamiento anómalo de un rodamiento, engranaje, eje o acoplamiento en particular, evaluando la gravedad de la falla en el componente defectuoso aislado; el sistema utiliza múltiples acelerómetros, montados en ubicaciones accesibles desde el exterior, o sensores de monitoreo de vibraciones sin contacto para recopilar datos [103], lo cual resulta ser una técnica fiable dentro de la adquisición de datos de señales de vibración. Por otra parte, se tiene un trabajo que trata acerca de la “Detección de desalineación del eje mediante imágenes térmicas de los cojinetes de soporte” el cual se basa en mediciones de vibración utilizando acelerómetros y vibrómetro láser de un solo punto en las ubicaciones de los rodamientos bajo diferentes condiciones de carga y velocidad para correlacionar con la imagen térmica [104].

Para el análisis de señales de video se tiene diferentes estudios como: “Evaluación de la precisión de las mediciones de vibración estructural de subpíxeles a través del análisis de flujo óptico de un video secuencia” en el cual se evalúa la precisión de la técnica para varias amplitudes de desplazamiento de vibración de subpíxeles, la respuesta se mide por un acelerómetro, un vibrómetro láser y seguimiento de marcadores que se comparan con los resultados del método de flujo óptico [105]. Por otra parte se tiene al “Monitoreo de vibraciones de múltiples puntos de puente mediante un sistema de medición único basado en visión” en el cual se utilizan dos tipos diferentes de cámaras para monitorear la respuesta de un puente al paso de un tren, las imágenes adquiridas se analizan utilizando tres técnicas de procesamiento de imágenes diferentes (coincidencia de patrones, detección de bordes y correlación de imágenes digitales) y los resultados se comparan con una medición de referencia, proporcionada por un interferómetro láser [9]. Por otro lado también se tiene el estudio “Aplicación de video con aumento de movimiento para el diagnóstico de maquinaria” el cual se basa en la evaluación de video de alta resolución y

de alta velocidad tomado de la maquinaria en funcionamiento. Este método proporciona información equivalente a un ODS de alto conteo de sensores, al tratar cada píxel como un acelerómetro, utilizando la modulación de intensidad de luz del píxel para determinar el espectro de frecuencia de desplazamiento de vibración local [106].

Los trabajos anteriormente mencionados han servido de base para la identificación de los parámetros a evaluar. En el presente trabajo se utilizó el análisis de vibraciones empleando señales de video y de vibración para la detección de fallos en rodamientos y acoplamientos. Para obtener los espectros es necesario el procesamiento de las señales de video, para lo cual se utilizó la técnica espejo, la misma que es empleada por el software DragonVision®. Este software es capaz de detectar micromovimientos que son identificados con la variación entre píxel y píxel, para posteriormente convertirlos en señales de vibración. Por otra parte, para la evaluación de las señales obtenidas se realizó dos metodologías, una de adquisición de señales y otra de evaluación de las mismas, que permitieron analizar e identificar los diferentes valores de la amplitud en los picos de los espectros proporcionados por el software DragonVision® correspondientes a las frecuencias características calculadas en el banco de vibraciones del GIDTEC. Con lo cual se pudo comparar con las señales de vibración obtenidas mediante acelerómetro. Se evidenció la diferencia de los mismos, ya que en el caso del software DragonVision® viene limitado por los cuadros por segundo de adquisición de video.

