



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“ESTABLECIMIENTO DE UNA BASE DE DATOS DE SEÑALES DE VIBRACIONES
MECÁNICAS PARA SISTEMAS MECÁNICOS ROTATIVOS CON LA
COMBINACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE FALLOS Y ELABORACIÓN DE
GUÍAS DE PRÁCTICAS PARA DETECCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS”

| Tesis previa a la obtención del
| Título de Ingeniero Mecánico |

Autores:

Santiago Vinicio Niveló Jara

David Julián Romero Rodríguez

Director:

Ing. René Vinicio Sánchez

Cuenca, Noviembre 2014



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“ESTABLECIMIENTO DE UNA BASE DE DATOS DE SEÑALES DE VIBRACIONES
MECÁNICAS PARA SISTEMAS MECÁNICOS ROTATIVOS CON LA
COMBINACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE FALLOS Y ELABORACIÓN DE
GUÍAS DE PRÁCTICAS PARA DETECCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS”

Tesis previa a la obtención del
Título de Ingeniero Mecánico

Autores:

Santiago Vinicio Niveló Jara
snivelojara@hotmail.com

David Julián Romero Rodríguez
djromero_15@hotmail.com

Director:

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

Cuenca, Noviembre 2014

AGRADECIMIENTO

Primeramente quiero agradecer a Dios por haberme dado la salud, fortaleza sabiduría para lograr esta meta tan anhelada.

A mis padres y hermanos que fueron la base fundamental de este logro alcanzado en mi vida, por todo el apoyo, la paciencia, comprensión y el cariño brindado por ellos durante mis años de estudio.

A los ingenieros Adrián Arpi y Omar Llerena que a más de aportar con sus conocimientos para que este trabajo salga adelante supieron brindarnos también su amistad y confianza.

Santiago Niveló.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por sus bendiciones, por llenarme de fortaleza y sabiduría para culminar una de mis metas planteadas a lo largo de mi vida.

A mis padres y hermanos, por su apoyo incondicional a lo largo de mi carrera universitaria.

Al Ing. Omar Llerena y Adrian Arpi, que gracias a su colaboración profesional permitieron que este proyecto se cumpla satisfactoriamente.

David Romero.

DEDICATORIA

A nuestras familias...

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Santiago Vinicio Niveló Jara y David Julián Romero Rodríguez, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación profesional y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

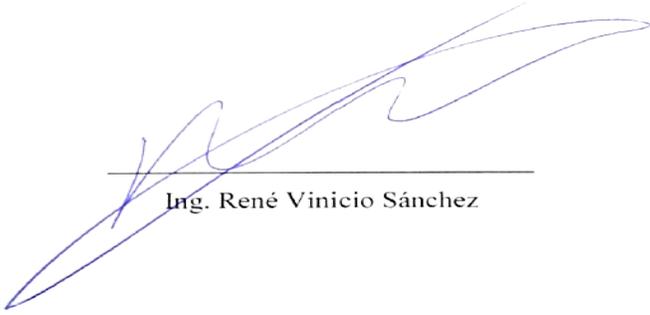
A través de la presente declaración cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la Normativa Institucional Vigentes

Santiago Vinicio Niveló Jara

David Julián Romero Rodríguez

CERTIFICADO

Que el presente proyecto de tesis “ESTABLECIMIENTO DE UNA BASE DE DATOS DE SEÑALES DE VIBRACIONES MECÁNICAS PARA SISTEMAS MECÁNICOS ROTATIVOS CON LA COMBINACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE FALLOS Y ELABORACIÓN DE GUÍAS DE PRÁCTICAS PARA DETECCIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS”, realizado por los estudiantes Santiago Vinicio Niveló Jara y David Julián Romero Rodríguez , fue dirigido por mi persona.



Ing. René Vinicio Sánchez

RESUMEN

El presente proyecto contiene información sobre la recopilación de señales de vibración en un sistema mecánico rotativo completo, simulando fallos en rodamientos y engranajes con perturbaciones en los ejes de transmisión, esto con el fin de aportar en el estudio de detección de fallos en maquinaria mediante señales de vibraciones aplicados en el mantenimiento predictivo. También se plantea la elaboración de una guía de prácticas para la detección de fallos en rodamientos con fines de aprendizaje y manejo del equipo en los estudiantes de pregrado de la Universidad Politécnica Salesiana.

En el capítulo 1, se presenta una revisión bibliográfica sobre el monitoreo de condición en el cual se analiza las principales características, objetivos y ventajas que tiene esta metodología en el campo del mantenimiento predictivo. También se analizan una serie de técnicas de monitoreo de condición que permiten detectar fallos en la maquinaria. Del grupo de técnicas analizadas se pone énfasis en la técnica de análisis de vibraciones.

En el capítulo 2, se establece la configuración de los diferentes sistemas mecánicos rotativos, en el cual primeramente se hace una descripción del banco de vibraciones y los sistemas mecánicos rotativos que se pueden montar en él. Luego se ofrece una descripción de los principales fallos que se pueden producir en engranajes, rodamientos y perturbaciones en los ejes como base para la construcción de fallos en estos elementos, finalmente se realiza la configuración de los fallos combinados en los elementos teniendo en cuenta algunas consideraciones para establecer el conjunto de combinaciones totales mediante una programación en el software MatLab.

En el capítulo 3, se presenta la configuración y protocolo para la toma de señales de vibración, en el cual primero se describen los equipos utilizados para la medición de la vibración tales como: las tarjetas DAQ, el software y los acelerómetros, seguidamente se presenta información sobre la lubricación de la caja de engranajes utilizada en este proyecto en la cual se da los parámetros necesarios para la selección de apropiada de lubricante y del nivel recomendado que se debe colocar en la caja, también se realiza una

investigación sobre la ubicación adecuada de los acelerómetros para la toma de señales basado en la normas ISO de vibración y de trabajos ya realizados anteriormente, luego se presenta la nomenclatura utilizada para identificar cada uno de los fallos montados en la pruebas actuales y las que se puedan realizar a futuro, así mismo se establece la selección de las pruebas y todos los parámetros para la toma de señales de vibración, finalmente se plantea un diagrama de bloques para la utilización de software de vibraciones y la ubicación en donde se almacenará la base de datos establecida.

En el capítulo 4, se presenta una guía de prácticas para la detección de fallos en rodamientos a través del análisis de vibraciones mecánicas para sistemas mecánicos rotativos; además con esta guía de prácticas se pretende que el docente fortalezca los conocimientos sobre el tema a los estudiantes de pregrado a través de actividades prácticas.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

1.1	Características del monitoreo de condición	2
1.1.1	Introducción	2
1.1.2	Concepto del Monitoreo de Condición	2
1.1.3	Selección de la técnica a utilizar	4
1.1.4	Ejecución del monitoreo de condición	5
1.1.5	Objetivos del monitoreo de condición	6
1.2	Técnicas del monitoreo de condición.....	6
1.2.1	Mediciones mecánicas.....	7
1.2.1.1	Análisis de vibraciones.....	8
1.2.1.2	Medición de esfuerzo.....	9
1.2.1.3	Emisiones acústicas	9
1.2.2	Mediciones eléctricas	11
1.2.2.1	Análisis de señales de corriente.....	12
1.2.3	Mediciones de rendimiento	14
1.2.3.1	Medición de temperatura	14
1.2.3.2	Medición de presión	15
1.2.3.3	Medición de flujo	16
1.2.4	Mediciones de tribología.....	16
1.2.4.1	Análisis de residuos de lubricación	17
1.2.5	Ensayos no destructivos	19
1.2.5.1	Inspecciones visuales.....	19
1.2.5.2	Análisis por ultrasonido.....	20
1.2.5.3	Análisis por termografía	21
1.2.5.4	Tintas penetrantes	23
1.2.5.5	Análisis por radiografías.....	24
1.3	Técnicas de monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones mecánicas	25
1.3.1	Análisis en el dominio del tiempo.....	27

1.3.2	Análisis en el dominio de la frecuencia	28
1.3.3	Análisis en el dominio del tiempo-frecuencia.....	29

CAPÍTULO 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

2.1	Descripción del banco de vibraciones	31
2.1.1	Unidad de mando	32
2.1.2	Unidad motriz.....	33
2.1.3	Unidad de sistemas rotativos.....	33
2.1.4	Unidad de carga.....	34
2.1.5	Descripción de los sistemas mecánicos rotativos.....	35
2.1.5.1	Carga axial sobre un eje de transmisión	35
2.1.5.2	Carga radial sobre un eje de transmisión.....	36
2.1.5.3	Desbalance de una masa	36
2.1.5.4	Caja reductora de velocidad	37
2.2	Disposición de fallos en los elementos de los sistemas mecánicos rotativos..	39
2.2.1	Fallos en engranajes	39
2.2.1.1	Designación y selección de engranajes para la construcción de fallos.....	41
2.2.1.2	Construcción de fallos en los engranajes.....	42
2.2.2	Fallos en rodamientos.....	48
2.2.2.1	Designación de los rodamientos para la construcción de fallos	49
2.2.2.2	Construcción de fallos en los rodamientos.....	51
2.2.3	Perturbaciones en los ejes de transmisión	56
2.2.3.1	Desbalanceo.....	56
2.2.3.1.1	Desbalanceo estático	56
2.2.3.1.2	Desbalanceo dinámico.....	57
2.2.3.2	Desalineación de ejes.....	58
2.2.3.2.1	Desalienación paralela.....	58
2.2.3.2.2	Desalineación angular	58
2.2.3.3	Cargas y precargas inducidas	59
2.3	Configuración de fallos combinados en engranajes, rodamientos y ejes	60

CAPÍTULO 3: Base de datos de las señales de vibración

3.1	Protocolo para la toma de señales de la base de datos	64
3.1.1	Equipos de medición para la toma de señales de vibración	64
3.1.1.1	Software para realizar las pruebas	64
3.1.1.2	Tarjetas de adquisición de datos	65
3.1.1.3	Acelerómetros.....	68
3.1.2	Lubricación de la caja de engranajes.....	69
3.1.2.1	Tipo de aceite.....	70
3.1.2.2	Nivel de aceite en la caja de engranajes	71
3.1.3	Posición de los acelerómetros	72
3.1.4	Nomenclatura de los elementos para cada prueba	75
3.1.4.1	Nomenclatura de los elementos en la caja de engranajes.....	75
3.1.4.2	Nomenclatura de los elementos para carga axial, carga radial, desbalanceo y desalineación.	89
3.1.4.3	Pruebas combinadas	94
3.2	Levantamiento de la base de datos de los sistemas mecánicos rotativos	94
3.2.1	Protocolo de la base de datos	94
3.2.1.1	Combinaciones seleccionadas para la toma de señales de vibración	95
3.2.2	Diagrama de Lenguaje Unificado de Modelado (UML) de la base de datos para el banco de vibraciones.....	96
3.2.3	Diagrama de bloques para la utilización del software para el banco de vibraciones.....	97
3.3	Almacenamiento de la base de datos.....	98

CAPÍTULO 4: Guía de prácticas

4.1.	Descripción del sistema mecánico rotativo para la guía de prácticas	100
4.2.	Descripción del equipo “ADASH A4400”	101
4.3.	Caracterización de los fallos de los rodamientos	104
4.4	Proceso de elaboración y validación de la guía de prácticas.....	106
4.4.1	Revisión de textos	108
4.4.2	Formato para las guías de practicas.....	108

4.4.3	Elaboración de la guía de prácticas	109
4.4.4	Revisión de las guías de prácticas	110
4.4.5	Ejecución de la práctica.....	110
4.4.6	Evaluación de la guía de prácticas	111
4.4.6.1	Formato de validación de las guías de prácticas.....	111
	Conclusiones y recomendaciones	114
	Anexos.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Optimización del mantenimiento.	3
Figura 1.2. Ciclo de ejecución del monitoreo de condición.	5
Figura 1.3. Diagrama de las técnicas utilizadas para el monitoreo de condición.	7
Figura 1.4. Sensor de emisión acústica.	11
Figura 1.5. Ejemplo de problema de rotura de barras del rotor.	12
Figura 1.6. Sistema básico de instrumentación MCSA.	13
Figura 1.7. Espectro de corriente.	13
Figura 1.8. Relación de fricción, desgaste y lubricación.	16
Figura 1.9. Esquema del equipo de separación.	18
Figura 1.10. Rango de frecuencias.	20
Figura 1.11. Medidor de ultrasonido.	21
Figura 1.12. Análisis termográfico de un motor.	21
Figura 1.13. Análisis termográfico de un interruptor.	22
Figura 1.14. Análisis termográfico de una máquina rotativa.	22
Figura 1.15. Cámara termográfica.	23
Figura 1.16. Técnica de análisis no destructivo mediante tintas penetrantes.	24
Figura 1.17. Clasificación del análisis basado en las vibraciones, técnicas y parámetros. ..	26
Figura 1.18. Diagrama de acondicionado y pre procesamiento de la señal.	27
Figura 2.1. Banco de pruebas de vibraciones mecánicas.	31
Figura 2.2. Unidad de mando.	32
Figura 2.3. Unidad motriz.	33
Figura 2.4. Sistemas mecánicos rotativos.	34
Figura 2.5. Unidad de carga mediante freno magnético.	34
Figura 2.6. Elementos de la carga axial.	35
Figura 2.7. Elementos de la carga radial.	36
Figura 2.8. Elementos de desbalanceo dinámico.	37
Figura 2.9. Elementos para montaje de la caja reductora.	38
Figura 2.10. Elementos internos de la caja reductora.	38
Figura 2.11. Tipos de fallos en ruedas dentadas.	40

Figura 2.12. Designación de ruedas dentadas en la caja de engranajes.....	41
Figura 2.13. Tipos de fallos en los rodamientos.....	48
Figura 2.14. Designación de los rodamientos.....	49
Figura 2.15. Características de los rodamientos de la caja reductora.....	49
Figura 2.16. Designación de los rodamientos del eje de transmisión.....	50
Figura 2.17. Características de los rodamientos del eje de transmisión.....	50
Figura 2.18. Desbalanceo estático.....	57
Figura 2.19. Desbalanceo por par de fuerzas.....	57
Figura 2.20. Desalineación paralela.....	58
Figura 2.21. Desalineación angular.....	59
Figura 3.1. Parámetros variables para las pruebas.....	65
Figura 3.2. NI cDAQ-9191.....	66
Figura 3.3. Módulo NI 9234.....	66
Figura 3.4. Tarjeta DAQ ERBESSD INSTRUMENTS.....	67
Figura 3.5. Tacómetro digital compact.....	67
Figura 3.6. Acelerómetro uniaxial PCB 352C03.....	68
Figura 3.7. Acelerómetro triaxial ERBESSD INSTRUMENTS.....	68
Figura 3.8. Depósito de lubricante.....	71
Figura 3.9. Reductor lubricado por salpicadura.....	72
Figura 3.10. Dirección horizontal, vertical y axial sobre un soporte de rodamientos.....	74
Figura 3.11. Dirección horizontal y vertical de dos acelerómetros uniaxiales en la caja de engranajes.....	74
Figura 3.12. Sistemas mecánicos rotativos.....	75
Figura 3.13. Designación de los elementos internos de la caja de engranajes.....	76
Figura 3.14. Designación de los acelerómetros en el eje I.....	76
Figura 3.15. Designación de los acelerómetros en el eje J.....	77
Figura 3.16. Designación de los acelerómetros en el eje K.....	77
Figura 3.17. Designación de los elementos para carga axial, radial, desbalanceo y desalineación.....	90
Figura 3.18. Designación de los acelerómetros en los soportes.....	90
Figura 3.19. Diagrama UML para el banco de vibraciones.....	97

Figura 3.20. Diagrama de bloques para arrancar la pruebas mediante el software.	98
Figura 4.1. Sistema mecánico rotativo.	100
Figura 4.2. Analizador de vibraciones - ADASH VA4Pro.	101
Figura 4.3. Información general del panel superior de ADASH VA4Pro.....	102
Figura 4.4. Acelerómetro piezoeléctrico.	102
Figura 4.5. Botonera de analizador de vibraciones.	103
Figura 4.6. Fallo de picadura en elemento rodante.	105
Figura 4.7. Designación de los rodamientos en el eje de transmisión.....	106
Figura 4.8. Proceso de elaboración y validación de la guía de prácticas.	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Ejemplos de monitoreo del rendimiento.....	14
Tabla 2.2. Descripción de los elementos de la unidad motriz.....	33
Tabla 2.3. Descripción de los elementos de los sistemas mecánicos rotativos.....	39
Tabla 2.4. Datos constructivos de los engranajes.....	42
Tabla 2.5. Selección de ruedas dentadas para la construcción de los fallos.....	42
Tabla 2.6. Fallos construidos en los engranajes.....	43
Tabla 2.7. Fallos construidos en rodamientos.....	52
Tabla 2.8. Parámetros para realizar la combinación en Matlab.....	61
Tabla 2.9. Parte de la combinación de fallos en engranajes, rodamientos y ejes.....	62
Tabla 2.10. Representación de los elementos del sistema.....	62
Tabla 3.1. Características del aceite Gulf EP Lubricant HD 220.....	71
Tabla 3.2. Designación en ruedas dentadas.....	78
Tabla 3.3. Designación de acelerómetros en la caja de engranajes.....	84
Tabla 3.4. Tipo de carga empleada en las pruebas de vibraciones mecánicas.....	84
Tabla 3.5. Condiciones para la toma de señales.....	84
Tabla 3.6. Designación en rodamientos.....	86
Tabla 3.7. Designación de los ejes de transmisión de la caja de engranajes.....	89
Tabla 3.8. Designación de los elementos mecánicos.....	91
Tabla 3.9. Designación de acelerómetros en los soportes de los rodamientos.....	93
Tabla 3.10. Designación en el eje de transmisión.....	93
Tabla 3.11. Características generales para la toma de señales de vibración.....	95
Tabla 3.12. Parámetros de carga y velocidad para las pruebas.....	96
Tabla 4.1. Función de los modos de medición de ADASH VA4Pro.....	103
Tabla 4.2. Características del fallo construido en el rodamiento.....	105
Tabla 4.3. Frecuencias características de los rodamientos.....	106

CAPÍTULO 1

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

1. MONITOREO DE LA CONDICIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

1.1 Características del monitoreo de condición

1.1.1 Introducción

En la actualidad la competitividad de la industria es cada vez más grande, esto ha obligado que las empresas tengan mayor productividad a bajos costos. Uno de los principales factores que influye en la productividad es la maquinaria rotativa que generalmente trabajan las 24 horas, su incorrecto funcionamiento puede ocasionar que las máquinas lleguen a fallar provocando importantes pérdidas económicas para la planta y peligro para los operadores [1][2][3].

Uno de los principales componentes de la maquinaria rotativa son las cajas de engranajes que tienen como función principal transferir la potencia y velocidad de un eje a otro. Cuando se producen fallos en los engranajes y rodamientos que están al interior de la caja, estos se agravan al transcurrir el tiempo provocando finalmente una falla total de la máquina lo que conduce a serios daños en la producción debido a la parada inesperada de la misma y en algunos casos atentar contra la vida del personal. Por lo tanto es importante detectar los fallos que se pueden dar en las cajas de engranajes en etapas tempranas [4].

Se puede detectar los fallos en los sistemas rotativos por medio de un monitoreo de condición, el cual posee varios métodos de análisis tales como: mediciones mecánicas, mediciones eléctricas, medición de magnitudes, la tribología y ensayos no destructivos, cada uno de estos campos abarca diferentes técnicas usadas en el monitoreo de condición.

1.1.2 Concepto del Monitoreo de Condición

El monitoreo de condición se define como el control de funcionamiento de una máquina a través del empleo de diferentes técnicas para la medición en tiempo real de ciertas

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

variables físicas tendientes a diagnosticar fallos incipientes y a predecir el tiempo de funcionamiento de un equipo en forma segura [5][6][7][8][9].

En la figura 1.1 se puede apreciar la ventaja de un mantenimiento basado en la condición en donde la optimización de estrategias y tecnologías generan costos bajos en el mantenimiento. El excesivo mantenimiento genera grandes costos debido a que mientras mayor es el mantenimiento mayor es la disponibilidad de tecnologías y estrategias. El escaso mantenimiento también genera grandes costos, puesto que a falta de recursos de mantenimiento menor es la vida útil de la maquinaria.

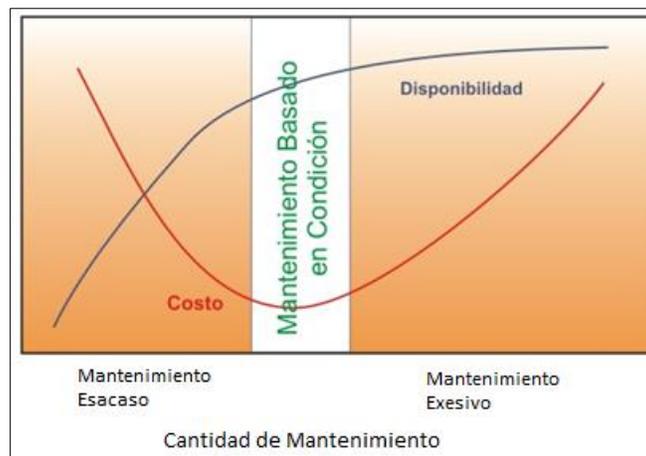


Figura 1.1. Optimización del mantenimiento. Fuente [10]

La selección de la tecnología adecuada para realizar el monitoreo de condición a cada maquinaria depende de varios factores como son: el tipo de maquinaria, el modo de fallo a diagnosticar y la capacidad de inversión.

Una de las mejores maneras de seleccionar la tecnología adecuada es mediante el Análisis de Modos de Falla, Efecto y Criticidad “*Analysis of Failure Modes, Effects and Criticality*” (AMEF). Existen otras opciones para este fin como: Mantenimiento centrado en confiabilidad “*Reliability Centered Maintenance*” (RCM), Análisis de causa raíz, Análisis de Pareto, Análisis de frecuencia de falla, entre otros [10].

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

Realizar la evaluación de la criticidad en categorías A, B, y C es importante, ya que sólo los equipos más críticos, en los cuales sus fallos generan mayor impacto, justificarán la implementación de técnicas de monitoreo más costosas [11].

Una vez que se ha efectuado el análisis de criticidad de la maquinaria, es importante identificar una acción de mantenimiento que permita eliminarla, detectarla y controlarla. De esta manera se construye un programa de monitoreo de condición, seleccionando la técnica a utilizar.

1.1.3 Selección de la técnica a utilizar

Cada técnica de monitoreo de condición posee un área de aplicación, donde su sensibilidad es máxima. También se puede utilizar varias técnicas en forma combinada para complementar e incrementar su poder de detección.

A continuación, se presentan algunos ejemplos de técnicas de monitoreo, que se pueden aplicar por clase de equipos:

- Bombas centrífugas: inspecciones con los sentidos humanos, análisis de vibraciones, medición del rendimiento, medición de temperatura
- Bombas hidráulicas: inspecciones con los sentidos humanos, medición de temperatura, medición del rendimiento, análisis de aceite
- Cañerías: Medición de espesores, inspección visual y detección por ultrasonido de fugas
- Tanques a presión: medición de espesores, prueba hidráulica, inspección radiográfica y por ultrasonido
- Compresores de tornillo: inspección con los sentidos humanos, análisis de vibraciones, análisis de aceite termografía, medición del rendimiento, detección de fugas por ultrasonido
- Motores eléctricos: análisis de vibraciones, termografía, mediciones eléctricas.
- Motores y compresores recíprocantes: inspecciones con los sentidos humanos, análisis de aceite, medición del rendimiento [11]

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

La inspección con los sentidos humanos, es quizás la técnica más subestimada de las técnicas de monitoreo, pero posee mucho potencial cuando se realiza en forma metódica y profesional, por parte de técnicos especializados y experimentados, puede resultar bastante útil. Cabe indicar que posee menos sensibilidad que las técnicas que utilizan instrumentos de medición pero esta técnica combinada con otras más simples puede convertirse en una herramienta poderosa en el monitoreo de la condición teniendo como ventaja la mejor relación costo beneficio al aplicar un plan de monitoreo.

1.1.4 Ejecución del monitoreo de condición

Para cumplir con las expectativas, el monitoreo de condición debe cumplir las actividades necesarias, en el tiempo determinado. Los cuatro pasos importantes a seguir se presentan en la figura 1.2.

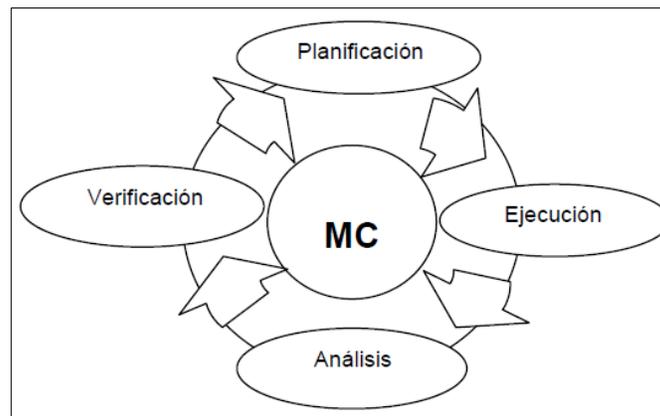


Figura 1.2. Ciclo de ejecución del monitoreo de condición. Fuente [12]

- **Planificación:** se debe planificar con antelación las actividades a realizar, definiendo las tareas, cuándo, quién y cómo se deben hacer.
- **Ejecución:** se deben realizar cada una de las tareas contempladas en el programa de monitoreo de condición, cumpliendo con lo determinado.
- **Análisis:** luego de obtener toda la información necesaria, se debe realizar un cuidadoso análisis para verificar si el funcionamiento del equipo se mantiene dentro de los parámetros aceptables o requiere intervención. En caso de requerir

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

intervención hacer un reporte, para que los técnicos realicen el reacondicionamiento del equipo.

- **Verificación:** es necesario hacer una evaluación de lo que se logró y compararlo con lo que se ha planeado, para constatar que se está cumpliendo con las expectativas.

1.1.5 Objetivos del monitoreo de condición

El objetivo del monitoreo de condición es conocer la condición actual de las máquinas con el fin de determinar su funcionamiento seguro, óptimo, eficiente y económico.

Los principales objetivos del monitoreo de condición son:

- Detectar condiciones que pueden ser causa de fallo – (proactiva)
- Detectar problemas en la maquinaria – (predictiva)
- Evitar fallos catastróficos – (predictiva)
- Diagnóstico de la causa del fallo – (proactiva)
- Pronóstico de vida útil de la máquina – (predictiva)

El monitoreo de condición estudia el comportamiento de la máquina en función del tiempo y establece una tendencia que indica la existencia de un fallo, la gravedad y el tiempo en que el equipo puede fallar. La ventaja de esta estrategia, es que puede ser efectuado mientras el equipo está en funcionamiento, evitando de esta manera acciones intrusivas a la maquinaria que a veces son generadoras de defectos [10].

1.2 Técnicas del monitoreo de condición

Se puede detectar los fallos en los equipos por medio del monitoreo de condición, el cual comprende diferentes campos tales como: mediciones mecánicas, mediciones eléctricas, medición de magnitudes, la tribología y ensayos no destructivos, cada uno de estos campos abarca diferentes técnicas, como se muestra en la figura 1.3 y tendrán que ser seleccionadas de acuerdo a su capacidad de identificar las causas de fallo.

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

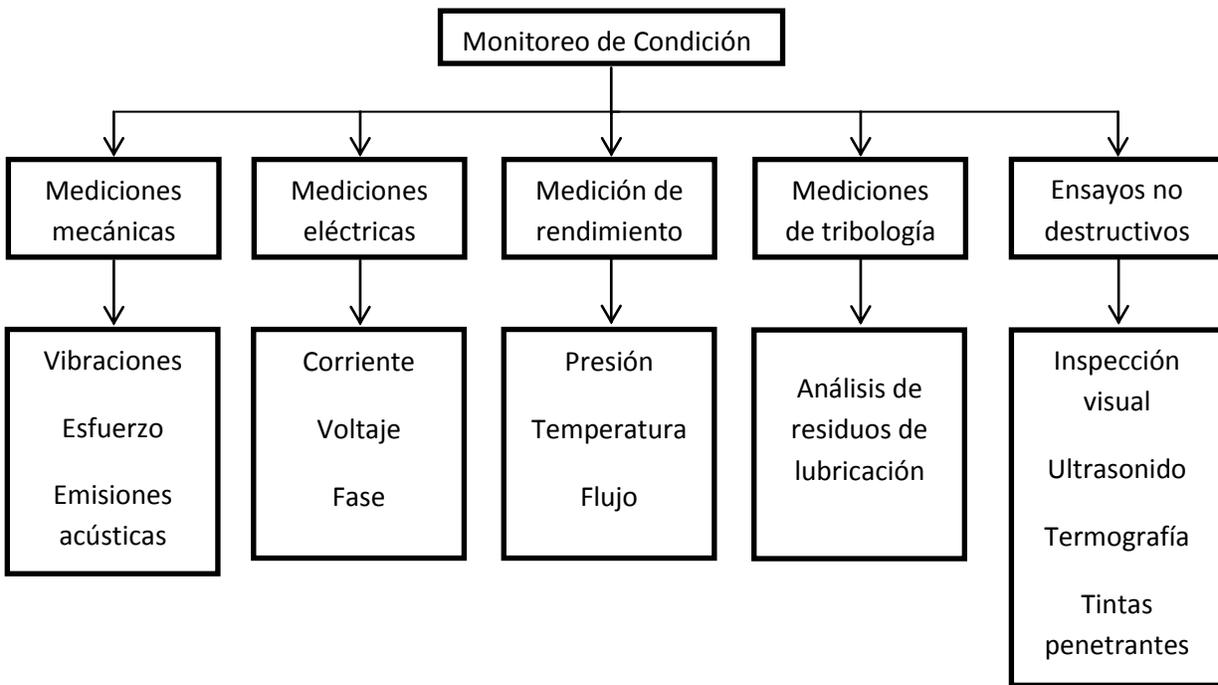


Figura 1.3. Diagrama de las técnicas utilizadas para el monitoreo de condición. Fuente [13]

A continuación se presenta un resumen de las técnicas más importantes empleadas en el monitoreo de condición.

1.2.1 Mediciones mecánicas

Las técnicas comprendidas en este campo se basan en el hecho de que los fallos que se generan en una máquina o estructura provocan un cambio en su comportamiento dinámico. Los fallos generados en los elementos rotatorios de una máquina generan fuerzas dinámicas que hacen vibrar la máquina en una forma tal que es indicativa del fallo que la genera. Por ejemplo, una picadura en una pista de rodadura de un rodamiento, generará una fuerza dinámica cada vez que un elemento rodante pase por el defecto en la pista.

Los fallos generados en equipos estáticos que alteran la rigidez y/o masa de la estructura, cambian sus frecuencias naturales y modos de vibrar. El monitoreo de estas magnitudes es usado para detectar en forma rápida, grietas en estructuras y estanques [6].

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

1.2.1.1 Análisis de vibraciones

Una de las herramientas principales para el diagnóstico de fallos que está comprendido en el campo de mediciones mecánicas y que es objeto del presente trabajo, es el análisis basado en vibraciones debido a su facilidad de medición [4], cada máquina produce una vibración específica que está directamente relacionada con su construcción y el estado de la misma. Si el estado de la máquina llega a cambiar, la firma de vibración también lo hará. Por consiguiente este cambio en la firma de vibración se puede aprovechar para detectar fallos incipientes en la maquinaria antes de que estos se vuelvan críticos [14], esta metodología constituye la base fundamental en este tipo de técnica.

El monitoreo de condición basado en el análisis de vibraciones permite realizar un seguimiento del estado de todos los componentes de las cajas de engranajes, como por ejemplo: engranajes, rodamientos y ejes. En los engranajes permite detectar grietas en etapas tempranas y realizar una parada correctiva antes de que la grieta progrese, siendo además capaces de conocer donde empezó la grieta y diagnosticar la razón del fallo [3]. La ventaja que presenta el análisis vibratorio respecto a otras técnicas, es que la evaluación se realiza con la máquina funcionando, evitando con ello la pérdida de producción que genera una detención.

Las etapas para realizar la medición y/o analizar una vibración son:

- Etapa transductora
- Etapa de acondicionamiento de la señal
- Etapa de análisis y/o medición

La etapa transductora es el primer paso en el proceso de medición y debería recoger exactamente las características de la magnitud que se desea medir a través de un transductor el cual es un dispositivo electrónico que detecta una magnitud física y la convierte en una señal eléctrica que es proporcional a la magnitud medida.

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

La etapa de acondicionamiento de la señal consiste en acondicionar la señal que sale del transductor para que pueda ser medida adecuadamente. Esto contempla en algunos casos, dependiendo del tipo de transductor, filtraje, amplificación o demodulación.

La etapa de análisis y/o medición se realiza una vez que la señal está acondicionada. Un medidor de vibraciones es un instrumento que mide el valor pico, pico a pico o raíz media cuadrática “*Root Mean Square*” (RMS) de la vibración. Un analizador de vibraciones es un instrumento que realiza el análisis espectral [15]. Técnicas de análisis de datos como el análisis en el dominio del tiempo, el análisis en el dominio de la frecuencia, promedio de la señal síncrona se pueden utilizar para analizar las señales obtenidas. En secciones posteriores se profundizará más sobre el análisis de vibraciones.

1.2.1.2 Medición de esfuerzo

Los medidores de esfuerzo se utilizan para medir las tensiones generadas por la maquinaria. Una aplicación son las pruebas en componentes de maquinaria de baja velocidad, en los cuales pequeños medidores de deformación están pegados a los elementos estructurales y a cualquier otro componente crítico para medir el nivel de tensión. La medición de esfuerzo puede ser muy útil para la predicción del tiempo de vida útil para las turbinas eólicas. Los medidores de esfuerzo no se aplican a menudo en el monitoreo de condición debido a que no son sólidos a largo plazo [16][17].

1.2.1.3 Emisiones acústicas

La técnica de emisión acústica describe las ondas de tensión acústicas resultantes cuando la energía se libera rápidamente debido a la ocurrencia de los cambios micro en un material. La emisión acústica implica el uso de transductores de ultrasonidos para escuchar los sonidos de fallos que se producen en maquinaria, componentes o estructuras, normalmente, el rango de frecuencias están en el orden de 50 kHz a 1 MHz. El uso de la tecnología de las emisiones acústicas puede ser utilizada para detectar grietas debido a la fatiga, la fragilización por hidrogeno, corrosión bajo tensión, fugas de alta presión pueden ser

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

localizados y detectados, rotura de fibras, en general esta técnica abarca un gran campo de aplicaciones debido a que proporciona información en tiempo real de la progresión de fallos [18].

La técnica de emisiones acústicas es menos usada que la técnica de análisis de vibraciones debido a la interferencia existente entre el ruido directo de la máquina con el proveniente de otras máquinas cercanas. La principal aplicación de las emisiones acústicas es en el monitoreo de máquinas pequeñas donde no se puede ubicar un sensor de vibraciones, o donde la masa aumentada por el sensor de vibraciones alteraría la dinámica propia de la máquina [6].

La extracción de la información requerida de la señal detectada depende del procesamiento de la señal. Diversas técnicas de procesamiento de señales se utilizan para analizar señales de las emisiones acústicas y extraer características relacionadas con defectos. Las formas de onda de la señal pueden ser analizadas en los dominios de tiempo y frecuencia. Las señales también pueden ser caracterizadas por parámetros estadísticos como la media, la varianza, la asimetría u otras [16].

Un sistema típico de emisión acústica se compone de:

- Los sensores utilizados para detectar señales, figura 1.4
- Preamplificadores que amplifican la señal inicial
- Los cables que transmiten señales a distancias de hasta 300 metros. Los cables son generalmente son de tipo coaxial
- Dispositivo de adquisición de datos que realiza la conversión de señales de analógico a digital, filtración, detección y parámetros de evaluación, análisis de datos

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones



Figura 1.4. Sensor de emisión acústica. Fuente [19]

Los sensores de emisión acústica son unos dispositivos que transforman un desplazamiento dinámico del material en una señal eléctrica. Estos sensores son del tipo piezoeléctricos con elementos cerámicos y generan señales eléctricas cuando se tensan mecánicamente.

La selección de un sensor específico depende de la aplicación, el tipo de defectos que se revelarán, las características del ruido y otros factores. Hay dos tipos cualitativos de sensores de acuerdo a su frecuencia de respuesta: sensores resonantes y de banda ancha. El espesor del elemento piezoeléctrico define la frecuencia de resonancia del sensor. Otra propiedad importante de los sensores es un punto de Curie, la temperatura bajo la cual elemento piezoeléctrico pierde sus propiedades piezoeléctricas. La temperatura de Curie varía para diferentes cerámicas de 120 a 400° C. Existen cerámica que con una temperatura de Curie de 1200°C [19].

1.2.2 Mediciones eléctricas

El objeto del análisis eléctrico como técnica de monitoreo de condición es el de realizar estudios eléctricos sobre aquellos equipos que pueden presentar averías de origen electro-mecánico.

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

1.2.2.1 Análisis de señales de corriente

El monitoreo de condición a través del análisis de señales de corriente “*Motor Current Signature Analysis*” (MCSA), recientemente ha llamado la atención de los investigadores. MCSA se practica generalmente para diagnosticar fallos en los motores de inducción y centra su esfuerzos en el análisis espectral de la corriente del estator siendo utilizado con éxito en la detección de barras de rotor rotas, ver figura 1.5, daños en los rodamientos, la excentricidad dinámica, espiras en cortocircuito en los bobinados del estator [20][21]. La ventaja de esta técnica es que está bien reconocida hoy en día como un estándar debido a su simplicidad: se necesita sólo un sensor de corriente por máquina y se basa en técnicas de procesamiento de señales directas, tales como la transformada rápida de Fourier “*Fast Fourier Transform*” (FFT). El espectro es obtenido usando la FFT, sin embargo la FFT en la corriente del estator es bastante difícil de aplicar con precisión debido a problemas como: la resolución de la frecuencia y más generalmente, debido al procesamiento de datos [20]. Existen otros métodos para obtener el espectro como la transformada de Fourier de tiempo corto y la transformada Wavelet [20].

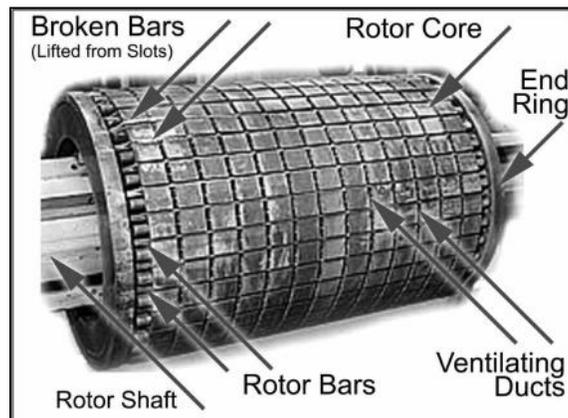


Figura 1.5. Ejemplo de problema de rotura de barras del rotor. Fuente [21]

Un sistema básico de instrumentación MCSA se muestra en la figura 1.6 y consiste en:

- Un transformador de corriente “*Current Transformer*” (CT) para detectar la señal
- Una derivación resistiva a través de la salida de la CT
- Un instrumento MCSA (o analizador de espectro) para producir el espectro actual

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

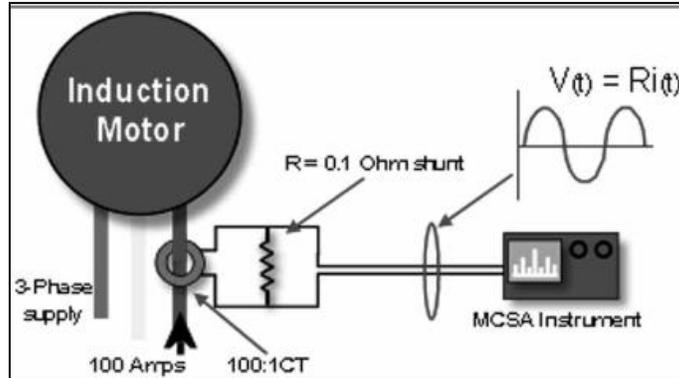


Figura 1.6. Sistema básico de instrumentación MCSA. Fuente [21]

Un espectro idealizado de corriente se muestra en la figura 1.7, en donde se representa las bandas laterales de la frecuencia de deslizamiento dos veces debido a barras rotas del rotor. Se debe tener en cuenta que un decibel (dB) frente a la frecuencia espectro, se utiliza para dar un amplio rango dinámico y para detectar la corriente característica de los diferentes fallos.

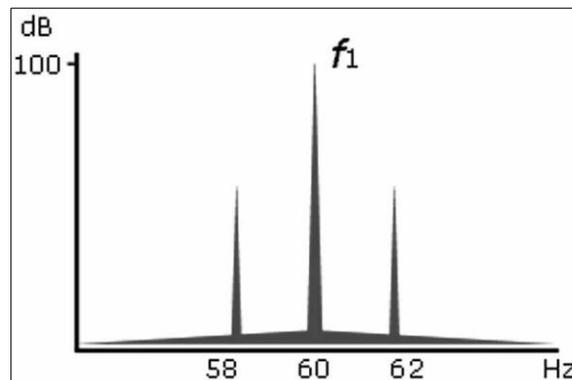


Figura 1.7. Espectro de corriente. Fuente [21]

Dependiendo de la instalación en el sitio actual, el CT puede ser de dos tipos, a saber, una pinza CT alrededor del cable de una de las fases de la alimentación o alrededor del lado secundario existente en el panel de instrumentos.

Hay que tener en cuenta que sólo un CT se requiere para MCSA, y puede estar en cualquiera de las tres fases de un motor de inducción trifásico. La razón fundamental de esto es que las ondas de flujo giratorio producidos por los diferentes fallos cortan los tres devanados de fase del estator, y las corrientes correspondientes son inducida en cada una de las tres fases.

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

1.2.3 Mediciones de rendimiento

El monitoreo del rendimiento de una máquina y/o de sus componentes es uno de los métodos más directos para conocer su condición o estado debido a que son los parámetros que están relacionados con el funcionamiento de la máquina, tales como: presión, temperatura, flujo, entre otros. La ventaja principal de estas técnicas es que es difícil que se realice una falsa interpretación de ellas, debido a que, cualquier desviación del rendimiento debe revelar la existencia de un problema real. Las principales desventajas, cuando se monitorea el rendimiento de una máquina completa, es que tiende a ser un método limitado a la hora de detectar fallos incipientes. Deberán ocurrir daños apreciables en algunos componentes de la máquina para que estos se traduzcan en efectos medibles del rendimiento [6]. En la tabla 1.1 se presenta ejemplos del monitoreo del rendimiento.

