



# **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA**

## **CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“ESTABLECIMIENTO DE UNA BASE DE DATOS DE SEÑALES DE VIBRACIONES ACÚSTICAS E IMÁGENES TERMOGRÁFICAS INFRARROJAS PARA UN SISTEMA MECÁNICO ROTATIVO CON LA COMBINACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE FALLOS Y ELABORACIÓN DE GUÍAS DE PRÁCTICAS PARA DETECCIÓN DE FALLOS EN ENGRANAJES”**

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

Autor:

Rómulo Andrés Guiracocha Guiracocha

Director:

Ing. René Vinicio Sánchez

Cuenca, Enero 2015



# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA

## CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

“ESTABLECIMIENTO DE UNA BASE DE DATOS DE SEÑALES DE VIBRACIONES ACÚSTICAS E IMÁGENES TERMOGRÁFICAS INFRARROJAS PARA UN SISTEMA MECÁNICO ROTATIVO CON LA COMBINACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE FALLOS Y ELABORACIÓN DE GUÍAS DE PRÁCTICAS PARA DETECCIÓN DE FALLOS EN ENGRANAJES”

Tesis previa a la obtención del  
Título de Ingeniero Mecánico

Autor:

Rómulo Andrés Guiracocha Guiracocha  
andresg\_4\_4@hotmail.com

Director:

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

Cuenca, Enero 2015

Dedicado con mucho cariño a mis padres los gestores de mi vida; a mis hermanos que siempre creyeron en mí y a mi madrina que desde el cielo me cuida.

Esta meta cumplida es de todos ustedes.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por ser mi fuerza día a día y darme la fortaleza para seguir en adelante.

A mis padres Julia y Rodrigo, por su amor y apoyo incondicional brindado a lo largo de mi vida; a mis hermanos Michael, Ángel, Juan y German, por el apoyo, cariño y confianza puesta sobre mí; a Marcia por brindarme su apoyo incondicional.

A los Ingenieros Vinicio Sánchez, Diego Cabrera y Adrián Arpi, por el aporte de sus conocimientos, su colaboración, sus comentarios y sugerencias durante el desarrollo de este proyecto.

Al Ing. Juan Fernando López M.Sc, por la disponibilidad de los equipos de medición de señales de vibración mecánicas, señales acústicas y la tarjeta de adquisición de datos utilizados en este proyecto.

A mis amigos de laboratorio David, Santiago, Genaro y Enrique, por su amistad y su cooperación.

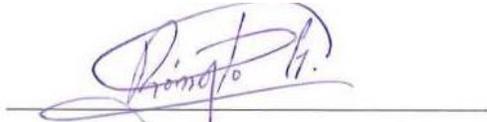
A mis amigos Carlos, Pablo, Andrés, Jorge, Fernando, Diego... por los buenos momentos, amistad y comprensión a lo largo de nuestra vida universitaria.

*Rómulo*

## **DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, Rómulo Andrés Guiracocha Guiracocha, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado por ningún grado o calificación profesional y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo 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.



---

Rómulo Andrés Guiracocha Guiracocha

## **CERTIFICADO**

Que el presente proyecto de tesis “ESTABLECIMIENTO DE UNA BASE DE DATOS DE SEÑALES DE VIBRACIONES ACÚSTICAS E IMÁGENES TERMOGRÁFICAS INFRARROJAS PARA UN SISTEMA MECÁNICO ROTATIVO CON LA COMBINACIÓN DE DIFERENTES TIPOS DE FALLOS Y ELABORACIÓN DE GUÍAS DE PRÁCTICAS PARA DETECCIÓN DE FALLOS EN ENGRANAJES”, realizado por el estudiante Rómulo Andrés Guiracocha Guiracocha, fue dirigido por mi persona.



---

Ing. René Vinicio Sánchez

## RESUMEN

El presente proyecto estudia las señales de emisión acústica, señales de vibración mecánicas e imágenes termográficas producto de la introducción de fallos sobre un sistema mecánico rotativo compuesto por un eje de transmisión y caja de engranajes rectos con la finalidad de generar bases de datos para entrenar sistemas automáticos de diagnóstico de fallos en engranajes y rodamientos aplicado al monitoreo de la condición dentro del mantenimiento predictivo. También se presenta guías de práctica para el análisis de vibraciones mecánicas en caja de engranajes y evaluación térmica de rodamientos con el fin de generar un aporte al aprendizaje dentro del mantenimiento a estudiantes y personal de la industria.

Inicialmente se desarrolla la revisión bibliográfica sobre emisión acústica y termografía infrarroja en la cual se estudia los conceptos generales sobre acústica y termografía, sus ecuaciones matemáticas características, las ventajas y limitaciones de su uso en el mantenimiento predictivo, el principio de funcionamiento de los equipos de medición y el análisis de las señales haciendo hincapié en máquinas rotativas.

Después se presenta una revisión bibliográfica sobre los indicadores de condición para señales acústicas e imágenes termográficas y las normas técnicas usadas para el monitoreo de la condición de máquinas. Luego se establece la designación y descripción del sistema mecánico rotativo y se presenta la configuración de fallos en engranajes, rodamientos y ejes. También se describen los equipos de medición y adquisición de señales acústicas e imágenes termográficas y su ubicación dentro del sistema mecánico rotativo dependiendo de la posición del fallo. Asimismo se designan los protocolos sobre la nomenclatura que detallan la información del fallo de manera codificada. Por último se realiza el levantamiento de 3 bases de datos bajo diferentes condiciones y son:

- Base 1: 100 pruebas de fallos incipientes combinados en el eje de transmisión y la caja de engranajes, 40 de ellos con perturbaciones sonoras causadas por la adición