CONCLUSIONES

- Se evaluó las señales de video empleando la técnica espejo para la detección de fallos en rodamientos y acoplamientos, obteniendo como resultado patrones espectrales distintos para cada tipo de fallo implantado. Los mismos que se emularon con el nivel máximo de severidad, logrando identificar un comportamiento espectral en el que no se visualizó picos de baja amplitud en el piso espectral. El desplazamiento generado entre píxel y píxel como respuesta a la vibración del banco es mayor, haciendo de esta una señal cruda y fácil de evaluar. Este comportamiento permite analizar fallos en maquinaria rotativa que opere a bajas frecuencias.
- Se caracteriza la técnica espejo, lo que permitió conocer los parámetros adecuados de adquisición de señales de video tales como: nivel de iluminación, tiempo de adquisición, cuadros por segundo, y resolución, donde se determinó con ayuda de un luxómetro que el nivel de iluminación adecuado es de 4997 Lux, el tiempo de adquisición de 3s a 240 fps, con una resolución en full HD. Estos parámetros fueron fundamentales para que las señales de video puedan ser procesadas y así lograr identificar los picos frecuenciales correspondientes a las frecuencias características del banco de vibraciones. Con parámetros erróneos el video presenta ruido en forma de cuadros oscuros y por lo tanto el espectro saldrá con errores.
- Se estableció una metodología en el procesamiento de señales de video, para lo cual se tuvo que considerar los parámetros mecánicos a los que opera el motor que está emplazado en el banco de vibraciones, las condiciones de adquisición de señales de video, siendo la iluminación la condición clave en la detección del desplazamiento que se da entre píxel-píxel. Esto debido a que incide directamente en la calidad del video y a su vez en la identificación de mas puntos de análisis. Como consecuencia se obtuvo una metodología viable que permite la reproducibilidad de adquisición de señales de video empleando la técnica espejo.
- Se implemento y evaluó la metodología en el procesamiento de señales de video, la cual se realizó mediante tablas comparativas entre el espectro de vibración y video las cuales fueron el resultado del procesamiento de las señales en el software: Matlab y DragonVision®, respectivamente. De los espectros se obtuvieron los valores de las frecuencias que permitió comparar las señales de vibración y video, donde se observa que los valores frecuenciales son similares, al igual que el comportamiento espectral tanto para señales de vibración como de video.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar una cámara que permita grabar video con mayor número de cuadros por segundo (fps) sin sacrificar resolución, con el objetivo de aumentar el rango visible de frecuencias y la detección de una gran cantidad de píxeles en movimiento.
- Se recomienda un nivel de iluminación adecuado, que permita adquirir un video con claridad, que no genere sombras y sea adecuado para la adquisición de señales de video.
- La distancia entre la cámara y la máquina a analizar debe ser lo más cercana, debido a que debe abarcarla en su totalidad, según lo recomienda Erbesd Instruments.
- Se recomienda escoger un solo punto de análisis para realizar la comparación entre las diferentes señales de video.

TRABAJOS FUTUROS

- Evaluar las señales de video aplicando la calibración del software DragonVision® con el método ANL, que consiste en la grabación de un video por medio de un recolector de datos Erbesd Instruments.
- Establecer una base de datos con otros tipos de fallo como: soltura mecánica, desbalanceo, excentricidad mediante señales de vibración y video.
- Realizar un estudio exhaustivo de cómo afecta el desplazamiento generado por el equipo a analizar en el espectro de vibración para señales de vibración y señales de video.