Tabla 1.1. Ejemplos de monitoreo del rendimiento. Fuente [6]

Método de monitoreo del rendimiento	Ejemplo
Medición de la cantidad de flujo salida	Cambios en el flujo medio de salida bajo condiciones estándar
Medición de la cantidad del producto de salida de la máquina	Cambios en la tolerancia de fabricación en una máquina herramienta
Medición de la razón entre la entrada y la salida de la máquina	Razón entre el consumo de combustible y la salida eléctrica de un generador diesel
Razón entre la medición simultanea de dos variables de salida	Razón entre el flujo y el aumento de presión en una bomba

1.2.3.1 Medición de temperatura

La técnica de monitoreo por calor se puede emplear para medir fluidos en un sistema o para superficies de componentes mecánicos como las cajas de rodamientos o muñoneras. Para la medición de las condiciones térmicas, se utilizan generalmente dos tipos de sensores:

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

a) Sensores de contacto

Los sensores de contacto son aquellos que toman la temperatura del cuerpo con el cual están en contacto y luego la transmiten a través de él. La precisión y el tiempo de respuesta se ven afectados por los mecanismos que la sujetan. Un buen contacto térmico es fundamental para su correcto funcionamiento [8].

b) Sensores sin contacto

La energía de radiación que emite un cuerpo varía con la temperatura absoluta del cuerpo y la emisión de la superficie de radiación de acuerdo con la ley de Boltzmann. Esto permite obtener la temperatura de la superficie partiendo de la energía radiante sin estar en contacto con ella [8].

1.2.3.2 Medición de presión

La presión conjuntamente con la temperatura, constituyen las variables que más frecuentemente se miden y controlan en el funcionamiento de maquinaria. Los dispositivos que se emplean en estos ambientes son fundamentalmente de dos tipos:

- Elementos de columna de líquido: en este grupo se encuentran los diversos manómetros de tubo y las campanas con sello líquido.
- Elementos elásticos: sirven tanto para medición local como para transmisores. Los cuatro elementos que se emplean en sensores industriales son: Tubo de Bourdon, diafragma, cápsulas y fuelles.

Existen en el mercado una diversidad de tecnologías para transmisores que se acoplan con los elementos elásticos, las más aplicados y confiables son los extensométricos (strain gage), capacitivos y de alambre vibrante [22].

1.2.3.3 Medición de flujo

Esta es una variable muy importante ya que su conocimiento es indispensable en los balances de materia y energía. El costo y las dificultades técnicas para la medición hacen que su uso sea menos difundido. Algunos de los elementos para realizar la medición son los siguientes:

- Placa orificio
- Caudalímetro magnético
- Caudalímetro a turbina

1.2.4 Mediciones de tribología

La tribología se centra en el estudio de la fricción, desgaste y lubricación, es esencialmente un proceso energético, la figura 1.8 muestra la relación que tienen estos factores de la tribología.

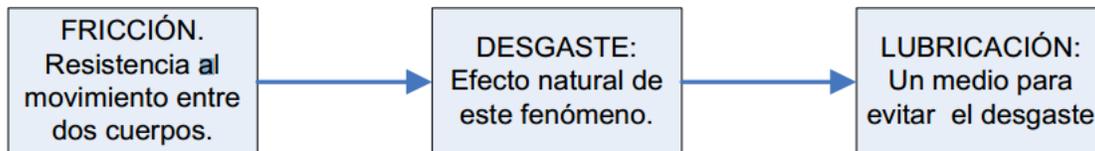


Figura 1.8. Relación de fricción, desgaste y lubricación. Fuente [23]

Las tareas del especialista en tribología son las de reducir tanto los efectos de fricción como de desgaste para alargar la vida útil del lubricante, disminuir costos por energía, incrementar la productividad, reducir el mantenimiento, lograr movimientos más rápidos y precisos, entre otras [8][23][24].

La lubricación permite mejorar la disponibilidad y el rendimiento de las máquinas rotativas [25], las funciones principales de los aceites dentro de las máquinas rotativas son: protección al desgaste, control de temperatura y la eliminación de impurezas. Las máquinas rotativas tienden a fallar en muchos casos debido a que sus componentes presentan problemas en la lubricación, es decir el aceite empieza a presentar altos grados de contaminación y/o degradación [24]. Existe una técnica que permiten detectar fallos en los

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

componentes por medio del análisis de los residuos de lubricación y se describe a continuación.

1.2.4.1 Análisis de residuos de lubricación

El análisis de aceite es una parte importante del mantenimiento basado en la condición, porque el aceite habla de la historia de la máquina desde el último cambio de aceite. Esta técnica permite cuantificar el grado de contaminación y/o degradación que puedan producir daños a las máquinas rotativas [8][24][25].

El análisis de aceites determina el estado de operación de las máquinas a partir de varios análisis tales como: análisis de partículas de desgaste, químico y de contaminación [26][27].

- Análisis de partículas de desgaste: permite detectar fallos incipientes de mejor forma que un análisis de vibración tanto para rodamientos, engranes, guías, y otros.
- El análisis químico: permite determinar si el lubricante presenta cambio de sus propiedades y sus aditivos tales como: viscosidad, detergencia, la constante dieléctrica: la principal causa de la degradación del lubricante se da por niveles de temperatura altos.
- El análisis de contaminación: permite detectar si el lubricante presenta partículas de desgaste y/o de sustancias extrañas tales como: partículas metálicas de desgaste, combustible, agua, etc.

El análisis de aceites se realiza según la necesidad [24][26].

- Análisis iniciales: se realizan a productos de aquellos equipos que presenten dudas provenientes de los resultados del estudio de lubricación y permiten correcciones en la selección del producto.
- Análisis rutinarios: aplican para equipos considerados como críticos o de gran capacidad, en los cuales se define una frecuencia de muestreo, siendo el objetivo principal de los análisis la determinación del grado de contaminación y degradación del lubricante.

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

- Análisis de emergencia: se efectúan para detectar el grado de contaminación del lubricante.

Existen diversas técnicas que permiten diagnosticar el estado del lubricante, determinando así el grado de contaminación y/o degradación, entre las técnicas más usuales se encuentran: [28][29]

Análisis espectrométrico del aceite “*Spectrometric Oil Analysis Procedure*” (SOAP): este tipo de análisis permite cuantificar la concentración de las partículas metálicas, la presencia de contaminantes y aditivos que se encuentran en los lubricantes. Para este tipo de análisis se utilizan equipos llamados espectrómetros.

Análisis de los residuos en el aceite (ferrografía directa, ferrografía analítica, análisis de astillas): mediante este análisis se puede separar las partículas metálicas, a través de un sistema de separación de partículas, usualmente con la ayuda de un imán permanente, en la figura 1.9 se muestra el esquema de un equipo de separación de partículas.

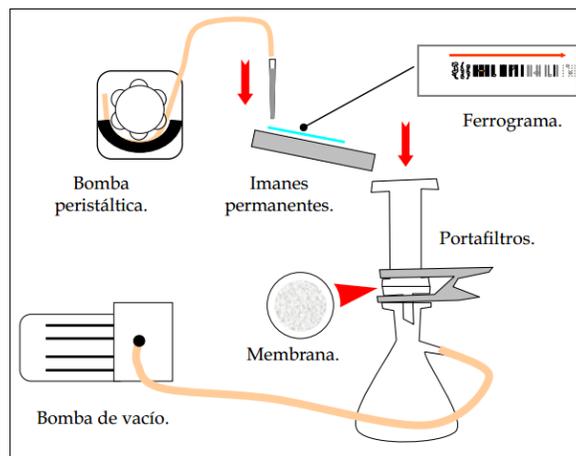


Figura 1.9. Esquema del equipo de separación. Fuente [29]

Análisis de la contaminación de los aceites hidráulicos: permite evaluar mediante diversos procedimientos el grado de degradación del lubricante, tales como: la viscosidad, el grado de oxidación y el contenido de cenizas.

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

Los autores de las referencias [12] y [24], mencionan que mediante el análisis de aceites se tendrá:

- Máxima vida útil de los lubricantes
- Máxima reducción de los costos operativos
- Máxima vida útil de los componentes con mínimo desgaste
- Máximo aprovechamiento del lubricante utilizado
- Disminución de tiempo perdido en producción debido a desperfectos mecánicos
- Disminución de desgaste de las máquinas y sus componentes
- Disminución de horas hombre dedicadas al mantenimiento
- Disminución de consumo general de lubricantes

1.2.5 Ensayos no destructivos

Los ensayos no destructivos tienen la finalidad de detectar y evaluar discontinuidades o propiedades de los componentes de una máquina sin afectar las condiciones de operación y trabajo.

Existen diversas técnicas para el monitoreo de condición mediante ensayos no destructivos, a continuación se mencionan los más importantes:

1.2.5.1 Inspecciones visuales

Es una de las técnicas más antiguas del mantenimiento basado en la condición; su principal objetivo es la detección de fallos de máquinas rotativas a través de los sentidos del cuerpo humano (visión, audición, olfato y tacto). A través de este análisis es posible monitorear las condiciones de los componentes de las máquinas de forma rápida y sencilla, debido a su forma natural de analizarlas como por ejemplo: [8][18][12][6].

- **Visión:** permite detectar cualquier anomalía que se pueda observar a simple vista, como por ejemplo: fugas, cambios de color de lubricantes y de superficies por recalentamiento, etc.

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

- **Audición:** permite detectar ruidos extraños producidos por los componentes de la máquina
- **Tacto:** permite detectar vibraciones y/o temperaturas anormales
- **Olfato:** permite detectar fugas y recalentamiento

Este tipo de análisis no ofrece una información exacta de las causas del posible fallo debido a que la sensibilidad de los sentidos del cuerpo humano son limitados [6].

1.2.5.2 Análisis por ultrasonido

El análisis por ultrasonidos se basa en el estudio de ondas de sonido de altas frecuencias desde 20 KHz hasta los 100 KHz y que son imposibles para el oído humano percibir las, en la figura 1.10 se presenta un rango de frecuencias que son perceptibles para el oído humano de 20 hz a 20 KHz. La mayoría de las máquinas emiten patrones de sonido consistentes en condiciones normales de funcionamiento, el cambio de estas firmas sonoras permite identificar y localizar la discontinuidad que se está presentando en algún componente de la máquina [12][28].

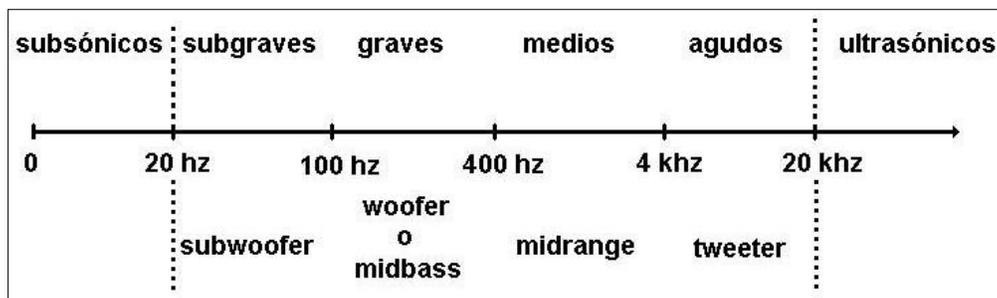


Figura 1.10. Rango de frecuencias. Fuente [30]

Existen varias técnicas para las pruebas de ultrasonido tales como: análisis de ondas de esfuerzos “*Stress Wave Analyzer*” (SWAN), análisis de emisiones acústicas “*Acoustic Emission*” (AE) y una de las más usadas para la detección e fallos incipientes en rodamientos y engranajes el análisis de impulsos de choque “*Shock Pulse Meter*” (SPM). Todas estas pruebas son aplicadas para la detección de fallos en máquinas rotativas (bombas, generadores, ventiladores), fugas de fluidos, pérdidas de vacío, arco eléctrico,

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

entre otras, especialmente para equipos rotativos que giran a bajas velocidades [26][12][24][31].

Los instrumentos encargados de convertir las ondas de ultrasonido en ondas audibles se llaman medidores de ultrasonido o detectores ultrasónicos. Por medio de estos instrumentos las señales ultrasónicas transformadas se pueden escuchar por medio de audífonos o se pueden observar en una pantalla como se muestra en la figura 1.11.



Figura 1.11. Medidor de ultrasonido. Fuente [26]

1.2.5.3 Análisis por termografía

El análisis por termografía permite detectar variaciones de temperatura superficiales (figura 1.12 y figura 1.13) o puntos calientes locales (figura 1.14) que son causadas por fallos de los componentes en las máquinas rotativas, ya sea por desgaste, fatiga, sobrecargas, fricción excesiva, entre otros [27][31][32].

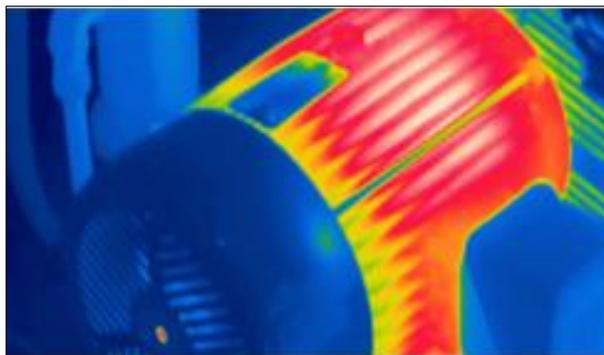


Figura 1.12. Análisis termográfico de un motor. Fuente [33]

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones



Figura 1.13. Análisis termográfico de un interruptor. Fuente [24]



Figura 1.14. Análisis termográfico de una máquina rotativa. Fuente [27]

Los cambios de temperatura en una máquina rotativa son indicios de fallos de sus componentes que podrían causar severos problemas a las máquinas ya sean problemas de lubricante, de alineación, desbalanceo, entre otros [27].

Los equipos capaces generar una imagen de radiación infrarroja a partir de la temperatura superficial de las máquinas, son las que permiten realizar este tipo de análisis termográfico y son llamadas cámaras termográficas (ver figura 1.15).



Figura 1.15. Cámara termográfica. Fuente [26]

Estos equipos proporcionan una imagen térmica que permite medir, visualizar y analizar a distancia y sin ningún contacto estos cambios de temperatura de la superficie en un tiempo real [18].

La termografía se aplica a menudo para el monitoreo en instalaciones eléctricas de baja y alta tensión, estructuras refractarias, elementos mecánicos, sistemas de climatización, entre otros [17][26][24].

1.2.5.4 Tintas penetrantes

Es un efecto físico que se utiliza para detectar fallos como grietas, fisuras superficiales, porosidades, que son invisibles a la inspección visual [7].

Se aplica la tinta o líquido penetrante sobre la superficie a analizar, luego se procede a remover el exceso de líquido que fue aplicado; una vez realizado este proceso, se aplica una sustancia reveladora que permite que el fallo se haga visible, el cual ya puede ser inspeccionado y analizado visualmente a través de una lámpara [28][34]. En la figura 1.16 se muestra cómo actúan esta técnica sobre la superficie.

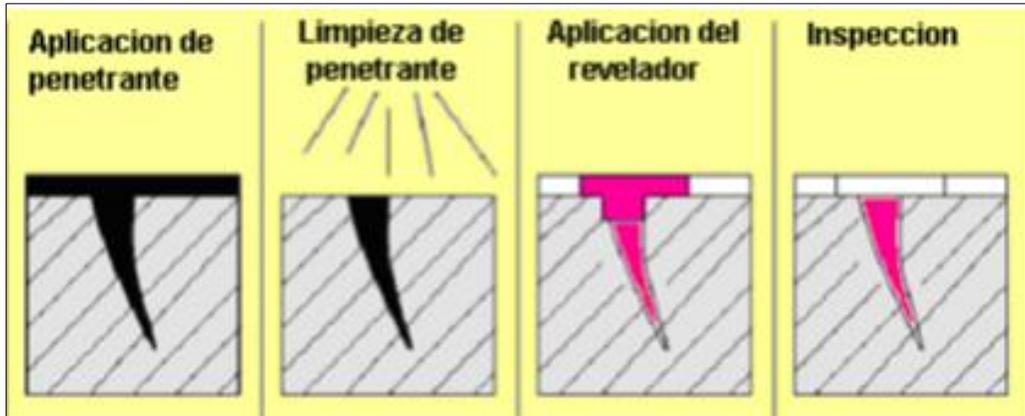


Figura 1.16. Técnica de análisis no destructivo mediante tintas penetrantes. Fuente [34]

Los autores de las referencias [28] y [34], dan a conocer una clasificación de los diferentes tipos de líquidos penetrantes, removedores y reveladores; que son utilizados con mayor frecuencia en este tipo de técnica; además presenta tiempos requeridos para que actúen los diferentes tipos de penetrantes con respecto a diversos materiales.

1.2.5.5 Análisis por radiografías

Dentro de los análisis de fallos a través de ensayos no destructivos se tiene una de las técnicas más antiguas y usadas en el monitoreo basado en la condición que son las radiografías, estas permiten tener un registro fotográfico producido por la transmisión de la radiación electromagnética de un objeto sobre una película; cuando la película se expone a la luz específica, se produce una imagen latente que posteriormente es sometida a un proceso de revelado para obtener la imagen del área inspeccionada [18][28].

Las técnicas utilizadas en el análisis por radiografías son: radiografía con rayos X y radiografía con rayos gamma. Estas dos técnicas se diferencian por el origen de la radiación electromagnética. Los rayos X son generados por un alto potencial eléctrico mientras que los rayos gamma se producen por desintegración atómica espontánea de un radioisótopo [28].

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

1.3 Técnicas de monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones mecánicas

El análisis de vibraciones es una de las técnicas que generalmente más se utiliza en el ámbito del monitoreo de condición de maquinaria rotativa. En los últimos años muchas investigaciones se han realizado, estando estas centradas en las técnicas basadas en vibraciones. En estas técnicas las señales de vibración se extraen por medio de un acelerómetro colocado en algún punto específico de la maquinaria y que son producidas por algún elemento defectuosos de la misma [35].

La firma de vibración recogida por el acelerómetro proporciona información referente al estado o condición de la máquina monitorizada. Por lo tanto se podrían comparar las firmas de vibración actuales con las anteriores para determinar si la máquina o sus componentes se están comportando normalmente o presentan algún síntoma de fallo. Sin embargo en la práctica estas comparaciones no son eficaces debido a las grandes variaciones de la comparación directa. En su lugar se puede utilizar un método más preciso que consiste en la extracción de características de los datos de la firma de vibración, estas características son más estables y proporcionan un conjunto reducido de datos para la aplicación de reconocimiento de patrones y técnicas de seguimiento [36]. La extracción de características para la detección de fallos en engranajes y rodamientos se basa en propiedades estadísticas de la señal de vibración recogida [37] y comprenden varios algoritmos o indicadores de condición para extraer información útil en el diagnóstico de las señales de vibración obtenidas [38].

Las técnicas basadas en la vibración se pueden dividir en tres grupos principales de procesamiento como son: el análisis en el dominio del tiempo, el análisis en el dominio de la frecuencia y el análisis tiempo-frecuencia los cuales se pueden dividir en subgrupos de análisis de señal, dentro de cada subgrupo se encuentran los respectivos indicadores de condición que cada técnica maneja para la extracción de características de la señal, como se muestra en la figura 1.17.

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

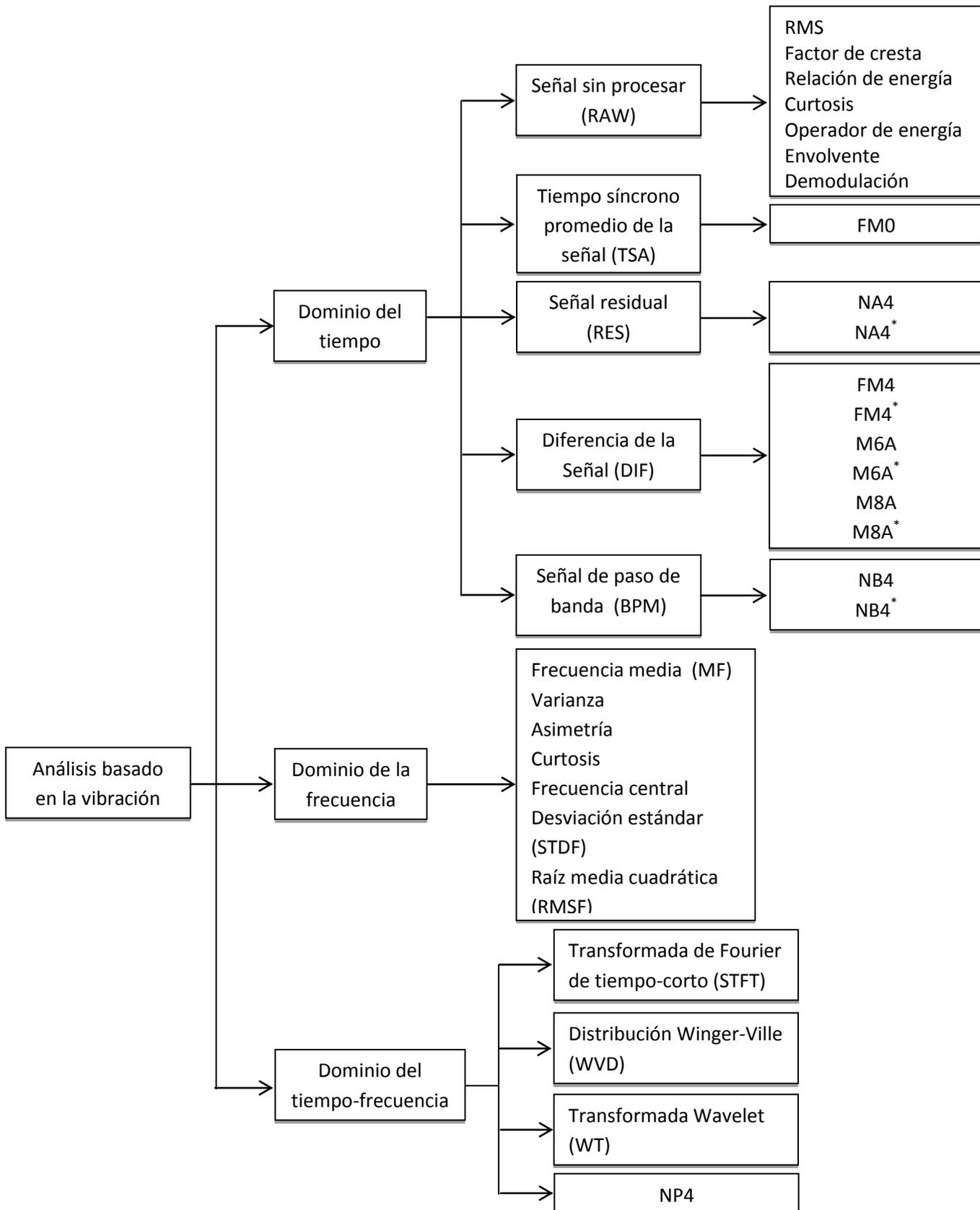


Figura 1.17. Clasificación del análisis basado en las vibraciones, técnicas y parámetros. Adaptado de [35]

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

A continuación se ofrece una breve explicación de los tres dominios comprendidos en el análisis basado en la vibración.

1.3.1 Análisis en el dominio del tiempo

El análisis en el dominio del tiempo es uno de los métodos más utilizados en la detección de fallos y monitoreo de condición en maquinaria rotativa. Este análisis se basa en las mediciones estadísticas de la energía de vibración [35]. La señal en el dominio del tiempo puede ser útil para realizar diagnósticos de averías mediante información de la amplitud y de la fase de la señal obtenida en rodamientos y engranajes con características de señal no estacionarias [39].

Antes de la extracción de características de los datos de la firma de vibración medida, primero se debe acondicionar y pre procesar la señal obtenida [36]. Este flujo de acondicionado y pre procesado de la señal se muestra en la figura 1.18.

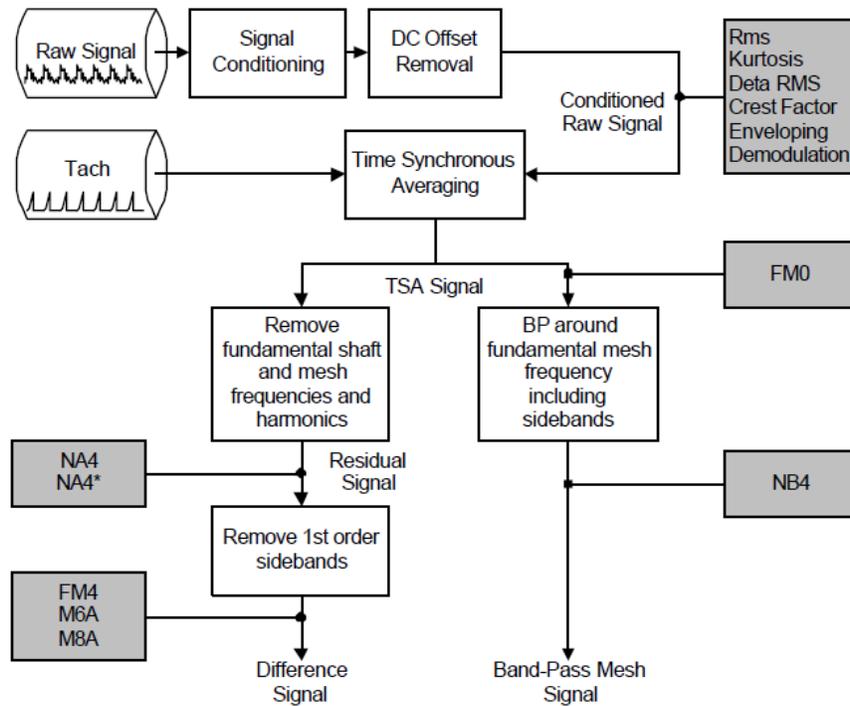


Figura 1.18. Diagrama de acondicionado y pre procesamiento de la señal. Fuente [36]

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

De acuerdo al acondicionamiento y pre procesamiento de la señal se han introducido 5 subgrupos de análisis de la señal como son: señal sin procesar, tiempo síncrono promedio de la señal, señal residual, diferencia de la señal, señal de paso de banda [35], ver la figura 1.17. Dentro de cada subgrupo se encuentran los diferentes indicadores de condición para la extracción de características de la señal.

En la bibliografía se puede encontrar más indicadores de condición en el dominio del tiempo de los que se muestra en la figura 1.17. La aplicación de estos indicadores en el monitoreo de condición depende de su utilidad y sensibilidad para detectar fallos en los componentes de la maquinaria. Estos deberán ser seleccionados en función de los requerimientos de la máquina a monitorizar.

1.3.2 Análisis en el dominio de la frecuencia

El análisis en el dominio de la frecuencia es muy utilizado en la actualidad para la detección de fallos en la maquinaria rotativa y se refiere al análisis del espectro de los datos de vibración medidos, estableciendo una comparación de espectros de máquinas en buenas y malas condiciones. Para calcular el espectro se requiere del uso de la transformada rápida de Fourier “*Fast Fourier Transform*” (FFT), que básicamente transforma la señal del dominio del tiempo en el dominio de la frecuencia y ha sido ampliamente utilizada para identificar las características de frecuencia de las señales, que pueden ser señales procesadas o señales sin procesar [38][40][41]. Como una desventaja se puede decir que la FFT no proporciona información alguna acerca de la señal en el dominio del tiempo lo que constituye un problema a la hora de analizar señales no estacionarias en las que es bastante útil tener un contraste entre los dos dominios.

Este tipo de análisis es útil en maquinaria rotativa que no contenga sistemas demasiado complejos debido a que la eficiencia de este se pierde con el número de componentes a analizar, se tiene también el inconveniente de no indicar la localización del defecto [41]. Para una caja de engranajes que contiene unos pocos pares de engranajes es posible detectar

Capítulo 1: Monitoreo de la condición mediante el análisis de vibraciones

fallos en los dientes de los engranes por medio de la inspección de la bandas laterales de modulación alrededor de la frecuencia de engrane y sus armónicos [40].

Los indicadores de condición para la extracción de características en el dominio de la frecuencia están siendo ampliamente investigados y pueden indicar de mejor manera los fallos en la maquinaria rotativa que las características de vibración en el dominio del tiempo, debido a que los componentes característicos de la frecuencia tales como frecuencia de resonancia o componentes de frecuencia de defectos pueden ser relativamente de fácil detección y concurrentes a los fallos [38]. A partir de esto se define un conjunto de indicadores de condición para la extracción de características como se mostró en la figura 1.17.

En la bibliografía se puede encontrar más indicadores de condición en el dominio de la frecuencia.

1.3.3 Análisis en el dominio del tiempo-frecuencia

El análisis en el dominio el Tiempo-Frecuencia se ha convertido en una técnica útil en la detección de fallos en cajas de engranajes. La firma de vibración de una caja de engranajes se compone de tres componentes significativos: un componente sinusoidal debido a la variable en el tiempo de carga, un componente impulsivo de banda ancha debido a un impacto, y el ruido aleatorio. El componente sinusoidal es el que predomina en una caja de engranajes en buenas condiciones y sus características son más observables en el dominio de la frecuencia, a diferencia del componente impulsivo y del ruido aleatorio en donde sus características son más observables en el dominio del tiempo. Por tal motivo el análisis en el tiempo frecuencia es una técnica adecuada debido a que se permite analizar las características de estos tres componentes [35].

Existen cuatro técnicas de análisis dentro de este grupo de procesamiento: transformada de fourier de tiempo-corto “*Fourier Transform Time-Short*” (STFT), distribución Winger-Ville “*Winger-Ville Distribution*” (WVD), transformada wavelet “*Wavelet Transformed*”(WT), NP4, como se ilustra en la figura 1.17.

CAPÍTULO 2

2. CONFIGURACIÓN DE LOS SISTEMAS MECÁNICOS ROTATIVOS

2.1 Descripción del banco de vibraciones

El banco de vibraciones mecánicas permite simular fallos en rodamientos y engranajes con diferentes sistemas mecánicos rotativos, en las que su condición de trabajo involucre carga radial, carga axial, desalineación y desbalanceo sobre sus ejes de transmisión. El banco está conformado por cuatro unidades de trabajo como se ilustra en la figura 2.1, cada una de estas unidades cumple una función diferente, permitiendo que el sistema tenga un control automatizado.

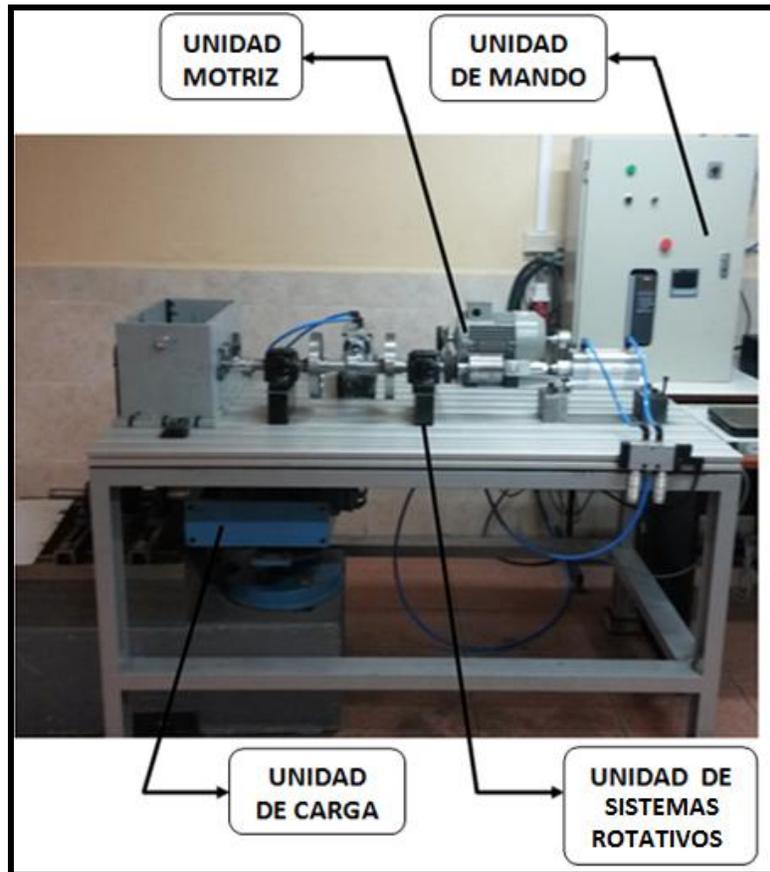


Figura 2.1. Banco de pruebas de vibraciones mecánicas. Fuente: Los autores

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

2.1.1 Unidad de mando

La unidad de mando, mostrada en la figura 2.2, permite controlar el sistema eléctrico del banco de vibraciones mecánicas.

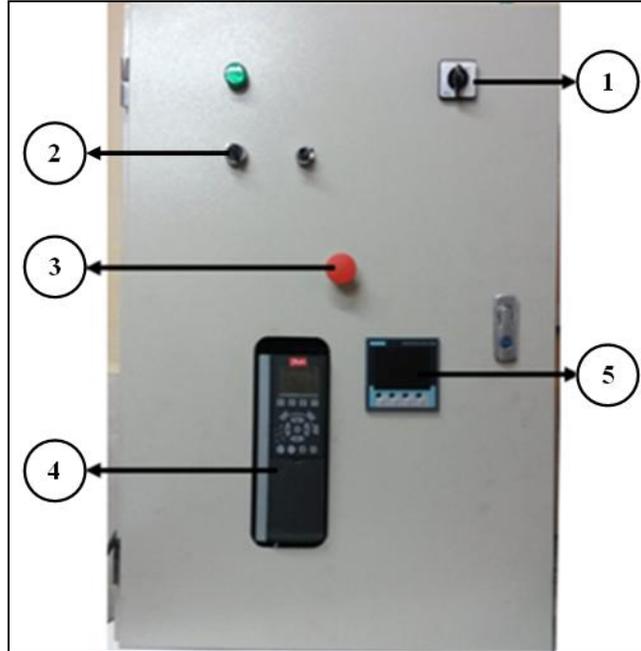


Figura 2.2. Unidad de mando. Fuente: Los autores

La unidad de mando tiene una alimentación trifásica de 220 VAC. Las características de los elementos de esta unidad se describen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Descripción de los elementos de la unidad de mando. Fuente: Los autores

Posición	Elemento	Características
1	Interruptor de encendido	Marca CAMSCO
2	Interruptor para activar el cilindro neumático	Marca SIEMENS, modelo 3SB3758-2KA
3	Botón de emergencia	Marca SIEMENS, modelo 3SB3400-OC
4	Variador de frecuencia	Marca DANFOSS, modelo FC302 / MCB102, alimentación trifásica DE 220 VAC @ 60 Hz, frecuencia de salida de 0-1000 Hz, comunicación RS485, potencia de 2 HP
5	Analizador de energía	Marca SIEMENS, modelo SENTRON PAC3100

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

2.1.2 Unidad motriz

En la figura 2.3 se muestran los elementos del cual está constituida la unidad motriz; donde el elemento principal es el motor, que transmite el movimiento rotativo hacia el eje, a través de un sistema banda – polea. Las características de los elementos de la unidad motriz se describen en la tabla 2.2.

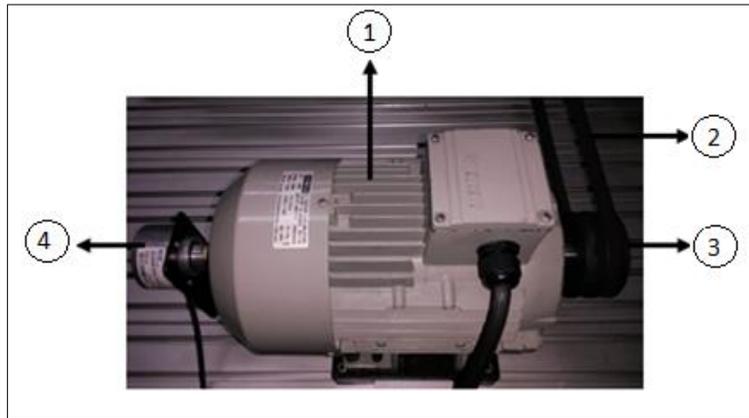


Figura 2.3. Unidad motriz. Fuente: Los autores

Tabla 2.2. Descripción de los elementos de la unidad motriz. Fuente: Los autores

Posición	Elemento	Características
1	Motor	Marca SIEMENS, modelo 1LA7 090-4YA60, alimentación trifásica de 220 VAC, potencia de 2 HP, 1700 rpm
2	Banda	A43
3	Polea	Marca OPTIBELT - SPA 71x2 - 1108
4	Encoder	Marca SICK, modelo DFS60B-S4PL10000 (1036723)

2.1.3 Unidad de sistemas rotativos

La unidad de sistemas rotativos permite simular fallos en engranajes y rodamientos, aplicando perturbaciones en el sistema, ya sea de: carga radial, carga axial, desbalanceo y desalineación sobre los ejes de transmisión. En la figura 2.4 se muestran los sistemas mecánicos rotativos montados en el banco de vibraciones. En la sección 2.1.5 se detallará cada uno de estos sistemas.

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

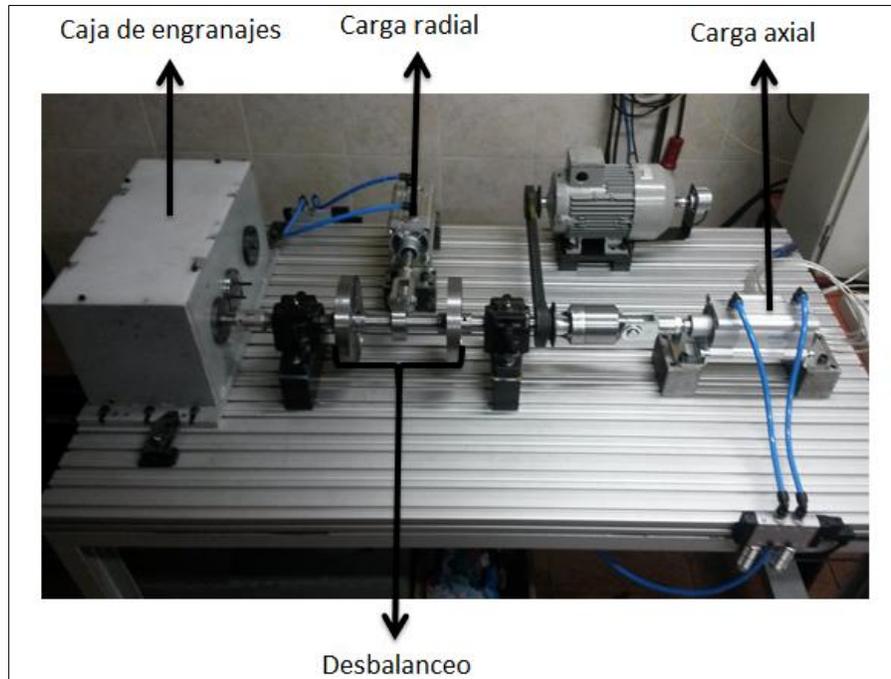


Figura 2.4. Sistemas mecánicos rotativos. Fuente: Los autores

2.1.4 Unidad de carga

El objetivo de esta unidad es de aplicar carga por torque lo que simula trabajo real para los sistemas rotativos. La carga puede variarse con la finalidad de detectar anomalías de elementos a diferentes cargas. En la figura 2.5 se muestra la unidad de carga.

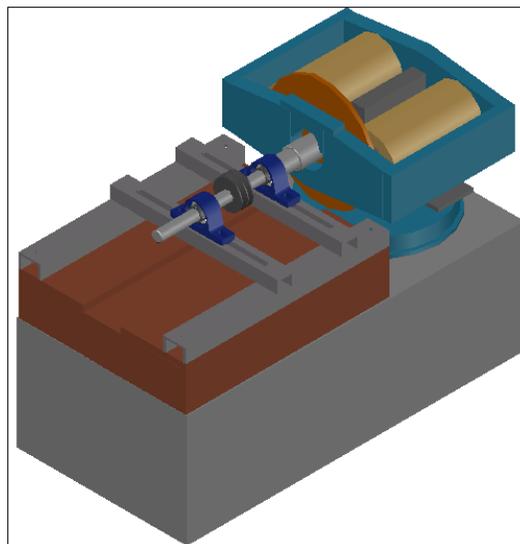


Figura 2.5. Unidad de carga mediante freno magnético. Fuente: Los autores

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

El freno magnético está formado por una parte eléctrica en la cual se induce corriente a un bobinado, produciéndose así un campo magnético que afecta a un disco de cobre provocando el frenado. El frenado genera el toque necesario en la salida de la caja de engranajes [42].

2.1.5 Descripción de los sistemas mecánicos rotativos

La disponibilidad de los sistemas mecánicos rotativos en el laboratorio de vibraciones permite realizar desde el montaje individual hasta montajes en conjunto de los sistemas rotativos para simular fallos. A continuación se describe cada uno de estos sistemas con sus respectivos elementos de montaje.

2.1.5.1 Carga axial sobre un eje de transmisión

Este sistema está diseñado con el objetivo de identificar las diferentes anomalías que sufren los ejes y rodamientos en situaciones reales [42]. En la figura 2.6 se muestra la configuración y los elementos utilizados en el montaje de este sistema. La descripción de los respectivos elementos de la carga axial se muestra en la tabla 2.3.