- de un motor al sistema; se utiliza 2 tipos de sensores acústicos (sensor de contacto y micrófono). Cada prueba recolecta 120 muestras por sensor.
- Base 2: 9 pruebas que recogen señales periódicas sobre el comportamiento de la vida útil del rodamiento NTN 6906LLU sometido a diferente carga axial en el eje de transmisión; se utiliza 1 sensor acústico de contacto, 1 micrófono, 2 sensores de vibración mecánica uniaxiales, 1 sensor de vibración mecánica triaxial, 1 tacómetro y la cámara termográfica. La Prueba 1 recolecta 297 muestras por cada sensor y 297 imágenes térmicas, la Prueba 2 recolecta 53 muestras por cada sensor y 53 imágenes térmicas, la Prueba 3 recolecta 26 muestras por cada sensor y 26 imágenes térmicas, la Prueba 4 recolecta 11 muestras por cada sensor y 10 imágenes térmicas, la Prueba 5 recolecta 23 muestras por cada sensor y 23 imágenes térmicas, la Prueba 6 recolecta 129 muestras por cada sensor y 129 imágenes térmicas, la Prueba 7 recolecta 113 muestras por cada sensor y 113 imágenes térmicas, la Prueba 8 recolecta 112 muestras por cada sensor y 112 imágenes térmicas y la Prueba 9 recolecta 713 muestras por cada sensor y 713 imágenes térmicas.
  - Base 3: 7 pruebas de fallos severos combinados en el eje de transmisión; se utiliza 2 sensores de vibración mecánica uniaxiales. Cada prueba recolecta 45 muestras por sensor.

Además se presentan nuevos softwares diseñados para la recolección de la base de datos y el almacenamiento y la disponibilidad de las bases de datos.

Finalmente se elaboran guías de prácticas para la detección de fallos en engranajes mediante el análisis de vibraciones mecánicas y la evaluación térmica de rodamientos en sistemas de eje de transmisión utilizando equipos de medición industriales, la evaluación de las guías de prácticas ha sido realizada por estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica, Automotriz e Industrial con lo que se establece un material de apoyo para el mejor entendimiento de estos temas afines al mantenimiento industrial en estudiantes de pregrado.

Este proyecto es un aporte al campo investigativo perteneciente al Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación en Ingeniería de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca dentro del proyecto de Diagnóstico De Fallos En Engranajes Basado En El Análisis De Señales De Vibración Empleando Técnicas De Inteligencia Artificial y/o Estadísticas con código CIDII-023513 dentro del cual se han desarrollado los proyectos: “Diseño y construcción de un banco didáctico para la medición de vibraciones mecánicas en los laboratorios de instrumentación de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca” realizado por el Ing. José Jara y el Ing. Juan Sinchi, “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” realizado por el Ing. Marcos Carangui, “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 el Ing. Santiago Niveló y el Ing. David Romero y “Diagnóstico de fallos en engranajes basado en el análisis de señales de vibración empleando una red neuronal perceptrón multicapa con retropropagación del error” realizado por el Ing. René Vinicio Sánchez. Con este proyecto se complementa los estudios realizados sobre el campo del análisis de vibraciones mecánicas.

# ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN A LAS EMISIONES ACÚSTICAS Y LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA .....	2
1.1 Emisión acústica.....	2
1.1.1 Relación acústica en los materiales.....	4
1.1.2 Aislamiento acústico .....	4
1.1.2.1 Cámara anecoica .....	4
1.1.2.1.1 Reverberación .....	4
1.1.2.2 Cámara semi-anecoica.....	5
1.1.2.3 Cámara reverberante .....	5
1.2 Onda acústica .....	5
1.2.1 Ecuación de la onda acústica .....	5
1.2.2 Solución de la onda acústica .....	6
1.2.2.1 Propagación de la onda acústica.....	7
1.2.2.2 Formas de propagación de las ondas acústicas en medios sólidos.....	7
1.2.3 Magnitudes de la onda acústica .....	9
1.2.3.1 Amplitud.....	9
1.2.3.2 Frecuencia ( $f$ ) .....	10
1.2.3.3 Longitud de onda acústica ( $\lambda$ ).....	10
1.2.3.4 Conteo de señal .....	10
1.2.3.5 Tiempo de subida .....	11
1.2.3.6 Energía de la onda acústica .....	11
1.2.4 Características del sonido .....	11
1.2.4.1 Sonido.....	11

1.2.4.2	Unidades.....	11
1.2.4.3	Intensidad .....	11
1.2.4.4	Potencia sonora .....	12
1.2.4.5	Presión sonora .....	12
1.2.4.6	Intensidad sonora.....	12
1.2.4.7	Energía sonora.....	12
1.2.4.8	Nivel de potencia sonora.....	13
1.2.4.9	Nivel de presión sonora.....	13
1.2.4.10	Nivel de intensidad del sonido .....	13
1.2.4.11	Nivel de energía sonora.....	14
1.2.4.12	Tono .....	14
1.2.5	Ruido Acústico.....	14
1.2.5.1	Tipos de ruido.....	15
1.2.5.2	Clasificación del ruido acústico en función del tiempo .....	15
1.2.5.2.1	Ruido estacionario .....	15
1.2.5.2.2	Ruido fluctuante .....	15
1.2.5.2.3	Ruido Impulsivo .....	15
1.2.5.2.4	Ruido de fondo .....	15
1.2.5.3	Clasificación del ruido acústico en función de la frecuencia .....	15
1.2.5.3.1	Ruido blanco.....	15
1.2.5.3.2	Ruido rosado.....	16
1.2.5.3.3	Ruido tonal .....	17
1.3	Mantenimiento predictivo empleando emisión acústica .....	17
1.3.1	Monitoreo de la condición .....	17
1.3.2	Técnicas para el mantenimiento predictivo usando emisiones acústicas....	19