REFERENCIAS

- [1] P. Li, W. Hu, R. Hu, and Z. Chen, “Imbalance fault detection based on the integrated analysis strategy for variable-speed wind turbines,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 116, p. 105570, 2020.
- [2] K. Yu, T. R. Lin, H. Ma, H. Li, and J. Zeng, “A combined polynomial chirplet transform and synchroextracting technique for analyzing nonstationary signals of rotating machinery,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 4, pp. 1505–1518, 2019.
- [3] H. Ma, J. Zeng, R. Feng, X. Pang, Q. Wang, and B. Wen, “Review on dynamics of cracked gear systems,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 55, pp. 224–245, 2015.
- [4] D. Goyal, B. Pabla, S. Dhami *et al.*, “Non-contact sensor placement strategy for condition monitoring of rotating machine-elements,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 22, no. 2, pp. 489–501, 2019.
- [5] N. DJAGAROV, Z. GROZDEV, G. ENCHEV, and J. DJAGAROVA, “Ship’s induction motors fault diagnosis,” in *2019 16th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*. IEEE, 2019, pp. 1–4.
- [6] D. H. C. de Sá Só, D. P. Viana, A. A. de Lima, M. F. Pinto, L. Tarrataca, F. L. e Silva, R. H. R. Gutiérrez, T. de Moura Prego, U. A. B. V. Monteiro, D. B. Haddad *et al.*, “Diagnostic and severity analysis of combined failures composed by imbalance and misalignment in rotating machines,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 114, no. 9, pp. 3077–3092, 2021.
- [7] A. Glowacz, “Acoustic based fault diagnosis of three-phase induction motor,” *Applied Acoustics*, vol. 137, pp. 82–89, 2018.
- [8] C. Peeters, Q. Leclere, J. Antoni, P. Lindahl, J. Donnal, S. Leeb, and J. Helsen, “Review and comparison of tacholeless instantaneous speed estimation methods on experimental vibration data,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 129, pp. 407–436, 2019.
- [9] A. Cigada, P. Mazzoleni, E. Zappa *et al.*, “Vibration monitoring of multiple bridge points by means of a unique vision-based measuring system,” *Experimental mechanics*, vol. 54, no. 2, pp. 255–271, 2014.
- [10] S. Kim, N. Kim, and Y. Kim, “Application of vision-based monitoring system to stay cables,” in *Bridge Maintenance, Safety, Management, Resilience and Sustainability: Proceedings of the Sixth International IABMAS Conference, Stresa, Lake Maggiore, Italy*, 2012, pp. 8–12.
- [11] J. Lee and M. Shinozuka, “Real-time displacement measurement of a flexible bridge using digital image processing techniques,” *Experimental Mechanics*, vol. 46, no. 1, pp. 105–114, 2006, cited By 199. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11340-006-9010-1>

//www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33746051753&doi=10.1007%
2fs11340-006-6124-2&partnerID=40&md5=c58abc9c9f05da614262b159f853b277

- [12] G. White, *Introducción al análisis de vibraciones*. Azima DLI, 2010, vol. 1.
- [13] A. K. S. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, “A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, Oct. 2006. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327005001512>
- [14] R. V. S. Loja, “Diagnósticos De Fallos En Cajas De Engranajes Basado En Una Red Neuronal Artificial Perceptrón Multicapa,” *XX Congreso Nacional De Ingeniería Mecánica*, Sep. 2014. [Online]. Available: <https://ups.elsevierpure.com/es/publications/gearbox-failure-diagnosis-based-on-artificial-neural-network-mult>
- [15] M. R. Carangui Vintimilla, “Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas de una caja reductora combinando fallos de rodamientos y engranajes rectos para fines investigativos en la universidad politécnica salesiana,” B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, 2014.
- [16] E. P. Córdova, R. V. S. Loja, D. Cabrera, and M. Cerrada, “Adquisición de señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de severidad de fallos en maquinaria rotativa,” *Revista colombiana de tecnologías de avanzada (RCTA)*, 2019.
- [17] R. A. Guiracocha Guiracocha, “Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones acústicas e imágenes termográficas infrarrojas para un sistema mecánico rotativo con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en engranajes,” B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [18] D. E. Chingal Imaicela, “Adquisición de señales de corriente del motor de inducción combinando fallos en la maquinaria rotativa y elaboración de una guía de práctica sobre detección de fallos por medio del afcm,” B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, 2018.
- [19] “IEAV- Ingeniería Electrónica Aplicada a las Vibraciones, José María Mestre 26, Mexico City (2020).” [Online]. Available: <http://www.findglocal.com/MX/Mexico-City/260198637479328/IEAV--Ingenier%C3%ADa-Electr%C3%B3nica-Aplicada-a-las-Vibraciones>
- [20] E. S. H. Dávila, R. I. G. Arias, F. A. T. Moreno, and C. S. M. Chugñay, “Aumento de la vida útil del rodamiento para un tupi de banco mediante análisis tribológico,” *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, vol. 5, no. 3, pp. 120–139, 2020.
- [21] X. Wang, D. Mao, and X. Li, “Bearing fault diagnosis based on vibro-acoustic data fusion and 1d-cnn network,” *Measurement*, vol. 173, p. 108518, 2021.