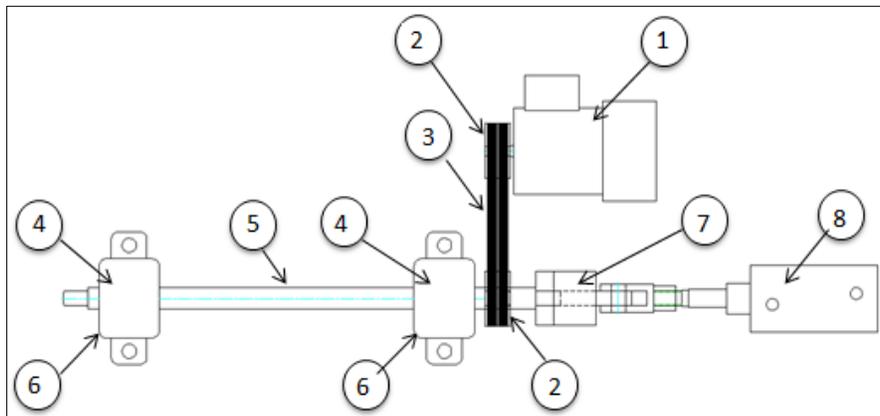


Figura 2.6. Elementos de la carga axial. Fuente: Los autores

Para el montaje de este sistema se utiliza un mecanismo (7), que sirve para acoplar el actuador neumático al eje de transmisión, dentro de este mecanismo existe un par de

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

rodamientos cónicos para soportar la carga axial producida por el actuador neumático. Para el control del actuador existe una electroválvula neumática 5/2.

2.1.5.2 Carga radial sobre un eje de transmisión

Este sistema está diseñado con el objetivo de identificar las diferentes anomalías que sufren los ejes y rodamientos en situaciones reales. La carga radial tiene la característica de ser transmitida a lo largo de todo el eje [42]. En la figura 2.7 se muestra la configuración y los elementos utilizados en el montaje de este sistema. La descripción de los respectivos elementos de la carga radial se muestra en la tabla 2.3.

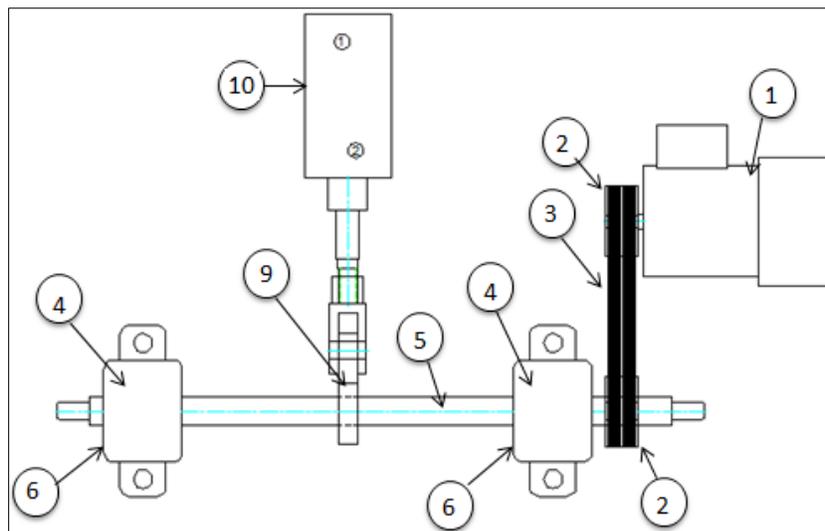


Figura 2.7. Elementos de la carga radial. Fuente: Los autores

Para el montaje de esta configuración se utiliza un mecanismo (9), que sirve para acoplar radialmente el actuador neumático al eje de transmisión, dentro de este mecanismo existe un rodamiento rígido de bolas para soportar la carga radial producida por el actuador neumático. Para el control del actuador existe una electroválvula neumática 5/2.

2.1.5.3 Desbalance de una masa

Este sistema consta de dos discos con agujeros para provocar problemas de desbalanceo mecánico, en los agujeros se montan masas medidas para su fácil identificación al momento

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

de la corrección [42]. Se puede simular dos tipos de desbalanceo a saber: desbalanceo estático lo cual se logra utilizando en el montaje un solo disco y desbalanceo dinámico utilizando los dos disco de desbalanceo.

En la figura 2.8 se muestra la configuración y los elementos utilizados en el montaje del desbalanceo dinámico. La descripción de los respectivos elementos de este sistema se muestra en la tabla 2.3.

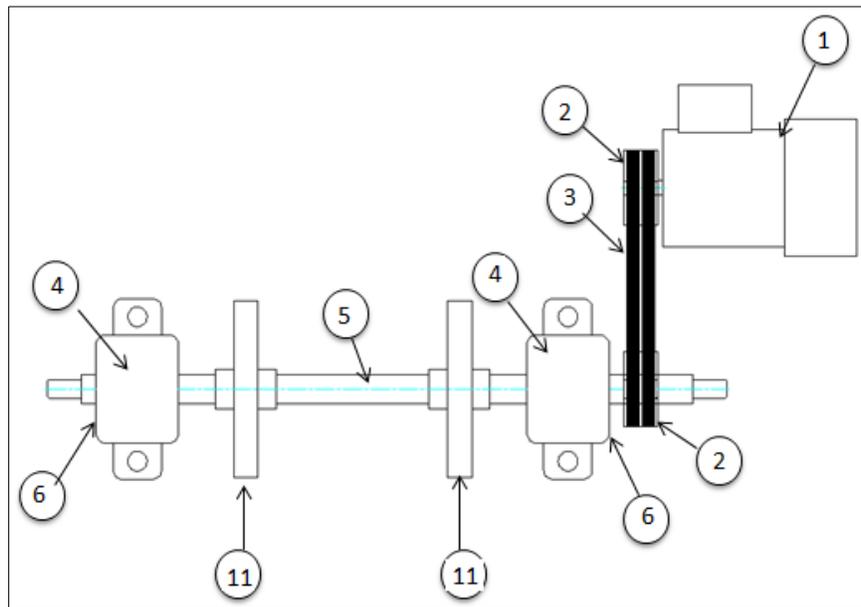


Figura 2.8. Elementos de desbalanceo dinámico. Fuente: Los autores

Para el montaje de este sistema se debe fijar los discos de desbalanceo en el eje, utilizando prisioneros para evitar el desplazamiento de los mismos.

2.1.5.4 Caja reductora de velocidad

El diseño de este sistema es de una transmisión de dos etapas de reducción, dos salidas de movimiento tanto para la primera como para la segunda etapa. Su diseño también está realizado de tal forma que permite el montaje de engranajes de diente recto o engranajes de dientes helicoidales [42].

El objetivo de este sistema es el de simular fallos en los engranajes, rodamientos y desalineación de ejes que están en el interior de la misma. Los mismos que pueden ser

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

detectados e identificados al realizar las pruebas. Las pruebas pueden realizarse con lubricación o sin lubricación. En la figura 2.9 se muestra la configuración y los elementos utilizados en el montaje de este sistema. La descripción de los respectivos elementos de la caja reductora se muestra en la tabla 2.3.

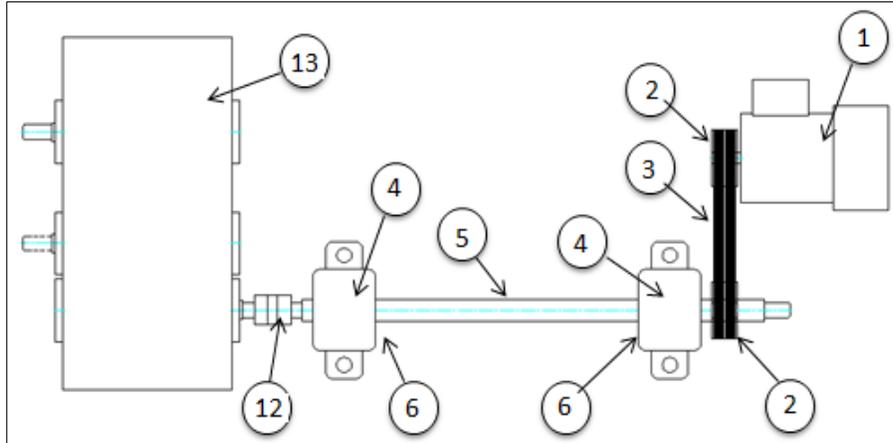


Figura 2.9. Elementos para montaje de la caja reductora. Fuente: Los autores

Para el montaje de este sistema se requiere de una alineación precisa entre eje de transmisión y el eje de entrada de la caja reductora, lo cual se logra por medio de la utilización del reloj comparador.

En la figura 2.10 se muestran los elementos internos que conforman la caja reductora. La descripción de los respectivos elementos se muestra en la tabla 2.3.

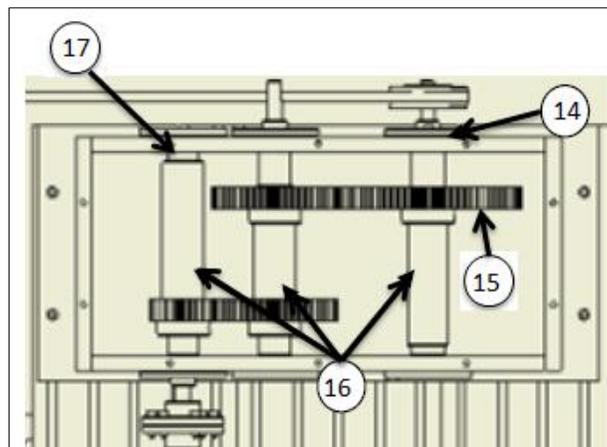


Figura 2.10. Elementos internos de la caja reductora. Fuente [42]

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

Tabla 2.3. Descripción de los elementos de los sistemas mecánicos rotativos. Fuente: Los autores

Posición	Elemento
1	Motor de 2 HP
2	Polea SPA 71 X 2
3	Banda elástica A-43
4	Soporte de pie de dos piezas SKF para rodamientos, SNL -507-C06
5	Eje de transmisión
6	Rodamiento SKF, 22207 EK/C3
7	Mecanismo de acoplamiento para la carga axial
8	Actuador neumático FESTO, DNCB-80-50-PPV-A
9	Mecanismo de acoplamiento para la carga radial
10	Actuador neumático FESTO, DNCB-80-50-PPV-A
11	Disco de desbalanceo
12	Matrimonio elástico, diámetro 20 mm
13	Caja reductora
14	Tapas de los apoyos de los ejes de transmisión
15	Juego de engranajes rectos
16	Ejes de transmisión
17	Juego de rodamientos

2.1.6 Combinación de los sistemas mecánicos rotativos

Los sistemas antes mencionados se pueden combinar formando una línea completa de producción para simular daños en engranajes y rodamientos, en la figura 2.4 se puede observar la combinación montada sobre el banco de vibraciones. Para la toma de señales de vibración se trabajará con este sistema rotativo combinado y de acuerdo con la selección de fallos se realizara el montaje de los elementos con los daños en engranajes y rodamientos. A continuación se detalla la disposición de fallos en engranajes, rodamientos y perturbaciones en los ejes.

2.2 Disposición de fallos en los elementos de los sistemas mecánicos rotativos

2.2.1 Fallos en engranajes

En los engranajes los fallos se producen a causa de:

- Construcción inadecuada de las ruedas dentadas
- Rectificado incorrecto de las ruedas dentadas

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

- Tratamiento térmico imperfecto en los dientes de las ruedas dentadas
- Fallos en los rodamientos

Las formas en que pueden fallar los engranajes son muy diversas, pero pueden determinarse por medio de un cuidadoso análisis debido a que cada tipo de fallo deja una pista característica en los dientes [43]. Se pueden distinguir cinco tipos de fallos los cuales se muestran en la figura 2.11



Figura 2.11. Tipos de fallos en ruedas dentadas. Fuente [44]

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

La profundización sobre las características de los fallos en engranajes no se aborda en este proyecto debido a que ya se realizó una investigación detallada sobre el tema en el trabajo anterior a este, el cual corresponde a la referencia bibliográfica [44] de este documento.

También en las referencias bibliográficas [43][45][46][47][48] se realiza una descripción detallada, características e ilustraciones de los principales fallos que se producen en los engranajes.

2.2.1.1 Designación y selección de engranajes para la construcción de fallos

La designación de los elementos dentados dentro de la caja reductora, es el primer parámetro que se determina para la construcción de los fallos en engranajes, la cual se muestra en la figura 2.12.

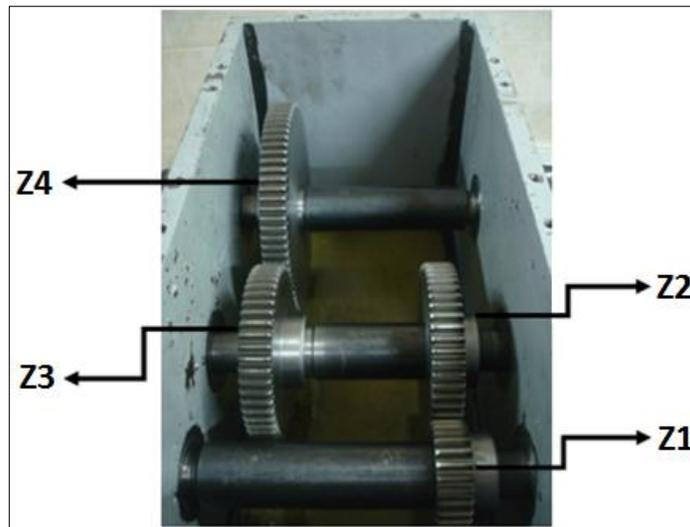


Figura 2.12. Designación de ruedas dentadas en la caja de engranajes. Fuente [44]

En la tabla 2.4, se presenta las características de cada una de las ruedas dentadas de la caja de engranajes.

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

Tabla 2.4. Datos constructivos de los engranajes. Fuente: Los autores

Engranajes	Módulo	Número de dientes	Diámetro primitivo (mm)	Diámetro exterior (mm)	Diámetro interior (mm)	Altura diente (mm)	Ancho diente (mm)	# engranajes disponibles
Z1	2.5	27	60.75	65.25	36.5125	5.062	20	8
Z2 y Z3	2.5	53	119.25	123.75	36.5125	5.062	20	10
Z4	2.5	80	180	184.5	36.5125	5.062	20	4

Tomando en cuenta los fallos más comunes en las ruedas dentadas y la designación mostrada en la figura 2.12, se selecciona las ruedas para la construcción de fallos de la manera presentada en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Selección de ruedas dentadas para la construcción de los fallos. Fuente: Los autores

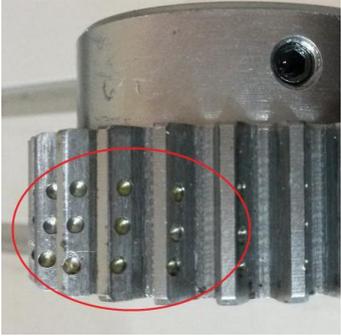
Ruedas dentadas	Tipo de fallo
Z1 y Z3	Fallo por desgate
	Fatiga superficial
Z2 y Z4	Rayado y escoriado
	Rotura de dientes

2.2.1.2 Construcción de fallos en los engranajes

Para la construcción de los fallos en los engranajes, es necesario hacer una revisión bibliográfica referente a las experimentaciones realizadas en otras instituciones con el objetivo de no repetir los fallos ya construidos. En la referencia bibliográfica [44], se ofrecen cuadros de resumen de las experimentaciones realizadas en otras instituciones, en donde se describe de forma detallada las características y dimensiones del fallo construido sobre los engranajes.

Con base a la investigación de la bibliografía se han construido fallos en los engranajes, los cuales están a disposición en el laboratorio de vibraciones. En la tabla 2.6, se presenta los datos de constructivos de cada fallo que están presentes en las ruedas dentadas.

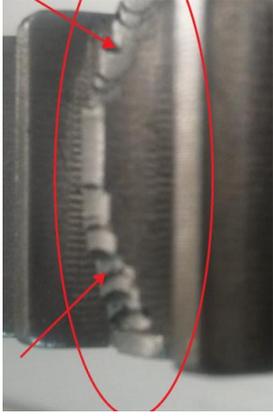
Tabla 2.6. Fallos constructivos en los engranajes. Fuente: Los autores

DESIGNACIÓN DE FALLOS	TIPO DE FALLO	DIMENSIONES DEL FALLO	IMAGEN
Z1_2_1	Fallo por desgaste	Desgaste, 2 líneas a lo largo de la cara del diente Profundidad de 0.4 mm Ancho 0.7 mm Separación entre líneas 0.7 mm	
Z1_3_1	Fatiga superficial	Picadura de los dientes, al 100 % Agujeros de 2.5 mm de diámetro Ángulo del agujero a 120°	

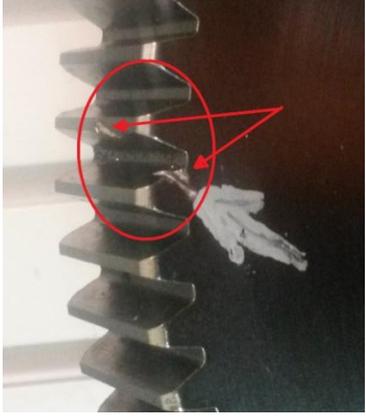
Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

<p>Z2_2_1</p>	<p>Rayado y escoriado</p>	<p>Escoriado a lo largo de la cara del diente, al 100 % Profundidad de 0.2 mm Ancho 0.7 mm</p>	
<p>Z2_2_2</p>	<p>Rayado y escoriado</p>	<p>Rayado a lo largo de la cara del diente Profundidad de 0.5 mm Ancho 0.7 mm Separación entre líneas 1.2 mm</p>	
<p>Z2_2_3</p>	<p>Rayado y escoriado</p>	<p>Escoriado a lo largo de la cara del diente, al 100 % Profundidad de 1 mm Ancho 2.5 mm</p>	

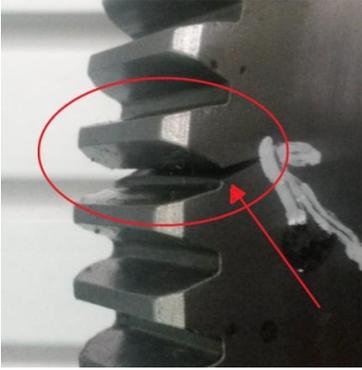
Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

Z2_3_1	Rotura del diente	Rotura del diente al 25 %	
Z2_3_2	Rotura del diente	Rotura del diente al 50 %, ángulo de la grieta a 45	
Z2_3_3	Rotura del diente	Rotura del diente al 100 %	

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

<p>Z3_2_1</p>	<p>Fallo por desgaste</p>	<p>Desgaste, 2 líneas a lo largo de la cara del diente Profundidad de 0.4 mm Ancho 0.7 mm Separación entre líneas 0.3 mm</p>	
<p>Z4_2_1</p>	<p>Rayado y escoriado</p>	<p>Escoriado al 50 % 0.7 mm a lo largo del perfil del diente 8 mm a través de la cara del diente 0.5 mm de profundidad</p>	
<p>Z4_3_1</p>	<p>Rotura del diente</p>	<p>Grieta de 4 mm a 45° y 25% de profundidad</p>	

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

Z4_3_2	Rotura del diente	Grieta a lo largo del diente, al 100% Ancho 1 mm Profundidad 4 mm	
--------	-------------------	---	---

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

2.2.2 Fallos en rodamientos

Los fallos en los rodamientos generalmente se atribuyen a la mala lubricación, manejo inadecuado, selección equivocada del rodamiento, holgura en eje o alojamiento del rodamiento [49].

Alrededor del 40% de los rodamientos fallan por mala lubricación, el 30% de los rodamientos fallan por causas de montaje incorrecto y alrededor del 30% fallan por otras causas como sobrecarga y defectos de manufactura [50].

En la figura 2.13 se presenta un cuadro de resumen de los principales daños que se pueden producir en rodamientos.

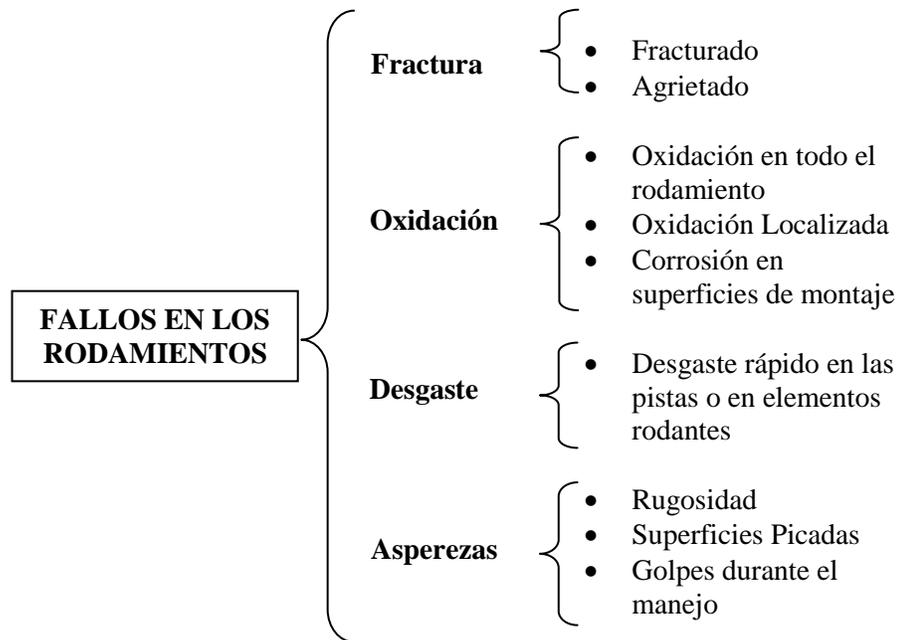


Figura 2.13. Tipos de fallos en los rodamientos. Fuente [44][51]

Existen muchas publicaciones sobre fallos en rodamientos principalmente de los fabricantes. En las referencias bibliográficas [44][46][51][52][53][54][55] se puede encontrar una descripción detallada, características e ilustraciones de los daños en rodamientos tanto en la pista externa, pista interna y los elementos rodantes.

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

2.2.2.1 Designación de los rodamientos para la construcción de fallos

La designación de los rodamientos dentro de la caja es el parámetro necesario para la construcción de los respectivos fallos, en la figura 2.14 se muestra la designación en la caja reductora.

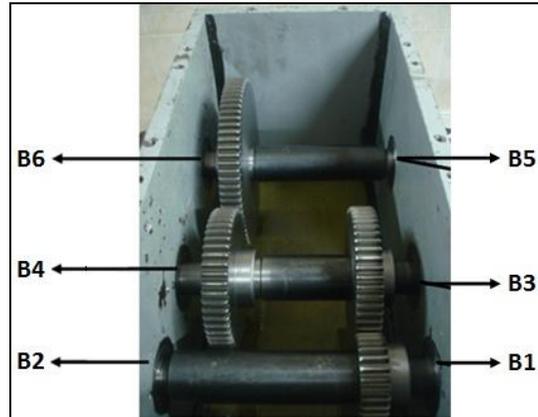


Figura 2.14. Designación de los rodamientos. Fuente [44]

En la figura 2.15 se presenta las características de los rodamientos utilizados en la caja reductora.

NTN Part Number		6005ZC3/0G
Weight		N/A (lbs) / N/A (kg)
DIMENSIONS		
DIMENSION	IMPERIAL	METRIC
Bore d	0.9843 (in)	25.000 (mm)
O.D.D.	1.8504 (in)	47.000 (mm)
Width B or W	0.4724 (in)	12.000 (mm)
rs min	0.0236 (in)	0.600 (mm)
D1 max	1.7559 (in)	44.600 (mm)
a max	0.0811 (in)	2.060 (mm)
b min	0.0532 (in)	1.350 (mm)
ro max	0.0157 (in)	0.400 (mm)
rns min	0.0197 (in)	0.500 (mm)
D2 max	2.0748 (in)	52.700 (mm)
f max	0.0441 (in)	1.120 (mm)
da min	1.1417 (in)	29.000 (mm)
da max	1.2008 (in)	30.500 (mm)
Da max	1.6929 (in)	43.000 (mm)
ras max	0.0236 (in)	0.600 (mm)
Dx min	2.1063 (in)	53.500 (mm)
Cy max	0.1142 (in)	2.900 (mm)
Cz min	0.0472 (in)	1.200 (mm)
rns max	0.0197 (in)	0.500 (mm)

Figura 2.15. Características de los rodamientos de la caja reductora. Fuente [56]

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

En la figura 2.16 se muestra la designación de los rodamientos en el eje de transmisión.

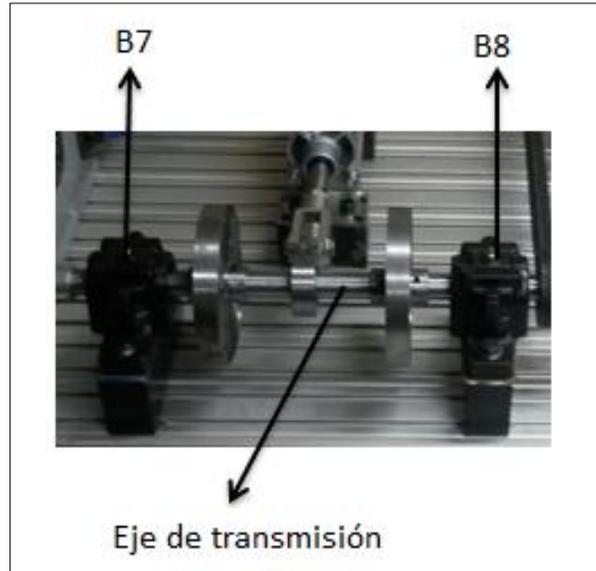


Figura 2.16. Designación de los rodamientos del eje de transmisión. Fuente: Los autores

En la figura 2.17 se presenta las características de los rodamientos B7 Y B8 utilizados en el eje de transmisión de la figura 2.16.

Dimensiones principales			Capacidades de carga básica		Velocidades nominales		Designación
d	D	B	C	estática	Velocidad de referencia	Límite de velocidad	
mm			kN		rpm		* rodamiento SKF Explorer
35	72	23	86,5	85	9000	12000	22207 EK *

The technical drawing shows two cross-sections of a bearing. The left section shows dimensions: $K = 2$, $b = 3,7$, $r_{1,2min} = 1,1$, $D = 72$, $D_1 = 61,8$, $B = 23$, $d = 35$, and $d_2 = 44,5$. The right section shows $r_{amax} = 1$ and $D_{amax} = 65$. Below the drawings are the calculation factors: $e = 0,31$, $Y_1 = 2,2$, $Y_2 = 3,3$, and $Y_0 = 2,2$.

Figura 2.17. Características de los rodamientos del eje de transmisión. Fuente [57]

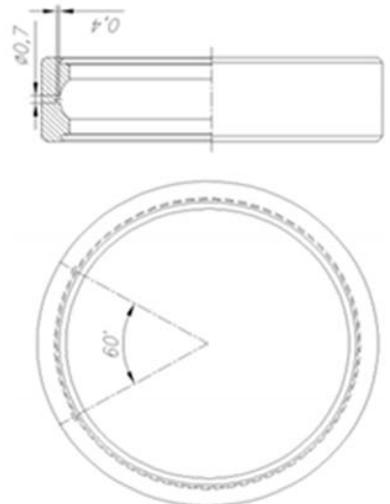
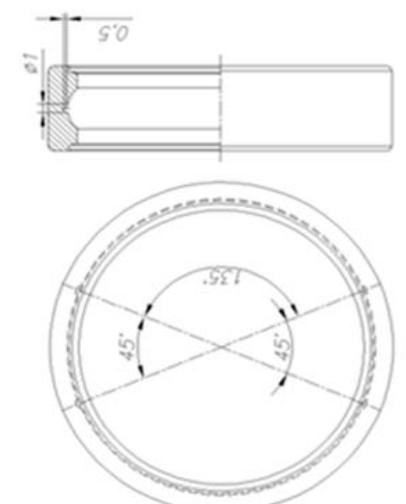
Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

2.2.2.2 Construcción de fallos en los rodamientos

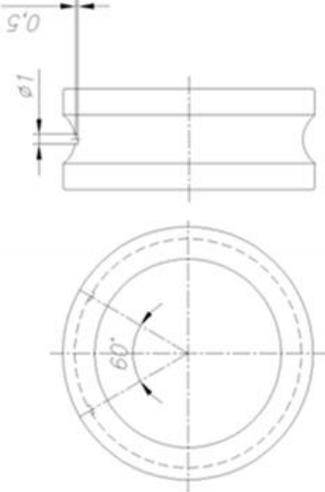
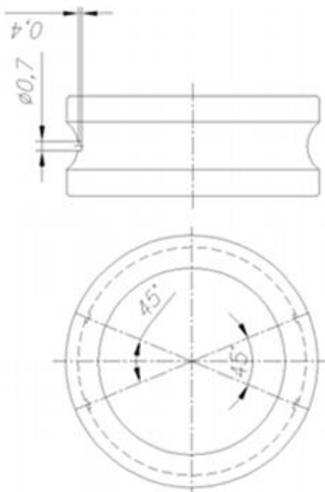
Con el fin de construir los fallos en los rodamientos, se debe hacer una revisión bibliográfica concerniente a las experimentaciones realizadas en otras instituciones para asegurar que no se repitan los fallos en rodamientos ya construidos. En la referencia bibliográfica [44], se ofrecen cuadros de resumen de las experimentaciones realizadas en otras instituciones, en donde se describe de forma detallada las características y dimensiones del fallo construido sobre los rodamientos.

Con base a esta investigación de la bibliografía, se han construido fallos en los rodamientos en: la pista externa, la pista interna, y en los elementos rodantes. En la tabla 2.7 se presenta los datos constructivos de cada fallo que están a disposición en el laboratorio de vibraciones.

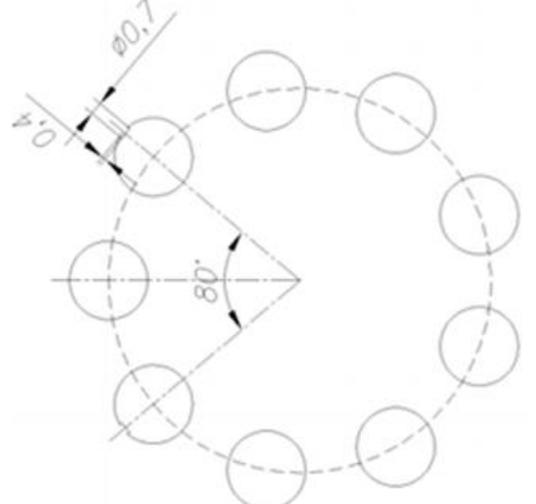
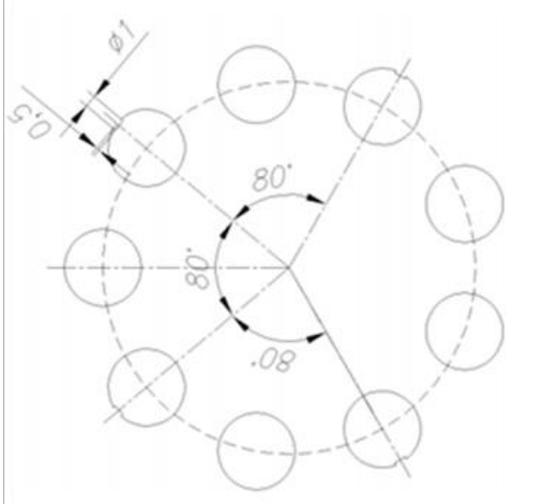
Tabla 2.7. Fallos constructivos en rodamientos. Fuente: Los autores

PARTE DEL RODAMIENTO	DIMENSIONES DEL FALLO	DESCRIPCIÓN	NÚMERO DE ELEMENTOS DISPONIBLES	IMAGEN
RODAMIENTO 6005 Z C3/0G				
Pista exterior	<p>Dos picaduras separada a 60°, de 0.7 mm de diámetro y 0.4 mm de profundidad</p>	2_1	3	
	<p>Cuatro picaduras (2 y 2 opuestas) con ángulo de 45°, de 1 mm de diámetro y 0.5 mm de profundidad</p>	2_2	3	

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

<p>Dos picaduras separadas a 60°, de 1 mm de diámetro y 0.5 mm de profundidad</p>	<p>3_1</p>	<p>3</p>	
<p>Cuatro picaduras (2 y 2 opuestas) con ángulo de 45°, de 0.7 mm de diámetro y 0.4 mm de profundidad</p>	<p>3_2</p>	<p>3</p>	
<p>Pista interior</p>			

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

	
<p>3</p>	<p>3</p>
<p>4_1</p>	<p>4_2</p>
<p>Dos picaduras en la bola separadas a 80°, de 0.7 mm de diámetro y 0.4 mm de profundidad</p>	<p>Cuatro picaduras dispersas en la bola, de 1 mm de diámetro y 0.5 mm de profundidad</p>
<p>Elemento rodante</p>	

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

RODAMIENTO 22207 EK/C3				
Pista exterior	Picadura de 1.5 mm de diámetro y profundidad de 0.15 mm	2_1	1	
Elemento rodante	Picadura de 1 mm de diámetro y profundidad de 0.15 mm	3_1	1	

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

2.2.3 Perturbaciones en los ejes de transmisión

Los efectos de las perturbaciones en los ejes de transmisión constituyen uno de los principales motivos por los que llegan al fallar más rápidamente los rodamientos, por tal motivo se ha visto la necesidad de tomar las señales de vibración tomando en cuenta estas perturbaciones las cuales pueden ser: desbalanceo, desalineación, carga axial y carga radial sobre los ejes.

El banco de vibraciones permite por su diseño aplicar estas perturbaciones sobre el eje de transmisión mostrado en la figura 2.16, para realizar las pruebas tomando en cuenta las perturbaciones es necesario conocer la teoría que se maneja alrededor de ellas.

2.2.3.1 Desbalanceo

El desbalanceo es uno de los fallos más comunes en maquinaria rotativa. Esta se produce cuando al girar el rotor o eje, se genera una fuerza centrífuga vertical hacia afuera, lo que hace que el eje del rotor se fleje y la fuerza sea transmitida a los descansos de la máquina [58][59].

Las fuerzas de desbalanceo en maquinaria producirán vibraciones en los rodamientos, donde las componentes verticales son las predominantes[59].

Las máquinas están sujetas a diferentes condiciones de desbalanceo, las más importantes se llaman estáticas y dinámicas [50].

2.2.3.1.1 Desbalanceo estático

El desbalanceo estático de la figura 2.18, es una condición donde el centro de gravedad del rotor no está ubicado sobre su eje de rotación. Este tipo de desbalanceo es equivalente a un punto pesado en un punto único del rotor y se podrá ver que si se coloca el rotor en una arista de presión nivelada, el punto pesado siempre buscará la posición más baja.

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

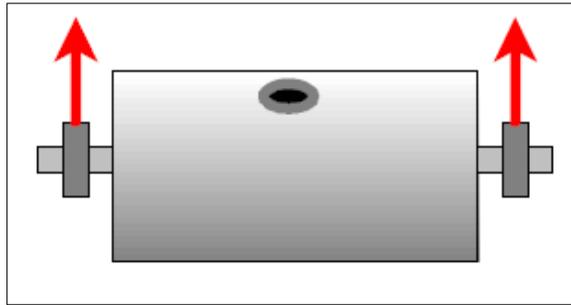


Figura 2.18. Desbalanceo estático. Fuente [50]

Un desbalanceo estático puro, producirá un fuerte pico 1x en el espectro de vibraciones y su amplitud será proporcional a la gravedad del desbalanceo y al cuadrado de las RPM [50].

2.2.3.1.2 Desbalanceo dinámico

El desbalanceo dinámico de la figura 2.19, es la combinación entre el desbalanceo estático y el desbalanceo por par de fuerzas. Un rotor con desbalanceo de par de fuerzas puede ser balanceado estáticamente y puede parecer que está perfectamente balanceado cuando se le coloca en una arista de presión nivelada. Pero al girar el rotor producirá fuerzas centrífugas en los rodamientos que estarán en fase opuesta.

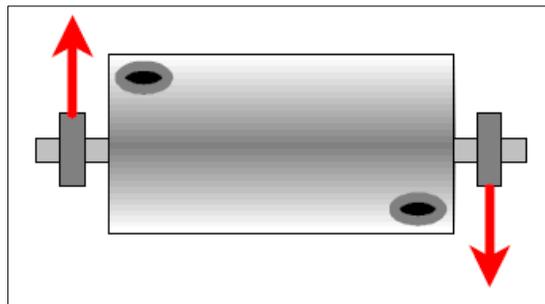


Figura 2.19. Desbalanceo por par de fuerzas. Fuente [50]

Cuando se está examinando un espectro sin información acerca de fase, no se puede distinguir el desbalanceo estático del dinámico. Para corregir el desbalanceo dinámico se necesita un trabajo de balanceo en varios planos y el desbalanceo estático teóricamente se puede corregir con un solo peso de corrección. El peso de corrección debe ser colocado exactamente al lado opuesto al desbalanceo lo que a veces no será fácil [50].

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

2.2.3.2 Desalineación de ejes

Es una condición en la que las líneas centrales de flechas acopladas no coinciden. Por ejemplo: si las líneas centrales de las flechas desalineadas están paralelas pero no coinciden, entonces es llamada desalineación paralela. Si las flechas desalineadas se juntan pero no son paralelas, entonces es llamada desalineación angular. Existe otro tipo de desalineación la cual es la combinación entre la desalineación paralela y la desalineación angular [50][58][59]. En la práctica la desalineación combinada es la que se presenta con más frecuencia en las máquinas rotatorias.

2.2.3.2.1 Desalineación paralela

La desalineación paralela produce una fuerza de cizallamiento y un momento de flexión en la extremidad acoplada de cada flecha. Los niveles vibratorios se producen en las direcciones horizontales o verticales en los rodamientos en cada lado del acoplamiento, y son de fase opuesta. En la figura 2.20 se muestra la desalineación paralela sobre dos ejes acoplados entre sí.

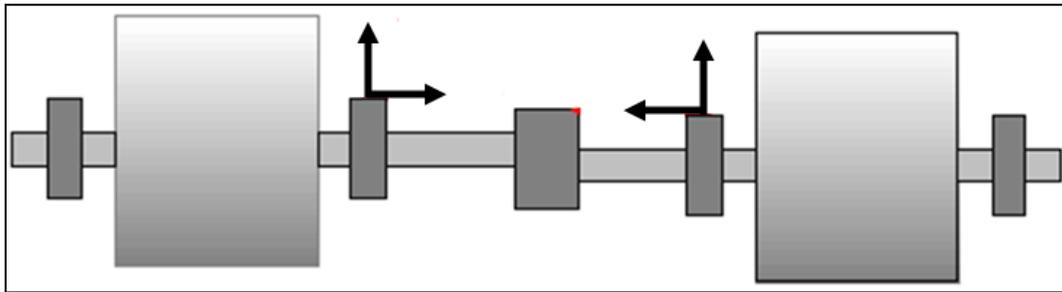


Figura 2.20. Desalineación paralela. Fuente [50]

Dentro de la desalineación paralela se pueden distinguir dos tipos de desalineación las cuales son: desalineación paralela horizontal y desalineación paralela vertical.

2.2.3.2.2 Desalineación angular

La desalineación angular produce un momento de flexión en cada flecha, los niveles vibratorios se producen en la dirección axial en ambos rodamientos y de fase opuesta. También habrá niveles relativamente fuertes en direcciones verticales y/o axiales [50]. En la figura 2.21 se muestra la desalineación angular sobre dos ejes acoplados.

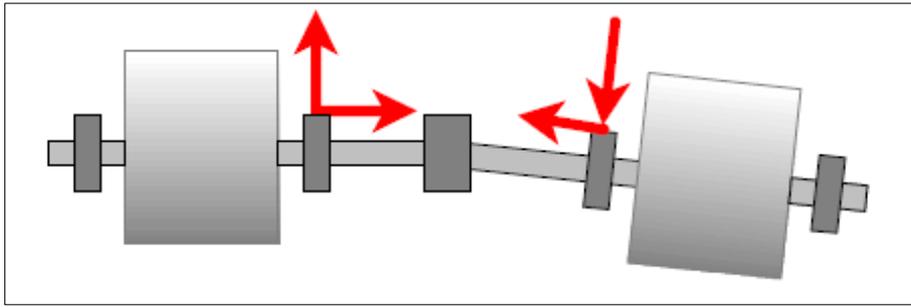


Figura 2.21. Desalineación angular. Fuente [50]

2.2.3.3 Cargas y precargas inducidas

Las cargas inducidas dinámicamente en ejes giratorios constituyen el más común y menos comprendido de los comportamientos de máquinas y son también ellas las que contribuyen mayormente al fallo de la máquina.

La precarga es definida como una fuerza direccional que, por motivos de diseño, es aplicada a un eje giratorio. Un ejemplo de precarga es la tensión lateral creada por una correa.

La carga inducida es una fuerza direccional desequilibrada en la máquina, en donde la fuerza está creada por el funcionamiento dinámico de la máquina. Un ejemplo de carga inducida es la inestabilidad creada por la obstrucción de la corriente de aire de un ventilador.

El resultado de la precarga y de la carga inducida es la flexión del eje en un cuadrante de los rodamientos. Esto origina una resistencia no lineal y que la constante de reacción de los rodamientos sea mayor en oposición a la fuerza que lo es perpendicularmente a ella; lo que causará un desgaste prematuro del rodamiento y puede ser motivo de serias averías en la máquina [60].

Se puede simular cargas y precargas inducidas aplicando carga axial y radial sobre los ejes de transmisión mediante los actuadores neumáticos instalados en el banco de vibraciones.

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

2.3 Configuración de fallos combinados en engranajes, rodamientos y ejes

La combinación de fallos en los elementos del sistema se realiza tomando ciertas consideraciones con el objetivo de reducir el número de las mismas y de manejar un número razonable de datos que sea acorde con las condiciones reales de la maquinaria en la industria. Las consideraciones que se tomaron son las siguientes:

- 1) Para la combinación de fallos en los engranajes se toma en cuenta la construcción de fallos en las ruedas existentes como se muestra en la tabla 2.9, lo que restringe la posibilidad de que puedan presentarse todos los fallos en las cuatro ruedas dentadas.
- 2) Para la combinación de fallos en los rodamientos de la caja de engranajes se restringe que: de los seis rodamientos, solo dos rodamientos presenten fallo; debido a que en cajas de engranajes no es muy común que se produzcan varios fallos en rodamientos a la vez.
- 3) Para la combinación con desalineación de ejes en la caja de engranajes se restringe que: de los tres ejes que se tienen en la caja de engranajes, solo un eje presente desalineación angular; debido a que por características constructivas de la caja de engranajes no se puede aplicar los demás tipos de desalineación.
- 4) Para la combinación de fallos en los rodamientos del eje de transmisión se restringe que: de los dos rodamientos que se tienen, solo uno presente fallo a la vez.
- 5) En el eje de transmisión se restringe que: presente carga radial, carga axial, desbalanceo dinámico, desbalanceo estático y desalineación combinada, en cada combinación se presenta solo una de ellas a la vez.