1.3.2.1	Medición de impulsos de choque “ <i>Shock Pulse Meter</i> ” .....	19
1.3.2.2	Análisis de ondas de tensión “ <i>Stress Wave Analyzer</i> ” .....	19
1.3.2.3	Análisis de emisión acústica “ <i>Emission Acoustic Analyzer</i> ” .....	19
1.3.3	Ventajas y limitaciones del análisis de señales acústicas en el mantenimiento predictivo. ....	20
1.3.4	Emisiones acústicas en máquinas rotativas.....	21
1.4	Medición de emisiones acústicas .....	22
1.4.1	Principio de funcionamiento de los medidores acústicos .....	22
1.4.1.1	Sensores acústicos capacitivos .....	22
1.4.1.2	Sensores acústicos piezoeléctricos .....	23
1.4.1.3	Sensores acústicos electrodinámicos.....	24
1.4.2	Sensores de Emisión Acústica .....	24
1.4.2.1	Sensor acústico o transductor de contacto.....	25
1.4.2.2	Micrófono o transductor sin contacto.....	25
1.4.2.3	Módulo para sensor acústico .....	26
1.4.2.4	Módulo para micrófono.....	26
1.4.2.5	El campo de medición para micrófono .....	27
1.4.3	El Sonómetro .....	28
1.5	Análisis acústico.....	29
1.5.1	Adquisición de datos en máquinas rotativas.....	29
1.5.1.1	Análisis en el dominio de tiempo de las señales acústicas.....	29
1.5.1.2	Análisis en el dominio de la frecuencia de las señales acústicas .....	30
1.5.1.2.1	La transformada rápida de Fourier “ <i>Fast Fourier Transform</i> ” (FFT).....	30
1.5.2	Procesamiento digital de señales acústicas .....	30
1.6	Termografía.....	31

1.6.1	Principios básicos en el estudio de termografía .....	31
1.6.1.1	Calor .....	31
1.6.1.2	Transferencia de calor .....	32
1.6.1.3	Radiación.....	32
1.6.1.4	Radiación Infrarroja .....	32
1.6.2	Espectro electromagnético .....	32
1.6.2.1	Ley fundamental de la radiación .....	34
1.6.2.2	Formas en las que se presenta la radiación .....	34
1.6.3	Emisividad .....	35
1.6.3.1	Coefficiente de emisividad ( $\epsilon$ ).....	35
1.6.3.2	Cuerpo negro .....	35
1.6.4	La termografía infrarroja.....	35
1.6.5	Inspección termográfica.....	36
1.6.5.1	Imagen radiométrica.....	36
1.6.5.2	Imagen térmica.....	36
1.7	Mantenimiento predictivo empleando termografía infrarroja .....	37
1.7.1	Ventajas y limitaciones del análisis termográfico infrarrojo en el mantenimiento .....	37
1.7.2	Termografía infrarroja en máquinas rotativas.....	38
1.7.3	Tipos de cámaras termográficas infrarrojo .....	39
1.7.3.1	Infrarrojo de media onda “ <i>Mid-Wave Infrared</i> ” (MWIR).....	39
1.7.3.2	Infrarrojo de onda larga “ <i>Large-Wave Infrared</i> ” (LWIR).....	39
1.7.3.3	Matriz de plano focal “ <i>Focal Plane Array</i> ” (FPA) .....	40
1.7.4	Cámara termográfica.....	40
1.7.5	Características de una cámara termográfica. ....	41

1.8	Análisis de imágenes termográfica infrarrojo .....	41
1.8.1	Adquisición y visualización de imágenes .....	42
1.8.2	Pre-procesamiento.....	42
1.8.3	Procesamiento .....	42
1.8.4	Extracción de características en imágenes térmicas .....	43
1.8.5	Diagnóstico mediante imágenes térmicas .....	43
CAPÍTULO 2: CONFIGURACIÓN Y BASE DE DATOS DE LOS SISTEMAS		
MECÁNICOS ROTATIVOS .....		
2.1	Indicadores de condición para señales acústicas e imágenes termográficas .....	45
2.1.1	Monitoreo de la condición .....	45
2.1.2	Normas para el monitoreo de condición mediante emisiones acústica.....	46
2.1.3	Normas para el monitoreo de condición mediante termografía infrarroja..	48
2.1.4	Indicadores de condición para engranajes utilizando emisiones acústicas .	49
2.1.4.1	Indicadores de condición para el análisis en el dominio del tiempo.....	50
2.1.4.2	Indicadores de condición para el análisis en el dominio de la frecuencia .....	54
2.1.5	Indicadores de condición para sistemas rotativos utilizando termografía ..	56
2.1.5.1	Histograma .....	56
2.1.5.2	Textura .....	58
2.1.5.3	Otros indicadores.....	59
2.2	Banco de vibraciones, disposición de fallos y configuración de fallos combinados en engranajes, rodamientos y ejes.....	59
2.2.1	Banco de vibraciones .....	59
2.2.2	Disposición de fallos.....	61
2.2.2.1	Fallo en engranajes y rodamientos .....	61

2.2.2.2	Designación de engranajes y rodamientos para la caja reductora y el sistema de transmisión. ....	61
2.2.2.3	Disponibilidad de fallos en engranajes y rodamientos.....	63
2.2.2.4	Perturbaciones en el eje de transmisión .....	63
2.2.2.5	Perturbación de ruido sonoro .....	63
2.2.3	Configuración de fallos combinados en engranajes, rodamientos y ejes....	64
2.3	Instrumentación acústica y termográfica.....	65
2.3.1	Instrumentación acústica.....	65
2.3.1.1	Características del software para recolección de datos .....	66
2.3.1.2	Tarjeta de adquisición de datos .....	66
2.3.1.3	Sensor acústico .....	67
2.3.1.4	Micrófono.....	67
2.3.2	Instrumentación termográfica .....	68
2.3.3	Lubricación de caja de engranajes y nivel de aceite .....	70
2.3.4	Posición del sensor acústico y del micrófono .....	70
2.4	Protocolo para la toma de señales acústicas e imágenes termográficas.....	71
2.4.1	Nomenclatura de los elementos del sistema rotativo .....	71
2.4.2	Nomenclatura para ubicación de sensor acústico, micrófono y cámara termográfica.....	72
2.4.3	Nomenclatura para base de datos de señales acústicas .....	74
2.4.3.1	Nomenclatura para caja de engranajes .....	74
2.4.3.2	Nomenclatura para eje de transmisión .....	75
2.4.3.3	Nomenclatura para combinación en caja de engranajes y eje de transmisión.....	76
2.4.4	Nomenclatura para base de datos de imágenes termográficas .....	77
2.4.4.1	Nomenclatura para eje de transmisión .....	77