- [22] Y. Peng, M. Dong, and M. J. Zuo, "Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: a review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 50, no. 1-4, pp. 297–313, 2010.
- [23] R. V. Sánchez Loja *et al.*, "Diagnóstico de fallos en cajas de engranajes con base en la fusión de datos de señales de vibración, corriente y emisión acústica," *instname: Universidad Pontificia Bolivariana*, 2018.
- [24] I. A. E. Agency, *Implementation Strategies and Tools for Condition Based Maintenance at Nuclear Power Plants*. International atomic energy agency, 2007, no. 1551.
- [25] A. K. Jardine, D. Lin, and D. Banjevic, "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 7, pp. 1483–1510, 2006. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327005001512>
- [26] S. Kumar, D. Goyal, R. K. Dang, S. S. Dhama, and B. Pabla, "Condition based maintenance of bearings and gears for fault detection—a review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, pp. 6128–6137, 2018.
- [27] M. A. A. Hamel, "Condition Monitoring of Helical Gears Using Acoustic Emission (AE) Technology," Ph.D. dissertation, Cranfield University, Jul. 2013, accepted: 2014-06-23T13:05:24Z Publisher: Cranfield University.
- [28] R. Bogue, "Sensors for condition monitoring: a review of technologies and applications," *Sensor Review*, 2013.
- [29] D. A. González González and J. L. Pizarro M, artínez, "Mantenimiento predictivo de motores diesel marinos mediante correlación de imágenes termográficas y análisis de vibraciones," Master's thesis, Universidad Tecnológica de Bolívar, 2005.
- [30] A. M. S. Gómez, "Técnicas de mantenimiento predictivo. Metodología de aplicación en las organizaciones," *Ing. Tesis. Universidad Católica de Colombia, Colombia*, p. 72, 2017.
- [31] M. El Hachemi Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, no. 5, pp. 984–993, 2000.
- [32] C. E. Flores, "Equipo de diagnostico mantenimiento centrado en la condición," *Facultad de Ingeniería - Universidad Rafael Landívar*, 2006.
- [33] Z. Momin, "Fundamentals of mechanical vibrations," *IR@AIKTC-KRRC*, 2019.
- [34] T. L. Schmitz and K. S. Smith, *Mechanical vibrations*. Springer, 2014.
- [35] R. P. A.-M. SA, "Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico," 2005.
- [36] J. G. Pasache Morales, "Plan de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones para mejorar la confiabilidad de los equipos rotativos del área de