La combinación de los fallos en engranajes, rodamientos y ejes se lo realiza utilizando el software Matlab. Para ello se establece primero, cada tipo de fallo con su respectiva numeración que servirán como parámetros para realizar la combinación. Estos parámetros se muestran en la tabla 2.8.

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

Tabla 2.8. Parámetros para realizar la combinación en Matlab. Fuente: Los autores

Numeración	Tipo de fallo
Común en Engranajes , Rodamientos y ejes	
1	sin fallo
En sección Engranajes para Z1 – Z3	
2	Fallos por desgaste
3	Fatiga Superficial
En sección Engranajes para Z2 – Z4	
2	Rayado y escoriado
3	Rotura de diente
En sección Rodamientos de la caja	
2	Fallo pista exterior
3	Fallo Pista Interior
4	Fallo de los elementos rodantes
En sección ejes de la caja	
2	Desalineación angular
En sección Rodamientos del eje de Transmisión	
2	Fallo pista exterior
3	Fallo del elemento rodante
En sección eje de Transmisión	
2	Desalineación combinada
3	Desbalanceo estático
4	Desbalanceo dinámico
5	Carga axial
6	Carga radial

Con estos parámetros establecidos se procede a utilizar la siguiente programación:

Unique(nchoosek(repmat([1:n],1,k),'rows'))

La cual proporciona un número total de 5184 combinaciones de fallos en los engranajes y rodamientos con perturbaciones en los ejes del sistema rotativo. En la tabla 2.9 se presenta una parte de las combinaciones obtenidas a través del software Matlab. La programación total para obtener la combinación completa se muestra en el Anexo 1.

Capítulo 2: Configuración de los sistemas mecánicos rotativos

Tabla 2.9. Parte de la combinación de fallos en engranajes, rodamientos y ejes. Fuente: Los autores

	Z1-Z3	Z2-Z4	S-CAJA	B1-B3-B5	B2-B4-B6	B7-B8	S4
Combinación 1	1	1	1	1	1	1	1
Combinación 2	1	1	1	1	1	1	2
Combinación 3	1	1	1	1	1	1	3
Combinación 4	1	1	1	1	1	1	4
Combinación 5	1	1	1	1	1	1	5
Combinación 6	1	1	1	1	1	1	6
Combinación 7	1	1	1	1	1	2	1
Combinación 8	1	1	1	1	1	2	2
Combinación 9	1	1	1	1	1	2	3
Combinación 10	1	1	1	1	1	2	4
Combinación 11	1	1	1	1	1	2	5
Combinación 12	1	1	1	1	1	2	6
Combinación 13	1	1	1	1	1	3	1
Combinación 14	1	1	1	1	1	3	2
Combinación 15	1	1	1	1	1	3	3
Combinación 16	1	1	1	1	1	3	4
Combinación 17	1	1	1	1	1	3	5
Combinación 18	1	1	1	1	1	3	6
Combinación 19	1	1	1	1	2	1	1
Combinación 20	1	1	1	1	2	1	2

En la cual:

Tabla 2.10. Representación de los elementos del sistema. Fuente: Los autores

Representación	Elemento
Z1-Z3	Rueda dentada 1 y 3 de la caja de engranajes
Z2-Z4	Rueda dentada 2 y 4 de la caja de engranajes
S-CAJA	Ejes de la caja de engranajes
B1-B3-B5	Rodamiento 1, 3 y 5 de la caja de engranajes
B2-B4-B6	Rodamiento 2,4 y 6 de la caja de engranajes
S4	Eje de transmisión acoplado a la caja de engranajes
B7-B8	Rodamiento 7 y 8 del eje de transmisión

CAPÍTULO 3

3. BASE DE DATOS DE LAS SEÑALES DE VIBRACIÓN

3.1 Protocolo para la toma de señales de la base de datos

Con la finalidad de establecer la toma de señales de vibración se debe especificar las características de los equipos y todos los parámetros necesarios para la toma de señales de vibración.

3.1.1 Equipos de medición para la toma de señales de vibración

Los equipos de medición son el medio por el cual se puede adquirir las señales de vibración. Los equipos involucrados en este proceso se describen a continuación.

3.1.1.1 Software para realizar las pruebas

El software utilizado para realizar las pruebas fue diseñado en LabView y desarrollado en la Universidad Politécnica Salesiana, el cual de acuerdo a las características de su diseño es capaz de realizar la toma de señales a diferentes cargas y velocidades aplicadas al motor, con la opción también de variar parámetros tales como: tiempo de muestreo, frecuencia de muestreo y número de muestras para cada prueba. Previo a cada prueba se debe establecer primero los parámetros variables los cuales son:

- Velocidad mínima
- Carga mínima
- Intervalos de velocidad
- Intervalos de carga
- Velocidad máxima
- Carga máxima

En la figura 3.1 se muestra el cuadro de dialogo que ofrece el programa para configurar los parámetro antes mencionados.

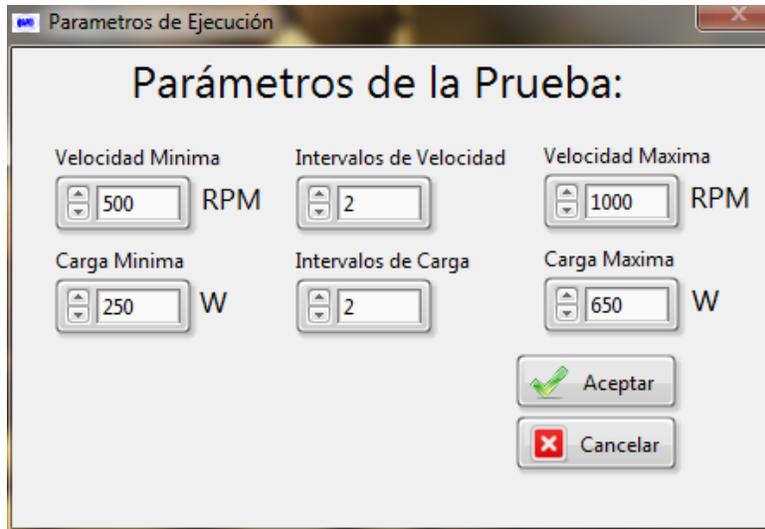


Figura 3.1. Parámetros variables para las pruebas. Fuente: Los autores

3.1.1.2 Tarjetas de adquisición de datos

Las tarjetas de adquisición son instrumentos utilizados para la toma de un conjunto de señales de vibración, convertirlas en señales eléctricas y digitalizarlas de tal manera que puedan ser procesadas en una computadora. Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace esta transformación es el módulo de digitalización o DAQ (data acquisition systems). En este proyecto se trabaja con dos tarjetas de adquisición de datos las cuales se describen a continuación.

La tarjeta DAQ de NATIONAL INSTRUMENTS está formada por dos componentes los cuales son:

- El chasis con código NI cDAQ-9191 de una ranura mostrado en la figura 3.2, envía los datos a una PC para su almacenamiento por vía Ethernet o WI-FI.

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración



Figura 3.2. NI cDAQ-9191. Fuente: Los autores

- El NI 9234 de National Instruments de la figura 3.3, es un módulo de cuatro canales de la Serie C para adquisición de señal. El NI 9234 proporciona rango dinámico de 102 dB e incorpora acondicionamiento de señales IEPE seleccionable por software para acelerómetros y micrófonos. Los cuatro canales de entrada digitalizan señales simultáneamente a rangos de hasta 51.2 kHz por canal con filtros integrados anti-aliasing que ajustan automáticamente su rango de muestreo. En este módulo están conectados dos acelerómetro y dos sensores acústicos que toman la respectivas señales emitidas por los sistemas mecánicos rotativos. Este módulo debe ser insertado en el chasis NI cDAQ-9191.



Figura 3.3. Módulo NI 9234. Fuente: Los autores

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

La tarjeta DAQ ERBESSED INSTRUMENTS mostrada en la figura 3.4, es de un solo cuerpo, en la cual está conectado un acelerómetro triaxial que sirve para tomar las señales de vibración en dirección de los tres ejes coordenados, además de ello también se conecta un tacómetro que permite obtener las señales a la frecuencia de rotación del motor. El tacómetro utilizado se muestra en la figura 3.5.



Figura 3.4. Tarjeta DAQ ERBESSED INSTRUMENTS. Fuente: Los autores



Figura 3.5. Tacómetro digital compact. Fuente: Los autores

3.1.1.3 Acelerómetros

Los acelerómetros son generalmente los transductores que más se utilizan para medir vibraciones, constan de un material piezoeléctrico localizado en su interior que transforma las variaciones de vibración en una señal eléctrica.

Los acelerómetros utilizados en este proyecto para la toma de señales de vibración se muestran en la figura 3.6 y 3.7, los cuales se fijan a la superficie de medición por medio de rosca.



Figura 3.6. Acelerómetro uniaxial PCB 352C03. Fuente: Los autores



Figura 3.7. Acelerómetro triaxial ERBESSD INSTRUMENTS. Fuente: Los autores

Las especificaciones del acelerómetro PCB de la figura 3.6 están dadas en unidades del sistema inglés y son las siguientes:

- Acelerómetro UNIAXIAL
- Modelo 352C03
- Sensibilidad 10.06 mV/g
- Rango de medición ± 500 g pk
- Rango de frecuencia ($\pm 5\%$) 0.5 a 10000 Hz
- Rango de frecuencia ($\pm 5\%$) 0.3 a 15000 Hz

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

- Resolución de ancho de banda 0.0005 g rms
- Frecuencia de resonancia $\geq 50\text{KHz}$

Las especificaciones del acelerómetro ERBESSD INSTRUMENTS de la figura 3.7 están dadas en unidades del sistema inglés y son las siguientes:

- Acelerómetro TRIAXIAL
- Sensibilidad 330 mV/g
- Rango de frecuencia 1 a 8000 Hz
- Rango de amplitud 6g pico-pico

3.1.2 Lubricación de la caja de engranajes

La lubricación en las cajas de engranajes juega un papel fundamental, porque de ello dependerá su correcto funcionamiento y vida útil. El lubricante que se coloque dentro de la caja reductora tiene la misión de lubricar, refrigerar, proteger y evitar el desgaste prematuro de los elementos dentados reduciendo la fricción entre ellos. Muchas veces se subestima la selección de un lubricante, decidiendo lubricar con el producto más barato disponible localmente. A veces esta decisión puede traer consecuencias desastrosas, desde fallos de las cajas reductoras hasta accidentes costosos. Por ello es muy importante que se seleccione correctamente el tipo de lubricante para la caja de engranajes.

La caja de engranajes que se utilizará en este proyecto, está diseñada para realizar pruebas con lubricación y sin lubricación. En este proyecto se trabajará utilizando lubricación, por lo que resulta indispensable conocer el tipo y el nivel de aceite apto para la caja de engranajes.

3.1.2.1 Tipo de aceite

Los criterios primarios que tienen incidencia en la selección del tipo de aceite para cajas de engranajes son:

- Velocidad
- Carga
- Temperatura

Existen otros recursos disponibles que nos ayudan en la selección del aceite indicado, como por ejemplo el manual de productos lubricantes, el cual contiene información de las características de los aceites utilizados para la lubricación tales como: gravedad API, punto de fluidez, punto de inflamación, grado ISO VG y el N° de AGMA. Las características de los aceites están reguladas por la norma DIN 51412.

Teniendo en cuenta la norma y los parámetros mencionados anteriormente se ha seleccionado un aceite SAE 80 como ideal para la caja de engranajes [44].

Entre los aceites que se encuentran comercialmente y que poseen características de SAE 80, están los siguientes:

- MobilGear 630 –MOBIL
- Tivela S220-SHELL
- Gulf EP Lubricant HD 220
- Omala 220-SHELL [61][62]

El aceite utilizado para la caja de engranajes es el Gulf EP Lubricant HD 220, este es un aceite mineral, altamente refinado y contiene aditivos con alto grado de calidad. Las características de este aceite son las mostradas en la tabla 3.1.

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

Tabla 3.1. Características del aceite Gulf EP Lubricant HD 220. Fuente [63]

Grado de Viscosidad ISO		32	46	68	100	150	220
Cumple las siguientes Especificaciones							
DIN 51517 Part 3, ISO 12925-1 Type		X	X	X	X	X	X
CKC, AGMA 9005, D 94		X	X	X	X	X	X
David Brown S 1.53 101(E)		X	X	X	X	X	X
US Steel 224				X	X	X	X
Propiedades Típicas							
Parámetros de Prueba	Método ASTM	Valores Típicos					
Viscosidad @ 40 °C, cSt	D 445	32.1	46.3	68.2	100.2	148.7	218.8
Indice de Viscosidad	D 2270	99	98	98	98	97	96
Punto de Inflamación, °C	D 92	208	210	224	230	240	242
Punto de Ecurrimiento, °C	D 97	-12	-12	-12	-12	-9	-9
Densidad @ 15°C, Kg/l	D 1298	0.873	0.878	0.884	0.889	0.893	0.897
FZG, fail load stage	DIN 51354 PART II	>12	>12	>12	>12	>12	>12
Rust Test	D 665A/B	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass	Pass
Corrosión al Cobre	D 130	1a	1a	1a	1a	1a	1a
Prueba de Emulsión 30 minute max.	@ 54 °C	D 1401	Pass	Pass	Pass	-	-
	@ 82 °C		-	-	-	Pass	Pass

3.1.2.2 Nivel de aceite en la caja de engranajes

El depósito de aceite mostrado en la figura 3.8, es el lugar donde se debe colocar el aceite, el nivel de aceite que se coloque en el depósito es esencial para asegurar que, tanto los elementos dentados como los rodamientos sean lubricados eficientemente puesto que el método de lubricación de la caja es por salpicadura.

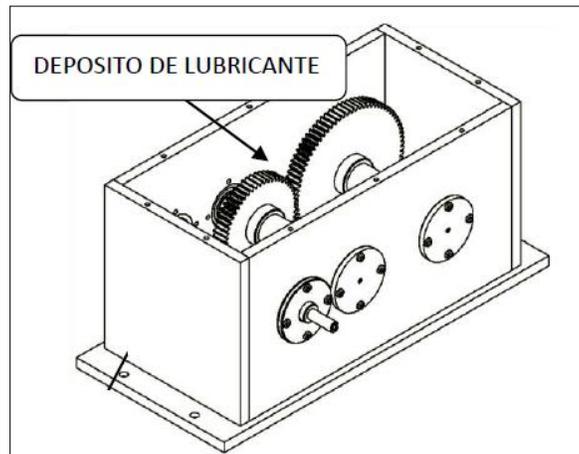


Figura 3.8. Depósito de lubricante. Fuente [42]

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

La lubricación por salpicadura mostrada en la figura 3.9, se emplea solamente en la lubricación de mecanismos cerrados, como en el caso de motores de combustión interna, compresores de pistón de simple efecto, cajas reductoras, etc. En el caso de la caja de engranajes uno o varios elementos de la caja se sumergen parcialmente en aceite y lo salpican hacia todas las partes internas que conforman el equipo por la acción de la rotación. Por lo tanto se debe de tener cuidado de mantener la cantidad de aceite en el nivel correcto. Se debe recordar que un nivel bajo de aceite da lugar a la fricción de los componentes que provocan el desgaste adhesivo, un nivel alto de aceite se convierte en una pérdida de potencia indeseable en la caja puesto que el aceite será agitado excesivamente [64].

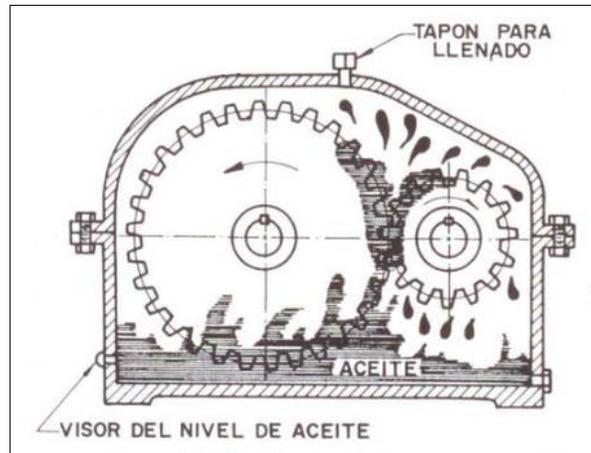


Figura 3.9. Reductor lubricado por salpicadura. Fuente [64]

Teniendo en cuenta las características del método de lubricación por salpicadura, se determina que un nivel de aceite del 35% de la totalidad de la caja asegura que tres de las cuatro ruedas dentadas de la caja utilizadas en este proyecto estén sumergidas parcialmente en el aceite, lo que asegura que todos los elementos internos de la caja de engranajes estén lubricados permanentemente [64].

3.1.3 Posición de los acelerómetros

- La ubicación de los acelerómetros se realiza de acuerdo a la norma ISO10816-3, en la cual se contempla máquinas que contengan engranajes y rodamientos tipo reductores, la norma expresa que la medición de vibración se debe realizar en

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

alguna parte no rotatoria de la máquina. La norma sugiere realizar la medición de la vibración en los descansos del equipo como son descanso del eje y del engranaje.

- Cuando no es posible ubicar los sensores en los descansos del equipo la norma sugiere colocarlos en la carcasa o en algún punto que sea accesible o suficientemente seguro para realizar la medición [58][65][66].
- En los engranajes rectos, lo más recomendable es que los acelerómetros se encuentren ubicados en forma vertical y horizontal. En el caso de los engranajes helicoidales y rodamientos, estos transductores deben ubicarse en forma vertical y axial [60][59][67][68].
- En el caso de desalineación de ejes, se debe colocar los transductores de acuerdo al tipo de desalineación existente, por ejemplo: si hay desalineación paralela vertical lo más recomendable es ubicar el transductor en forma horizontal, si existe desalineación paralela horizontal lo más recomendable es ubicar el transductor en forma vertical, si existe desalineación angular lo más recomendable es colocar el transductor en forma axial. El caso común es la desalineación combinada por lo que es recomendable que se ubique el transductor en forma axial, puesto que la componente axial es significativa en este tipo de problemas [59][60][69][70].
- En el caso de desbalanceo, las componentes verticales son predominantes sobre las axiales a excepción de los ejes en voladizo. Por lo tanto lo más recomendable es que se ubique los traductores en forma vertical [59][60][69].
- En el caso de la carga radial, la dirección la vibración se da perpendicular al eje de rotación. por lo tanto es recomendable que se ubique los acelerómetros en forma horizontal para este tipo de carga [70].
- Para la carga axial lo más recomendable es que se coloque el transductor axialmente o paralela al eje de rotación [65].

La norma ISO 10816-1 se refiere a la dirección en que serán colocados los acelerómetros y establece que es común, pero no obligatorio montar los sensores de vibración en dirección horizontal, vertical y axial, con el eje del sensor señalando hacia la línea central del eje de la máquina, el centro de la caja de engranajes, el eje principal de la máquina. En la figura 3.10 se muestra la ubicación vertical, horizontal y axial sobre un soporte de rodamientos.

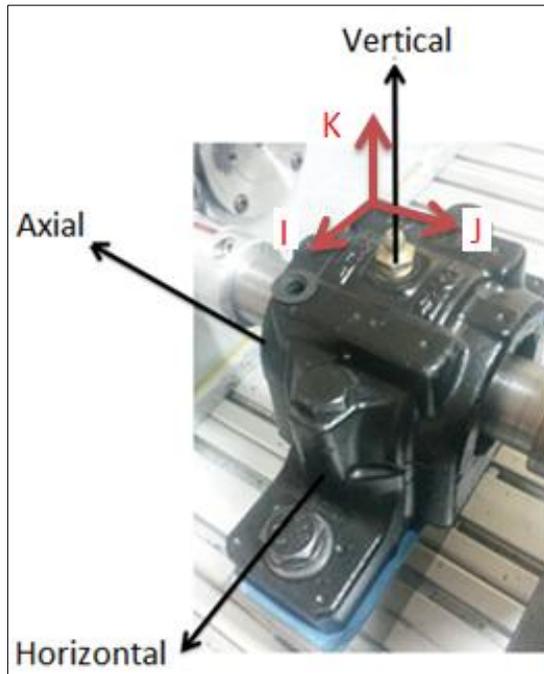


Figura 3.10. Dirección horizontal, vertical y axial sobre un soporte de rodamientos. Fuente: Los autores

En la figura 3.11, se observa la ubicación en dirección horizontal y vertical de dos acelerómetros uniaxiales sobre una caja de engranajes.

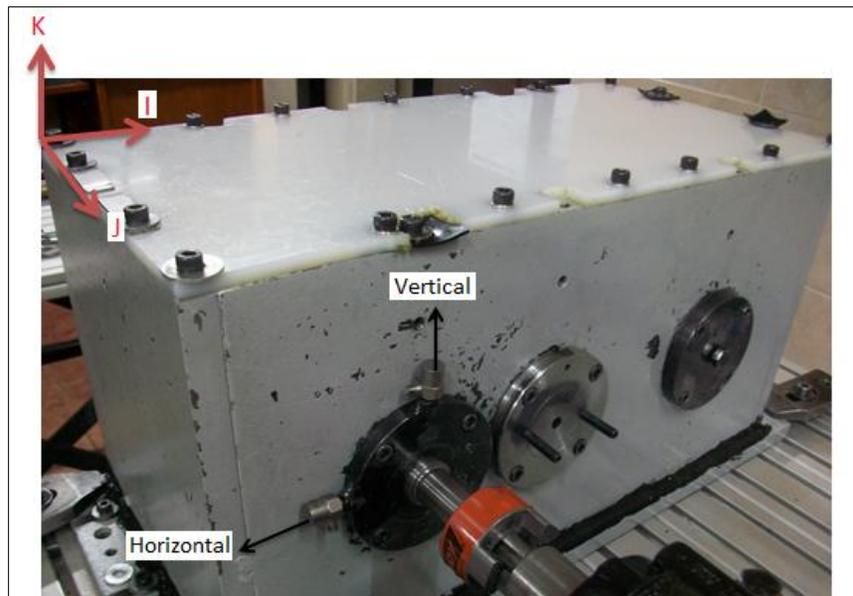


Figura 3.11. Dirección horizontal y vertical de dos acelerómetros uniaxiales en la caja de engranajes. Fuente: Los autores

3.1.4 Nomenclatura de los elementos para cada prueba

La nomenclatura de los elementos es fundamental para realizar de manera ordenada las pruebas con los diferentes tipos de fallos en los elementos, es importante también para dejar de una manera bien documentada la toma de la base de datos de señales de vibración, puesto que existen varios parámetros que hay que tener en cuenta a la hora de realizar las pruebas. En la figura 3.12 se muestra los sistemas mecánicos rotativos montados en el banco de vibraciones en los cuales se realiza la nomenclatura correspondiente en sus elementos.

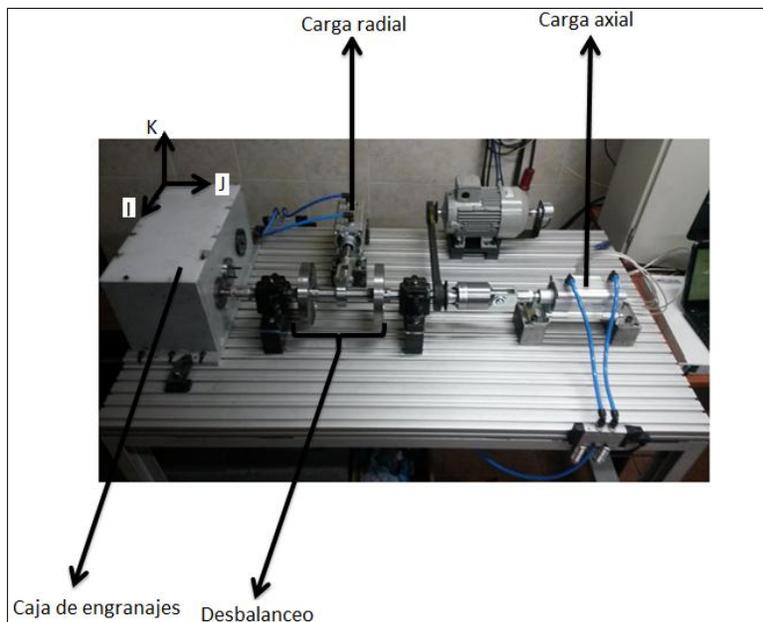


Figura 3.12. Sistemas mecánicos rotativos. Fuente: Los autores

3.1.4.1 Nomenclatura de los elementos en la caja de engranajes

En la figura 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, se muestra la designación mediante letras de los elementos de la caja de engranajes, los cuales son: engranajes, rodamientos y ejes, a estos se les suma los acelerómetros cada uno con su respectiva posición en dirección de los ejes coordinados. La posición de los acelerómetros en la caja, es fundamental para una correcta toma de señales de vibración.

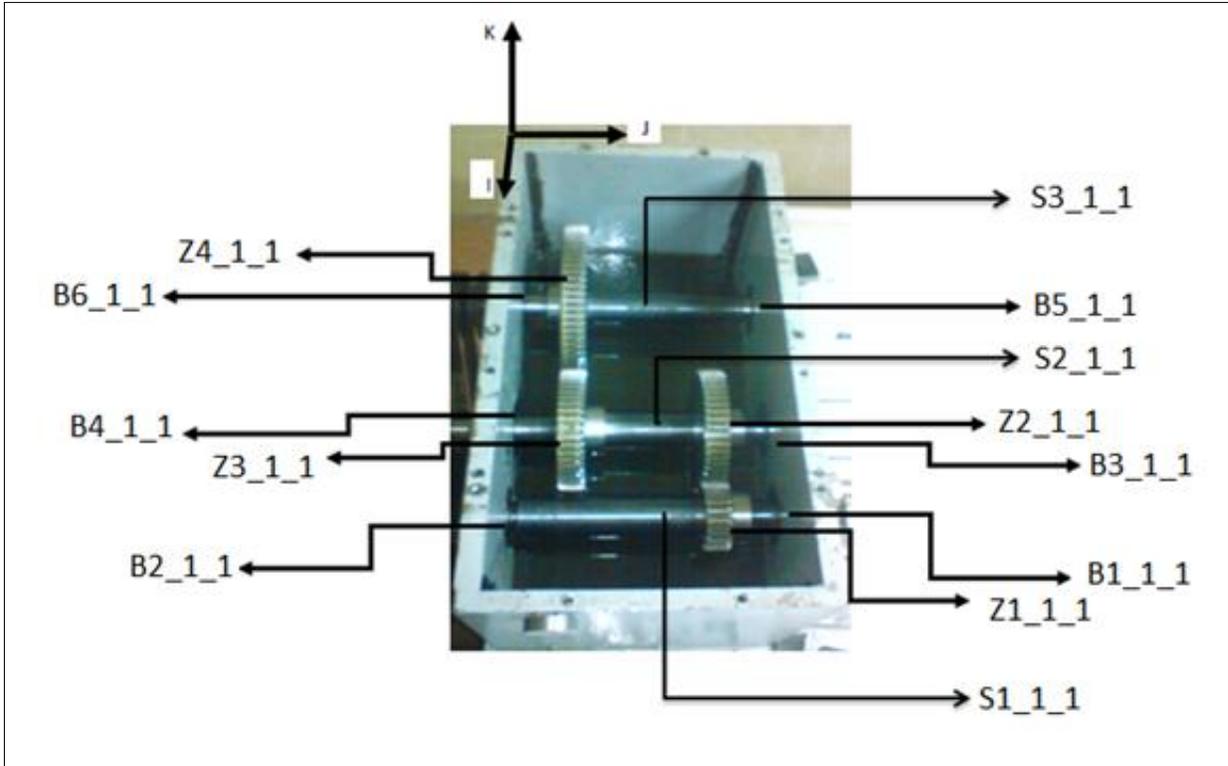


Figura 3.13. Designación de los elementos internos de la caja de engranajes. Fuente: Los autores

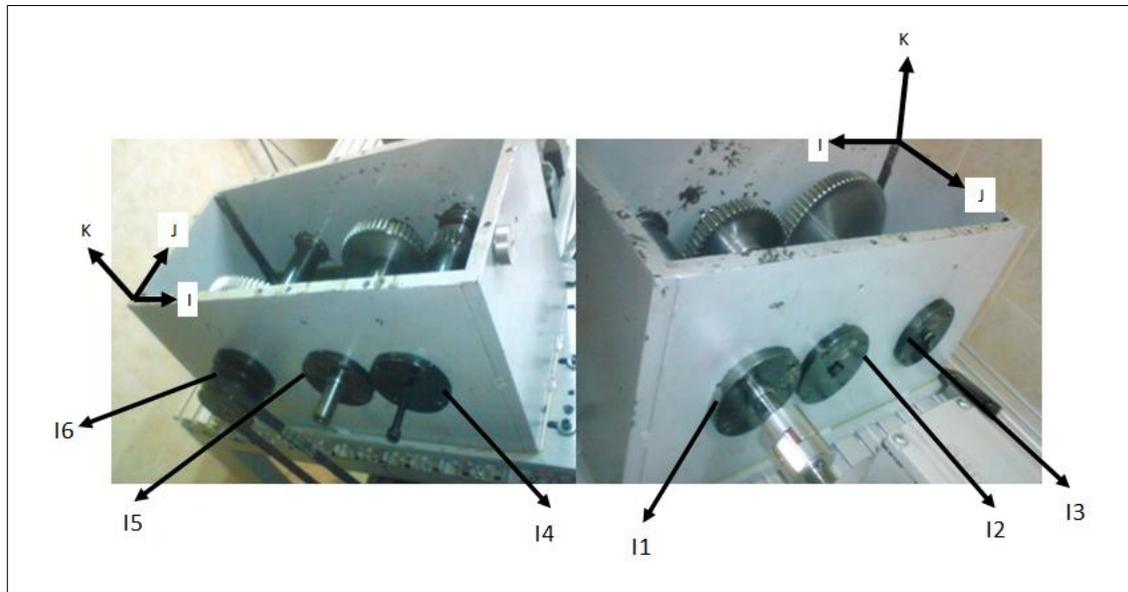


Figura 3.14. Designación de los acelerómetros en el eje I. Fuente: Los autores

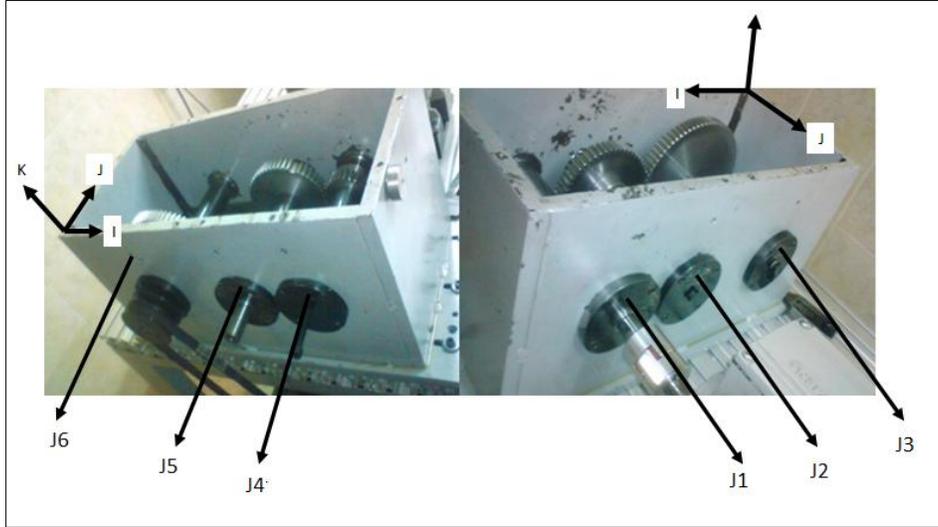


Figura 3.15. Designación de los acelerómetros en el eje J. Fuente: Los autores

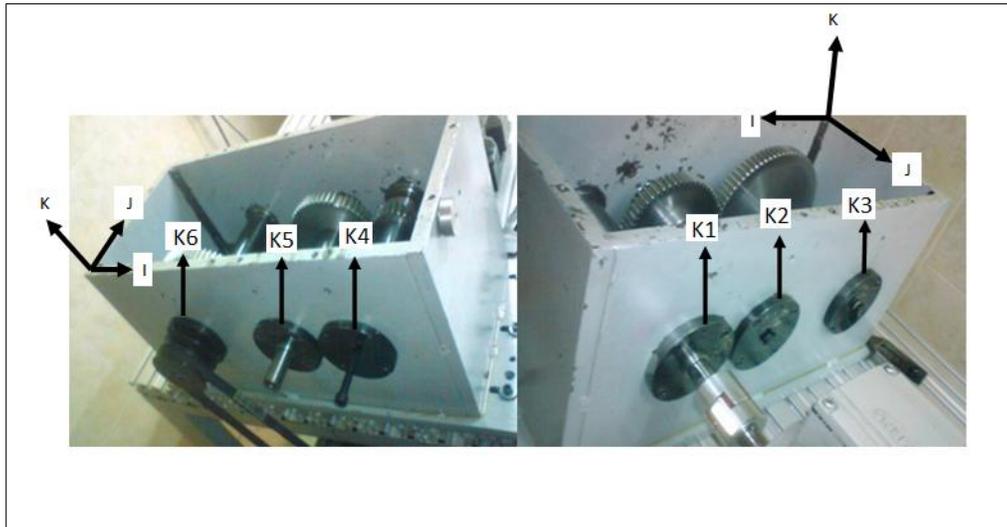
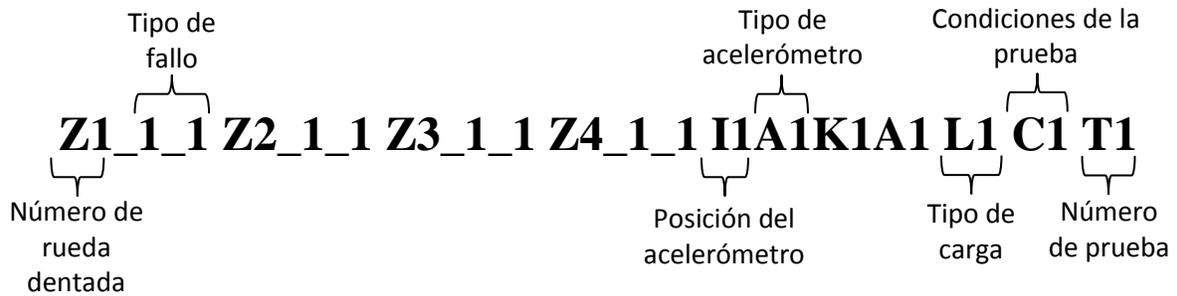


Figura 3.16. Designación de los acelerómetros en el eje K. Fuente: Los autores

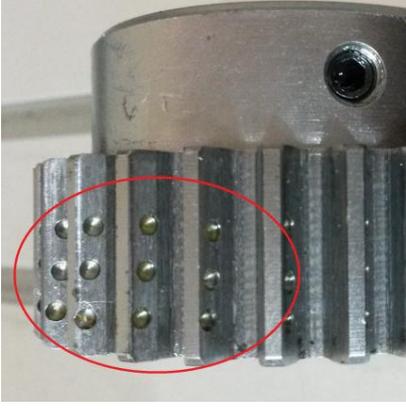
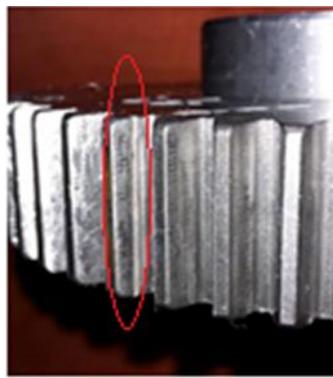
En los engranajes de diente recto de la caja reductora, se utilizará la siguiente nomenclatura según la designación de la figura 3.13.

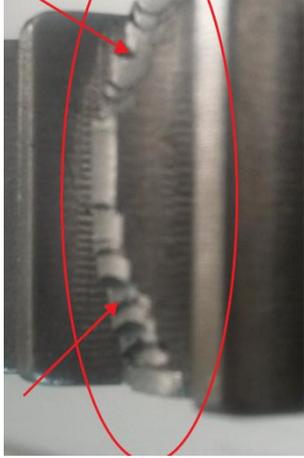


En la cual:

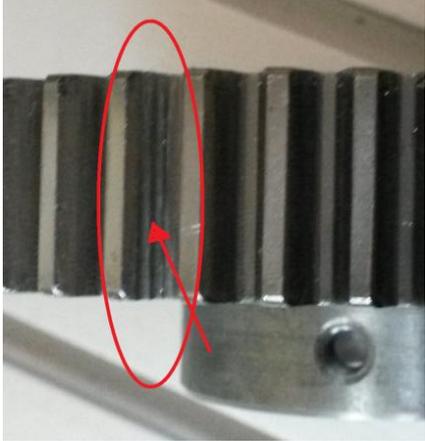
Tabla 3.2. Designación en ruedas dentadas. Fuente: Los autores

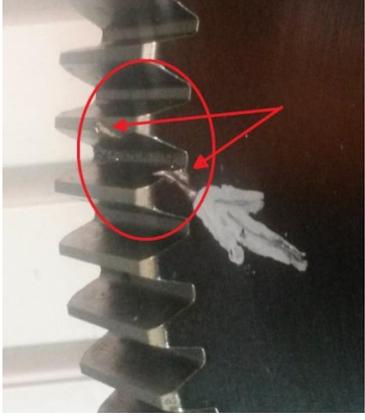
DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN	DESCRIPTION	IMAGEN
Z1-Z4	Rueda dentada 1 - 4	Wheel gear 1 to 4	
1_1	Rueda dentada sin fallo	Wheel gear without fault	
Z1	RUEDA DENTADA 1	WHEEL GEAR 1	
Z1_2_1	Desgaste, 2 líneas a lo largo de la cara del diente Profundidad de 0.4 mm Ancho 0.7 mm Separación entre líneas 0.7 mm	Wear, two groove lanes along of the tooth face. 0.4 mm depth 0.7 mm width 0.7 mm line spacing	

<p>Z1_3_1</p>	<p>Picadura de los dientes, Agujeros de 2.5 mm de diámetro Ángulo del agujero a 120°</p>	<p>Pitting teeth, Hole's diameter of 2.5 mm Hole's angle to 120 °</p>	
<p>Z2</p>	<p>RUEDA DENTADA 2</p>	<p>WHEEL GEAR 2</p>	
<p>Z2_2_1</p>	<p>Escoriado a lo largo de la cara del diente, al 100 % Profundidad de 0.2 mm Ancho 0.7 mm</p>	<p>Scoring along the tooth face of 100% 0.2 mm depth 0.7 mm width</p>	
<p>Z2_2_2</p>	<p>Rayado a lo largo de la cara del diente Profundidad de 0.5 mm Ancho 0.7 mm Separación entre líneas 1.2 mm</p>	<p>Scratch along the tooth face. 0.5 mm depth 0.7 mm width 1.2 mm line spacing</p>	

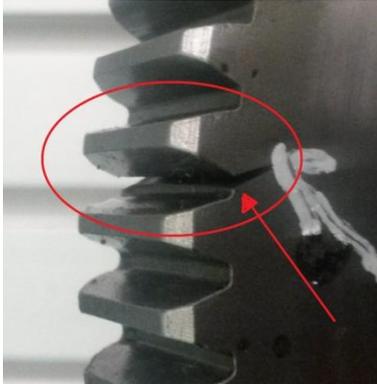
<p>Z2_2_3</p>	<p>Escoriado a lo largo de la cara del diente, al 100 % Profundidad de 1 mm Ancho 2.5 mm</p>	<p>Scoring along the tooth face of 100% 1 mm depth 2.5 mm width</p>	
<p>Z2_3_1</p>	<p>Rotura del diente al 25 %</p>	<p>Tooth breakage of 25%</p>	
<p>Z2_3_2</p>	<p>Rotura del diente al 50 %, ángulo de la grieta a 45</p>	<p>Tooth breaking of 50%, crack angle 45</p>	

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

<p>Z2_3_3</p>	<p>Rotura del diente al 100 %</p>	<p>Tooth breakage of 100 %</p>	
<p>Z3</p>	<p>RUEDA DENTADA 3</p>	<p>WHEEL GEAR 3</p>	
<p>Z3_2_1</p>	<p>Desgaste, 2 líneas a lo largo de la cara del diente Profundidad de 0.4 mm Ancho 0.7 mm Separación entre líneas 0.3 mm</p>	<p>Wear, two groove lanes along of the tooth face. 0.4 mm depth 0.7 mm width 0.3 mm line spacing</p>	

<p>Z4</p>	<p>RUEDA DENTADA 4</p>	<p>WHEEL GEAR 4</p>	
<p>Z4_2_1</p>	<p>Escoriado al 50 % 0.7 mm a lo largo del perfil del diente 8 mm a través de la cara del diente 0.5 mm de profundidad</p>	<p>Scoring of 50%. 0.7 mm along the tooth profile. 8 mm across of the tooth face 0.5 mm depth</p>	
<p>Z4_3_1</p>	<p>Grieta de 4 mm a 45° y 25% de profundidad</p>	<p>Tooth's crack of 4 mm to 45° and 25% depth.</p>	

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

	<p>Crack along tooth of 100% 1 mm width 4 mm depth</p>	<p>Grieta a lo largo del diente, al 100% Ancho 1 mm Profundidad 4 mm</p>	<p>Z4_3_2</p>
---	--	--	---------------

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

Tabla 3.3. Designación de acelerómetros en la caja de engranajes. Fuente: Los autores

DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN
K1 -K6	Posición en el eje K del acelerómetro 1 al 6 respectivamente
J1-J6	Posición en el eje J del acelerómetro 1 al 6 respectivamente
I1-I6	Posición en el eje I del acelerómetro 1 al 6 respectivamente
A1	Acelerómetro uniaxial
A2	Acelerómetro biaxial
A3	Acelerómetro triaxial

Tabla 3.4. Tipo de carga empleada en las pruebas de vibraciones mecánicas. Fuente: Los autores

DESIGNACIÓN	TIPO DE CARGA
L1	Carga constante
L2	Carga randómica
L3	Carga seno
L3	Carga cuadrática
L4	Carga triangular

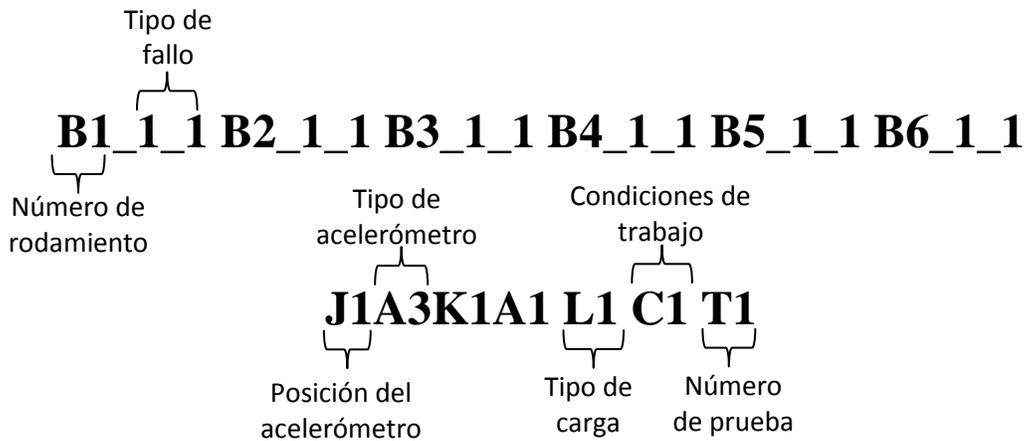
Tabla 3.5. Condiciones para la toma de señales. Fuente: Los autores

C1 REPRESENTA LAS CONDICIONES MOSTRADAS A CONTINUACIÓN		
Frecuencia de muestreo	44100 HZ	
Tiempo de muestreo	7 s	
Potencia	1500 W	
Velocidad mínima	750 RPM	
Velocidad máxima	1500 RPM	
Carga mínima	650 W	
Carga máxima	1400 W	
Número de velocidades	4	940 RPM
		1130 RPM
		1320 RPM
		1500 RPM

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

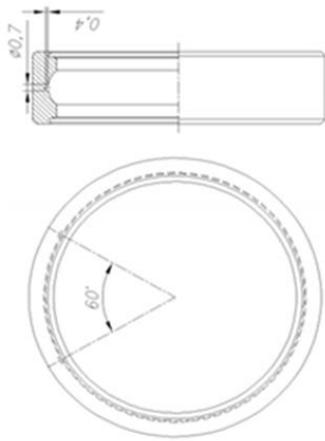
Número de cargas	3	900 W
		1150 W
		1400 W
Número de muestras	10	
Tipo de acelerómetros	Uniaxial	Triaxial
Marca	PCB piezotronics	Ebessd instruments
Modelo	352C03	
Sensibilidad	10.6 mV/g	330 mV/g

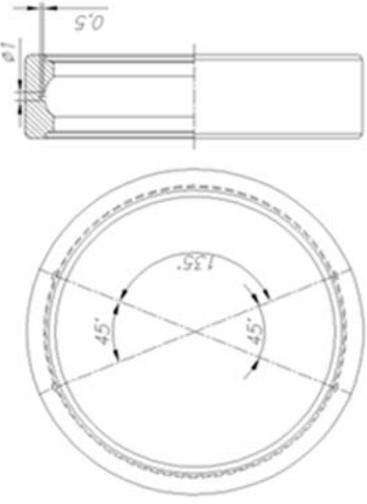
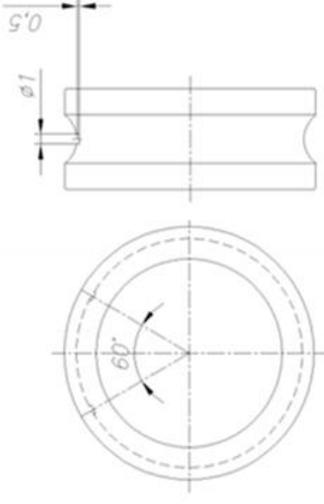
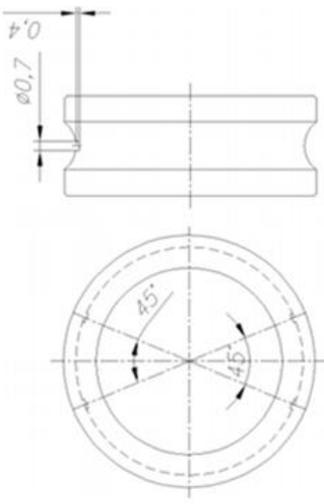
En los rodamientos de la caja reductora se utilizará la siguiente nomenclatura según la designación de la figura 3.13.