2.5	Levantamiento y almacenamiento de la base de datos de señales acústicas e imágenes termográficas.....	77
2.5.1	Condiciones ambientales de laboratorio .....	78
2.5.2	Bases de datos .....	78
2.5.2.1	Base de datos 1 .....	78
2.5.2.2	Base de datos 2 .....	79
2.5.2.2.1	Base de datos 2 – Grupo 1 .....	80
2.5.2.2.2	Base de datos 2 – Grupo 2 .....	84
2.5.2.2.3	Cálculo de emisividad .....	86
2.5.2.3	Base de datos 3 .....	87
2.5.2.3.1	Protocolo para la toma de señales de vibración mecánicas en el sistema de eje de transmisión. ....	87
2.5.3	Software de control y adquisición de base de datos para el banco de vibraciones.....	90
2.5.4	Almacenamiento de base de datos .....	92
CAPÍTULO 3: GUÍA DE PRÁCTICAS .....		94
3.1	Descripción del sistema mecánico rotativo para la guía de prácticas .....	94
3.2	Descripción del equipo “ADASH 4400-VA4Pro” .....	95
3.2.1	Medidor de vibraciones ADASH 4900 Vibrio .....	95
3.3	Descripción del equipo “Testo 882” .....	98
3.3.1	Cámara Termográfica Testo 882 .....	99
3.3.2	Aplicaciones de la cámara termográfica Testo 882 .....	99
3.3.3	Características técnicas de la cámara termográfica Testo 882.....	100
3.3.4	Panel de control de la cámara termográfica. ....	100
3.3.5	Software testo IRSoft .....	102
3.4	Selección de fallos de caja de engranajes y sistema de eje de transmisión.....	103

3.4.1	Fallos en caja de engranajes.....	103
3.4.2	Fallos en el sistema de eje de transmisión .....	104
3.5	Elaboración de la guía de prácticas .....	106
3.5.1	Revisión de textos.....	107
3.5.2	Formato para guía de prácticas .....	107
3.5.3	Guías de Practicas .....	108
3.5.3.1	Guía de prácticas para detectar fallos en engranajes rectos mediante señales de vibraciones mecánicas. ....	108
3.5.3.2	Guía de prácticas para evaluar fallos en sistemas rotativos mediante imágenes termográficas infrarrojas.....	108
3.5.4	Revisión de las guías de práctica .....	109
3.5.5	Ejecución de la práctica .....	109
3.6	Validación de las guías de prácticas.....	110
3.6.1	Evaluación de la guía de prácticas .....	110
3.6.2	Resultados de la evaluación de las guías de prácticas .....	111
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		112
TRABAJOS FUTUROS .....		114
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....		115
ANEXOS .....		124
ANEXO A.....		125
ANEXO B .....		131
ANEXO C .....		134
ANEXO D.....		143
ANEXO E .....		151
ANEXO F.....		156

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Morfología de una señal AE.....	2
Figura 1.2: Comunicación por infrasonido, emisión sonido y ultrasonido.....	3
Figura 1.3: Formas de propagación de una señal AE en medios sólidos.....	8
Figura 1.4: Magnitudes de la onda acústica.....	9
Figura 1.5: Longitud de onda acústica.....	10
Figura 1.6: Longitud de onda acústica.....	16
Figura 1.7: Esquema del principio de funcionamiento de un sensor capacitivo.....	23
Figura 1.8: Esquema del principio de funcionamiento de un sensor piezoeléctrico.....	24
Figura 1.9: Esquema del principio de funcionamiento de un sensor electrodinámico.....	24
Figura 1.10: Transductor de contacto.....	25
Figura 1.11: Micrófono.....	25
Figura 1.12: Módulo de emisión acústica.....	26
Figura 1.13: Módulo de emisión acústica.....	26
Figura 1.14: Sonómetro.....	28
Figura 1.15: Longitud de onda electromagnética.....	33
Figura 1.16: Detector térmico no refrigerado.....	39
Figura 1.17: Detector matriz de plano focal.....	40
Figura 1.18: Captación de imágenes térmicas infrarrojas.....	41
Figura 1.19: Sistema de diagnóstico de fallos por termografía infrarroja.....	42
Figura 2.1: Unidad motriz.....	60
Figura 2.2: Designación de engranajes y rodamientos en la caja reductora.....	61
Figura 2.3: Designación de rodamientos en eje de transmisión.....	62
Figura 2.4: Características técnicas de rodamiento SKF 22207 EK/C3.....	62

Figura 2.5: Características técnicas de rodamiento SKF 61906-2RS1 .....	63
Figura 2.6: Tarjeta de adquisición de datos NATIONAL INSTRUMENTS.....	66
Figura 2.7: Sensor acústico PANAMETRISCS V109.....	67
Figura 2.8: Micrófono y preamplificador PCB PIEZOTRONICS .....	67
Figura 2.9: Cámara termográfica TESTO 882.....	68
Figura 2.10: Software IRSoft.....	68
Figura 2.11: Tarjeta de adquisición de datos ERBESSD INSTRUMENTS.....	69
Figura 2.12: (a) Sensor uniaxial, (b) Sensor triaxial, (c) Tacómetro .....	69
Figura 2.13: Sistema coordinado definido para el sistema mecánico rotativo.....	70
Figura 2.14: Nomenclatura de elementos de la caja de engranajes .....	71
Figura 2.15: Nomenclatura para carga axial, carga radial, eje de transmisión y desbalanceo. . . . .	72
Figura 2.17: Nomenclatura para sensores acústicos en caja de engranajes .....	73
Figura 2.18: Nomenclatura para sensores acústicos y cámara termográfica en chumaceras. . . . .	73
Figura 2.19: Configuración del sistema para base de datos 2. Pruebas 1, 2 y 3 .....	81
Figura 2.20: Características técnicas de rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3.....	81
Figura 2.21: Características técnicas de rodamiento NTN 6906LLU.....	82
Figura 2.22: Configuración del sistema para base de datos 2. Pruebas 4, 5, 6, 7, 8 y 9 ...	84
Figura 2.23: Sistema de eje de transmisión .....	87
Figura 2.24: Software para adquisición de señales en base de datos 2. Pruebas 4, 5, 6, 7, 8, y 9.....	91
Figura 2.25: Software para adquisición de señales en base de datos 3.....	91
Figura 3.1: Equipos de medición de vibraciones y termografía para sistema mecánico rotativo .....	95
Figura 3.2: Equipo ADASH 4900-Vibrio III.....	96