- galvanizado en una empresa metalmecánica, lima 2017.” B.S. thesis, Universidad César Vallejo, 2017.
- [37] F. E. Moreno-García, J. A. Becerra-Vargas, and C. A. Rendón-Echeverri, “Diseño de un sistema de análisis temporal y espectral para detectar fallas por vibración en motores eléctricos,” *Revista facultad de ingeniería*, vol. 24, no. 38, p. 41, dec 2014.
- [38] Z. Y. Medrano-Hurtado, C. Pérez-Tello, J. Gómez-Sarduy, and M. Vera-Pérez, “Nueva metodología de diagnóstico de fallas en rodamientos en una máquina síncrona mediante el procesamiento de señales vibro-acústicas empleando análisis de densidad de potencia,” *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 17, no. 1, pp. 73–85, Jan. 2016. [Online]. Available: <http://www.revistaingenieria.unam.mx/numeros/v17n1-07.php>
- [39] N. E. A. Gaviria and J. A. O. Ruíz, *Análisis comparativo de descriptores para la clasificación de telas utilizando imágenes*. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingenierías Eléctrica . . . , 2016.
- [40] M. Albertos Cabañas, “Monitorización y clasificación de defectos en rodamientos de bolas: estudio transitorio,” Master’s thesis, Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ingeniería Mecánica, 2011.
- [41] R. Moreno Sánchez, P. Pintado Sanjuán, F. Alonso Sánchez, J. Chicharro Higuera, R. A. Morales, and A. Nieto Quijorna, “Evaluación y comparación de modelos de diagnóstico de fallos en engranajes utilizando las señales de vibraciones mecánicas,” in *8vo congreso iberoamericano de ingeniería mecánica, Cusco*, vol. 23, 2007.
- [42] O. Cardona Morales, “Análisis tiempo-frecuencia de señales de vibraciones mecánicas para la detección de fallos en máquinas rotativas= time-frequency analysis of mechanic vibration signals for fault detection in rotating machines,” B.S. thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [43] A. Friedman, “Detección automática del desgaste de rodamientos,” *Estados Unidos: Procedimientos del Instituto de Vibraciones ([https://goo. gl/NCVn3t](https://goo.gl/NCVn3t))(16-08-2016)*, 2004.
- [44] J. M. M. García, *Apuntes de diseño de máquinas*. Editorial Club Universitario, Oct. 2008, google-Books-ID: KEyDAMa_0ngC.
- [45] “Centro de documentación | NTN SNR.” [Online]. Available: https://www.ntn-snr.com/sites/default/files/2019-11/ntn-care-and-maintenance3017-ii_s.pdf
- [46] A. Carrillo Fontaine, “Estudio de fallas en los rodamientos de la máquina vibraco,” Ph.D. dissertation, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, 2013.
- [47] B. Graney and K. Starry, “Rolling element bearing analysis,” *Materials Evaluation*, vol. 70, pp. 78–85, 01 2012.
- [48] C. Nieto, R. López, and O. Galvis, “Montaje de rodamientos y ejes. 3,” Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Tech. Rep., 1985.

- [49] Z. Y. Medrano-Hurtado, C. Pérez-Tello, J. Gómez-Sarduy, and M. Vera-Pérez, “Nueva metodología de diagnóstico de fallas en rodamientos en una máquina síncrona mediante el procesamiento de señales vibro-acústicas empleando análisis de densidad de potencia,” *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 17, no. 1, pp. 73–85, 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1405774316000081>
- [50] A. M. Castellino, P. D. Donolo, G. R. Bossio, C. H. De Angelo, and G. García, “Diagnóstico de fallas en los rodamientos de motores eléctricos empleando variables eléctricas,” *XI Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control-RPIC*, p. 6, 2007.
- [51] R. Rodríguez, A. Fernández, and J. Barros, “Estudio de fallas comunes en rodamientos rígidos de una hilera de bolas mediante análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia,” *Trabajo de grado, Universidad Austral de Chile, Valdivia [Chile]*, 2002.
- [52] N. Americas. Diseños y construcción de los rodamientos.
- [53] “Rodamientos de bolas a rótula | SKF | SKF.” [Online]. Available: <https://www.skf.com/co/products/rolling-bearings/ball-bearings/self-aligning-ball-bearings>
- [54] “1207 EKTN9 | SKF.” [Online]. Available: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/single-row-angular-contact-ball-bearings/productid-1207%20EKTN9>
- [55] 14:00-17:00, “ISO 10816-21:2015.” [Online]. Available: <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/03/60328.html>
- [56] F. Torres, J. Royo, and G. Rabanaque, “Análisis de vibraciones e interpretación de datos,” *DIDYF Universidad de Zaragoza, España*, 2000.
- [57] M. E. Moreno-Sánchez, J. A. Villarraga-Ossa, and R. Moreno-Sánchez, “Diagnóstico de fallas tempranas de rodamientos en mecanismos susceptibles al desbalanceo ya la desalineación,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 18, no. 2, pp. 187–198, 2019.
- [58] R. P. A.-M. SA, “Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico,” 2005.
- [59] J. Patel and S. Upadhyay, “Comparison between artificial neural network and support vector method for a fault diagnostics in rolling element bearings,” *Procedia Engineering*, vol. 144, pp. 390–397, 2016, international Conference on Vibration Problems 2015. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816303654>
- [60] E. E. Pacheco Córdova, “Adquisición de señales de vibración y emisión acústica para el diagnóstico de severidad de fallos en maquinaria rotativa,” B.S. thesis, Universidad Politécnica Salesiana, 2018.