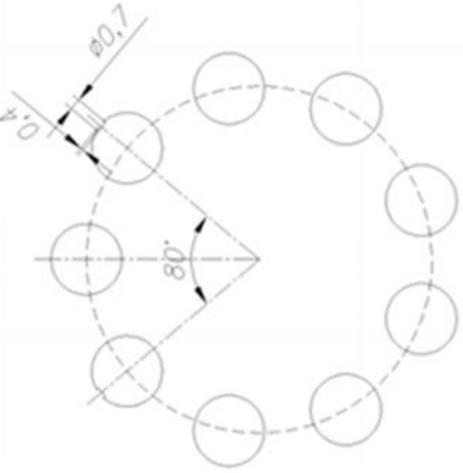
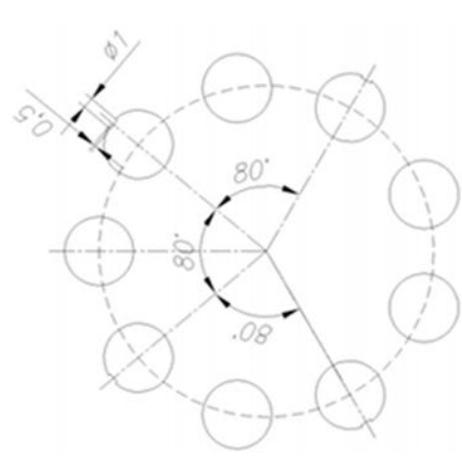


En la cual:

Tabla 3.6. Designación en rodamientos. Fuente: Los autores

DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN	DESCRIPTION	IMAGEN
B1-B6	Rodamiento 1 al 6	Bearing 1 to 6	
1_1	Rodamiento sin fallo	Bearing without fault	
2_1	Rodamiento con 2 picaduras en pista exterior Dos picaduras separada a 60°, de 0.7 mm de diámetro y 0.4 mm de profundidad	Bearing with 2 pitting on the outer ring Two pitting with angle of 60° 0.7 mm diameter 0.4 mm depth	

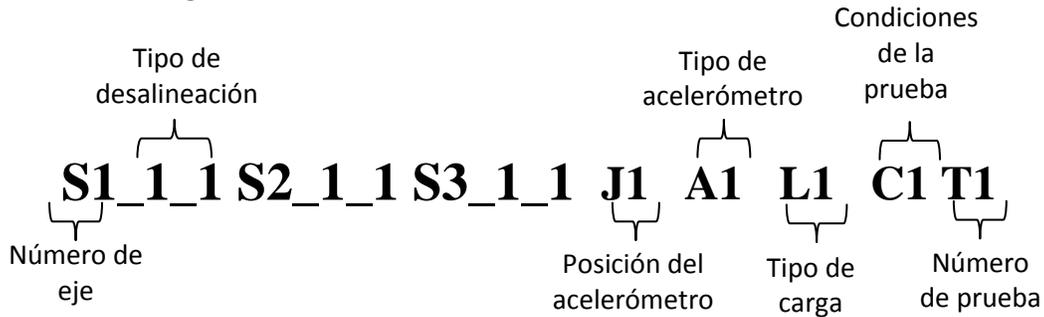
<p>2_2</p>	<p>Rodamiento con 4 picaduras en pista exterior 2 y 2 opuestas con ángulo de 45°, de 1 mm de diámetro y 0.5 mm de profundidad</p>	<p>Bearing with 4 pitting on the outer ring 2 and 2 opposite with angle of 45°. 1 mm diameter 0.5 mm depth</p>	
<p>3_1</p>	<p>Rodamiento con 2 picaduras en pista interior Dos picaduras separadas a 60°, de 1 mm de diámetro y 0.5 mm de profundidad</p>	<p>Bearing with 2 pitting on the inner ring Two pitting with angle of 60°. 1 mm diameter 0.5 mm depth</p>	
<p>3_2</p>	<p>Rodamiento con 4 picaduras en pista interior 2 y 2 opuestas con ángulo de 45°, de 0.7 mm de diámetro y 0.4 mm de profundidad</p>	<p>Bearing with 4 pitting on the inner ring 2 and 2 opposite with angle of 45°. 0.7 mm diameter 0.4 mm depth</p>	

<p>4_1</p>	<p>Rodamiento con 2 picaduras en elemento rodante Dos picaduras en bola separadas 80°, de 0.7 mm de diámetro y 0.4 mm de profundidad</p>	<p>Bearing with 2 pitting in rolling element. Two pitting separate bearing ball of 80°, 0.7 mm diameter 0.4 mm depth</p>	
<p>4_2</p>	<p>Rodamiento con 4 picaduras en elemento rodante Cuatro picaduras en la bola dispersos, de 1 mm de diámetro y 0.5 mm de profundidad</p>	<p>Bearing with 4 pitting in rolling element. 1 mm diameter 0.5 mm depth</p>	

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

La designación correspondiente a posición del acelerómetro, tipo de acelerómetro, tipo de carga y condiciones para la prueba es la misma que la descrita en las tablas 3.3, 3.4 y 3.5.

En los ejes de transmisión de la caja se utilizara la siguiente nomenclatura según la designación de la figura 3.13.



En la cual:

Tabla 3.7. Designación de los ejes de transmisión de la caja de engranajes. Fuente: Los autores

DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN	DESCRIPTION
S1-S3	Eje del 1 al 3 de la caja de engranajes	Shaft from 1 to 3 of gearbox
1_1	Alineado	Aligned
2_1	Desalineación angular	Angular misalignment

La nomenclatura correspondiente a posición del acelerómetro, tipo de acelerómetro, tipo de carga y condiciones para la prueba es la misma que la descrita en la Tablas 3.3, 3.4 y 3.5.

3.1.4.2 Nomenclatura de los elementos para carga axial, carga radial, desbalanceo y desalineación.

En la figura 3.17 y 3.18 se muestra la designación mediante letras de los elementos para simular carga radial, carga axial, desbalanceo y desalineación sobre el eje de transmisión, los elementos mencionados son: eje de transmisión y rodamientos, a estos se les suma los acelerómetros cada uno con su respectiva posición sobre el soporte de los rodamientos en dirección de los ejes coordenados. La posición de los acelerómetros en el soporte es fundamental para una correcta toma de señales de vibración.

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

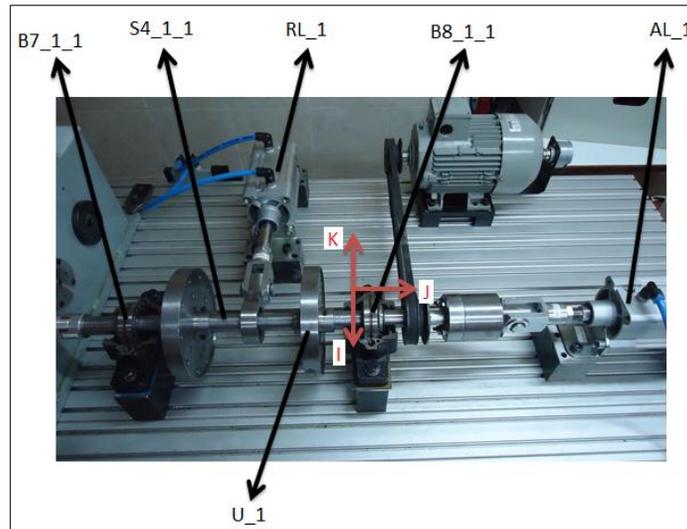


Figura 3.17. Designación de los elementos para carga axial, radial, desbalanceo y desalineación. Fuente: Los autores

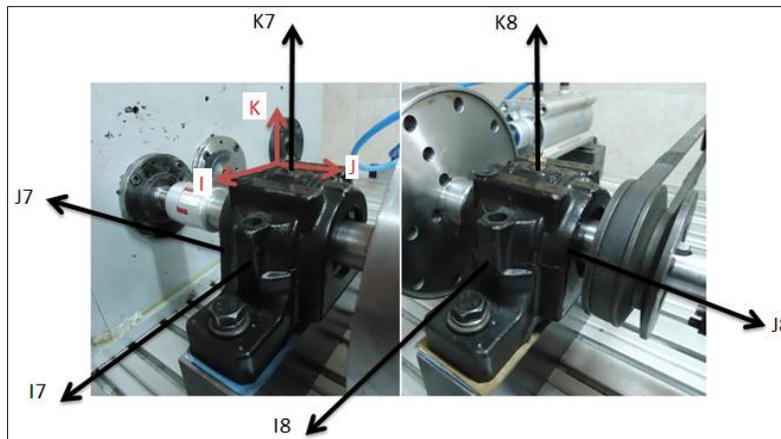
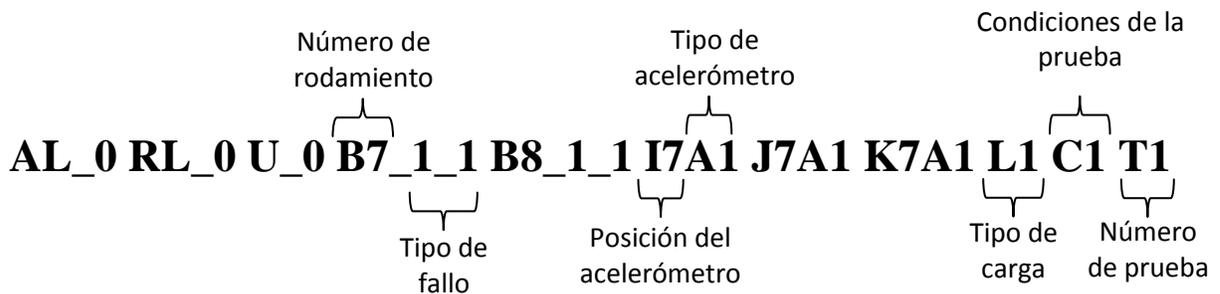


Figura 3.18. Designación de los acelerómetros en los soportes. Fuente: Los autores

En los rodamientos bajo carga axial, carga radial y desbalanceo aplicados al eje de transmisión se utilizará la siguiente nomenclatura según la designación de la figura 3.17.



En la cual:

Tabla 3.8. Designación de los elementos mecánicos. Fuente: Los autores

DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN	DESCRIPTION	IMAGEN
AL_0	Sin carga axial	Without axial load	
AL_1	Con carga axial	With axial load	
RL_0	Sin carga radial	Without radial load	
RL_1	Con carga radial	With radial load	
U_0	Balanceado	Balanced	
U_1	Desbalanceo estático (eje con un disco)	Static unbalance (shaft with a disk)	

<p>U_2</p>	<p>Desbalanceo dinámico (eje con dos disco)</p>	<p>Dynamic unbalance (shaft with two disk)</p>	
<p>B7 – B8</p>	<p>Rodamientos 7 y 8</p>	<p>Bearings 7 and 8</p>	
<p>1_1</p>	<p>Rodamiento sin fallo</p>	<p>Bearings without fault</p>	
<p>2_1</p>	<p>Rodamiento con fallo en la pista exterior Picadura de 1.5 mm de diámetro y profundidad de 0.15 mm</p>	<p>Bearing with outer race fault Sting, 1.5 mm diameter and 0.15 mm depth.</p>	
<p>3_1</p>	<p>Rodamiento con fallo en el elemento rodante Picadura de 1 mm de diámetro y profundidad de 0.15 mm</p>	<p>Bearing with the rolling element fault Sting, 1 mm diameter and 0.15 mm depth.</p>	

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

Tabla 3.9. Designación de acelerómetros en los soportes de los rodamientos. Fuente: Los autores

DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN
K7-K8	Posición en el eje K del acelerómetro 7 y 8 respectivamente
J7-J8	Posición en el eje J del acelerómetro 7 y 8 respectivamente
I7-I8	Posición en el eje I del acelerómetro 7 y 8 respectivamente
A1	Acelerómetro uniaxial
A2	Acelerómetro biaxial
A3	Acelerómetro triaxial

La nomenclatura correspondiente a tipo de carga y condiciones para la prueba es la misma que la descrita en las tablas 3.4 y 3.5.

En el eje de transmisión para la desalineación se utilizará la siguiente nomenclatura según la designación de la figura 3.17.



En la cual:

Tabla 3.10. Designación en el eje de transmisión. Fuente: Los autores

DESIGNACIÓN	DESCRIPCIÓN	DESCRIPTION
S4	Eje de transmisión	Transmission shaft
1_1	Alineado	Aligned
2_1	Desalineación angular	Angular misalignment
3_1	Desalineación paralela horizontal	Horizontal Parallel misalignment
4-1	Desalineación paralela vertical	Parallel vertically misalignment
5_1	Desalineación combinada	Combined misalignment

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

La nomenclatura correspondiente a posición del acelerómetro, tipo de acelerómetro, tipo de carga y condiciones para la prueba es la misma que la descrita en las tablas 3.4, 3.5 y 3.9.

3.1.4.3 Pruebas combinadas

En las pruebas combinadas se sigue la misma nomenclatura de las Tablas 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10 con la particularidad que se anota una sola vez el número de prueba, la posición del acelerómetro y el tipo de acelerómetro de la siguiente manera:

**Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1
B4_1_1 B5_1_1 B6_1_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0
RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 S4_1_1 I1A1 J1A1 K1A1 I7A1
J7A1 K7A1 L1 C1 T1**

3.2 Levantamiento de la base de datos de los sistemas mecánicos rotativos

3.2.1 Protocolo de la base de datos

Para la obtención de señales de vibración primero se debe escoger las combinaciones con fallos en los elementos a ensayar, el grupo completo de combinaciones se puede obtener mediante la programación mostrada en el Anexo I.

La selección de los fallos en los elementos del sistema rotativo se escogió en base a una revisión de la literatura de señales de vibración tomadas en estudios anteriores, esto con el objetivo mejorar los trabajos realizados anteriormente. En la referencias bibliográficas [54][71][72][73][74][75][76] se realizaron la toma de señales de vibración con fallos en engranajes solamente, lo que se pretende en el presente proyecto es hacer el establecimiento de una base de datos más completa combinando fallos tanto en rodamientos como en engranajes y perturbaciones en los ejes.

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

Las combinaciones seleccionadas serán ejecutadas bajo las características mostradas en la tabla 3.11.

Tabla 3.11. Características generales para la toma de señales de vibración. Fuente: Los autores

Combinaciones seleccionadas para las pruebas	Se seleccionan 100 combinaciones de las posibles que puedan darse en los sistemas mecánicos rotativos de la siguiente manera: <ul style="list-style-type: none">• 50 combinaciones de fallos en los elementos del sistema, utilizando una sola etapa de la caja de engranajes• 50 combinaciones de fallos en los elementos del sistema, utilizando las dos etapas de la caja de engranajes De cada combinación , se toman pruebas correspondiente a la carga: <ul style="list-style-type: none">• Carga constante
Presión de los actuadores neumáticos para carga radial o axial	2 bares, con la cual se obtiene una carga radial o axial de 98.6 N
Temperatura máxima en Cuenca/anuales	24.5°C [77]
Temperatura mínima Cuenca/anuales	7.6°C [77]
Vibraciones de otras máquinas ruido externo	En el laboratorio de vibraciones no existen máquinas cercanas que puedan ocasionar vibración sobre el banco de pruebas.
Altitud de Cuenca	2.550 metros sobre el nivel del mar
Presión en Cuenca	0.68 ATM [77]

3.2.1.1 Combinaciones seleccionadas para la toma de señales de vibración

En el Anexo II se presentan las combinaciones seleccionadas para las pruebas en una y dos etapas respectivamente, en las cuales se especifican también la respectiva nomenclatura.

Los parámetros para las pruebas se determinaron tomando 4 velocidades del motor a 3 diferentes cargas con un tiempo de muestreo de 7 segundos, estos parámetros se muestran en la tabla 3.12. De cada prueba se toman 10 muestras, lo que produce un total de 12000 muestras tomadas en la base de datos establecida en este proyecto.

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

Tabla 3.12. Parámetros de carga y velocidad para las pruebas. Fuente: Los autores

VELOCIDADES (RPM)	CARGAS (W)	TIEMPO DE MUESTREO
940	900	7s
	1150	
	1400	
1130	900	
	1150	
	1400	
1320	900	
	1150	
	1400	
1500	900	
	1150	
	1400	

El montaje de las configuraciones seleccionadas están a cargo de los estudiantes autores del presente proyecto. Las pruebas se realizan bajo la supervisión y colaboración de los ingenieros pertenecientes al Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación en Ingeniería de la Universidad Politécnica Salesiana.

3.2.2 Diagrama de Lenguaje Unificado de Modelado (UML) de la base de datos para el banco de vibraciones

El diagrama UML mostrado en la figura 3.19 para el banco de vibraciones abarca 5 campos: muestra, canales, velocidad, potencia y campo de cargas.

En el Campo canales se presenta las cuatro entradas disponibles de la tarjeta de adquisición de la NATIONAL INSTRUMENTS; el Canal 2 y Canal 3 sirven para la conexión de dos acelerómetros uniaxiales, el Canal 1 y Canal 4 se utilizan para la conexión de sensores acústicos, en la tarjeta de adquisición ERBESSD INSTRUMENTS se presentan disponibles 2 canales; el Canal 1 sirve para la conexión del acelerómetro triaxial y el Canal 2 sirve para la conexión del tacómetro. En el Campo muestra se asigna el nombre de la

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

muestra que se va a tomar. En el Campo potencia se presenta una potencia de referencia en la cual se ingresa la potencia que se impone para la prueba y una potencia real la cual muestra la potencia que se genera en el transcurso de la prueba. En el Campo Velocidad se presentan dos velocidades, la velocidad de referencia es aquella que se impone para la prueba y la velocidad real es la que se genera en el transcurso de la prueba. El Campo cargas muestra los diferentes tipos de carga que se puede utilizar para las pruebas [44].

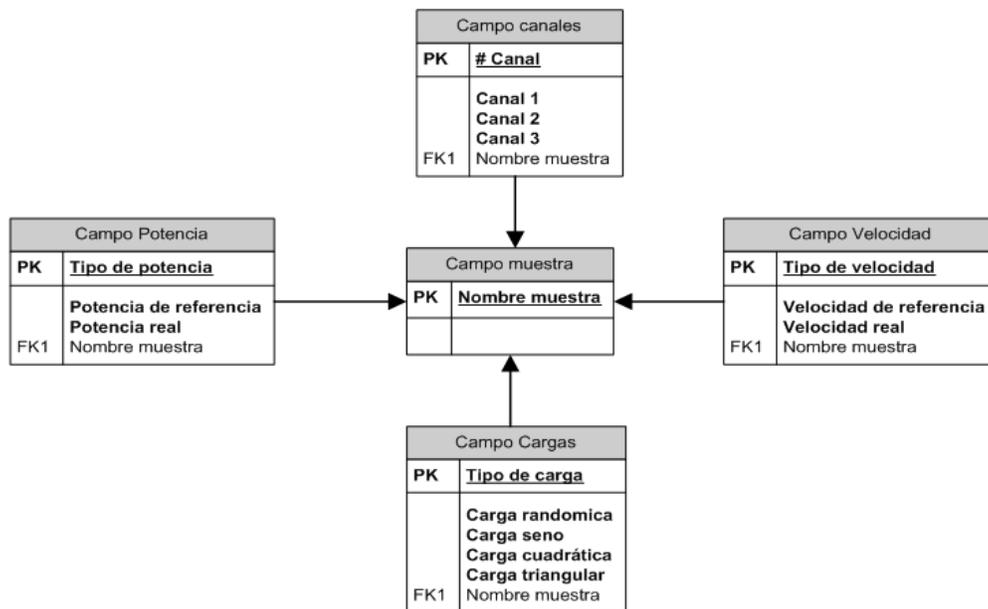


Figura 3.19. Diagrama UML para el banco de vibraciones. Fuente [44]

3.2.3 Diagrama de bloques para la utilización del software para el banco de vibraciones

Para arrancar una prueba primero se debe desplegar la barra de inicio de la computadora y seguidamente hacer doble ENTER en el icono de *vibraciones*, luego de esto deberá aparecer un cuadro de diálogo en el cual se debe presionar el botón ok en el campo de *nueva prueba*. Seguidamente aparece otro cuadro en el cual se debe introducir el nombre de la prueba de acuerdo al protocolo establecido anteriormente, finalmente se deben introducir los parámetros, de encendido, descanso del motor y número de muestras de la prueba. El diagrama de bloques que describe los pasos mencionados anteriormente para arrancar una prueba se muestra en la figura 3.20

Capítulo 3: Base de datos de las señales de vibración

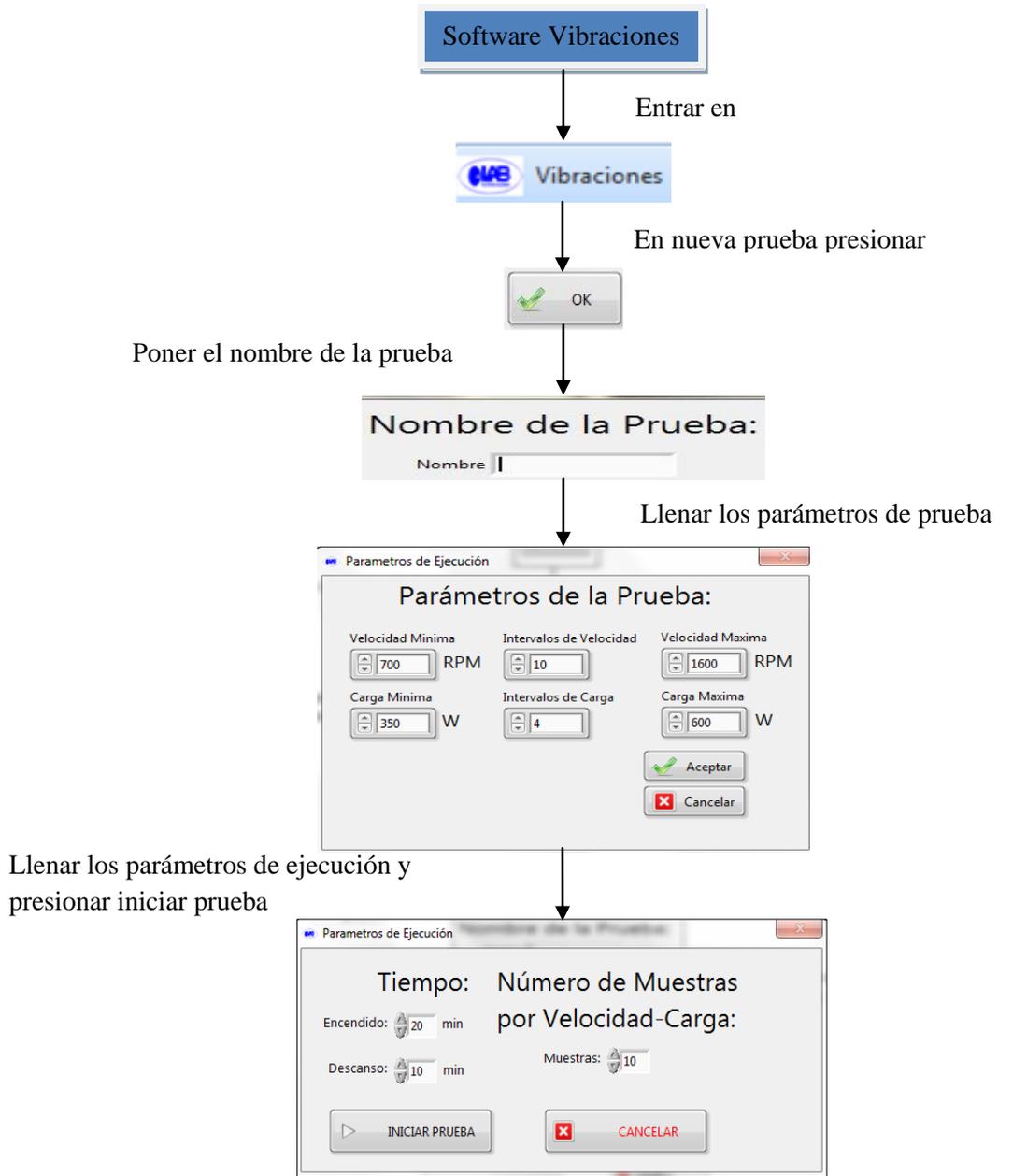


Figura 3.20. Diagrama de bloques para arrancar la pruebas mediante el software. Fuente [44]

3.3 Almacenamiento de la base de datos

La base de datos de señales de vibración establecida en este proyecto esta disponible en los laboratorios de ingeniería mecánica de la Universidad Potiecnica Salesiana.

CAPÍTULO 4

4. GUÍA DE PRÁCTICAS

El presente capítulo, tiene como objetivo, elaborar una guía de prácticas para la detección de fallos en rodamientos a través del análisis de vibraciones mecánicas para sistemas mecánicos rotativos.

Mediante la guía de prácticas, se pretende que el docente fortalezca los conocimientos sobre el tema a los estudiantes de pregrado a través de actividades prácticas, además dar a conocer a los estudiantes la importancia del mantenimiento predictivo dentro del campo industrial.

4.1. Descripción del sistema mecánico rotativo para la guía de prácticas

El banco de pruebas mostrado en la figura 4.1, está compuesto por: unidad de mando, unidad motriz, unidad de sistemas rotativos y unidad de carga, que se describieron en el capítulo 2.

Dentro del sistema mecánico rotativo se permite simular fallos en rodamientos aplicando diferentes perturbaciones tales como: carga radial, carga axial, desalineación y desbalanceo.

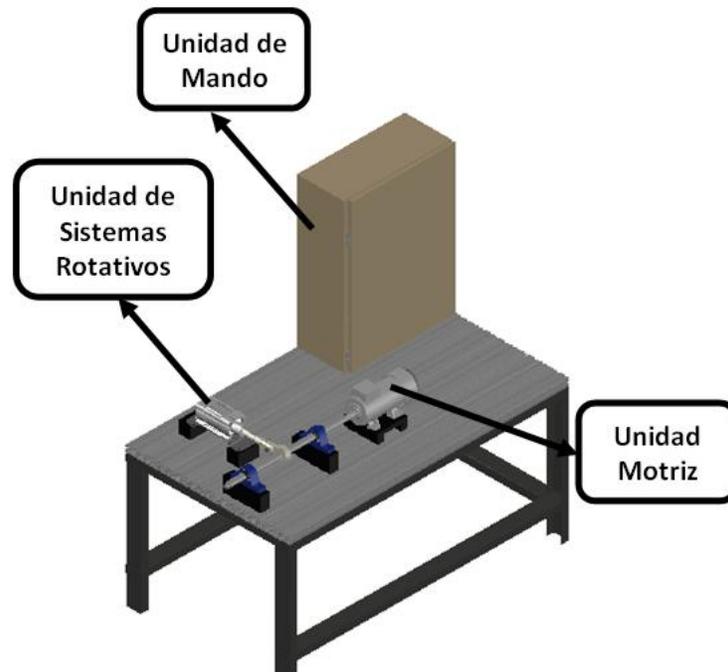


Figura 4.1. Sistema mecánico rotativo. Fuente: Los autores

4.2. Descripción del equipo “ADASH A4400”

ADASH VA4Pro es un instrumento de medición, usado para el diagnóstico de vibraciones especialmente para sistemas mecánicos rotativos. En la figura 4.2 se muestra el analizador de vibraciones ADASH VA4Pro, utilizado en los laboratorios de ingeniería mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana.



Figura 4.2. Analizador de vibraciones - ADASH VA4Pro. Fuente [78]

En la figura 4.3 se muestra la información general del panel superior del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro, el cual tiene cuatro tomas de entradas (*IN 1*, *IN 2*, *IN 3*, *IN 4*) estos son canales simultáneos basados en ICP “*Integrated Circuit Piezoelectric*” de corriente alterna (*AC*) y canales de corriente directa (*DC*) para mediciones de procesos, además cuenta con un canal para señales de disparo o tacómetro (*TRIG*). El instrumento está programado para que se apague automáticamente después de cinco minutos, si no está en uso.

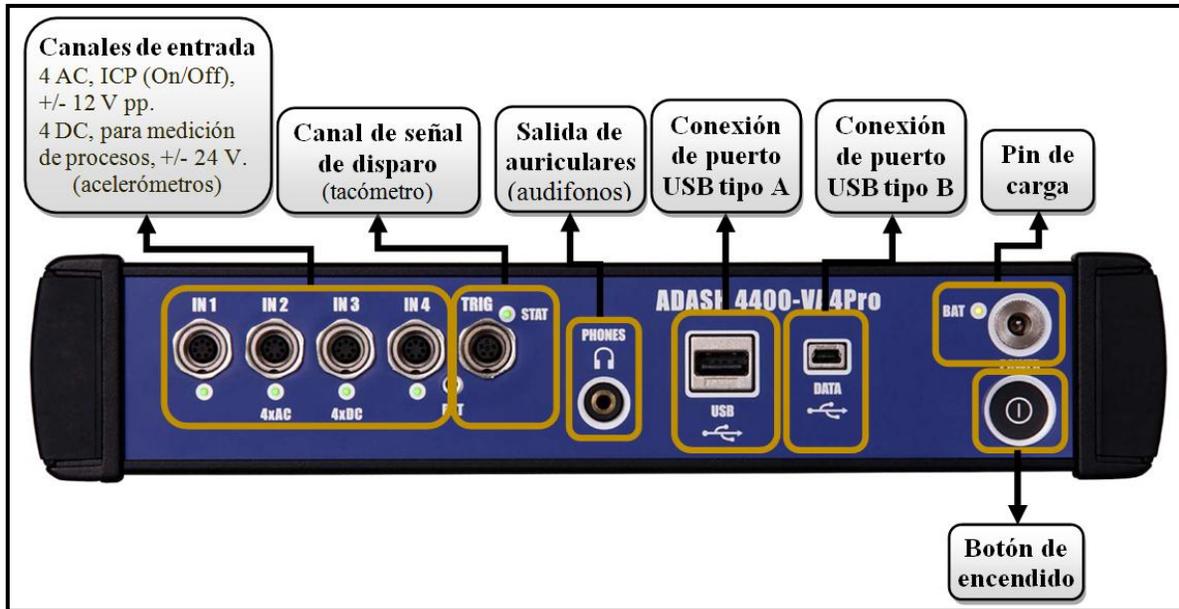


Figura 4.3. Información general del panel superior de ADASH VA4Pro. Fuente [78]

ADASH VA4Pro, utiliza acelerómetros tipo A 102-A1 (figura 4.4), su montaje se lo puede realizar a través de base magnética A 1102 ó por tornillo, para la adquisición de las señales vibratorias, estos acelerómetros tienen una sensibilidad de 100 mV/g, frecuencia de respuesta (± 3 dB) de 30 – 900000 CPM, rango dinámico de ± 50 g, peak y rango de temperatura de -50 a 121 °C [79].



Figura 4.4. Acelerómetro piezoeléctrico. Fuente: Los autores

En el panel frontal, el analizador de vibraciones cuenta con quince botones alrededor de la pantalla como se indica en la figura 4.5, estos permiten controlar las funciones de instrumento de medición. La función de cada botón se describe en la pantalla a lado del botón.



Figura 4.5. Botonera de analizador de vibraciones. Fuente [78]

En la ventana del panel frontal de ADASH VA4Pro, se visualizan los modos de medición que permiten diagnosticar los fallos de los sistemas mecánicos rotativos. Dentro de los modos de medición de ADASH VA4Pro se tiene: analizador, ruta, arranque, grabador de señal, balanceo, FASIT, estetoscopio, lubri, análisis de octava y prueba de impacto; en la tabla 4.1 se presenta una descripción general de la función de cada uno de los modos de medición.

Tabla 4.1. Función de los modos de medición de ADASH VA4Pro. Fuente [80]

MODO DE MEDICIÓN	FUNCIÓN
<p>Modo analizador</p> 	Su función es obtener un espectro de vibración del sistema y analizar estas señales para la detección de fallos
<p>Modo ruta</p> 	Su función es establecer rutas para el control de la máquina
<p>Modo arranque</p> 	Sirve para el análisis de señales transitorio durante arranque y paro de maquinaria
<p>Modo grabador de señal</p> 	Permite la grabación de señales vibratorias de larga duración

<p>Modo balanceo</p> 	<p>Permite realizar un balanceo tanto estático como dinámico en máquinas rotativas</p>
<p>Modo FASIT</p> 	<p>Es un sistema que permite identificar y diagnosticar fallos en rodamientos, desbalanceo, desalineación y holgura, utilizando códigos de colores que permite evaluar la severidad de la vibración de acuerdo a la norma ISO 10816-3</p>
<p>Modo estetoscopio</p> 	<p>Este modo de medición permite escuchar las señales de vibraciones</p>
<p>Modo lubri</p> 	<p>Permite el control y comprobación del estado de los lubricantes</p>
<p>Modo análisis de octava</p> 	<p>Proporciona un análisis de octava (1/1, 1/3, 1/12 y 1/24 de octava) para el sonido y la medición de las vibraciones. Su alta resolución a baja frecuencia se puede utilizar para identificar los armónicos de la velocidad de rotación y el aumento de la vibración debido a fallos en rodamiento o la caja de engranajes</p>
<p>Modo prueba de impacto</p> 	<p>Mide el nivel de vibración, transmitiendo un golpe al sistema con un martillo, ya sea de goma o de caucho</p>

4.3. Caracterización de los fallos de los rodamientos

Dentro del campo experimental, las referencias [52][54][72][74][81][82] usan rodamientos rígidos de bolas que soportan sólo cargas radiales, con los fallos más usuales tales como: fallos por contaminación, fallos por problemas de lubricación y fallos por fatiga; para fines investigativos y con el propósito de no repetir estos fallos, en esta guía de prácticas se experimentará con fallo en el elemento rodante y que contengan un alto grado de severidad en rodamientos que soporten tanto carga radial como carga axial con el fin de conocer el comportamiento del rodamientos dentro de los sistemas mecánicos rotativos.

El fallo se construyó en un rodamiento SKF 22207 EK/C3, en el elemento rodante, el mismo se muestra en la figura 4.6.

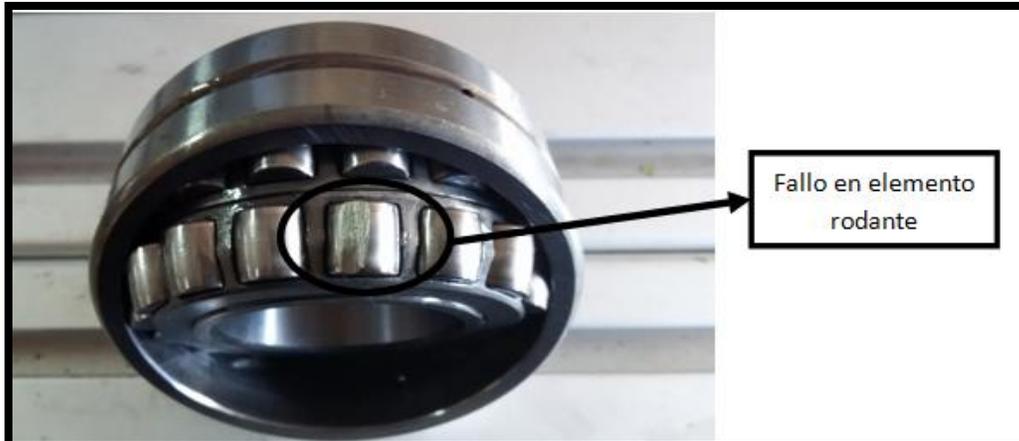


Figura 4.6. Fallo de picadura en elemento rodante. Fuente: Los autores

En la tabla 4.2 se presenta los datos constructivos del fallo en el rodamientos SKF 22207 EK/C3, que están a disposición en el laboratorio de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana.

Tabla 4.2. Características del fallo construido en el rodamiento. Fuente: Los autores

RODAMIENTO 22207 EK/C3		
Elemento del rodamiento	Dimensiones del fallo	Número de elementos
Elemento rodante	Rayado a lo largo del elemento rodante de 1.5 mm de diámetro y 0.5 de profundidad	1

Los rodamientos poseen una frecuencia característica y son calculadas como se indica en la tabla 4.3 [83].

- Frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista externa “*Ball pass frequency of the outer race*” (BPFO)
- Frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista interna “*Ball pass frequency of the inner race*” (BPFI)
- Frecuencia de giro de los elementos rodantes “*Ball spin frequency*” (BSF)
- Frecuencia de rotación del canastillo o jaula que contiene los elementos rodantes “*Fundamental train frequency*” (FTF)

Tabla 4.3. Frecuencias características de los rodamientos. Fuente [84]

ELEMENTO	FRECUENCIA CARACTERÍSTICA
<i>Pista externa</i> (BPFO)	$0.4 \times \text{RPM} \times N_b$
<i>Pista interna</i> (BPFI)	$0.6 \times \text{RPM} \times N_b$
<i>Elementos rodantes</i> (BSP)	Para rodamientos de una hilera $0.23 \times \text{RPM} \times N_b$ Cuando $N_b < 10$ $0.18 \times \text{RPM} \times N_b$ Cuando $N_b \geq 10$
	Para rodamientos de doble hilera $2 \times 0.23 \times \text{RPM} \times N_b$ Cuando $N_b < 10$ $2 \times 0.18 \times \text{RPM} \times N_b$ Cuando $N_b \geq 10$
<i>Jaula</i> (FTF)	$0.4 \times \text{RPM}$

La unidad de sistemas rotativos se muestra en la figura 4.7, donde R1 y R2 corresponden a los rodamientos del eje de transmisión, para los cuales R1 se mantendrá con rodamiento en buenas condiciones y R2 se colocará rodamiento con fallo.