Figura 3.3: (a) Acelerómetro A 102-1A, (b) Base magnética A 1102, (c) Conector Amphenol MS3106A10SL-4S, (d) Acelerómetro armado para ser usado .....	96
Figura 3.4: Cámara TESTO 882 .....	98
Figura 3.5: Disposición de botones en el panel de control del equipo Testo 882.....	101
Figura 3.6: Software de análisis IRSofT .....	102
Figura 3.7: Designación de engranajes rectos en la caja reductora .....	103
Figura 3.8: Designación de rodamientos en el sistema de eje de transmisión.....	105
Figura 3.9: Proceso para la elaboración y validación de una guía de prácticas .....	106
Figura 3.10: Resultados de la validación de las guías de prácticas. ....	111

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Maquinaria en donde se utiliza el análisis EA.....	18
Tabla 1.2: Tipos de radiación infrarroja .....	32
Tabla 2.1: Normas técnicas usadas en el monitoreo de condición de máquinas con emisión acústica .....	47
Tabla 2.2: Normas técnicas usadas en el monitoreo de condición de máquinas con termografía infrarroja.....	48
Tabla 2.3: CI para señales EA en el dominio del tiempo.....	50
Tabla 2.4: CI para señales EA en el dominio de la frecuencia .....	55
Tabla 2.5: CI basadas en histograma para imágenes térmicas infrarrojas .....	57
Tabla 2.6: Descripción de los elementos de la unidad motriz .....	60
Tabla 2.7: Presión sonora de las fuentes de ruido.....	64
Tabla 2.8: Combinación de fallos .....	65
Tabla 2.9: Elementos del sistema.....	65
Tabla 2.10: Designación numérica de posición de sensores acústicos y cámara térmica.	75
Tabla 2.11: Designación numérica de perturbaciones .....	75
Tabla 2.12: Designación numérica de fallos en rodamientos .....	76
Tabla 2.13: Designación numérica para posición de sensores acústicos y cámara térmica.....	76
Tabla 2.14: Condiciones ambientales del laboratorio.....	78
Tabla 2.15: Condiciones C1 para base de datos 1 .....	79
Tabla 2.16: Estudios realizados en diagnóstico de fallos aplicando termografía infrarroja.....	80
Tabla 2.17: Condiciones C2-1, C2-2 y C2-3 para base de datos 2 .....	82
Tabla 2.18: Parámetros de calibración de la cámara termográfica .....	83

Tabla 2.19: Humedad relativa en la ciudad de Cuenca.....	84
Tabla 2.20: Condiciones C2-4, C2-5, C2-6, C2-7, C2-8 y C2-9 para base de datos 2. ....	85
Tabla 2.21: Emisividad del sistema rotativo.....	87
Tabla 2.22: Canales de adquisición de datos .....	88
Tabla 2.23: Condiciones C3 para base de datos 3 .....	88
Tabla 2.24: Fallos severos en Rodamiento 1207 EKTN9/C3.....	88
Tabla 2.25: Patrones de fallos.....	89
Tabla 2.26: Número total de pruebas .....	89
Tabla 3.1: Modos de medición del equipo ADASH 4900-Vibrio III .....	97
Tabla 3.2: Funciones de los botones del panel de control de la cámara termográfica....	101
Tabla 3.3: Designación numérica para realizar combinación de fallo - Caja reductora .	104
Tabla 3.4: Combinación de fallos para la Etapa 1 .....	104
Tabla 3.5: Designación numérica para combinación de fallo - Eje de transmisión.....	105
Tabla 3.6: Combinación de fallos para eje de transmisión .....	105
Tabla 3.7: Información bibliográfica para realización de guías de prácticas .....	107

# CAPÍTULO 1

# 1 INTRODUCCIÓN A LAS EMISIONES ACÚSTICAS Y LA TERMOGRAFÍA INFRARROJA

En este capítulo se describe los términos necesarios y los conceptos generales para entender el fenómeno de la emisión acústica y las señales físicas de la termografía infrarroja en el campo del mantenimiento predictivo aplicado al análisis de fallos en máquinas rotativas.

## 1.1 Emisión acústica

Emisión Acústica (EA) se define como un fenómeno transitorio que emite ondas elásticas por la rápida liberación de energía procedente de una deformación o daño que se localiza en el interior o en la superficie de un material, el rango de frecuencia típico para una señal EA está comprendida entre 100 kHz a 1000 kHz. De manera similar, EA es una técnica de seguimiento que analiza las frecuencias de ondas elásticas generadas de forma natural y que son superiores al umbral de audición humana que se sitúa entre 20 Hz a 20000 Hz y que genera actividad de banda ancha debido a la liberación transitoria de energía almacenada de fuentes localizadas [1][2][3].

En la Figura 1.1 se muestra una señal de EA generada en el orden superior al umbral de audición humana entre el orden de 20 kHz a 100kHz.

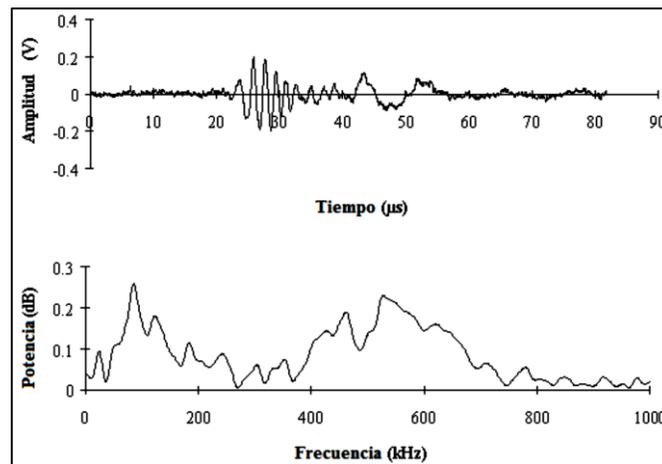


Figura 1.1: Morfología de una señal AE. Fuente: [2]

Ondas que se encuentran fuera del rango de la audición humana son conocidos como: ondas infrasónicas (frecuencias menores a los 20 Hz) y ondas ultrasónicas (frecuencias superiores a los 20 kHz). Las ondas infrasónicas pueden ser naturales generadas por terremotos, erupciones volcánicas, grandes mareas, huracanes, auroras boreales y avalanchas; o artificiales producidos por la explosión de una bomba atómica, la ignición de cohetes, aviones supersónicos y motores de combustión interna, Las ondas ultrasónicas pueden ser naturales generadas por los delfines y murciélagos; o artificiales [4].