- [61] J. Garcia-Prada, C. Castejon, and O. Lara, "Incipient bearing fault diagnosis using dwt for feature extraction," in *Proc. of 12th World Congress in Mechanism and Machine Science, IFToMM*, 2007, pp. 394–399.
- [62] J. Liu, W. Wang, F. Golnaraghi, and K. Liu, "Wavelet spectrum analysis for bearing fault diagnostics," *Measurement Science and Technology*, vol. 19, no. 1, p. 015105, nov 2007. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/19/1/015105>
- [63] K. M. Bhavaraju, P. Kankar, S. C. Sharma, and S. Harsha, "A comparative study on bearings faults classification by artificial neural networks and self-organizing maps using wavelets," *International Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 2, no. 5, pp. 1001–1008, 2010.
- [64] R. Kumar and A. Kumar, "Fusion of microphone and accelerometer sensing for the identification and measurement of inner race defect," in *Proceedings of the 10th International Conference on Measurement, Smolenice, Slovakia*, 2015, pp. 183–186.
- [65] W. S. Siew, W. A. Smith, Z. Peng, and R. B. Randall, "Fault severity trending in rolling element bearings," in *Proceedings of Acoustics*, 2015.
- [66] A. Rezaei, A. Dadouche, V. Wickramasinghe, and W. Dmochowski, "A comparison study between acoustic sensors for bearing fault detection under different speed and load using a variety of signal processing techniques," *Tribology Transactions*, vol. 54, no. 2, pp. 179–186, 2011.
- [67] Y. Yang, D. Yu, and J. Cheng, "A fault diagnosis approach for roller bearing based on imf envelope spectrum and svm," *Measurement*, vol. 40, no. 9-10, pp. 943–950, 2007.
- [68] G. Urquizo Calderon *et al.*, "Análisis de vibraciones para detección temprana de fallas en cojinetes de tipo anti-fricción," B.S. thesis, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1991.
- [69] B. V. González Luna, R. C. Quispe Saca *et al.*, "Comparación de la efectividad de las técnicas de ultrasonido pasivo y análisis de vibraciones en la detección de fallas incipientes en rodamientos." B.S. thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2016.
- [70] B. Dolenc, P. Bošković, and D. Juričić, "Distributed bearing fault diagnosis based on vibration analysis," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 66-67, pp. 521–532, 2016, cited By 56. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84944464807&doi=10.1016%2fj.ymssp.2015.06.007&partnerID=40&md5=1f7499581d68511c66d0e0e6998f355b>
- [71] "Acoplamiento encajable/de garras encapsulado resistente a descargas disruptivas con elemento elástico (estrella)." [Online]. Available: <https://www.optibelt.com/sp/productos/acoplamientos/hrc/>
- [72] A. P. González, P. J. R. Cervantes, and J. L. S. Brú, *Mantenimiento mecánico de máquinas*. Publicacions de la Universitat Jaume I, 2007, vol. 25.