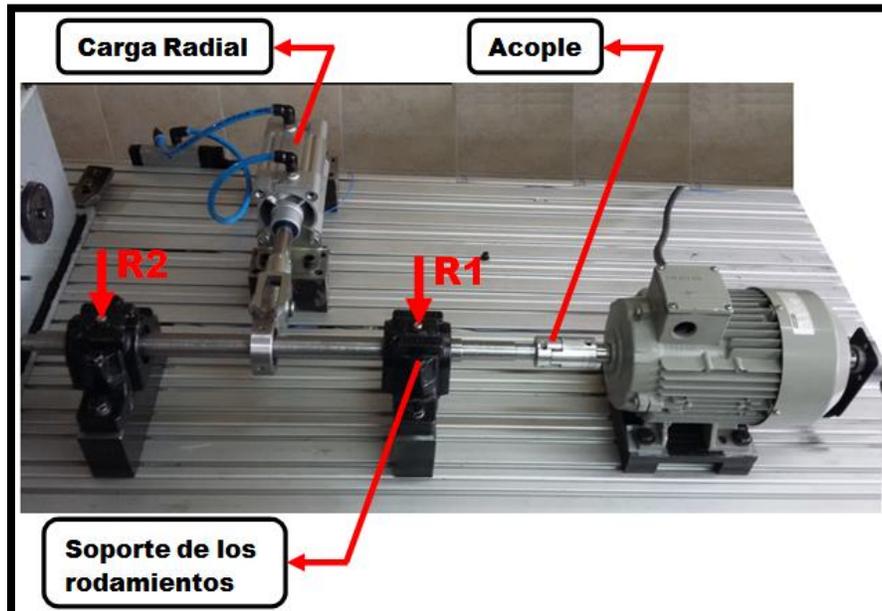


Figura 4.7. Designación de los rodamientos en el eje de transmisión. Fuente: Los autores

4.4 Proceso de elaboración y validación de la guía de prácticas

Para el proceso de elaboración y validación de las guías de prácticas se propone un diagrama de flujo mostrado en la figura 4.8, en el cual se plantea los pasos lógicos y ordenados a seguir para lograr este fin.

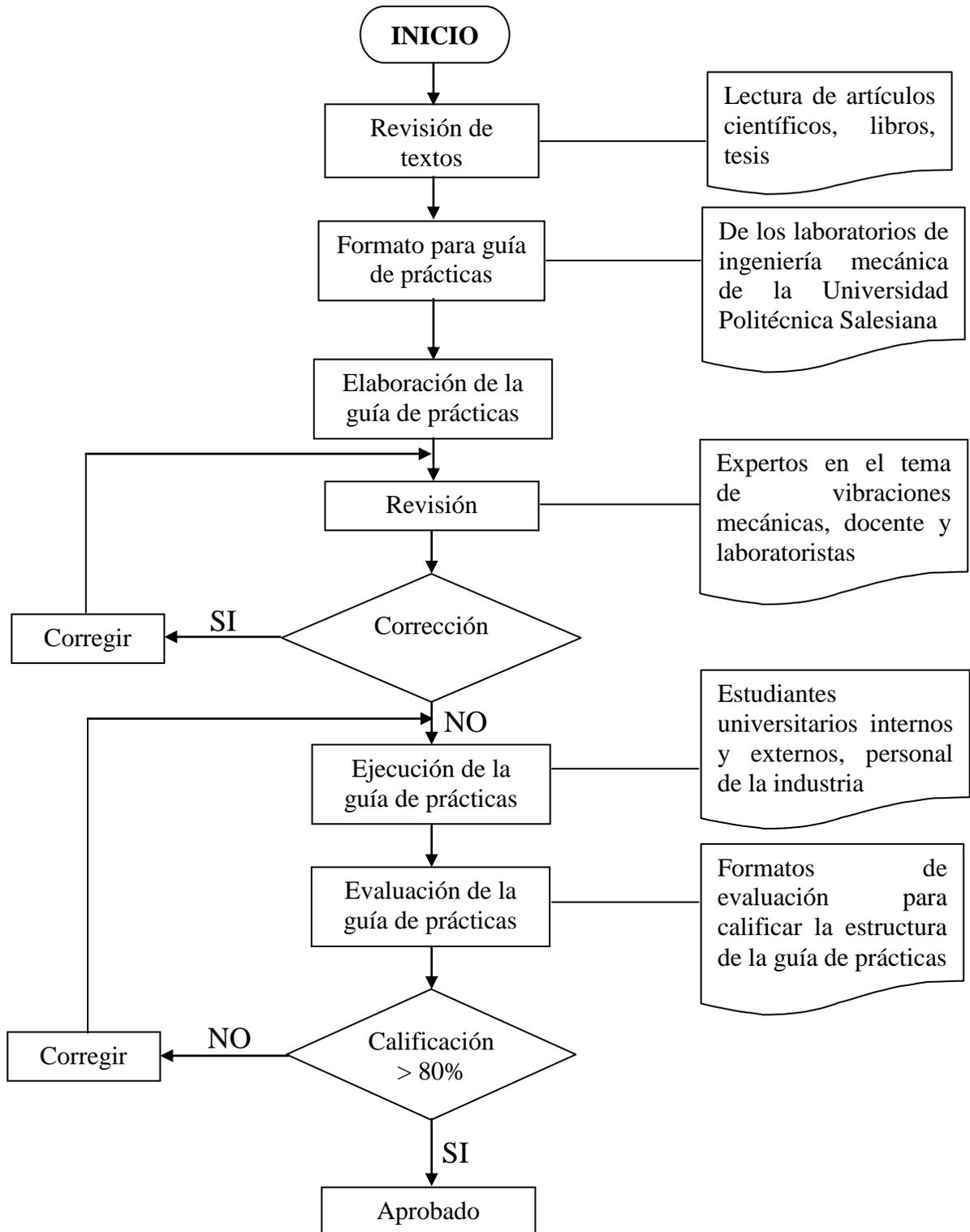


Figura 4.8. Proceso de elaboración y validación de la guía de prácticas. Fuente: Los autores

A continuación se describen las actividades que se realizaron al seguir los pasos planteados en el diagrama de flujo.

4.4.1 Revisión de textos

Se realizó una lectura de varios textos que involucran temas sobre fundamentos de la vibración, normas de la vibración, fallos en rodamientos, análisis y detección de fallos en rodamientos.

- Libros: [50], [84], [85]
- Artículos científicos: [24], [58], [78], [83], [86], [87],[88], [89]
- Normas: [67], [90]
- Tesis: [42], [91], [92]

4.4.2 Formato para las guías de practicas

Las guías de prácticas poseen una estructura general, basadas en una recopilación de los formatos anteriores de los laboratorios de ingeniería mecánica [91][92]; para ello, esta estructura se ha dividido en:

Estructura teórica: consiste en una exposición de conceptos básicos y procedimientos que permitirá cumplir con los objetivos propuestos de la práctica.

Estructura práctica: permite que los ejecutantes de las prácticas se familiaricen con los equipos involucrados en la realización de las prácticas, de la misma forma permite que los ejecutantes establezcan sus conclusiones y recomendaciones sobre la importancia de los temas tratados en las guías de prácticas.

La estructura del formato para la guía de prácticas está elaborada de la siguiente forma:

- Tema: el tema debe estar planteada de forma clara y precisa.
- Presentación de la práctica: un resumen de lo que se pretende hacer en la práctica.

- Requisitos, conocimientos y precauciones previas a realizar la práctica: recomendar lectura de textos hacia donde está enfocada la guía de prácticas, además recomendaciones preventivas en la ejecución de la guía de prácticas.
- Objetivos: los objetivos deben ser planteados de forma clara, precisa.
- Equipos, instrumentación y software: enumerar y nombrar los equipos, instrumentos y software con los que se va a trabajar durante la práctica.
- Exposición: proponer un resumen introductorio sobre el tema que se va a tratar en la guía de prácticas.
- Proceso y procedimientos: establecer una serie de procesos y procedimientos que faciliten la ejecución de la guía de prácticas.
- Conclusiones y recomendaciones
- Referencias
- Glosario

4.4.3 Elaboración de la guía de prácticas

Para que los estudiantes fortalezcan sus conocimientos de forma práctica en el área de mantenimiento, se elaboró dos guías de prácticas:

- **Guía de prácticas #1: Uso del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro**

Esta guía de prácticas permitirá que los estudiantes entiendan el funcionamiento y se familiaricen con el analizador de vibraciones ADASH VA4Pro, que se encuentra en el laboratorio de vibraciones mecánicas de la Universidad Politécnica Salesiana.

- **Guía de prácticas #2: Detección de fallos de rodamientos en sistemas mecánicos rotativos.**

Con esta práctica se pretende detectar fallos de rodamientos en sistemas mecánicos rotativos mediante el análisis de vibraciones mecánicas, utilizando el analizador de vibraciones ADASH VA4Pro.

4.4.4 Revisión de las guías de prácticas

Gracias a aporte de *Grover Zurita Villarroel* PhD experto en el tema de “*Análisis de vibraciones*”, *Mariela Cerrada Lozada* PhD experta en la “*Detección de fallos en procesos industriales*”, *René Vinicio Sánchez* M.Sc “*Director de tesis*” y *Omar Llerena ingeniero electrónico*, hicieron posible que las guías de prácticas estén correctamente elaboradas.

Las correcciones que se presentaron durante este proceso fueron en la parte narrativa y su estructura.

- Corrección de la presentación de la práctica
- Corrección de los objetivos
- Corrección de la exposición de la guía de prácticas

4.4.5 Ejecución de la práctica

La ejecución de las prácticas fueron realizadas por estudiantes universitarios de las carreras de ingenierías tanto internos como externos, además con personal de la industria; durante el proceso de ejecución de las guías de prácticas se presentaron correcciones en el procedimiento las cuales fueron corregidas en función de las recomendaciones de los ejecutantes.

Entre esas correcciones y recomendaciones se tiene:

- Corrección: se corrigieron algunos pasos del procedimiento de la guía de prácticas.
- Corrección: se mejoró la estructura del procedimiento de la guía de prácticas.
- Recomendación: agregar fotos para que el procedimiento sea más entendible.
- Recomendación: agregar los pasos que sean necesarios debido a que la guía de prácticas la realizarán personas que no son expertos en el tema.

4.4.6 Evaluación de la guía de prácticas

Para la evaluación de las guías de prácticas se planteó un formato de valoración, la cual se establecieron ciertos puntos que serán calificados por las personas encargadas de ejecutar la práctica [91], estos puntos son:

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

4.4.6.1 Formato de validación de las guías de prácticas

	LABORATORIO DE INGENIERÍAS
	LABORATORIO DE MECÁNICA
FICHA DE VALORACIÓN DE LA GUÍA DE PRÁCTICAS	

Nombre de la práctica:			
Fecha:			
Hora de inicio:		Hora de término:	

1. EVALUACIÓN

Se evaluarán los puntos mencionados anteriormente y se les proporcionarán un puntaje, el cual deberá cumplir según el reglamento Universitario con el 70% aprobado.

ESCALA	EQUIVALENCIA	PUNTAJE
Sobresaliente	Cumple óptimamente con lo previsto en el indicador	3
Satisfactorio	Cumple satisfactoriamente con los requerimientos del indicador	2
Insatisfactorio	Cumple parcialmente con los requerimientos del indicador	1
Deficiente	No cumple	0

Capítulo 4: Guía de prácticas

Señalar con una “X” dentro del cuadro de la escala de valoración, según el valor que crea aceptable.

INDICADOR	ESCALA DE VALORACIÓN			
	3	2	1	0
GUÍA DE PRÁCTICAS A REALIZARSE				
1. Logros de Aprendizaje				
1.1 Los autores de las guías de prácticas proponen lecturas sobre el tema y facilitan las lecturas de forma impresa.				
1.2 Los objetivos de la guía de práctica son mencionados de forma clara y precisa.				
2. Estructura Básica				
2.1 La guía de práctica contiene una estructura teórica explicativa para la persona encargada de elaborar la práctica.				
3. Estrategia Metodológica				
3.1 Los autores de las guías de prácticas establecen una serie de procesos y procedimientos lo suficientemente entendibles para que la práctica sea factible.				
3.2 Los autores de las guías de prácticas proponen acciones o procesos de aprendizaje: observar, investigar, analizar, sintetizar.				
4. Materiales Para La Práctica				
4.1 Son factibles las máquinas, equipos, herramientas, software durante la ejecución de la práctica.				
4.2 Las máquinas, equipos, herramientas, software entre otras disponen su correcto funcionamiento durante la ejecución de la práctica.				

PUNTAJE FINAL	
----------------------	--

2. DATOS EVALUADOR

Nombre:	
Ocupación:	<input type="checkbox"/> Estudiante <input type="checkbox"/> Personal de industria

EN CASO DE SER ESTUDIANTE	
Universidad:	
Carrera:	
Ciclo:	

EN CASO DE SER PERSONAL DE INDUSTRIA	
Profesión:	
Empresa donde labora:	
Cargo en la empresa:	

Firma:	<hr/>
--------	-------

3. RESULTADOS DE LA PRÁCTICA

Los resultados de la práctica se verán reflejados en las conclusiones y en la evaluación de la práctica, establecidas por los estudiantes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Se pudo entender las ventajas y/o desventajas que tiene el análisis de vibraciones con respecto a otras técnicas de monitoreo de condición gracias al aporte teórico desarrollado en este proyecto.
- En este proyecto se aportó con un total de 12000 muestras en la base de datos establecida, la cual contiene información de fallos en los diferentes elementos del sistema rotativo tomadas a 4 velocidades del motor y 3 cargas del freno magnético por cada velocidad, lo que significa un aporte valioso en el desarrollo de temas investigativos en el campo de vibraciones mecánicas, podrían ser utilizadas también en la capacitación de personal de mantenimiento y el entrenamiento de sistemas inteligentes de detección de fallos.
- Se aprovechó todos los sistemas rotativos existentes en el laboratorio los mismos que fueron armados en conjunto, con lo cual se puede decir que es una base de datos completa y única en referencia a los trabajos que se han realizado anteriormente en este campo ya que se combinaron fallos en engranajes, rodamientos y carga radial en el eje de transmisión.
- Se estableció una nomenclatura completa para la configuración de los sistemas mecánicos rotativos lo cual es importante para que los investigadores interesados en este campo, puedan comprender fácilmente el tipo de fallo, posición de los elementos en cada prueba y bajo qué condiciones se la realizó.
- Con las guías de prácticas elaboradas en este proyecto se logro que los estudiantes y personal de la industria ganen conocimientos en el manejo y funcionamiento del equipo analizador de vibraciones ADASH VA4Pro, siendo capaces luego de realizar las prácticas de determinar el estado general de cualquier máquina rotativa así como también detectar fallos en rodamientos con la ayuda de las funciones del equipo y de la teoría que se aborda en la guías de prácticas.

RECOMENDACIONES

- Para trabajos futuros se recomienda adquirir un alineador laser para alineación del motor con el eje de transmisión y la caja de engranajes, puesto que con el método de relojes comparadores la alineación no es tan precisa y requiere demasiado tiempo.
- Se recomienda utilizar las guías de prácticas elaboradas en este proyecto en el aprendizaje en las materias que contemplen este tema tales como mantenimiento.
- Adquirir un calibrador de acelerómetros, para los acelerómetros que se encuentran disponibles en el laboratorio de vibraciones de la Universidad Politécnica Salesiana.
- Se recomienda realizar la adquisición de acelerómetros para el equipo Adash de mayor sensibilidad (300mV/g), para tomar señales en la que los niveles de vibración son bajos.

TRABAJOS FUTUROS

- Se puede levantar una base de datos más completa a futuro tomando en cuenta los efectos que acarrea la desalineación de poleas y la tensión de las bandas elásticas así como también fallos en los ejes de transmisión como por ejemplo fisuras, picaduras o roturas y además fallos en engranajes helicoidales.
- Se puede levantar una base de datos a futuro instalando un torquímetro entre el motor y el eje de transmisión con el fin de determinar de forma precisa y real la potencia del sistema.
- También se puede implementar una tarjeta de adquisición de datos con más canales con el fin de aumentar el número acelerómetros, sensores acústicos o termocuplas para la toma de señales de vibración, emisiones acústicas, o térmicas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Z. YANG, W. I. HOI, and J. ZHONG, "Gearbox fault diagnosis based on artificial neural network and genetic algorithms," in System Science and Engineering (ICSSE), 2011 International Conference on, Macau, China, 2011, pp. 37–42.
- [2] M. WANG and J. WANG, "CHMM for tool condition monitoring and remaining useful life prediction," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 59, no. 5–8, pp. 463–471, Nov. 2011.
- [3] J. QUEVEDO, "Curso sobre detección, diagnóstico de fallos y control tolerante," Universitat Politècnica de Valencia, Valencia, Sep. 2008.
- [4] L. YAGUO, Z. MING J, H. ZHENGJIA, and Z. YANYANG, "A multidimensional hybrid intelligent method for gear fault diagnosis," *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 2, pp. 1419–1430, Mar. 2010.
- [5] P. N. SAAVEDRA, "Mantenimiento predictivo y monitoreo según condición," Universidad de Concepción, Concepción, Biobío, Chile.
- [6] "CAPÍTULO 9: Monitoreo diagnóstico industrial," in http://globalassetmanagement-amp.com/phocadownload/libro_electr/modelos-mixtos/CAPITULO%209.pdf, Global Asset Management, pp. 97–114.
- [7] J. S. MORALES, "Tema 6: Mantenimiento preventivo, predictivo, proactivo," in *Mantenimiento industrial I*, vol. 1, Tecnicatura Superior En Mantenimiento Industrial, 2011, p. 32.
- [8] E. ALPÍZAR VILLEGAS, "Capítulo 5: Mantenimiento," in *Tratamiento de agua para consumo humano*, Lima: Organización Panamericana de la Salud, 2005, pp. 191–246.
- [9] M. BENGTTSSON, "Condition based maintenance systems – an investigation of technical constituents and organizational aspects," Mälardalen University Sweden, Suecia, 2004.
- [10] G. TRUJILLO C, "Monitoreo de Condición – Una estrategia de Integración de Tecnologías," presented at the Primer Congreso Mexicano De Confiabilidad Y Mantenimiento, México, 2003, vol. 1, p. 9.
- [11] C. ALTMANN, "Las técnicas de monitoreo de condición, como herramienta del mantenimiento proactivo," p. 9.
- [12] L. A. GRIJALVA GARCÍA, "Manual de operación, diseño y propuesta de implementación del programa de monitoreo de condición en la planta san miguel de cementos progreso S.A.," Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2004.
- [13] L. XIAOFENG, "Machinery fault diagnostics based on fuzzy measure and fuzzy Integral data fusion techniques," Queensland University of Technology, Australia, 2007.
- [14] A. AHERWAR and K. SAIFULLAH, "Vibration analysis techniques for gearbox diagnostic," *Int. J. Adv. Eng. Technol.*, vol. III, no. II, p. 9, Dec. 2012.
- [15] P. N. SAAVEDRA, "La medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación," Facultad de Ingeniería - Universidad de Concepción, Chile.
- [16] M. A. ELFORJANI, "Condition Monitoring of Slow Speed Rotating Machinery Using Acoustic Emission Technology," School Of Engineering - Cranfield University, 2010.
- [17] T. W. VERBRUGGEN, "Wind turbine operation and maintenance based on condition monitoring." *ECN Wind Energy*, Apr-2003.
- [18] A. PANOPOULOU, "Methodology for innovative health monitoring of aerospace structures using dynamic response measurements and advanced signal processing techniques," University Of Patras, Patras, 2012.
- [19] B. MURAVIN, "Acoustic emission science and technology." *Journal of Building and Infrastructure Engineering of the Israeli Association of Engineers and Architects*, 2009.

- [20] N. MEHALA and R. DAHIYA, "Condition monitoring methods, failure identification and analysis for Induction machines," *Int. J. Circuits Syst. Signal Process.*, vol. 3, no. 1, pp. 10–17, 2009.
- [21] W. T. THOMSON and R. J. GILMORE, "Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives—fundamentals, data interpretation, and industrial case histories," in *Proceedings of the thirty-second turbomachinery symposium*, 2003, pp. 145–156.
- [22] M. R. CESCA, "TEMA 3: Elementos de medición y transmisión," Universidad Nacional de Tucumán, San Miguel de Tucumán, Mar. 2014.
- [23] SENATI, "Módulo 2: Mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo," in *Gestión de mantenimiento*, 1st ed., Independencia – Lima Perú: SENATI, 2007, p. 25.
- [24] E. LABAIEN and G. CARRASCO, "Mantenimiento predictivo: Curso sobre mantenimiento predictivo y sus distintas técnicas de aplicación," PREDICTOVE Ingenieros S.L., Guipúzcoa, Dec. 2009.
- [25] GILBERT D., "The international journal of condition monitoring," *Off. J. Br. Inst. Non-Destr. Test.*, vol. 1, no. 1, p. 44, Jun. 2011.
- [26] W. OLARTE, M. B. ARBELÁEZ, and B. C. ZABALETA, "Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria," *Sci. Tech.*, vol. 2, no. 45, p. 4, Aug. 2010.
- [27] PLANTWEB UNIVERSITY, "Disponibilidad 301: Mejorando la disponibilidad mediante la detección y el monitoreo," p. 11.
- [28] M. A. ROSA PÉREZ, L. A. MILES HERNÁNDEZ, and J. R. PÉREZ LÓPEZ, "Manual de aplicaciones de herramientas y técnicas del mantenimiento predictivo," Universidad De El Salvador, San Salvador, 2009.
- [29] L. MONTORO, T. PUJOL, J. VELAYOS, and J. R. GONZÁLEZ, "Comparativa entre la ferografía analítica y las técnicas espectrométricas de análisis de aceites lubricantes usados," presented at the XVIII congreso nacional de ingeniería mecánica, Catalán, 2010, p. 7.
- [30] ELASTIX, "Transmisión de la voz," ELASTIX. [Online]. Available: <http://elastixtech.com/fundamentos-de-telefonía/transmisión-de-la-voz/>.
- [31] S. MEDINA CÁMARA, "Mantenimiento y seguridad," in *Sistemas mecánicos*, p. 27.
- [32] R. B. RANDALL, *Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications*. Australia: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [33] INNOVACIÓN Y SERVICIO FUCHS, "Servicio mantenimiento predictivo." FUCHS LUBRICANTES, S.A.U.
- [34] M. E. FLORES PARADA, "Propuesta de un laboratorio de ensayos no destructivos para la Escuela de Ingeniería Mecánica," Universidad De El Salvador, San Salvador, 2010.
- [35] SAIT and S.-E. YAHYA I., "A review of gearbox condition monitoring based on vibration analysis techniques diagnostics and prognostics," *Rotating Mach. Struct. Health Monit. Shock Vib.* Vol. 5, pp. 307–324, 2011.
- [36] M. LEBOLD, K. McCLINTIC, R. CAMPBELL, C. BYINGTON, and K. MAYNARD, "Review of vibration analysis methods for gearbox diagnostics and prognostics," in *Proceedings of the 54th meeting of the society for machinery failure prevention technology*, Virginia Beach, VA, 2000, pp. 623–634.
- [37] X. ZHAO, M. J. ZUO, and Z. LIU, "Diagnosis of pitting damage levels of planet gears based on ordinal ranking," in *Prognostics and Health Management (PHM), 2011 IEEE Conference on*, 2011, pp. 1–8.
- [38] H. YANG, J. MATHEW, and L. MA, "Vibration feature extraction techniques for fault diagnosis of rotating machinery: a literature survey," *Sch. Mech. Manuf. Med. Eng.*, p. 8, Dec. 2003.

- [39] N. R. SAKTHIVEL, V. SUGUMARAN, and S. BABUDEVASENAPATI, “Vibration based fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using decision tree,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 6, pp. 4040–4049, Jun. 2010.
- [40] W. Q. WANG, F. ISMAIL, and M. FARID GOLNARAGHI, “Assessment of gear damage monitoring techniques using vibration measurements,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 15, no. 5, pp. 905–922, Sep. 2001.
- [41] F. J. SANZ CORRETGE, “Diagnosis de modos de fallo en máquinas rotativas mediante técnicas basadas en redes neuronales artificiales y en la transformación con ondículas.,” Tesis Doctoral, UNED, 2007.
- [42] J. A. JARA JIMBO and J. G. SINCHI VIVAR, “Diseño y construcción de un banco didáctico para la medición de vibraciones mecánicas en los laboratorios de instrumentación de la Universidad Politécnica Salesiana,” Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2012.
- [43] L. E. BENITEZ HERNANDEZ, “Las fallas en los engranajes,” Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, Colombia.
- [44] 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,” Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2014.
- [45] K. GOPINATH AND M. . MAYURAM, “Gear Failure,” presented at the Module 2 Gear, Madras, 2010.
- [46] REXNORD INDUSTRIES, “Failure analysis gears - shafts - bearings - seals,” LLC, Gear Group, USA, Aug. 1978.
- [47] GARY DELANGE, “Failure Analysis for Gearing,” p. 12.
- [48] L. J. MALES ALCOSER and D. D. MORALES LEMA, “Manual de diagnóstico de fallas de funcionamiento en maquinaria pesada de construcción civil,” Escuela Politécnica Nacional, 2007.
- [49] NSK Bearing Doctor, “Diagnóstico rápido de fallas en rodamientos,” Jan. 2004.
- [50] G. WHITE, *Introducción al análisis de vibraciones*. Massachusetts-USA: AZIMA DLI, 2009.
- [51] FAG, “Averías de los rodamientos,” FAG Sales Europe GmbH, España, 2002.
- [52] V. C. GÓMEZ and R. I. PAREDES, “Diagnóstico de condiciones de operación de rodamientos en máquinas usando espectros de alto orden,” Centro nacional de investigaciones y desarrollo tecnológico, Cuernavaca, Morelos, 2005.
- [53] Z. KIRAL, “Simulation and analysis of vibration signals generated by rolling element bearings with defects,” Dokuz Eylül University, Izmir, 2002.
- [54] O. J. LARA CASTRO, “Nuevas metodologías no invasivas de diagnosis de defectos incipientes en rodamientos de bola,” Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2007.
- [55] I. LEON CEDEÑO, “Análisis de vibraciones mecánicas como base para la ejecución de un plan de mantenimiento predictivo para la maquinaria petrolera (bloque 15) de occidental exploration & production company,” Escuela Politécnica Del Ejército, Sangolquí, 2006.
- [56] NTN Bearing Corporation, “Bearing data sheet,” NTN, 2013. [Online]. Available: <http://www.ntnamericas.com/en/products/bearing-search/bearing-search-results/datasheet?pid=78300&cid=RBSRD&ctc=B>.
- [57] SKF, “Rodamientos de rodillos a rótula, agujero cilíndrico y cónico.” [Online]. Available: <http://www.skf.com/es/products/bearings-units-housings/roller-bearings/spherical-roller-bearings/cylindrical-and-tapered-bore/index.html?prodid=1550532207&imperial=false>.

- [58] G. D. HERNÁNDEZ, “Vibraciones mecánicas,” Chile, 2007, p. 136.
- [59] N. F. GATICA HERNÁNDEZ and P. H. JIMÉNEZ ROSENDE, “Técnica de la demodulación en el diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias,” Universidad Austral de Chile, Valdivia, 2002.
- [60] J. PINTOR BOROBIA, “Tema 8 – Vibraciones en máquinas - mantenimiento predictivo,” Universidad Pública de Navarra, España.
- [61] SDT, “PARAMAX 9000 - serie manual de mantenimiento,” Sumitomo Drive Technologies.
- [62] A. J. CAVANILLES, “Proyecto modelo: reductora de velocidad,” IES, Alicante, 2010.
- [63] GULF, “Aceite para engranajes industriales de servicio pesado,” Gulf EP Lubricant HD.
- [64] P. R. ALBARRACÍN AGUILLÓN, “Sistemas y métodos de lubricación,” in *Tribología y lubricación industrial y automotriz*, 4th ed., vol. 1, pp. 385–389.
- [65] ISO 10816 - 3, Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non - rotating parts - part 3, 1st ed. International Standar, 1998.
- [66] A. ALVAREZ FLORES, “Base de datos de vibraciones para análisis de fallas en rodamientos de bolas,” Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2009.
- [67] ISO 10816 - 1, Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non - rotating parts - part 1, 1st ed. International Standar, 1995.
- [68] ISO 10816 - 2, Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non - rotating parts - part 2, 2nd ed. International Standar, 2001.
- [69] A-MAQ S.A, “Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico.” A-MAQ “Análisis de Maquinaria,” Jan-2005.
- [70] V. MUKESH, “Vibration monitoring system basics.” Forbes Marshall P Ltd Pune.
- [71] S. EBERSBACH, Z. PENG, and N. J. KESSISSOGLU, “The investigation of the condition and faults of a spur gearbox using vibration and wear debris analysis techniques,” *Wear*, vol. 260, no. 1–2, pp. 16–24, Jan. 2006.
- [72] S. EBERSBACH, “Artificial intelligent system for integrated wear debris and vibration analysis in machine condition monitoring,” PhD thesis, University of Queensland, Australia, 2007.
- [73] A. DOČEKAL, M. KREIDL, and R. ŠMÍD, “Evaluation of methods used for separation of vibrations produced by gear transmissions,” *Czech Tech. Univ. Publ. House*, vol. 48, no. 6, p. 7, 2008.
- [74] H. YANG, “Automatic fault diagnosis of rolling element bearings using wavelet based pursuit features,” PhD thesis, Queensland University of Technology, Australia, 2008.
- [75] S. QIAN, “Fault detection in rotating machines by vibration signal processing techniques,” *Università Degli Studi Di Bologna*, 2002.
- [76] A. A. DEDES ROZAS and P. SAAVEDRA GONZÁLEZ, “Técnicas de análisis de vibraciones avanzado para el monitoreo de la condición mecánica de cajas de engranajes,” p. 14, 2010.
- [77] EXA, “Historia climatológica para Cuenca - Ecuador,” EXA - división de ciencias planetarias. [Online]. Available: <http://cue.exa.ec/historia.html>.
- [78] ADASH, “Manual de usuario: ADASH VA4Pro,” Czech Republic, 2011.
- [79] ADASH, “Sección I: Vibration sensors - Accelerometers.”
- [80] TAM, “Mantenimiento - MANTENIMIENTO PREDICTIVO,” *Tecnología avanzada para mantenimiento. S.A de C.V.* [Online]. Available: http://www.tam.com.mx/a4400_0.html.
- [81] A. J. ALVAREZ RAMIREZ, “Técnicas de diagnósticos de daños incipientes en rodamientos,” Universidad de Magallanes, Chile, 2005.

- [82] R. A. VALENCIA MEZA, “Análisis del efecto de la variación de velocidad sobre el espectro de vibración en equipos rotodinámicos,” Universidad Autónoma del Occidente, Santiago de Cali, 2014.
- [83] E. A. ESTUPIÑAN and P. N. SAAVEDRA, “Análisis de vibraciones aplicado a las máquinas rotatorias de baja velocidad,” p. 6, 2010.
- [84] SKF Reliability Maintenance Institute, “Análisis de vibraciones categoría 2: ISO 18436,” 2010.
- [85] B. J. SMITH, R. J. PETERS, and S. OWEN, Acoustics and noise control, 2nd ed. Longman Malaysia, 1996.
- [86] E. ESTUPIÑAN and P. SAAVEDRA, “Técnicas de diagnóstico para el análisis de vibraciones de rodamientos.” 26-Nov-2011.
- [87] J. A. ROYO and G. RABANAQUE, “Análisis de vibraciones e interpretación de datos,” Universidad de Zaragoza, p. 14, 2012.
- [88] M. U. BRITO and D. MÉNDEZ, “Introducción a las vibraciones mecánicas.” 2007.
- [89] E. P. MARÍN, “La medición y el análisis de vibración en el diagnóstico de máquinas rotativas.” RENOVETEC.
- [90] ISO, “ISO 2041:2009 - Mechanical vibration, shock and condition monitoring - Vocabulary,” ISO, 2009. [Online]. Available: http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=35848.
- [91] V. G. VENEGAS RIERA, “Elaboración e implementación de las guías de prácticas para los laboratorios de mecánica de fluidos, máquinas térmicas, máquinas hidráulicas, termodinámica, transferencia de calor, automatismos, metrología, fundición, tratamientos térmicos y CNC.,” Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2012.
- [92] J. M. BARBECHO BARBECHO and A. P. SARMIENTO CAJAMARCA, “Diseño e implementación de tres bancos didácticos de instrumentación industrial para la medición de fuerza - desplazamiento y temperatura en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca,” Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2013.

ANEXOS

ANEXOS

Anexo I. Programación de las combinaciones completas de fallos en MatLab

```

%% Cálculo de Combinaciones de fallos en: engranajes, rodamientos y ejes
% Programa para evaluar las posibles combinaciones de fallos en el banco
% de vibraciones

clc;
clear all;
close all;

%% Cálculo con engranajes (para Z1 y Z3)

% 1 Sin fallo
% 2 Fallos por desgaste
% 3 Fatiga Superficial

n = 3; % Número total de fallos
K = 1; % Número de ubicaciones de fallos

engranajes1 = unique(nchoosek(repmat([1:n],1,K),K), 'rows');

%% Cálculo con engranajes (para Z2 y Z4)

% 1 Sin fallo
% 2 Rayado y escoriado
% 3 Rotura de diente

n = 3; % Número total de fallos
K = 1; % Número de ubicaciones de fallos

engranajes2 = unique(nchoosek(repmat([1:n],1,K),K), 'rows');

%% Cálculo con ejes de la caja reductora

% 1 Sin fallo
% 2 Desalineación angular

n = 2; % Número total de fallos
K = 1; % Número de ubicaciones de fallos

ejes_caja = unique(nchoosek(repmat([1:n],1,K),K), 'rows');

%% Cálculo con rodamientos 1 de la caja reductora

% 1 Sin fallo
% 2 Fallo pista exterior
% 3 Fallo Pista Interior
% 4 Fallo de los elementos rodantes

n = 4; % Número total de fallos
K = 1; % Número de ubicaciones de fallos

```

```

rodamientos1 = unique(nchoosek(repmat([1:n],1,K),K), 'rows');

%% Cálculo con rodamientos 2 de la caja reductora

% 1 Sin fallo
% 2 Fallo pista exterior
% 3 Fallo Pista Interior
% 4 Fallo de los elementos rodantes

n = 4; % Número total de fallos
K = 1; % Número de ubicaciones de fallos

rodamientos2 = unique(nchoosek(repmat([1:n],1,K),K), 'rows');

%% Cálculo con rodamientos en el eje

% 1 Sin fallo
% 2 Fallo pista exterior
% 3 Fallo de los elementos rodantes

n = 3; % Número total de fallos
K = 1; % Número de ubicaciones de fallos

rodamientos3 = unique(nchoosek(repmat([1:n],1,K),K), 'rows');

%% Cálculo con ejes transmisión

% 1 Sin fallo
% 2 Desalineación combinada
% 3 Desbalanceo estático
% 4 Desbalanceo dinámico
% 5 Carga axial
% 6 Carga radial

n = 6; % Número total de fallos
K = 1; % Número de ubicaciones de fallos

eje = unique(nchoosek(repmat([1:n],1,K),K), 'rows');

%% Cálculo total de combinaciones

size_engranajes1 = size(engranajes1);
size_engranajes2 = size(engranajes2);
size_ejescaja = size(ejes_caja);
size_rodamientos1 = size(rodamientos1);
size_rodamientos2 = size(rodamientos2);
size_rodamientos3 = size(rodamientos3);
size_eje = size(eje);
total=size_engranajes1(1,1)*size_engranajes2(1,1)*size_ejescaja(1,1)*size_rodamientos1(1,1)*size_rodamientos2(1,1)*size_rodamientos3(1,1)*size_eje(1,1);
colum=size_engranajes1(1,2)+size_engranajes2(1,2)+size_ejescaja(1,2)+size_rodamientos1(1,2)+size_rodamientos2(1,2)+size_rodamientos3(1,2)+size_eje(1,2);

```

```

mat_total=zeros(864,colum);

p=0;

for s=1:size_engranajes1(1,1)
    for t=1:size_engranajes2(1,1)
        for u=1:size_ejescaja(1,1)
            for v=1:size_rodamientos1(1,1)
                for w=1:size_rodamientos2(1,1)
                    for x=1:size_rodamientos3(1,1)
                        for y=1:size_eje(1,1)
                            p=p+1;

mat_total(p,:)=[engranajes1(s,:),engranajes2(t,:),ejes_caja(u,:),rodamien
tos1(v,:),rodamientos2(w,:),rodamientos3(x,:),eje(y,:)]';
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

disp('Número total de combinaciones:');

disp(total);

disp('Combinaciones:');

disp(mat_total);

```

Anexo II. Combinaciones seleccionadas para la pruebas

- En una etapa de la caja de reductora

# Combinación	Z1	Z2	S-CAJA	B1-B3	B2-B4	B7-B8	S4	NOMENCLATURA
1	1	1	1	1	1	1	1	Z1_1_1Z2_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 I1A1J1A3K1A1L1C1T1
2	1	1	1	1	2	1	1	Z1_1_1Z2_1_1B1_1_1B2_2_1B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 I1A1J1A3K1A1L1C1T2
3	1	1	1	1	4	1	1	Z1_1_1Z2_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_4_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 I1A1J1A3K1A1L1C1T3
4	1	1	1	2	2	1	1	Z1_1_1Z2_1_1B1_2_1B2_1_1B3_1_1B4_2_2S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 I1A1J1A3K1A1L1C1T4
5	1	1	1	2	3	1	1	Z1_1_1Z2_1_1B1_1_1B2_3_1B3_2_2B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 I1A1J1A3K1A1L1C1T5
6	1	1	1	3	2	1	1	Z1_1_1Z2_1_1B1_3_1B2_2_1B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 I1A1J1A3K1A1L1C1T6
7	1	1	1	3	3	1	1	Z1_1_1Z2_1_1B1_1_1B2_1_1B3_3_2B4_3_2S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 I1A1J1A3K1A1L1C1T7
8	1	1	1	3	4	1	1	Z1_1_1Z2_1_1B1_3_1B2_1_1B3_1_1B4_4_2S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 I1A1J1A3K1A1L1C1T8
9	1	1	1	4	1	1	1	Z1_1_1Z2_1_1B1_1_1B2_1_1B3_4_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 I1A1J1A3K1A1L1C1T9
10	1	1	1	4	3	2	6	Z1_1_1Z2_1_1B1_4_2B2_3_1B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_1U_0B7_2_1B8_1_1S4_1_1 I1A1K1A1K7A3L1C1T10

11	1	2	1	1	3	1	1	Z1_1_1Z2_2_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_3_2S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T11
12	1	2	1	1	4	1	1	Z1_1_1Z2_2_2B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_4_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T12
13	1	2	1	2	1	1	1	Z1_1_1Z2_2_3B1_1_1B2_1_1B3_3_2B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T13
14	1	2	1	2	4	1	1	Z1_1_1Z2_2_1B1_2_2B2_4_2B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T14
15	1	2	1	3	1	1	1	Z1_1_1Z2_2_2B1_1_1B2_1_1B3_3_2B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T15
16	1	2	1	3	3	1	1	Z1_1_1Z2_2_3B1_3_1B2_1_1B3_1_1B4_3_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T16
17	1	2	1	3	4	3	6	Z1_1_1Z2_2_1B1_1_1B2_4_1B3_3_2B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_1U_0B7_1_1B8_3_1S4_1_1 IIA1K1A1K8A3L1C1T17
18	2	2	1	2	4	1	1	Z1_2_1Z2_2_2B1_2_1B2_4_2B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T18
19	2	2	1	3	1	1	1	Z1_2_1Z2_2_3B1_1_1B2_1_1B3_3_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T19
20	2	2	1	3	2	1	1	Z1_2_1Z2_2_1B1_3_2B2_1_1B3_1_1B4_2_2S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T20
21	2	2	1	3	3	1	1	Z1_2_1Z2_2_2B1_1_1B2_3_2B3_3_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T21
22	2	2	1	4	2	1	1	Z1_2_1Z2_2_3B1_4_1B2_2_1B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T22
23	2	2	1	4	3	1	1	Z1_2_1Z2_2_1B1_1_1B2_1_1B3_4_2B4_3_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T23
24	2	3	1	1	2	1	1	Z1_2_1Z2_3_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_2_2S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T24
25	2	3	1	1	3	1	1	Z1_2_1Z2_3_2B1_1_1B2_3_2B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T25

26	2	3	1	1	4	3	6	Z1_2_1Z2_3_3B1_1_1B2_4_1B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_1U_0B7_3_1B8_1_1S4_1_1 IIA1K1A1K7A3L1C1T26
27	2	3	1	2	1	1	1	Z1_2_1Z2_3_1B1_1_1B2_1_1B3_2_2B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T27
28	2	3	1	2	3	1	1	Z1_2_1Z2_3_2B1_2_1B2_1_1B3_1_1B4_3_2S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T28
29	2	3	1	2	4	1	1	Z1_2_1Z2_3_3B1_1_1B2_4_2B3_2_2B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T29
30	2	3	1	3	3	1	1	Z1_2_1Z2_3_1B1_3_2B2_3_2B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T30
31	2	3	1	3	4	1	1	Z1_2_1Z2_3_2B1_1_1B2_1_1B3_3_1B4_4_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T31
32	2	3	1	4	1	1	1	Z1_2_1Z2_3_3B1_4_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T32
33	2	3	1	4	3	1	1	Z1_2_1Z2_3_1B1_1_1B2_3_1B3_4_2B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T33
34	2	3	1	4	4	3	6	Z1_2_1Z2_3_2B1_4_1B2_4_2B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_1U_0B7_1_1B8_3_1S4_1_1 IIA1K1A1K8A3L1C1T34
35	3	1	1	1	1	1	1	Z1_3_1Z2_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T35
36	3	1	1	1	2	1	1	Z1_3_1Z2_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_2_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T36
37	3	1	1	1	3	1	1	Z1_3_1Z2_1_1B1_1_1B2_3_2B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T37
38	3	1	1	2	1	1	1	Z1_3_1Z2_1_1B1_2_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T38
39	3	1	1	2	4	1	1	Z1_3_1Z2_1_1B1_1_1B2_1_1B3_2_2B4_4_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T39
40	3	1	1	3	2	2	6	Z1_3_1Z2_1_1B1_3_2B2_1_1B3_1_1B4_2_2S1_1_1S2_1_1AL_ORL_1U_0B7_2_1B8_1_1S4_1_1 IIA1K1A1K7A3L1C1T40