Algunos ejemplos del uso de ondas infrasónicas muestran en: la comunicación de algunos animales como los elefantes, topes, tigres, ballenas y rinocerontes mostrado en la Figura 1.2; el monitoreo geológico como las erupciones volcánicas, terremotos, huracanes, tormentas; la detección de objetos como la basura espacial, navegación marítima. El uso de las ondas ultrasónicas se presenta en: la comunicación de animales como los delfines y murciélagos mostrado en la Figura 1.2; en aplicaciones industriales como la microestructura de materiales, ensayos no destructivos, diagnóstico de fallos y otros; aplicaciones civiles como estructuras y cimentación; en medicina como en ecografía, fisioterapia, ultrasonoterapia, sonomamografías, urosonografías y otros [5][6].

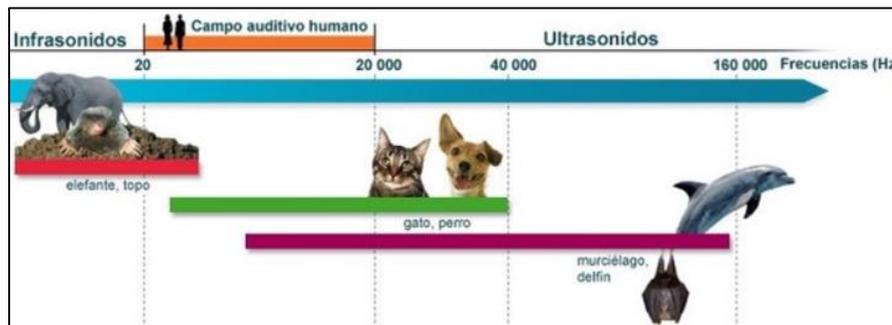


Figura 1.2: Comunicación por infrasonido, emisión sonido y ultrasonido. Fuente: [7]

La técnica de la EA es aplicada en laboratorio con ensayos no destructivos, inspección y evaluación de estructuras, estudios de corrosión, pruebas de materiales avanzadas en compuestos y cerámica, control de calidad de producción, detección de fallos incipientes por fatiga en componentes estructurales de aeronaves, control de agrietamiento de las soldaduras durante el proceso de enfriamiento, estudios del comportamiento de los materiales a altas temperaturas, entre otros [8].

Las señales acústicas se desplazan a través de un medio elástico sólido, líquido o gaseoso; las características de los sólidos o los fluidos (líquidos y gaseosos) influyen en la propagación de la señal de emisión acústica.

### **1.1.1 Relación acústica en los materiales**

Los materiales representan un medio de transmisión, reflexión o absorción de las ondas acústicas, las características que presentan los materiales influyen de forma general en el resultado de una medición acústica y las condiciones del medio en donde este concentrado la fuente de sonido influye sobre los efectos producidos por la onda acústica.

### **1.1.2 Aislamiento acústico**

Es la oposición a la transmisión de la onda acústica desde un local hacia otro local o hacia el medio exterior y requiere del empleo de un conjunto de procedimientos a fin de obtener la calidad acústica determinada. Las propiedades de los materiales con los que está construido el local condicionan la calidad acústica. Un material con propiedades de absorción o reflejo de una cantidad importante de energía de la onda acústica que incide en el medio es adecuado para el aislamiento acústico, la calidad acústica de una pared estará relacionada con el índice de aislamiento acústico del material, el coeficiente de absorción y el coeficiente de transmisión de los materiales de la pared [9].

De acuerdo a las condiciones de absorción del local cerrado se designan 3 tipos de cámaras que reaccionan de forma diferente ante una señal de EA: cámara anecoica, cámara semi-anecoica y cámara reverberante.

#### **1.1.2.1 Cámara anecoica**

Una cámara anecoica es un lugar cerrado diseñado para absorber toda la energía que incide sobre las paredes, el piso y el techo anulando los efectos de reverberación [10].

##### **1.1.2.1.1 Reverberación**

Es un fenómeno que hace que el sonido persista en un punto establecido, dentro de un lugar cerrado, producto del rebote de las ondas acústicas al chocar contra las paredes. La disminución del sonido en 60dB, después de cortar la emisión sonora; se define como el tiempo de reverberación (T) y se puede

calcular mediante la Ecuación 1.1, conocida como la ecuación de Sabine, es utilizada en lugares cerrados donde los materiales de las paredes están distribuidos homogéneamente y tienen coeficientes de absorción pequeños [3].

$$T = \frac{0.16 V}{A} \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

Donde:

T = duración de la reverberación.

V = volumen del lugar cerrado.

A = superficie de absorción equivalente (paredes y objetos internos).

### **1.1.2.2 Cámara semi-anecoica**

En una cámara semi-anecoica la superficie del piso del lugar cerrado produce reverberación mientras que las paredes absorben la energía de la onda acústica, el piso está construido de concreto adecuado para alojar maquinaria pesada lo que es conveniente para sistemas de investigación industrial.

### **1.1.2.3 Cámara reverberante**

Una cámara reverberante es un lugar cerrado diseñado con materiales de alta reflectividad de la energía acústica, su uso es para evaluar la potencia del sonido [11].

## **1.2 Onda acústica**

Una onda acústica es una variación periódica de la presión acústica, tiene un movimiento ondulatorio que es representado mediante ecuaciones matemáticas para su análisis.