- [73] C. C. J. Londoño and M. A. C. Montoya, “Montaje y caracterización del sistema de carga en un banco de pruebas para análisis de fallas en ruedas dentadas,” Ph.D. dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Mecánica , 2014.
- [74] A. E. A. C. E. Símeón and I. Guatemalteca, “Alineamiento entre acoples con equipo láser,” B.S. tesis, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016.
- [75] E. F. Vela Urizar, “Evaluación de la implementación de un sistema de acople flexible a utilizar en zafra 2013, en relación a un sistema de acople rígido utilizando en zafra 2012, en el molino cañero núm. 5 del tádemç.^{en} el ingenio magdalena sa,” Ph.D. dissertation, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2018.
- [76] lojoyadmin, “Jaw Type Couplings - Lovejoy - a Timken company.” [Online]. Available: <https://cutt.ly/mmE6dDP>
- [77] “Acoplamiento encajable/de garras resistente a descargas disruptivas con elemento elástico (estrella).” [Online]. Available: <https://www.optibelt.com/sp/productos/acoplamientos/habix/>
- [78] “Tipos de acoplamientos mecánicos.” [Online]. Available: <https://inducor-ec.com/tipos-de-acoplamientos-mecanicos/>
- [79] O. Sytrans. Ventajas de los acoplamientos KTR. [Online]. Available: <http://www.sytrans.es/docs/cms/documento-1-1464969359.pdf>
- [80] C. Bai, S. Ganeriwala, and N. Sawalhi, “A rational basis for determining vibration signature of shaft/coupling misalignment in rotating machinery,” in *Rotating Machinery, Vibro-Acoustics & Laser Vibrometry, Volume 7*, 2019, pp. 207–217, cited By 2.
- [81] J. E. Flores Ibarra and F. V. Silva Pineda, “Modelo empírico de influencia de la desalineación en el consumo energético en un motor eléctrico trifásico asincrónico jaula de ardilla de 5 hp.” B.S. thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2017.
- [82] J. M. Bossio, G. R. Bossio, and C. H. De Angelo, “Angular misalignment in induction motors with flexible coupling,” in *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. IEEE, 2009, pp. 1033–1038.
- [83] W. U. Espinoza, “Facultad de tecnología de la industria,” Ph.D. dissertation, Universidad nacional de ingeniería, 2009.
- [84] lojoyadmin, “Jaw Type Couplings.” [Online]. Available: <https://www.lovejoy-inc.com/products/jaw-type-couplings/>
- [85] T. Patel and A. Darpe, “Experimental investigations on vibration response of misaligned rotors,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23, no. 7, pp. 2236–2252, 2009, cited By 132. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.05.011>

//www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-67349262338&doi=10.1016%2fj.ymsp.2009.04.004&partnerID=40&md5=00dc832ac881b3ef226a7809418eedce