41	3	1	1	3	2	1	1	Z1_3_1Z2_1_1B1_1_1B2_2_1B3_3_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T41
42	3	1	1	3	1	1	1	Z1_3_1Z2_1_1B1_3_2B2_1_1B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T42
43	3	1	1	4	1	1	1	Z1_3_1Z2_1_1B1_1_1B2_1_1B3_4_2B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T43
44	3	1	1	4	2	1	1	Z1_3_1Z2_1_1B1_4_1B2_1_1B3_1_1B4_2_2S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T44
45	3	1	1	4	4	1	1	Z1_3_1Z2_1_1B1_1_1B2_4_1B3_4_2B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T45
46	3	2	1	1	1	1	1	Z1_3_1Z2_2_2B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T46
47	3	2	1	1	3	1	1	Z1_3_1Z2_2_3B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_3_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T47
48	3	2	1	1	4	1	1	Z1_3_1Z2_2_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_4_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T48
49	3	2	1	2	1	1	1	Z1_3_1Z2_2_2B1_1_1B2_1_1B3_2_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1 IIA1J1A3K1A1L1C1T49
50	3	2	1	2	3	2	6	Z1_3_1Z2_2_3B1_2_2B2_3_2B3_1_1B4_1_1S1_1_1S2_1_1AL_ORL_1U_0B7_1_1B8_2_1S4_1_1 IIA1K1A1K8A3L1C1T50

- En dos etapas de la caja reductora

# Combinación	Z1-Z3	Z2-Z4	S-CAJA	B1-B3-B5	B2-B4-B6	B7-B8	S4	NOMENCLATURA
1	1	1	1	1	1	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T1
2	1	2	1	4	2	1	1	Z1_1_1Z2_2_1Z3_1_1Z4_1_1B1_4_1B2_2_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T2
3	1	2	1	4	3	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_2_1B1_4_1B2_1_1B3_1_1B4_3_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T3
4	1	3	1	1	1	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_3_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T4
5	1	3	1	1	3	1	1	Z1_1_1Z2_3_1Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_3_2B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T5
6	1	3	1	1	4	1	1	Z1_1_1Z2_3_2Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_4_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T6
7	1	3	1	2	1	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_3_2B1_1_1B2_1_1B3_2_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T7
8	1	3	1	2	2	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_3_1B1_1_1B2_2_2B3_1_1B4_1_1B5_2_2B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T8
9	1	3	1	2	3	3	6	Z1_1_1Z2_3_3Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_3_1B5_2_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_1U_0B7_3_1B8_1_1S4_1_1I1A1K1A1K7A3L1C1T9
10	1	3	1	3	1	1	1	Z1_1_1Z2_3_1Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_3_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T10
11	1	3	1	3	2	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_3_2B1_3_2B2_2_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T11

12	1	3	1	3	3	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_3_1B1_3_1B2_1_1B3_1_1B4_3_2B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T12
13	1	3	1	3	4	1	1	Z1_1_1Z2_3_2Z3_1_1Z4_1_1B1_3_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_4_2S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T13
14	1	3	1	4	1	1	1	Z1_1_1Z2_3_3Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_4_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T14
15	1	3	1	4	3	2	6	Z1_1_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_3_2B1_1_1B2_1_1B3_4_2B4_3_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_1U_0B7_1_1B8_2_1S4_1_1I1A1K1A1K8A3L1C1T15
16	1	3	1	4	4	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_3_1B1_1_1B2_1_1B3_4_1B4_1_1B5_1_1B6_4_2S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T16
17	2	1	1	1	1	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_2_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T17
18	2	1	1	1	2	1	1	Z1_2_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_2_2B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T18
19	2	1	1	1	3	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_2_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_3_2S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T19
20	2	1	1	2	1	1	1	Z1_2_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_1_1B1_2_2B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T20
21	2	1	1	2	2	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_2_1Z4_1_1B1_2_1B2_1_1B3_1_1B4_2_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T21
22	2	1	1	2	3	3	6	Z1_2_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_1_1B1_2_2B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_3_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_1U_0B7_3_1B8_1_1S4_1_1I1A1K1A1K7A3L1C1T22
23	2	1	1	3	1	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_2_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_3_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T23
24	2	1	1	3	2	1	1	Z1_2_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_3_2B4_2_2B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T24
25	2	1	1	3	4	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_2_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_3_1B4_1_1B5_1_1B6_4_2S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T25
26	2	1	1	4	1	1	1	Z1_2_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_4_2B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T26

27	2	1	1	4	3	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_2_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_3_2B5_4_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T27
28	2	1	1	4	4	1	1	Z1_2_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_4_2B6_4_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T28
29	2	2	1	1	1	1	1	Z1_1_1Z2_2_2Z3_2_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T29
30	2	2	1	1	2	1	1	Z1_2_1Z2_2_3Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_2_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T30
31	2	2	1	1	3	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_2_1Z4_2_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_3_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T31
32	2	2	1	1	4	1	1	Z1_2_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_2_1B1_1_1B2_4_2B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T32
33	2	2	1	2	3	2	6	Z1_1_1Z2_2_1Z3_2_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_2_1B4_3_2B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_1U_0B7_1_1B8_2_1S4_1_1I1A1K1A1K8A3L1C1T33
34	3	2	1	2	4	1	1	Z1_3_1Z2_2_2Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_2_2B4_1_1B5_1_1B6_4_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T34
35	2	2	1	3	1	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_2_1Z4_2_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_3_2B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T35
36	3	2	1	3	4	1	1	Z1_3_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_2_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_4_2B5_3_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T36
37	2	2	1	4	1	1	1	Z1_1_1Z2_2_3Z3_2_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_4_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T37
38	3	2	1	4	3	1	1	Z1_3_1Z2_2_1Z3_1_1Z4_1_1B1_4_2B2_3_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T38
39	2	2	1	4	4	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_2_1Z4_2_1B1_4_1B2_1_1B3_1_1B4_4_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T39
40	3	3	1	1	3	1	1	Z1_3_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_3_2B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_3_2S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T40
41	2	3	1	1	4	1	1	Z1_1_1Z2_3_1Z3_2_1Z4_1_1B1_1_1B2_4_2B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T41

42	3	3	1	2	1	3	6	Z1_3_1Z2_3_2Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_2_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_1U_0B7_3_1B8_1_1S4_1_1I1A1K1A1K7A3L1C1T42
43	2	3	1	2	2	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_2_1Z4_3_1B1_1_1B2_1_1B3_2_2B4_1_1B5_1_1B6_2_2S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T43
44	3	3	1	2	4	1	1	Z1_3_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_3_2B1_1_1B2_4_1B3_1_1B4_1_1B5_2_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T44
45	2	3	1	3	1	1	1	Z1_1_1Z2_3_3Z3_2_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_3_2B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T45
46	3	3	1	3	2	1	1	Z1_3_1Z2_3_1Z3_1_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_3_1B6_2_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T46
47	2	3	1	3	4	1	1	Z1_1_1Z2_1_1Z3_2_1Z4_3_1B1_3_2B2_4_2B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T47
48	3	3	1	4	1	1	1	Z1_3_1Z2_1_1Z3_1_1Z4_3_2B1_1_1B2_1_1B3_4_2B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T48
49	2	3	1	4	2	1	1	Z1_1_1Z2_3_2Z3_2_1Z4_1_1B1_1_1B2_1_1B3_1_1B4_1_1B5_4_1B6_2_2S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_0U_0B7_1_1B8_1_1S4_1_1I1A1J1A3K1A1L1C1T49
50	3	3	1	4	3	3	6	Z1_3_1Z2_3_3Z3_1_1Z4_1_1B1_4_2B2_3_1B3_1_1B4_1_1B5_1_1B6_1_1S1_1_1S2_1_1S3_1_1 AL_ORL_1U_0B7_1_1B8_3_1S4_1_1I1A1K1A1K8A3L1C1T50

Anexo III. Uso del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro.

**USO DEL ANALIZADOR DE VIBRACIONES
ADASH VA4Pro**

David Romero, Santiago Niveló, estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica,
correo electrónico: dromeror@est.ups.edu.ec y sniveló@est.ups.edu.ec
Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de [Ingeniería Mecánica](#)
Asignatura: [Análisis de vibraciones](#), Cuenca – Ecuador, Fecha de entrega: 23-10- 2014

1. Presentación de la práctica

En la presente práctica se realizará diferentes mediciones de vibraciones mecánicas en una máquina herramienta con el propósito de entender el funcionamiento del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro.

2. Requisitos, conocimientos y precauciones previos a realizar la práctica

Para realizar esta práctica es necesario tener los conocimientos básicos sobre el funcionamiento del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro y los fundamentos de la vibración mecánica, para ello se recomiendan realizar una lectura de los siguientes textos:

- Manual de usuario: ADASH VA4Pro [1] pág. 8, 10-12, 17, 18, 31-38, 44,45
- Introducción al análisis de vibraciones [2] pág. 16, 22-25, 27-30, 53-56, 63-68

El estudiante debe tener en consideración la siguiente precaución antes de desarrollar la práctica.

- Verificar que la batería del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro se encuentre con una carga mayor al 50%.

3. Objetivos

- Entender el funcionamiento del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro.
- Manipular el analizador de vibraciones ADASH VA4Pro.
- Realizar mediciones de vibraciones mecánicas de un torno paralelo del laboratorio de máquinas herramientas.
- Evaluar la severidad de vibración del torno paralelo.
- Identificar las características de la vibración en un espectro de frecuencia.

4. Equipos, instrumentos y software

Tabla 1. Tabla de equipos e instrumentos.

Descripción	Marca	Modelo
Analizador de vibraciones	ADASH	ADASH VA4Pro
Acelerómetro	ADASH	A 102-A1
Torno paralelo	EASTAR	S430

5. Normas de seguridad

- Para la ejecución de la práctica, es de carácter obligatorio el uso de mandil y gafas de en los laboratorios
- En caso de requerir los laboratorios de máquinas herramientas es necesario no portar o vestir elementos sueltos tales como: cadenas, anillos cabello largo, pulseras, corbata, entre otros.

6. Exposición

6.1 Descripción del analizador de vibraciones “ADASH VA4Pro”

En la figura 1 se ilustra el analizador de vibraciones ADASH VA4Pro, este es un instrumento de medición, usado para la medición y el diagnóstico de vibraciones especialmente para sistemas mecánicos rotativos.



Figura 1. Analizador de vibraciones - ADASH VA4Pro. Fuente [1]

En la figura 2 se presenta la información general del panel superior del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro, el cual tiene cuatro tomas de entradas (*IN 1*, *IN 2*, *IN 3*, *IN 4*); estos son canales simultáneos basados en ICP “*Integrated Circuit Piezoelectric*” de corriente alterna (*AC*) y canales de corriente directa (*DC*) para mediciones de procesos, además cuenta con un canal para señales de disparo o tacómetro (*TRIG*). El instrumento está programado para que se apague automáticamente después de cinco minutos, si no está en uso [1].

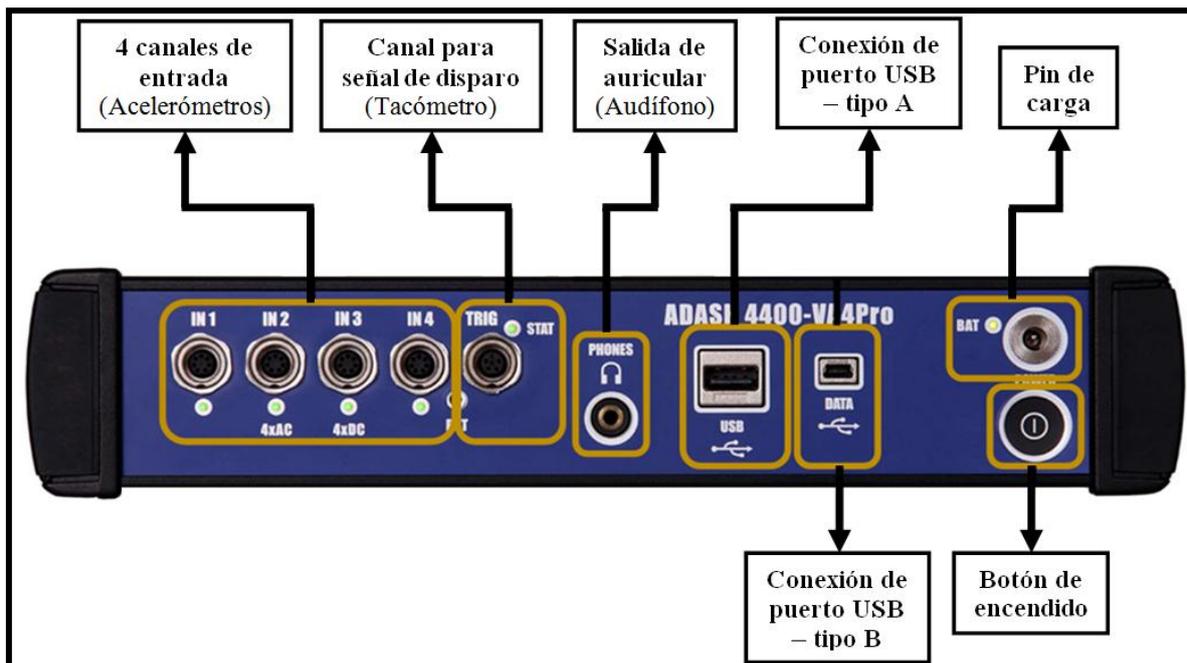


Figura 2. Información general del panel superior de ADASH VA4Pro. Fuente [1]

6.2 Fundamentos de la vibración mecánica

6.2.1 Vibración

Es la oscilación o el movimiento repetitivo en una sola dirección de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. La posición de equilibrio es la que llegará cuando la fuerza o sumatoria de fuerzas que actúa sobre él sea cero [2]. La vibración de un objeto es causada por una fuerza excitación, que puede ser interna o externa al objeto [2][3]. Las señales de vibración pueden ser observadas tanto para el tiempo como de la frecuencia.

6.2.2 Características de la vibración

La condición de una máquina y sus problemas mecánicos se determinan midiendo las características de su vibración, que varían de acuerdo a la causa que la ocasiona.

Al medir estas características, se puede detectar el movimiento vibratorio de las máquinas y de esta forma se puede diagnosticar el funcionamiento de la máquina o en su defecto la presencia de un problema eminente [3].

Frecuencia: número de ciclos completados en un período determinado de tiempo.

Periodo: tiempo necesario para completar un ciclo de movimiento.

Amplitud: es la magnitud de la vibración o la cantidad de desplazamiento, velocidad o aceleración de la vibración, medida desde el valor en reposo.

Frecuencia natural: sólo depende de la masa y la rigidez del sistema.

Resonancia: se da cuando un sistema es excitado por una fuerza armónica externa y esta frecuencia iguala a la frecuencia natural del sistema. Cuando ocurre la resonancia, los niveles de vibración que resultan pueden ser muy altos y pueden causar daños muy rápidamente.

En la tabla 2, se muestran las ecuaciones y unidades de las características de la vibración.

Tabla 2. Ecuaciones y unidades de las características de la vibración. Fuente [2]

Característica de la vibración	Ecuación	Unidades
Frecuencia	$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2 \cdot \pi} = \frac{RPM}{60}$	Hertzio [Hz]
Periodo	$T = \frac{1}{f} = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}$	Segundos [s]
Velocidad angular	$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$	RPM
Frecuencia natural	$F_n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{m}}$	Hertzio [Hz]
Donde: f = Frecuencia T = Tiempo ω = velocidad angular F _n = Frecuencia natural k = Constante del resorte o rigidez m = Masa		

6.2.3 Parámetros de medición de vibraciones para describir movimiento

Al efectuar la medición del nivel de vibraciones es necesario definir qué magnitud física se desea cuantificar para describir la vibración [3][4].

Desplazamiento: es una cantidad vectorial que describe el cambio de posición de un cuerpo o partícula con respecto a un sistema de referencia. La métrica particular de esta variable es el valor “pico a pico”

Velocidad: es un vector que especifica la derivada del desplazamiento en el tiempo. La métrica particular de esta variable es el valor “pico”.

Aceleración: es un vector que especifica la derivada de la velocidad en el tiempo. La métrica particular de esta variable es el valor “rms”

En la tabla 3, se muestran las unidades de medición empleadas para cuantificar los niveles de vibración según la norma ISO 1000 [4].

Tabla 3. Unidades de medición de vibraciones. Fuente [5]

Magnitud	Unidades		
	ISO	SI	IMPERIAL
Desplazamiento	μm	μm	Mils
Velocidad	mm/s	mm/s	in/seg
Aceleración	g = 9.807 m/s ²	m/s ²	G = 32.2 ft/s ²

6.3 Espectro de vibración

La señal de vibración obtenida de una máquina rotativa se muestran en el dominio del tiempo y son señales de vibración complejas, esto se convierte en un problema al momento de realizar un diagnostico de la máquina, para ello es necesario convertir estas señales al dominio de la frecuencia mediante técnicas de procesamiento, una de las más usadas es la

transformada rápida de fourier [3]. En la figura 3 se muestra una señal en el dominio del tiempo transformada al dominio de la frecuencia.



Figura 3. Señales en el dominio del tiempo y dominio de la frecuencia. Fuente [3]

En un espectro de vibración se analizan dos componentes [5]:

1. La amplitud indica la severidad de la fallo, mayor amplitud mayor el problema.
2. La frecuencia a la cual la vibración ocurre indica el tipo de fallo.

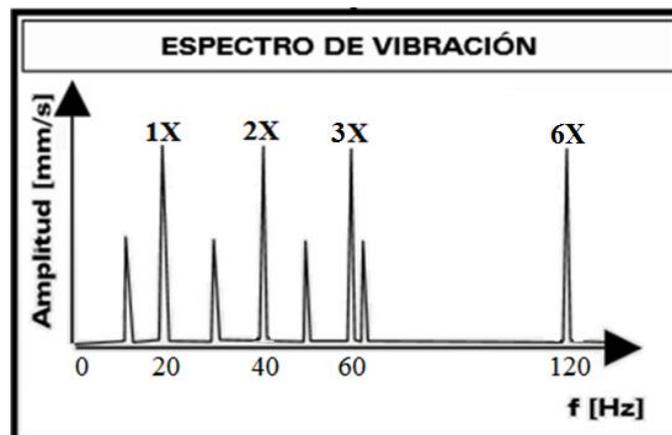


Figura 4. Espectro de vibración de un rodamiento. Fuente [2]

Dentro del espectro de vibración se pueden presentar una serie de armónicos, que son múltiplos enteros de la velocidad de rotación de la máquina, en la figura 4 se puede observar picos a 1X, 2X, 3X, 6X, estos valores se los conoce como armónicos.

6.4 Severidad de la vibración

Las máquinas rotativas poseen una vibración característica en las condiciones normales de funcionamiento, esta vibración cambiará debido a la presencia de fallos en uno o varios de sus elementos.

El objetivo principal de usar el monitoreo de la vibración en máquinas rotativas, es detectar el fallo de sus elementos y poder programar el procedimiento de corrección adecuado [3].

Para determinar la severidad de vibración se utiliza el valor pico y RMS de la misma, en la tabla 4 se muestra los rangos de severidad de vibración de acuerdo al tipo de máquina según la norma ISO 10816-1.

Tabla 4. Severidad de vibración según norma ISO 10816-1. Fuente [6]

VELOCIDAD DE LA VIBRACIÓN		LÍMITES DEL RANGO DE VELOCIDAD Y CLASE DE MÁQUINA			
mm/s RMS	in/s Pico	Máquinas pequeñas Clase I	Máquinas medianas Clase II	Máquinas grandes	
				Soportes rígidos Clase III	Soportes menos rígidos Clase IV
0.28	0.02	Buena	Buena	Buena	Buena
0.45	0.03				
0.71	0.04				
1.12	0.06	Satisfactoria	Satisfactoria	Satisfactoria	Buena
1.80	0.10				
2.80	0.16	Insatisfactoria (alerta)	Insatisfactoria (alerta)	Satisfactoria	Satisfactoria
4.50	0.25	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)	Insatisfactoria (alerta)	
7.10	0.40			Insatisfactoria (alerta)	
11.20	0.62			Insatisfactoria (alerta)	
18.00	1.00	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)	Insatisfactoria (alerta)
28.00	1.56			Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)
45.00	2.51			Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)

6.3.1 Clasificación de máquinas

Las máquinas están clasificadas por Clase I, Clase II, Clase III y Clase IV.

Tabla 5. Clasificación de las máquinas según norma ISO 10816-1 [5].

CLASE	DESCRIPCIÓN
Clase I	Partes de máquinas y motores hasta 15KW (20 HP)
Clase II	Máquinas de tamaño medio hasta los 300 KW (400 HP)
Clase III	Máquinas grandes montadas en soportes rígidos. La frecuencia natural de la máquina y la estructura está por encima de la frecuencia de excitación del equipo
Clase IV	Máquinas grandes de 10 MW (13404 HP) con soporte flexible en la dirección de la medida de vibración

6.5 Sensor de aceleración (acelerómetro)

Son transductores que convierten el movimiento mecánico en una señal eléctrica a escala, usados por su relativa simplicidad, robustez y confiabilidad. Cada sensor de aceleración posee una sensibilidad característica que es medida en mV/g (milivoltios/gravedad).

Los acelerómetros se colocan lo más cercano al elemento de máquina que se desee analizar, ya sea en posición horizontal, vertical o axial, como se ilustra en la figura 5.

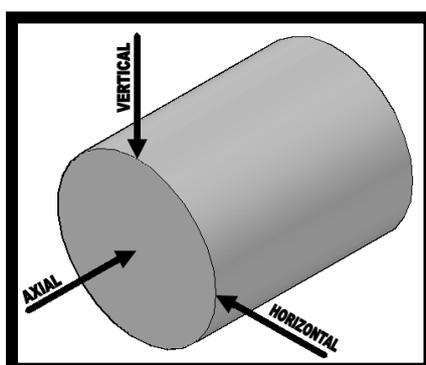


Figura 5. Posición del acelerómetro. Fuente [2]

La figura 6 muestra la curva de respuesta típica en frecuencia para un acelerómetro piezoeléctrico, esta curva indica los límites de la frecuencia en los que el acelerómetro puede trabajar, los límites de esta frecuencia dependen del tipo de montaje.

Cuando un acelerómetro se encuentra en el límite inferior los recopiladores de datos deben de tener un retraso integrado, para asegurar que la unidad está en condición estable. Si el retraso es demasiado breve, la forma de onda de tiempo tendrá una rampa de voltaje en forma exponencial superpuesta sobre los datos y en el espectro se verá una característica creciente de muy baja frecuencia.

Cuando un acelerómetro sobrepasa el límite superior de la frecuencia de trabajo se le denomina frecuencia de resonancia del acelerómetro y esto hará que sea imposible cuantificar la vibración en la máquina.

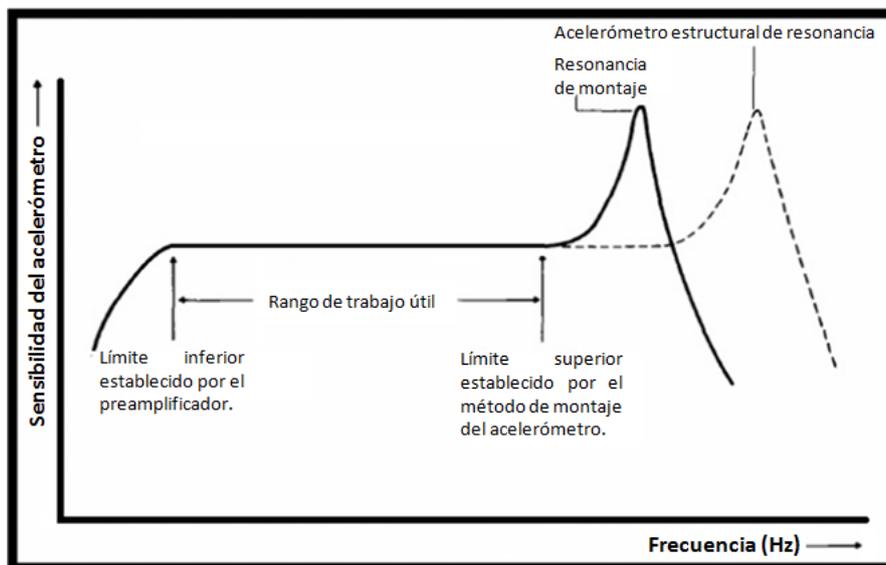


Figura 6. Curva de respuesta típica en frecuencia para un acelerómetro piezoeléctrico. Fuente [7]

Las técnicas de montaje más usadas son:

Con tornillo: su respuesta típica en frecuencia alcanza hasta los 10 KHz.

Con pegamento adhesivo: su respuesta típica en frecuencia alcanza hasta los 7.5 KHz.

Con base magnética: su respuesta típica en frecuencia alcanza hasta los 5 KHz.

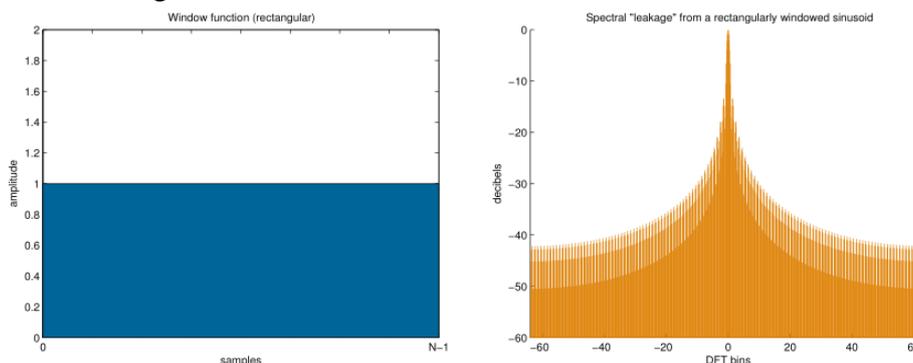
Con sonda de mano: su respuesta típica en frecuencia alcanza hasta los 500 Hz.

Debido a su fácil montaje y a que su respuesta típica es aceptable, la técnica de montaje más usada es con base magnética.

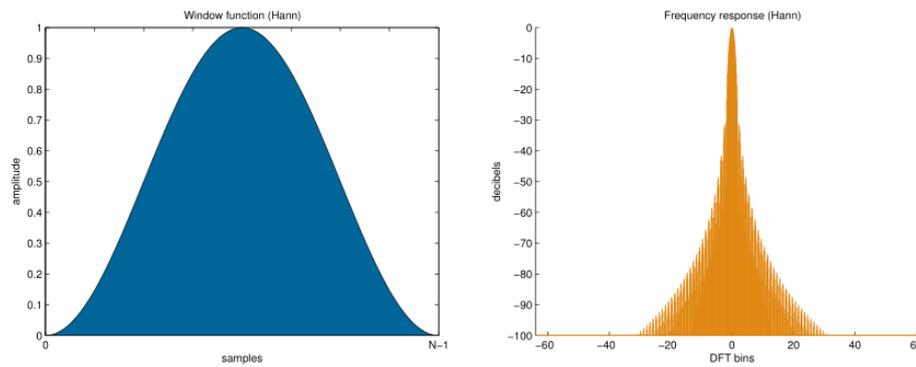
6.6 Ventanas

Se usan para eliminar fugas en el análisis de la transformada rápida de fourier, con esto se logra mejorar la señal del espectro, entre las ventanas más usadas están: [5]

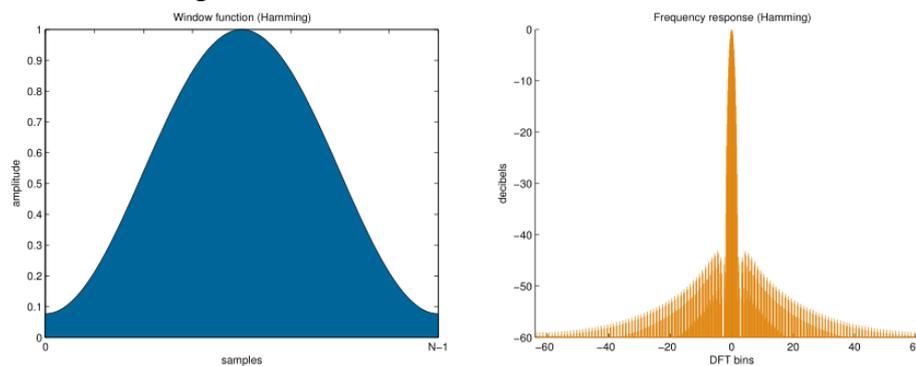
- Ventana Rectangular:



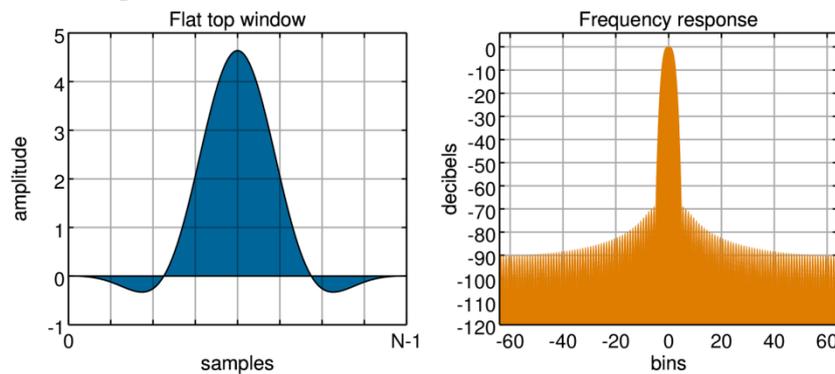
- Ventana Hanning:



- Ventana Hamming:



- Ventana Flat Top:



La ventana Hanning es satisfactoria en el 95% de los casos. Tiene una buena resolución de frecuencia y reduce la fuga espectral, además se aplica cuando se desconoce la naturaleza de la señal, por lo tanto, esto hace que la ventana Hanning sea la más usada en el análisis del espectro [5].

6.7 Número de promedios espectrales

Es un compromiso entre la precisión y la validez de los datos del análisis y el tiempo de recolección de datos; entre mayor sea el número de promedios mayor será el tiempo para la recolección de datos. Los promedios espectrales se utilizan para atenuar irregularidades que no son propias del sistema mecánico, se recomienda usar entre 4 a 8 promedios en máquinas rotativas [5].

7. Proceso y procedimiento

7.1 Proceso

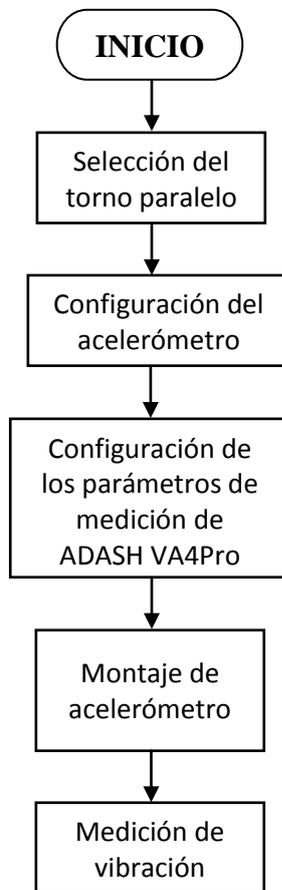


Figura 7. Procesos para el uso del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro. Fuente: Los autores

7.2 Procedimiento

A continuación se describe el procedimiento para el desarrollo de la práctica.

7.2.1 Selección del torno paralelo

1. Seleccionar un torno paralelo del laboratorio de máquinas herramientas.
2. Determinar la clase de máquina según la norma ISO 10816-1 de la tabla 5.
3. Se tomarán una prueba, en tres puntos diferentes del torno paralelo, como se indica en la figura 8.

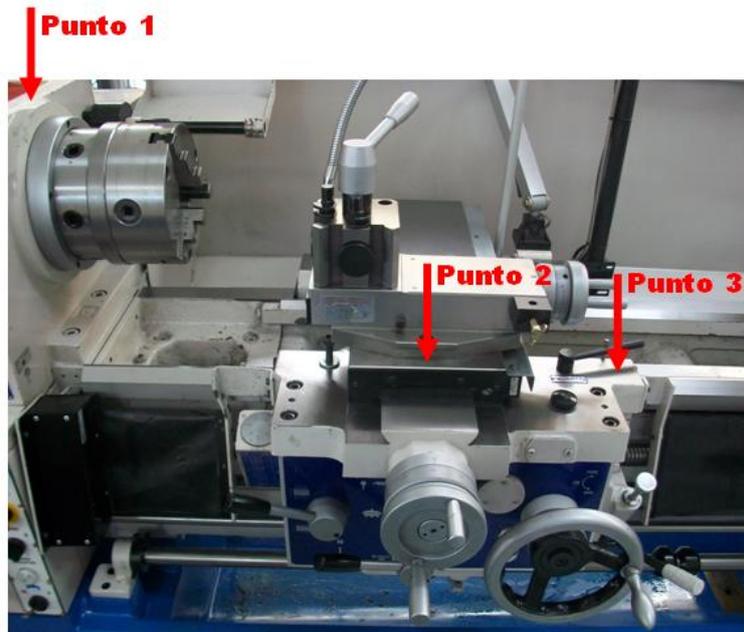


Figura 8. Ubicación de los puntos para las pruebas de medición de vibración. Fuente: Los autores

7.2.2 Configuración del acelerómetro

1. Conectar el cable del acelerómetro al canal de entrada 1 del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro, tal como se indica en la figura 9.



Figura 9. Conexión de acelerómetro en el analizador de vibraciones. Fuente: Los autores

2. Encender el analizador de vibraciones ADASH VA4Pro.
3. Seleccionar el modo “ANALIZADOR” y pulsar el botón “OK”.
4. Pulsar el botón que indica la opción de “PROYECTO”, seleccionar “Nuevo conjunto” y pulsar el botón “OK” (para desplazarse usar los botones de cursor, para seleccionar OK).
5. Establecer un nombre a la prueba y pulsar el botón “OK”.
6. Seleccionar la prueba creada y pulsar el botón “OK”.
7. Pulsar el botón que indica la opción “SENSORES”, seleccionar “AC 1” y pulsar el botón “OK”.
8. Establecer los parámetros de configuración del acelerómetro según como se indica en la tabla 6 y pulsar el botón “GUARDAR”, (configurar si es necesario).

Tabla 6. Configuración del acelerómetro.

ICP	On
Sensibilidad [mV/g]	100
Unidad	g
Posición [°]	0
Grupo de máquinas ISO	1
Fundación de la máquina ISO	rígido
Tipo de rodamiento	no definido

7.2.3 Configuración de los parámetros de medición del analizador de vibraciones

7.2.3.1 Configuración de las mediciones de vibración

- Se establecerá tres mediciones para cada punto de las prueba del torno paralelo.
- Una vez configurado el acelerómetro se procederá a configurar los parámetros para la medición de la vibración de la máquina.

PRUEBA 1: Manejo de unidades en el punto 1.

Esta prueba se la realizará en el punto 1, en el cual se pretende medir el nivel de vibración de la máquina y hacer un manejo de unidades en función de la velocidad (*mm/s*) y aceleración (*g*).

- **Configuración de medición 1**

1. Pulsar el botón que indica la opción “MEDIDA”, seleccionar “Nuevo básico” y luego “OK”.
2. Seleccionar la medida “ISO RMS” y pulsar el botón “OK”, luego pulsar el botón “GUARDAR”.

- **Configuración de medición 2**

1. Pulsar el botón que indica la opción “MEDIDA”, seleccionar “Nuevo avanzado” y pulsar el botón “OK”, establecer los parámetros según indica la tabla 7 y luego pulsar el botón “GUARDAR”.

Tabla 7. Configuración de los parámetros para la medición 2.

Medición 2	
Tipo	espectro
Canal	1
Ventana	hanning
Unidades	mm/s
Zoom de espectro	no
Banda: Fmin [Hz]	2
Rango [Hz]	800
Líneas	1600
Promediando	lineal
Promedios	Off
Solapamiento	0%

- **Configuración de medición 3**

1. Pulsar el botón que indica la opción “MEDIDA”, seleccionar “Nuevo avanzado” y pulsar el botón “OK”, establecer los parámetros según indica la tabla 8 y luego pulsar el botón “GUARDAR”.

Tabla 8. Configuración de la medición 3.

Medición 3	
Tipo	espectro
Canal	1
Ventana	hanning
Unidades	g
Zoom de espectro	no
Banda: F_{min} [Hz]	2
Rango [Hz]	800
Líneas	1600
Promediando	lineal
Promedios	Off
Solapamiento	0%

7.2.4 Montaje de acelerómetro

- El montaje del acelerómetro en la máquina, se realizará con base magnética.
- El montaje y desmontaje correcto del acelerómetro sobre la superficie que se desea colocar el acelerómetro se ilustra en la figura 10.

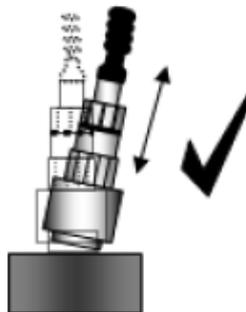


Figura 10. Montaje correcto del acelerómetro.

1. Colocar el acelerómetro de forma correcta al torno paralelo seleccionado en el punto según donde indique la prueba, asegurarse que los cables del acelerómetro estén asegurados y no hagan contacto con los elementos rotativos de la máquina (ver figura 11).

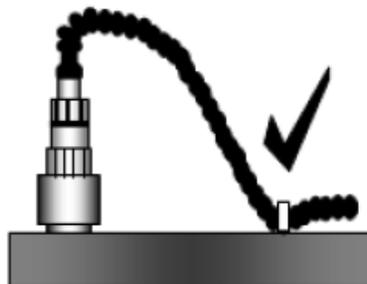


Figura 11. Seguridad de los cables del acelerómetro.

7.2.5 Medición de vibración

Una vez montado el acelerómetro y configurada las mediciones de vibración, se procede a medir la vibración en el torno paralelo.

1. Poner la velocidad de giro del torno a 900 RPM.
2. Encender el torno.
3. En el medidor de vibraciones pulsar el botón “MEDIR”, (si el analizador de vibraciones le indica un aviso de “¿Guardar los datos?”, pulsar el botón que indique la opción “NO”).
4. Esperar hasta que finalice la prueba (tiempo estimado de 16 segundos).
5. Apagar el torno.
6. Retirar el acelerómetro del torno (ver figura 10).

Llenar los espacios de la tabla 9.

- Para la clase de máquina dirigirse a la tabla 5 y dependiendo de la potencia de la máquina establecer la clase de máquina.
- En la medición 1, colocar el valor “RMS” medido por el analizador de vibraciones y con este valor determinar el estado de la máquina según de la tabla 4.
- En la medición 2 y medición 3, colocar los valores de la tabla que son generados por el analizador de vibraciones.

Tabla 9. Resultados de la prueba 1.

Máquina		
Clase de máquina		
Medición 1	Valor “rms” medido	Estado de la máquina
	Frecuencia [Hz]	Amplitud [mm/s]
Medición 2	.	.
	.	.
	.	.
	.	.
	.	.
	Frecuencia [Hz]	Amplitud [g]
Medición 3	.	.
	.	.
	.	.
	.	.
	.	.

PRUEBA 2: Manejo de promedios en el punto 2.

En esta prueba se pretende configurar los promedios para el análisis del espectro y establecer una observación sobre que sucede con los espectros de la medición 2 y medición 3.

Para la prueba 2, editar los parámetros de las mediciones 2 y 3.

- **Configuración de medición 1**

Mantener la misma medición que se utilizo en la prueba 1.

- **Configuración de medición 2**

1. Seleccionar la medición 2.
2. Pulsar el botón que indica la opción “MEDIDA”, seleccionar “Editar” y pulsar el botón “OK”, configurar los parámetros según indica la tabla 10 y luego pulsar el botón “GUARDAR”.

Tabla 10. Configuración de los parámetros para la medición 2.

Medición 2	
Tipo	espectro
Canal	1
Ventana	hanning
Unidades	mm/s
Zoom de espectro	no
Banda: F_{min} [Hz]	2
Rango [Hz]	800
Líneas	1600
Promediando	lineal
Promedios	2
Solapamiento	0%

- **Configuración de medición 3**

1. Selecciona la medición 3.
2. Pulsar el botón que indica la opción “MEDIDA”, seleccionar “Editar” y pulsar el botón “OK”, configurar los parámetros según indica la tabla 11 y luego pulsar el botón “GUARDAR”.

Tabla 11. Configuración de la medición 3.

Medición 3	
Tipo	espectro
Canal	1
Ventana	hanning
Unidades	mm/s
Zoom de espectro	no
Banda: F_{min} [Hz]	2
Rango [Hz]	800
Líneas	1600
Promediando	lineal
Promedios	8
Solapamiento	0%

- Repetir los pasos 7.2.4 y 7.2.5

Llenar los espacios de la tabla 12.

- Para la clase de máquina dirigirse a la tabla 5 y dependiendo de la potencia de la máquina establecer la clase de máquina.
- En la medición 1, colocar el valor “RMS” medido por el analizador de vibraciones y con este valor determinar el estado de la máquina según de la tabla 4.
- En la medición 2 y medición 3, colocar los valores de la tabla que son generados por el analizador de vibraciones.

Tabla 12. Resultados de la prueba 2.

Máquina		
Clase de máquina		
Medición 1	Valor “rms” medido	Estado de la máquina
	Frecuencia [Hz]	Amplitud [mm/s]
Medición 2	.	.
	.	.
	.	.
	.	.
	.	.
	Frecuencia [Hz]	Amplitud [mm/s]
Medición 3	.	.
	.	.
	.	.
	.	.
	.	.
Observaciones		

PRUEBA 3: Manejo de las ventanas en el punto 3.

En esta prueba se pretende configurar las ventanas para el análisis del espectro y establecer una observación sobre que sucede con los espectros de la medición 2 y medición 3.

Para la prueba 3, editar los parámetros de las mediciones 2 y 3.

- **Configuración de medición 1**

Mantener la misma medición que se utilizó en la prueba 1.

- **Configuración de medición 2**

1. Selecciona la medición 2.
2. Pulsar el botón que indica la opción “MEDIDA”, seleccionar “Editar” y pulsar el botón “OK”, configurar los parámetros según indica la tabla 13 y luego pulsar el botón “GUARDAR”.

Tabla 13. Configuración de los parámetros para la medición 2.

Medición 2	
Tipo	espectro
Canal	1
Ventana	hanning
Unidades	mm/s
Zoom de espectro	no
Banda: F_{min} [Hz]	2
Rango [Hz]	800
Líneas	1600
Promediando	lineal
Promedios	Off
Solapamiento	0%

- **Configuración de medición 3**

1. Selecciona la medición 3.
2. Pulsar el botón que indica la opción “MEDIDA”, seleccionar “Editar” y pulsar el botón “OK”, configurar los parámetros según indica la tabla 14 y luego pulsar el botón “GUARDAR”.