### **1.2.1 Ecuación de la onda acústica**

Para entender los principios del análisis acústico se debe tener presente la Ecuación 1.2 que describe la transmisión de la onda acústica en el espacio tridimensional, la cual relaciona la suma de variación de la presión acústica instantánea en las coordenadas (x, y, z) y el tiempo (t).

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

Donde:

$p$  = presión acústica instantánea.

$c$  = velocidad del sonido.

$t$  = tiempo.

La ecuación de onda acústica tiene dos restricciones importantes: (a) los efectos de disipación de energía son despreciables y (b) la amplitud de la onda de presión deben ser relativamente pequeña en comparación con la presión atmosférica. Si no se cumplen estas dos condiciones en la situación física analizada, los resultados del análisis no tendrá ningún valor, independientemente de la técnica utilizada para la solución [11].

La representación de la onda acústica también es estudiada mediante la Ecuación 1.3 que relaciona la variación de la presión acústica instantánea en coordenada radial ( $r$ ) y el tiempo ( $t$ ).

$$\frac{\partial^2 (pr)}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 (pr)}{\partial t^2} \quad (\text{Ecuación 1.3})$$

### 1.2.2 Solución de la onda acústica.

La solución general aplicada a la Ecuación 1.2 (onda acústico en coordenadas  $(x, y, z)$ ) se muestra en la Ecuación 1.4, que relaciona la suma algébrica de una onda positiva y una onda negativa en tres dimensiones.

$$p((x, y, z), t) = f((x, y, z) - ct) + g((x, y, z) + ct) \quad (\text{Ecuación 1.4})$$

Donde:

$f((x, y, z) - ct)$  representa una onda tridimensional que viaja en la dirección positiva de  $x, y, z$ , con velocidad  $c$ .

$g((x, y, z) + ct)$  representa una onda tridimensional que viaja en la dirección negativa de  $x, y, z$  con velocidad  $c$ .

La solución general aplicada a la Ecuación 1.3 (onda acústica en coordenada radial ( $r$ )) se muestra en la Ecuación 1.5, que relaciona la suma algebraica de una onda esférica que se aleja y se aproxima a un punto central.

$$p(r, t) = \frac{f(r - ct)}{r} + \frac{g(r + ct)}{r} \quad (\text{Ecuación 1.5})$$

Donde:

$f(r - ct)/r$  representa una onda esférica que se aleja del centro con velocidad  $c$ .

$g(r + ct)/r$  representa una onda esférica que se aproxima al centro con velocidad  $c$ .

### **1.2.2.1 Propagación de la onda acústica**

La propagación de ondas acústicas en superficies planas se distribuye como círculos concéntricos alrededor de la fuente y puede ser captada por uno o varios sensores, la distancia máxima para la captación de una onda acústica depende de las propiedades de materiales, la geometría de objeto de prueba, su contenido y el ambiente [8].

La propagación de la onda acústica requiere de un medio de conducción líquido, sólido o gaseoso y la velocidad de propagación de las ondas sonoras está relacionado a la distancia promedio entre las partículas que conforman el medio, por tanto, la velocidad es mayor en los sólidos que en los líquidos y en los gases se propaga a menor velocidad; en el vacío no se propaga la onda acústica.

### **1.2.2.2 Formas de propagación de las ondas acústicas en medios sólidos**

En un medio sólido y elástico la onda acústica se manifiesta como una onda de presión, entre las que se diferencian: ondas longitudinales o de compresión (conocidas como ondas P), ondas transversales o de cortante (conocidas como ondas S) y las ondas de superficie (conocidas como ondas Rayleigh); como se observa en la Figura 1.3.

- Onda P.- la dirección del movimiento de las partículas es paralela a dirección de propagación, se relacionan a tensiones normales.
- Onda S.- la dirección del movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación, se relacionan a tensiones tangenciales.
- Onda Rayleigh.- la dirección del movimiento de las partículas es elíptico y se propaga a lo largo de la superficie de un sólido.

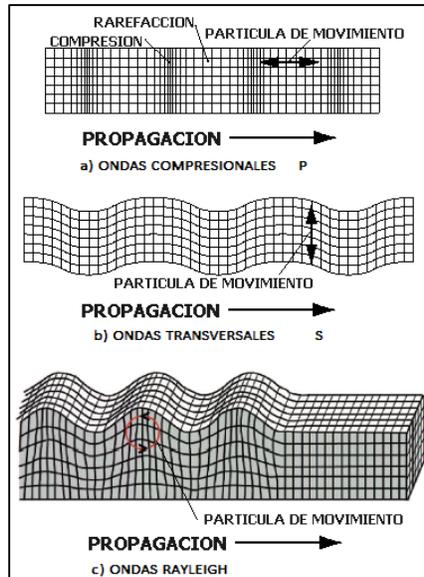


Figura 1.3: Formas de propagación de una señal AE en medios sólidos. Fuente: [12]

La velocidad de propagación para las ondas P es el más rápido y para las ondas Rayleigh es el más lento [8].

La Ecuación 1.6 relaciona el cálculo de la velocidad de propagación ( $V_p$ ) de la onda longitudinal con el módulo de elasticidad (E) y la densidad  $\rho$ .

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{Ecuación 1.6})$$

La velocidad del sonido en el aire, en función de la temperatura (T), se la calcula con la Ecuación 1.7.

$$V_p = V_o + \beta * T \quad (\text{Ecuación 1.7})$$

Donde:

$V_0 = 331.3 \text{ m/s}$  (Velocidad a  $T=0^\circ\text{C}$ , presión atmosférica de 1atm y humedad relativa 0).

$\beta = 0.606 \text{ m/(s } ^\circ\text{C)}$ .

$T$ = temperatura en grados Celsius.

### 1.2.3 Magnitudes de la onda acústica

Las magnitudes características de la onda acústica servirán para realizar, mediante técnicas de extracción, el diagnóstico de cualquier señal. Una onda acústica se presenta como una emisión constante, producto de deformaciones constantes en elementos o como emisión de ráfaga producto del contacto de uno o más fallos internos.

La representación simplificada de la onda acústica y sus magnitudes características se observa en la Figura 1.4.