- [86] C. Verucchi, J. Bossio, G. Bossio, and G. Acosta, "Misalignment detection in induction motors with flexible coupling by means of estimated torque analysis and mcsa," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 80, pp. 570–581, 2016.
- [87] A. Simm, Q. Wang, S. Huang, and W. Zhao, "Laser based measurement for the monitoring of shaft misalignment," *Measurement*, vol. 87, pp. 104–116, 2016.
- [88] G. Santillán, C. Verucchi, J. Bossio, and G. Bossio, "Deteccion de fallas en acoplamientos elÁsticos mediante el estudio de variables electricas," *Congreso Internacional de Ingeniería de Mantenimiento*, 2015.
- [89] M. C. S. Reddy and A. Sekhar, "Detection and monitoring of coupling misalignment in rotors using torque measurements," *Measurement*, vol. 61, pp. 111–122, 2015.
- [90] C. A. Baldeón Silva, "Diseño y construcción de un banco didáctico para pruebas de vibraciones y alineación láser en motores asíncronos para el laboratorio de electricidad de la facultad de educación técnica para el desarrollo," B.S. thesis, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2018.
- [91] E. R. J. Antonio, "Análisis de vibración," *Logicbus SA de CV*, 2018.
- [92] V. Nistane and S. Harsha, "Failure evaluation of ball bearing for prognostics," *Procedia Technology*, vol. 23, pp. 179 – 186, 2016, 3rd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering 2016, ICIAME 2016 05-06 February, 2016".
- [93] R. P. Orts, N. C. Davó, and E. V. Sánchez, "Bancos de ensayo para docencia en vibraciones mecánicas." *Sea Acustica*, 2008.
- [94] "Dragon Vision®." [Online]. Available: <https://grupovtk.mx/productos/analisis-de-vibracion/dragon-vision/>
- [95] S. Lu, X. Wang, F. Liu, Q. He, Y. Liu, and J. Zhao, "Fault diagnosis of motor bearing by analyzing a video clip," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2016, 2016, cited By :4. [Online]. Available: www.scopus.com
- [96] D. Mas, J. Espinosa, A. B. Roig, B. Ferrer, J. Perez, and C. Illueca, "Measurement of wide frequency range structural microvibrations with a pocket digital camera and sub-pixel techniques," *Applied optics*, vol. 51, no. 14, pp. 2664–2671, 2012.
- [97] "Vibration Tracking – The Looking Glass Technique – See the Invisible," Feb. 2020. [Online]. Available: <https://www.reliabilityconnect.com/vibration-tracking-the-looking-glass-technique-see-the-invisible/>
- [98] C. P. William, T. R. Jeniffer, C. S. Jesús, and R. S. Jaime, "Identificacion alternativa de parametros no lineales en el modelo del altavoz electrodinamico," *Sea Acustica*, 2012.

- [99] A. M. E. Rodríguez and S. B. Restrepo, “Métodos de evaluación del nivel de actividad física: revisión de literatura,” *VIREF Revista de Educación Física*, vol. 4, no. 2, pp. 86–98, 2015.
- [100] “PCB Model 356A15.” [Online]. Available: <https://www.pcb.com/products?m=356A15>
- [101] “Manual de Usuario.” [Online]. Available: <https://www.erbessd-instruments.com/docs/dragonvision/manual-de-usuario/>
- [102] C. S. Byington, P. R. Orsagh, P. Kallappa, J. Sheldon, M. DeChristopher, S. Amin, and J. Hines, “Recent case studies in bearing fault detection and prognosis,” in *2006 IEEE Aerospace Conference*. IEEE, 2006, pp. 8–pp.
- [103] M. Watson, J. Sheldon, S. Amin, H. Lee, C. Byington, and M. Begin, “A comprehensive high frequency vibration monitoring system for incipient fault detection and isolation of gears, bearings and shafts/couplings in turbine engines and accessories,” in *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, vol. 47942, 2007, pp. 885–894.
- [104] A. Mohanty and S. Fatima, “Shaft misalignment detection by thermal imaging of support bearings,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 21, pp. 554–559, 2015.
- [105] D. Diamond, P. Heyns, and A. Oberholster, “Accuracy evaluation of sub-pixel structural vibration measurements through optical flow analysis of a video sequence,” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 95, pp. 166–172, 2017, cited By 26. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84991670353&doi=10.1016%2fj.measurement.2016.10.021&partnerID=40&md5=3f683dfe19b3466ba23a401795e401af>
- [106] W. Marscher and C. Pasho, “Motion magnified video application to machinery diagnosis,” *MFPT 2019: Where Theory Meets Practice*, 2019, cited By 0. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85083953417&partnerID=40&md5=7920671c014908fa29051e892770301a>

A. Anexos



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

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

PROYECTO TÉCNICO:

**“EVALUACIÓN DE LAS SEÑALES DE VÍDEO PARA
LA DETECCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS Y
ACOPLAMIENTOS EMPLEANDO LA TÉCNICA ESPEJO”**

*“Video signals evaluation for the fault detection in bearings and couplings using the mirror
technique”*

Autores:

Cristian Andrés Carrión Alberca

Renán Xavier Montesinos Loaiza

Tutor:

Dr. René Vinicio Sánchez Loja

Cuenca - Ecuador

Julio 2021