Tabla 14. Configuración de la medición 3.

Medición 3	
Tipo	espectro
Canal	1
Ventana	rectangular
Unidades	mm/s
Zoom de espectro	no
Banda: F_{min} [Hz]	2
Rango [Hz]	800
Líneas	1600
Promediando	lineal
Promedios	Off
Solapamiento	0%

- Repetir los pasos 7.2.4 y 7.2.5

Llenar los espacios de la tabla 15.

- Para la clase de máquina dirigirse a la tabla 5 y dependiendo de la potencia de la máquina establecer la clase de máquina.
- En la medición 1, colocar el valor “RMS” medido por el analizador de vibraciones y con este valor determinar el estado de la máquina según de la tabla 4.
- En la medición 2 y medición 3, colocar los valores de la tabla que son generados por el analizador de vibraciones.

Tabla 15. Resultados de la prueba 3.

Máquina		
Clase de máquina		
Medición 1	Valor “rms” medido	Estado de la máquina
	Frecuencia [Hz]	Amplitud [mm/s]
Medición 2	.	.
	.	.
	.	.
	.	.
	.	.
	Frecuencia [Hz]	Amplitud [mm/s]
Medición 3	.	.
	.	.
	.	.
	.	.
	.	.
Observaciones		

7.2.6 Apagar el analizador de vibraciones

Una vez terminada las pruebas, es necesario apagar el analizador de vibraciones, para ello realizar el siguiente procedimiento.

1. Pulsar el botón que indica la opción “Cerrar Proyecto”.
2. El analizador de vibraciones le indicará un aviso de “¿Guardar los datos?”, para ello, pulsar el botón que indique la opción “NO”.

3. Pulsar el botón que indica la opción “Pantalla principal”.
4. Pulsar el botón que indica la opción “Apagar”.
5. El analizador de vibraciones le indicará un aviso de “¿Apagar el equipo?”, para ello, pulsar el botón que indique la opción “SI”.
6. Desconectar el cable del acelerómetro.
7. Guardar el analizador de vibraciones en su respectivo laboratorio.

8. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Recomendaciones

9. Referencias

- [1] ADASH, “Manual de usuario: ADASH VA4Pro,” Czech Republic, 2011.
- [2] G. WHITE, Introducción al análisis de vibraciones. Massachusetts-USA: AZIMA DLI, 2009.
- [3] M. U. BRITO and D. MÉNDEZ, “Introducción a las vibraciones mecánicas.” 2007.
- [4] E. P. MARÍN, “La medición y el análisis de vibración en el diagnóstico de máquinas rotativas.” RENOVETEC.
- [5] SKF Reliability Maintenance Institute, “Análisis de vibraciones categoría 2: ISO 18436,” 2010.
- [6] ISO 10861-1, “Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements non-rotating - Part 1,” Int. Stand., vol. 1, p. 19, 1995.
- [7] B. J. SMITH, R. J. PETERS, and S. OWEN, Acoustics and noise control, 2nd ed. Longman Malaysia, 1996.
- [8] ISO, “ISO 2041:2009 - Mechanical vibration, shock and condition monitoring - Vocabulary,” ISO, 2009. [Online]. Available: http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_ics/catalogue_detail_ics.htm?csnumber=35848.

Glosario

Este glosario está establecido según la Norma ISO 2041:2009 [8]

Acelerómetro: sensor y transductor cuya entrada es la amplitud de aceleración y tiene una salida de voltaje de baja impedancia.

Armónico: son frecuencias de vibración que son múltiples integrales de una frecuencia fundamental específica.

Diagnóstico: proceso por medio del cual se juzga el estado de una máquina.

Fase: es un retardo en el tiempo de dos señales, expresado en grados de rotación.

Frecuencia: es el recíproco del período fundamental (tiempo de repetición de un fenómeno periódico). Se expresa en hertz [hz], lo cual se corresponde con un ciclo por segundo.

Frecuencia Natural (Fn): es la frecuencia que presenta cada componente por su propia naturaleza y características.

Resonancia: se presenta cuando cualquier cambio, incluso muy pequeño, en la frecuencia de la excitación, causa un decrecimiento en la respuesta del sistema.

Subarmónicos: son frecuencias que se encuentran a una fracción fija de una frecuencia fundamental, como la velocidad nominal de la máquina.

Transductor: es un dispositivo diseñado para recibir energía de un sistema y suministrar energía ya sea del mismo tipo o de otra naturaleza, hacia otro sistema, de forma tal que a la salida del transductor aparezca la característica de interés de la energía de entrada.

Vibración: es toda variación en el tiempo, de una magnitud que describe el movimiento o la posición de un sistema mecánico, cuando esta magnitud es alternativamente mayor o menor que cierto valor promedio o de referencia.

Velocidad Nominal: velocidad de entrada de una máquina.

Vector: es una cantidad dotada de magnitud y dirección.

*Anexo IV. Detección de fallos de rodamientos en sistemas mecánicos rotativos.***DETECCIÓN DE FALLOS DE RODAMIENTOS EN SISTEMAS MECÁNICOS ROTATIVOS**

David Romero, Santiago Niveló, estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica,
 correo electrónico: dromeror@est.ups.edu.ec y sniveló@est.ups.edu.ec
 Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de [Ingeniería Mecánica](#)
 Asignatura: [Análisis de vibraciones](#), Cuenca – Ecuador, Fecha de entrega: 23-10- 2014

1. Presentación de la práctica

En la presente práctica, mediante el análisis de señales de vibraciones mecánicas, se detectará fallos de rodamientos en sistemas mecánicos rotativos utilizando el analizador de vibraciones ADASH VA4Pro.

2. Requisitos, precauciones y evaluación

Para la realización de esta práctica es necesario tener los conocimientos básicos sobre vibraciones mecánicas, para ello se recomienda realizar una lectura de los siguientes textos:

- Análisis de vibraciones e interpretación de datos [1] pág. 1-8.
- Técnicas de diagnóstico para el análisis de vibraciones de rodamientos [2] pág. 1-2.

El estudiante debe tener en consideración algunas precauciones antes de desarrollar la respectiva práctica.

- Antes de encender el banco de vibraciones verificar que los cables de los acelerómetros no estén en contacto con los elementos rotativos del banco de vibraciones.
- Verificar que la batería del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro se encuentre con una carga mayor al 50%.

3. Objetivos

- Obtener la señal de vibración mecánica.
- Calcular las frecuencias características de cada uno de los elementos del rodamiento.
- Ubicar las frecuencias características calculadas en la señal de vibración.
- Detectar el tipo de fallo que presenta el sistema mecánico rotativo.

4. Equipos, instrumentos y software

Tabla 1. Tabla de equipos, instrumentos y software. Fuente: Los autores

Descripción	Marca	Serie
Banco de vibraciones		
Unidad de control eléctrico		
Computador portátil	HP	Pavilion G4

Analizador de vibraciones	ADASH	ADASH VA4Pro
Acelerómetro	ADASH	A 102-A1
Software - Control de velocidad y carga mediante mandos manuales		

5. Exposición

5.1 Introducción de los rodamientos

Los rodamientos actúan como una fuente de ruido y vibración, debido tanto a la variación de sensibilidad como a la presencia de defectos en ellos. Los defectos en los rodamientos se pueden clasificar como distribuidos (rugosidades superficiales, ondulaciones sobre las pistas y elementos rodantes desiguales) y localizados (grietas, hendiduras, resaltes, picaduras y descascaramiento) [2][3].

Cada elemento del rodamiento (pista interior, pista exterior, elemento rodante y jaula) generan vibraciones de diferente frecuencia. Cuando una superficie defectuosa hace contacto con su superficie de encuentro, se producen pulsos periódicos de corta duración a la que se le denomina tono del rodamiento, como se ilustra en la figura 1 [2][3].



Figura 1. Tono de rodamiento. Fuente [4]

5.2 Caracterización de fallos típicos en rodamientos

Los fallos se presentan en los elementos del rodamiento, tanto en: pista externa, pista interna, elemento rodante y en la jaula.

Cada elemento del rodamiento, posee una frecuencia característica de fallo, que permite identificar en donde se encuentra afectado el rodamiento [5]; están designadas comúnmente como BPFO, BPFI, BSF y FTF, que pueden ser calculadas analíticamente [3]. En la tabla 2 se presentan las ecuaciones para el cálculo de las frecuencias características de fallo de los elementos del rodamiento.

- Frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista externa “*Ball pass frequency of the outer race*” (BPFO).
- Frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista interna “*Ball pass frequency of the inner race*” (BPFI).
- Frecuencia de giro de los elementos rodantes “*Ball spin frequency*” (BSF).
- Frecuencia de rotación del canastillo o jaula que contiene los elementos rodantes “*Fundamental train frequency*” (FTF).

Tabla 2. Ecuaciones para el cálculo de las frecuencias características de los rodamientos. Fuente [6]

Elemento	Frecuencia característica
<i>Pista externa</i> (BPFO)	$0.4 \times \text{RPM} \times \text{Nb}$
<i>Pista interna</i> (BPFI)	$0.6 \times \text{RPM} \times \text{Nb}$
<i>Elementos rodantes</i> (BSP)	Para rodamientos de una hilera
	$0.23 \times \text{RPM} \times \text{Nb}$ Cuando $\text{Nb} < 10$
	$0.18 \times \text{RPM} \times \text{Nb}$ Cuando $\text{Nb} \geq 10$
	Para rodamientos de doble hilera
$0.46 \times \text{RPM} \times \text{Nb}$ Cuando $\text{Nb} < 10$	
$0.36 \times \text{RPM} \times \text{Nb}$ Cuando $\text{Nb} \geq 10$	
<i>Jaula</i> (FTF)	$0.4 \times \text{RPM}$

Donde:

Nb es el número de elementos rodantes del rodamiento

RPM es la velocidad de giro del sistema en [Hz]

5.3 Espectro de vibración en los rodamientos

Las señales de vibración se presentan en el dominio del tiempo, el cual hace que esto se convierta en un problema al momento de realizar un diagnóstico de la señal de vibración, para ello es necesario convertir estas señales al dominio de la frecuencia mediante técnicas de procesamiento, una de las más usadas es la transformada rápida de fourier [7]. En la figura 2 se muestra una señal en el dominio del tiempo transformada al dominio de la frecuencia.

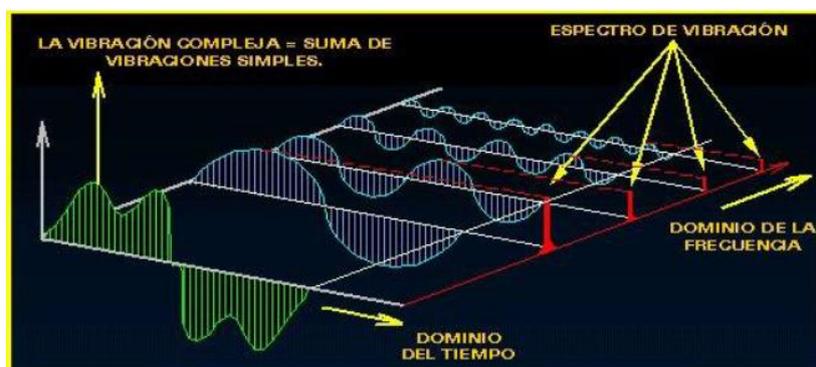


Figura 2. Señales en el dominio del tiempo y dominio de la frecuencia. Fuente [7]

Cuando se analiza vibración miramos dos componentes de la señales de vibración [6]:

1. La amplitud indica la severidad de la fallo, mayor amplitud mayor el problema; esos valores de amplitud son verificados a través de la severidad de vibración que se ilustran en la tabla 3.
2. La frecuencia a la cual la vibración ocurre, indica el tipo de fallo; para detectar el tipo de fallo en los rodamientos es necesario identificar la frecuencia característica en el espectro de vibración.

Dentro del espectro de vibración se pueden presentar una serie de armónicos, que son múltiplos de la velocidad de la frecuencia (X) de la máquina, en la figura 3 se puede observar picos a 1X, 2X, 3X, 6X, estos valores se los conoce como armónicos.

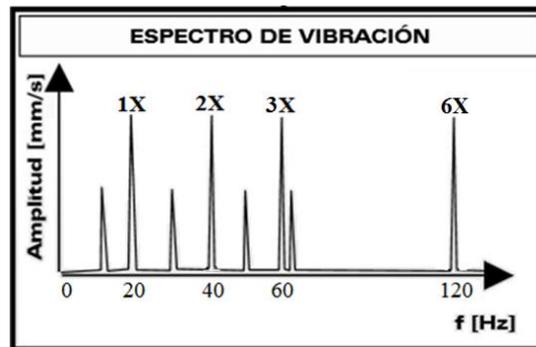


Figura 3. Espectro de vibración de un rodamiento. Fuente [8]

La velocidad de rotación puede estar establecida en unidades de RPM o Hz; para transformar las unidades de RPM a Hz se ocupa la ecuación 1 y para transformar de Hz a RPM se utiliza la ecuación 2.

$$f = \frac{rpm}{60} \rightarrow \text{Ecuación 1}$$

$$rpm = 60 \cdot f \rightarrow \text{Ecuación 2}$$

Cada elemento de los rodamientos genera una vibración diferente, estas vibraciones son visualizadas en la señal del espectro de vibración a través de su frecuencia característica, los cuales detectan el elemento del rodamiento que se encuentra afectado.

- En la pista externa se puede presentar armónicos hasta 6 X BPFO [6], como se ilustra en la figura 4.

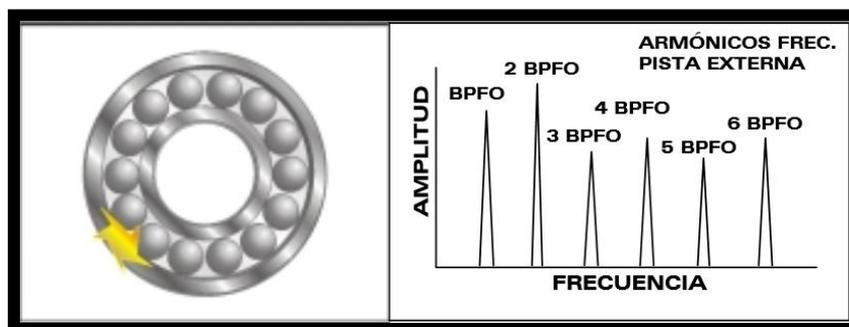


Figura 4. Armónicos de frecuencia de la pista externa. Fuente [9]

- En la pista interna se puede presentar armónicos hasta 6 X BPFI [6], como se ilustra en la figura 5.

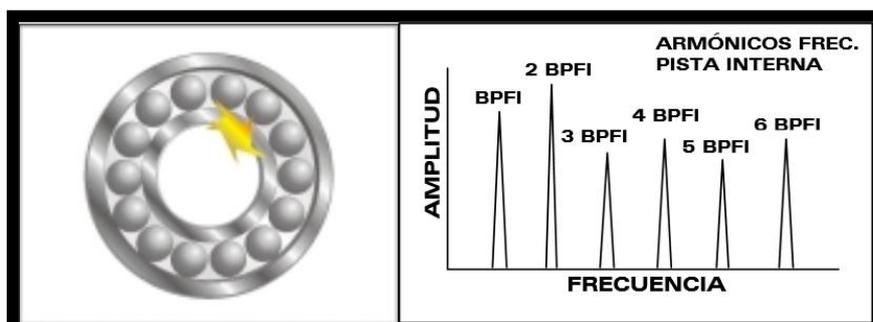


Figura 5. Armónicos de frecuencia de la pista interna. Fuente [9]

- En el elemento rodante se puede presentar armónicos hasta 6 X BPFO [6], como se ilustra en la figura 6.

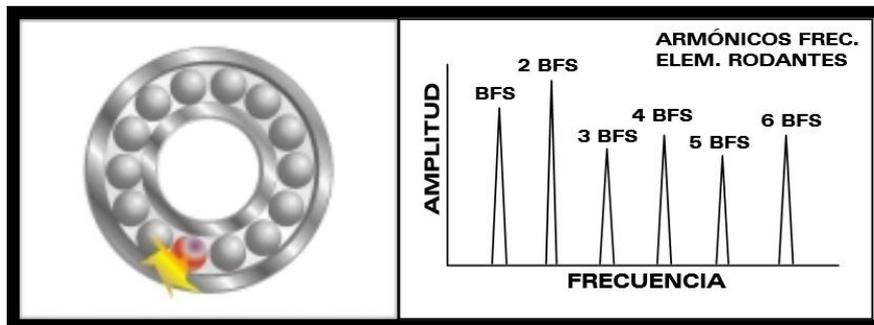


Figura 6. Armónicos de frecuencia del elemento rodante. Fuente [9]

- En la jaula se puede presentar armónicos hasta 6 X BPFO [6], como se ilustra en la figura 7.

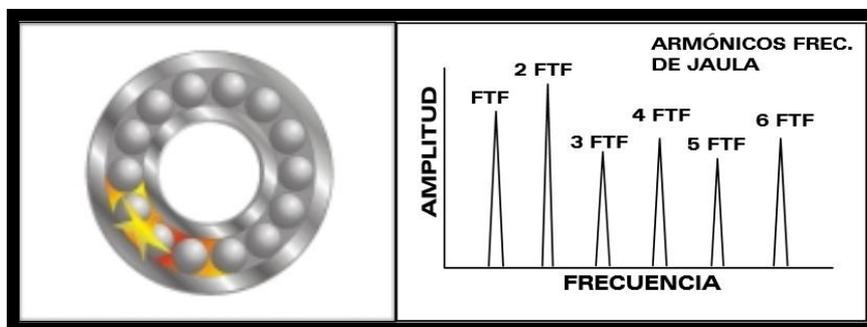


Figura 7. Armónicos de frecuencia de jaula. Fuente [9]

5.4 Severidad de la vibración

Para determinar la severidad de vibración se utiliza el valor pico o el valor RMS en el dominio de la frecuencia, en la tabla 3 se muestra los rangos de severidad de vibración de acuerdo al tipo de máquina según la norma ISO 10816-1.

Tabla 3. Severidad de vibración según norma ISO 10816-1. Fuente [10]

VELOCIDAD DE LA VIBRACIÓN		LÍMITES DEL RANGO DE VELOCIDAD Y CLASE DE MÁQUINA			
mm/s RMS	in/s Pico	Máquinas pequeñas Clase I	Máquinas medianas Clase II	Máquinas grandes	
				Soportes rígidos Clase III	Soportes menos rígidos Clase IV
0.28	0.02	Buena	Buena	Buena	Buena
0.45	0.03				
0.71	0.04				
1.12	0.06	Satisfactoria	Satisfactoria	Satisfactoria	Buena
1.80	0.10				
2.80	0.16	Insatisfactoria	Insatisfactoria (alerta)	Satisfactoria	Satisfactoria
4.50	0.25	(alerta)		Insatisfactoria (alerta)	
7.10	0.40	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)	Insatisfactoria (alerta)	Insatisfactoria (alerta)
11.20	0.62			Inaceptable (peligro)	
18.00	1.00			Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)
28.00	1.56				
45.00	2.51			Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)

Tabla 4. Clasificación de las máquinas según norma ISO 10816-1. Fuente [6]

CLASE	DESCRIPCIÓN
Clase I	Partes de máquinas y motores hasta 15KW (20 HP)
Clase II	Máquinas de tamaño medio hasta los 300 KW (400 HP)
Clase III	Máquinas grandes montadas en soportes rígidos. La frecuencia natural de la máquina y la estructura está por encima de la frecuencia de excitación del equipo
Clase IV	Máquinas grandes de 10 MW (13404 HP) con soporte flexible en la dirección de la medida de vibración

6. Proceso y procedimiento

6.1 Proceso

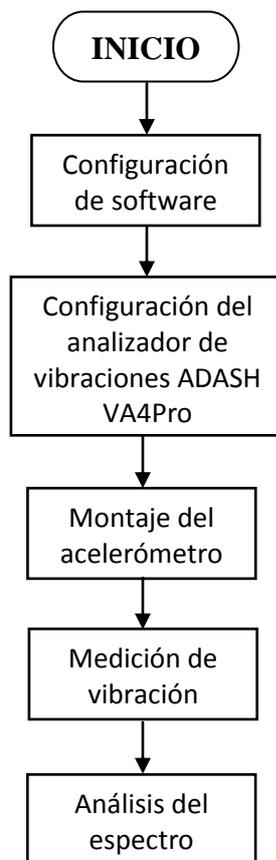


Figura 8. Procesos para detección de fallos en rodamientos con ADASH VA4Pro . Fuente: Los autores

6.2 Procedimiento

A continuación se describe el procedimiento para el desarrollo de la práctica.

6.2.1 Banco de pruebas

El banco de pruebas con el que se realizará esta práctica se ilustra en la figura 9. La unidad de control eléctrico del banco de pruebas se muestra en la figura 10.

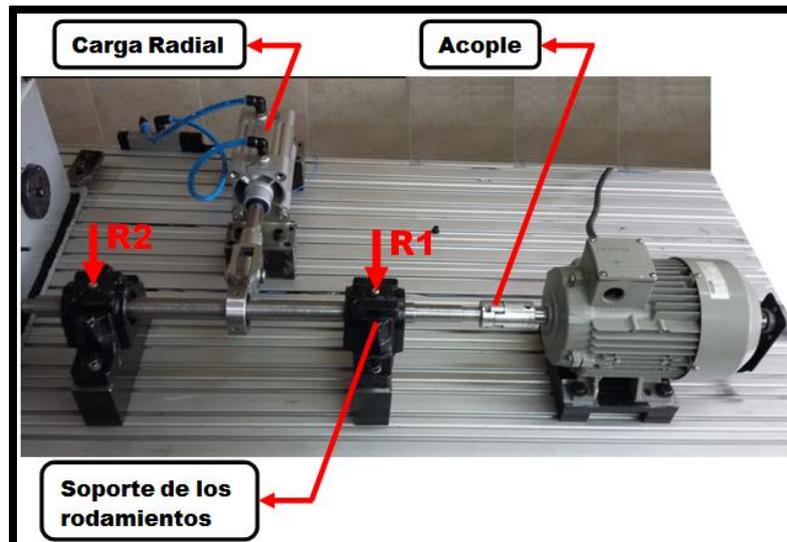


Figura 9. Banco de pruebas. Fuente: Los autores

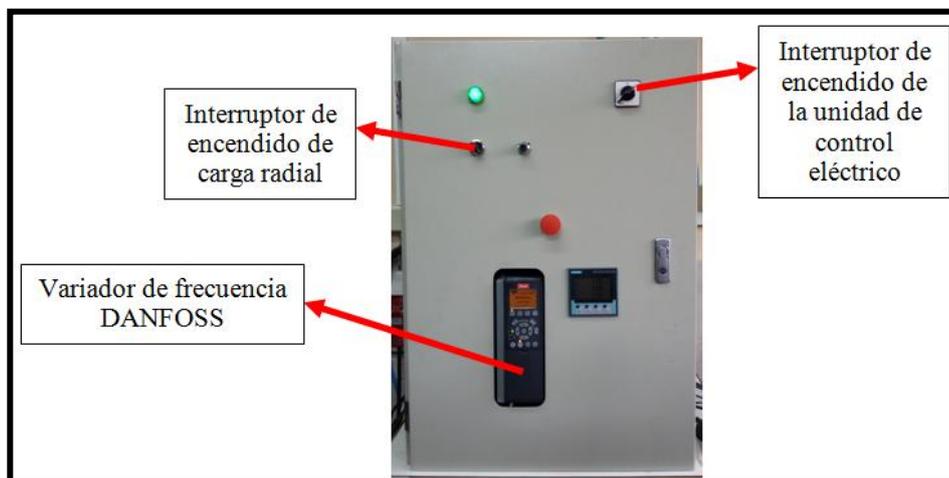


Figura 10. Unidad de control eléctrico del banco de pruebas. Fuente: Los autores

6.2.2 Configuración del software

1. Encender la unidad de control eléctrico.
2. Encender el computador portátil.
3. Conectar el puerto USB (cable USB color blanco).
4. En la unidad de control eléctrico revisar que este activada la luz de “OFF”  del variador de frecuencia DANFOSS.
5. Abrir el software desde el computador portátil, para ello vaya a “INICIO” y seleccione el software “Control de velocidad y carga mediante mandos manuales”.
6. En el software pulsar la opción “STOP” .
7. Modificar Modbus Port a “COM 13”.
8. Modificar Serial Port a “COM 9”.
9. Establecer una velocidad de 1500, moviendo la perilla de “RPM Control Velocidad”.
10. Luego de realizar las respectivas configuraciones, en el software pulsar la opción “RUN” .

6.2.3 Configuración del analizador de vibraciones

6.2.3.1 Configuración del acelerómetro

1. Conectar el cable del acelerómetro al canal de entrada 1 del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro, tal como se indica en la figura 11.



Figura 11. Conexión de acelerómetro en el analizador de vibraciones. Fuente: Los autores

2. Conectar el cable del tacómetro (tacómetro se ilustra en la figura 12) al canal de entrada “Trig” del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro, tal como se indica en la figura 13.



Figura 12. Tacómetro. Fuente: Los autores



Figura 13. Conexión del tacómetro en el analizador de vibraciones. Fuente: Los autores

3. Encender el analizador de vibraciones ADASH VA4Pro.
4. Seleccionar el modo “FASIT” y pulsar el botón “OK”.
5. Configurar el modo “FASIT” según lo establecido en la tabla 5 (configurar si es necesario) y pulsar el botón “GUARDAR”.

Tabla 5. Configuración FASIT.

Canal	1
Usar tacómetro	Si

- Pulsar el botón que indica la opción “SENSORES”, seleccionar “AC 1” y pulsar el botón “OK”.
- Establecer los parámetros de configuración del acelerómetro según como se indica en la tabla 6 (configurar si es necesario) y pulsar el botón “GUARDAR”.

Tabla 6. Configuración del acelerómetro.

ICP	On
Sensibilidad [mV/g]	100
Unidad	g
Posición [°]	0
Grupo de máquinas ISO	1
Fundación de la máquina ISO	rígido
Tipo de rodamiento	no definido

- Poner el soporte del tacómetro a nivel, tal como se indica en la figura 14, para ello girar la perilla de ajuste del medidor de nivel hasta que sea posible nivelarlo.



Figura 14. Nivelación del soporte del tacómetro. Fuente: Los autores

- Colocar el tacómetro en el soporte haciendo presión hacia abajo hasta que el tacómetro se encuentre fijo, tal como se indica en la figura 15.



Figura 15. Montaje del tacómetro en el soporte. Fuente: Los autores

10. Colocar el láser del tacómetro en un punto de referencia al eje de rotación del sistema mecánico, para ello mover el soporte hasta que el láser del tacómetro marque en la señal de referencia del eje, tal como se muestra en la figura 16 (para desplazar de forma vertical el tacómetro aflojar la perilla de ajuste vertical)



Figura 16. Fijación del laser en el punto de referencia al eje. Fuente: Los autores

6.2.4 Descripción de la pantalla del modo FASIT

En la pantalla del modo FASIT se presentan tres ventanas como se ilustra en la figura 17.

- Los niveles de gravedad muestran la condición de algunos defectos dentro del sistema mecánico rotativo como se muestra en la tabla 7. FASIT evalúa la severidad del defecto mediante colores establecidos por la norma ISO 10861.
 - Verde: Buenas condiciones
 - Amarillo: Satisfactoria
 - Naranja: Insatisfactoria
 - Rojo: Peligro (mal estado)
- Nivel de severidad indica la condición global del valor RMS de la severidad de la máquina.

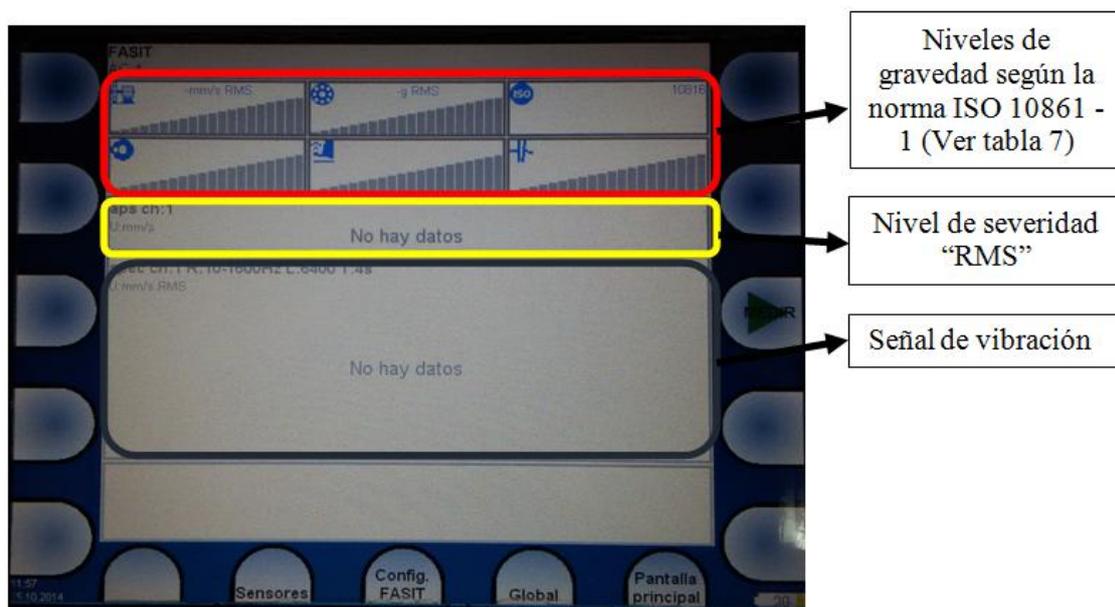


Figura 17. Descripción del modo FASIT. Fuente [11]
 Tabla 7. Descripción de los niveles de gravedad. Fuente [11]

	Condición de la máquina.
	Condición de los rodamientos.
	Nivel de gravedad de desbalanceo.
	Nivel de gravedad de holgura.
	Nivel de gravedad de desalineación.
	Clase de máquina.

6.2.5 Montaje de acelerómetro

El montaje del acelerómetro se lo realizará en los soportes del rodamiento y la sujeción es por tornillo.

1. El montaje del acelerómetro se lo hace de forma roscada en el soporte del rodamiento SKF, como se indica en la figura 18.



Figura 18. Montaje del acelerómetro. Fuente: Los autores

6.2.6 Medición de vibración

• Medición 1

1. Colocar el acelerómetro en el soporte del rodamiento SKF del rodamiento R1.
2. Encender el banco de pruebas, para ello, en el control eléctrico pulsar la opción “Hand On”  del variador de frecuencia DANFOSS.
3. Esperar 10 segundos que sistema rotativo se estabilice.
4. En el medidor de vibraciones pulsar el botón “MEDIR”.
5. Esperar hasta que finalice la prueba (tiempo estimado de 30 segundos).
6. Presionar el botón que indica la opción “STOP”
7. Apagar el banco de pruebas, desde el control eléctrico pulsando la opción “OFF”  del variador de frecuencia DANFOSS.

8. Retirar el acelerómetro del soporte del rodamiento SKF.

Llenar los espacios de la tabla 8.

- Para cada medición colocar las unidades de medida de cada magnitud física.
- Para la clase de máquina dirigirse a la tabla 4 y dependiendo de la potencia de la máquina establecer la clase de máquina.
- Identificar el valor “RMS” desde la opción de “condición de la máquina” de la ventana de niveles de gravedad y colocar ese valor en la celda que corresponda y determinar el estado de la máquina según de la tabla 3.
- La velocidad de giro establecer en unidades de RPM y Hz; para el cambio de unidades utilizar la ecuación 2.
- Mediante las ecuaciones establecidas en la tabla 2, realizar los cálculos de la frecuencia característica del rodamiento y escribirlos en la celda de frecuencias características en la tabla 8. Los rodamientos son de doble hilera y considerar el valor de $N_b = 16$.
- Según la opción de “condición de los rodamientos” desde la ventana de niveles de gravedad determinar el estado del rodamiento según los colores establecidos por la norma ISO 10861.

Tabla 8. Resultados de la medición 1.

Medición 1		
Clase de máquina		
Severidad de vibración	Valor “rms” medido	Estado de la máquina
Velocidad de giro	Unidades de [RPM]	Unidades de [Hz]
Tipo de fallo	Frecuencia característica	Estado del rodamiento
BPFO		
BPMF		
BSP		
FTF		
OBSERVACIONES		

• **Medición 2**

1. Colocar el acelerómetro en el soporte del rodamiento SKF del rodamiento R2.
2. Encender el banco de pruebas, para ello, en el control eléctrico pulsar la opción “Hand On”  del variador de frecuencia DANFOSS.
3. Esperar 10 segundos que sistema rotativo se estabilice.

4. En el medidor de vibraciones pulsar el botón “MEDIR”.
5. Esperar hasta que finalice la prueba (tiempo estimado de 30 segundos).
6. Presionar el botón que indica la opción “STOP”
7. Apagar el banco de pruebas, desde el control eléctrico pulsando la opción “OFF”  del variador de frecuencia DANFOSS.
8. Retirar el acelerómetro del soporte del rodamiento SKF.

Llenar los espacios de la tabla 9.

- Para cada medición colocar las unidades de medida de cada magnitud física.
- Para la clase de máquina dirigirse a la tabla 4 y dependiendo de la potencia de la máquina establecer la clase de máquina.
- Identificar el valor “RMS” desde la opción de “condición de la máquina” de la ventana de niveles de gravedad y colocar ese valor en la celda que corresponda y determinar el estado de la máquina según de la tabla 3.
- La velocidad de giro establecer en unidades de RPM y Hz; para el cambio de unidades utilizar la ecuación 2.
- Mediante las ecuaciones establecidas en la tabla 2, realizar los cálculos de la frecuencia característica del rodamiento y escribirlos en la celda de frecuencias características en la tabla 8. Los rodamientos son de doble hilera y considerar el valor de $N_b = 16$.
- Según la opción de “condición de los rodamientos” desde la ventana de niveles de gravedad determinar el estado del rodamiento según los colores establecidos por la norma ISO 10861.

Tabla 9. Resultados de la medición 2.

Medición 2		
Clase de máquina		
Severidad de vibración	Valor “rms” medido	Estado de la máquina
Velocidad de giro	Unidades de [RPM]	Unidades de [Hz]
Tipo de fallo	Frecuencia característica	Estado del rodamiento
BPFO		
BPMF		
BSP		
FTF		
OBSERVACIONES		

6.2.7 Apagar el analizador de vibraciones

Una vez terminada la prueba, es necesario apagar el analizador de vibraciones, para ello realizar el siguiente procedimiento:

1. Pulsar el botón que indica la opción “Pantalla principal”.
2. Pulsar el botón que indica la opción “Apagar”.
3. El analizador de vibraciones le indicará un aviso de “¿Apagar el equipo?”, para ello, pulsar el botón que indique la opción “SI”.
4. Desconectar el cable del acelerómetro.
5. Desconectar el cable del tacómetro.
6. Guardar el analizador de vibraciones.

6.2.8 Apagar la unidad de control

1. Cerrar el software “Control de velocidad y carga mediante mandos manuales”.
2. Desconectar el puerto USB (cable USB color blanco).
3. Apagar la unidad de control eléctrico.

7. Resultados

Resultados

8. Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Recomendaciones

9. Referencias

- [1] J. A. ROYO and G. RABANAQUE, “Análisis de vibraciones e interpretación de datos,” Universidad de Zaragoza, p. 14, 2012.
- [2] E. ESTUPIÑAN and P. SAAVEDRA, “Técnicas de diagnóstico para el análisis de vibraciones de rodamientos.” 26-Nov-2011.
- [3] E. A. ESTUPIÑAN and P. N. SAAVEDRA, “Análisis de vibraciones aplicado a las máquinas rotatorias de baja velocidad,” p. 6, 2010.
- [4] MOBIUS INSTITUTE, Vibraciones en rodamientos - Tres maneras de entenderlo. Estados Unidos, 2010.
- [5] A. J. ALVAREZ RAMIREZ, “Técnicas de diagnósticos de daños incipientes en rodamientos,” Universidad de Magallanes, Chile, 2005.
- [6] SKF Reliability Maintenance Institute, “Análisis de vibraciones categoría 2: ISO 18436,” 2010.
- [7] M. U. BRITO and D. MÉNDEZ, “Introducción a las vibraciones mecánicas.” 2007.
- [8] G. WHITE, Introducción al análisis de vibraciones. Massachusetts-USA: AZIMA DLI, 2009.
- [9] A-MAQ S.A, “Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico.” A-MAQ “Análisis de Maquinaria,” Jan-2005.
- [10] ISO 10816 - 1, Mechanical vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non - rotating parts - part 1, 1st ed. International Standar, 1995.
- [11] ADASH, “Manual de usuario: ADASH VA4Pro,” Czech Republic, 2011.

Glosario

Espectro: descripción de una cantidad como una función de la frecuencia o longitud de onda

BPFO: es la frecuencia de deterioro de la pista exterior. Físicamente es el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista exterior cada vez que el eje realiza un giro completo.

BPMI: es la frecuencia de deterioro de la pista interior. Físicamente es el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista interior cada vez que el eje realiza un giro completo.

BSF: es la frecuencia de deterioro de los elementos rodantes. Físicamente es el número de giros que realiza una bola del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo.

FTF: es la frecuencia fundamental de tren o de deterioro de la jaula. Físicamente es el número de giros que realiza la jaula del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo.

Anexo V. Fichas de registro para la validación de las guías de prácticas con los estudiantes.

La validación de las guías de prácticas fue ejecutada por estudiantes internos, estudiantes externos y por personal de la industria, cada uno de ellos evaluaron algunos indicadores con el propósito de que la práctica este planteada de forma clara y precisa.

VALIDACIÓN DE LAS GUÍAS DE PRÁCTICAS EJECUTADAS POR LOS ESTUDIANTES					
Guía de prácticas #1: Uso del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro					
Nombre	Fecha	Universidad	Ciclo	Carrera	Calificación
Enrique Muños	02 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Décimo	Ingeniería Mecánica	19/21
Genaro Vera	02 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Décimo	Ingeniería Mecánica	20/21
Diego Lasso	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	21/21
Fabián Flores	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	21/21
Edgar Arias	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	21/21
Sebastián Peralta	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	21/21
Jonathan Ortiz	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	21/21
Thuesman Montaño	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	21/21
Andrés Cedillo	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Décimo	Ingeniería Mecánica	20/21
Juan Pablo Marín	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Décimo	Ingeniería Mecánica	20/21
Dominique Baquero	29 - 10 - 2014	Universidad de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21

Omar Mogrovejo	29 - 10 - 2014	Universidad de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21
Javier Cabrera	30 - 10 - 2014	Universidad de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	18/21
Gabriel Ayauaca	30 - 10 - 2014	Universidad de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	19/21
Sebastián Quizhpi	30 - 10 - 2014	Universidad de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21
César Marca	30 - 10 - 2014	Universidad de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21
Jack Siguencia	30 - 10 - 2014	Universidad de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21
Miguel Barahona	31 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Egresado	Ingeniería Mecánica Automotriz	21/21
Diego Llivizaca	31 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Egresado	Ingeniería Mecánica Automotriz	20/21

VALIDACIÓN DE LAS GUÍAS DE PRÁCTICAS EJECUTADAS POR LOS ESTUDIANTES					
Guía de prácticas #2: Detección de fallos de rodamientos en sistemas mecánicos rotativos					
Nombre	Fecha	Universidad	Ciclo	Carrera	Calificación
Enrique Muños	15 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	21/21
Genaro Vera	15 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Décimo	Ingeniería Mecánica	19/21
Diego Lasso	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	19/21
Fabián Flores	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	19/21
Edgar Arias	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	21/21
Sebastián Peralta	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	21/21
Jonathan Ortiz	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	21/21
Thuesman Montaño	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	20/21
Andrés Cedillo	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Décimo	Ingeniería Mecánica	19/21
Juan Pablo Marín	16 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Décimo	Ingeniería Mecánica	20/21
Dominique Baquero	29 - 10 - 2014	Universidad de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21
Omar Mogrovejo	29 - 10 - 2014	Universidad de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21
Javier Cabrera	30 - 10 - 2014	Universidad de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	19/21
Gabriel Ayauaca	30 - 10 - 2014	Universidad de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	19/21

Sebastián Quizhpi	30 - 10 - 2014	Universidad de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21
César Marca	30 - 10 - 2014	Universidad de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21
Jack Sigüencia	30 - 10 - 2014	Universidad de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21
Miguel Barahona	31 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Egresado	Ingeniería Mecánica Automotriz	21/21
Diego Llivizaca	31 - 10 - 2014	Universidad Politécnica Salesiana	Egresado	Ingeniería Mecánica Automotriz	20/21

VALIDACIÓN DE LAS GUÍAS DE PRÁCTICAS EJECUTADAS POR PERSONAL DE LA INDUSTRIA					
Guía de prácticas #1: Uso del analizador de vibraciones ADASH VA4Pro					
Nombre	Fecha	Profesión	Empresa	Cargo en la empresa	Calificación
Carlos Quinde	20 - 10 - 2014	Matricero	TECNERO	Jefe de mantenimiento	18/21
Carlos Farias	20 - 10 - 2014	Ingeniero Químico	TECNERO	Gerente de producción	18/21
Rumiñahui Loaiza Lange	20 - 10 - 2014	Ingeniero Químico Ingeniero Comercial	TECNERO	Gerente general	20/21

VALIDACIÓN DE LAS GUÍAS DE PRÁCTICAS EJECUTADAS POR PERSONAL DE LA INDUSTRIA					
Guía de prácticas #2: Detección de fallos de rodamientos en sistemas mecánicos rotativos					
Nombre	Fecha	Profesión	Empresa	Cargo en la empresa	Calificación
Carlos Quinde	20 - 10 - 2014	Matricero	TECNERO	Jefe de mantenimiento	19/21
Carlos Farias	20 - 10 - 2014	Ingeniero Químico	TECNERO	Gerente de producción	18/21
Rumiñahui Loaiza Lange	20 - 10 - 2014	Ingeniero Químico Ingeniero Comercial	TECNERO	Gerente general	19/21