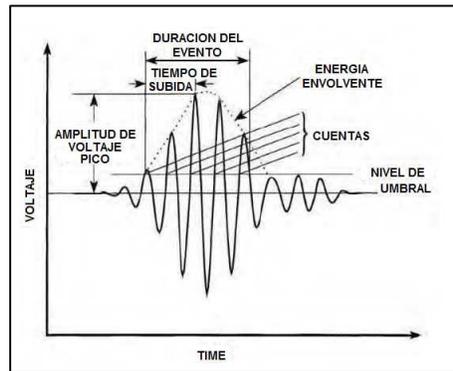


Figura 1.4: Magnitudes de la onda acústica. Fuente: [13]

#### 1.2.3.1 Amplitud

En una señal de EA, la amplitud es el valor pico de la señal envolvente, tal como se observa en la Figura 1.4. Debido a la dificultad que puede presentarse por la alta frecuencia de la señal, la identificación de la amplitud será el valor pico máximo que dé la señal [14].

### 1.2.3.2 Frecuencia ( $f$ )

Es el número de repeticiones que una perturbación realiza en el intervalo de un segundo, se la mide en hertzios (Hz) o ciclos por segundo (c/s) [10].

### 1.2.3.3 Longitud de onda acústica ( $\lambda$ )

Es la distancia que existe para el transcurso de un periodo de oscilación completo de un frente de onda en cualquier instante de tiempo, como se observa en la Figura 1.5.

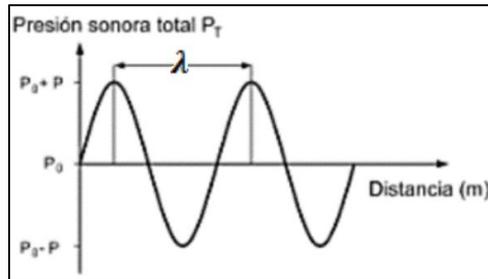


Figura 1.5: Longitud de onda acústica. Fuente: [15]

La relación entre la velocidad del sonido ( $V_p$ ), la frecuencia ( $f$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ) se expresa en la Ecuación 1.8.

$$\lambda = \frac{V_p}{f} \quad (\text{Ecuación 1.8})$$

De esta relación se observa que la longitud de onda acústica es proporcional a la velocidad e inversamente proporcional a la frecuencia, y depende del medio de propagación. Para el oído humano la longitud de onda se encuentra en el rango de 17.25 m ( $f = 20 \text{ Hz}$ ) hasta 17.2 mm ( $f = 20 \text{ kHz}$ ).

### 1.2.3.4 conteo de señal

En una señal de AE se fija un nivel de umbral que se considera aceptable por el ser humano, el número de los tiempos que una amplitud EA supera un flanco positivo es denominado como el conteo de señal, como se observa en la Figura 1.4. Este valor indica la cantidad de la actividad y la intensidad de la fuente de generación [14].

#### **1.2.3.5 Tiempo de subida**

Es el valor comprendido desde el momento en que aparece la primera señal por encima del umbral establecido hasta que se llega a la amplitud máxima, como se observa en la Figura 1.4. Esto puede ayudar a determinar un tipo de daño dentro de un mecanismo [14].

#### **1.2.3.6 Energía de la onda acústica**

Para una señal EA, la energía se define como la raíz cuadrada media (Root Mean Square) aplicada a la señal. Es proporcional al área bajo la curva de la envolvente de la señal EA, como se observa en la Figura 1.4. La energía EA se relaciona con la energía mecánica, la relación de tensión y el mecanismo de deformación [14].

### **1.2.4 Características del sonido**

#### **1.2.4.1 Sonido**

Se define como una onda de presión que se mueve a través de un medio elástico a una cierta velocidad, en el aire las fluctuaciones de presión constituyen un campo de sonido, el cual puede ser percibido por el oído humano [16] [17].

#### **1.2.4.2 Unidades**

El decibelio (dB) es una unidad relativa empleada en acústica y telecomunicación, es utilizado para expresar la relación entre una magnitud de entrada (magnitud a estudiar) y una magnitud de salida (magnitud de referencia).

El oído humano responde a la entrada de energía de forma logarítmica que es proporcional al cuadrado de la presión de sonido. La presión sonora aceptable para el ser humano está comprendida entre un mínimo de 20  $\mu$ Pa (0 dB) y un máximo de 20 mPa (60 dB) que es detectado por el oído antes de causar dolor al oído [3][17].

#### **1.2.4.3 Intensidad**

La intensidad es la cantidad de energía acústica que contiene el sonido y permite diferenciar entre un sonido fuerte o débil porque está determinada por la potencia [10].

#### 1.2.4.4 Potencia sonora

Es la energía acústica por unidad de tiempo radiada por una fuente y se la mide en watts.

Potencia instantánea se define como la energía radiada en cualquier instante de tiempo.

Potencia máxima se define como el valor máximo de potencia radiada en cualquier instante de tiempo. Potencia media se define como el valor integrado de potencia radiada en un determinado intervalo de tiempo [10].

#### 1.2.4.5 Presión sonora

Se define como la diferencia entre la presión de sonido instantánea y la presión atmosférica estática, se mide en Pascal.

La presión de sonido instantánea, es el valor de la fluctuación de la presión que provoca variaciones pequeñas en la presión atmosférica. La presión atmosférica es la presión del aire sobre la superficie de la tierra [10].

#### 1.2.4.6 Intensidad sonora

Se define como la cantidad de energía sonora transferida por una onda sonora por unidad de área, aplicado en una dirección específica dentro del campo sonoro, el área es perpendicular a la dirección de propagación de la energía.

#### 1.2.4.7 Energía sonora

La energía acústica que atraviesa una superficie A se calcula mediante la Ecuación 1.9, se la expresa en Joules.

$$E_{son} = \int_A \left[ \int_0^{\Delta t} I_{son}(r, t) dt \right] dA = \int_0^t W(t) dt \quad (\text{Ecuación 1.9})$$

Donde:

$E_{son}$  = energía acústica sonora [J].

$I_{son}$  = intensidad acústica, que es función del punto escogido y del tiempo.

$\Delta t$  = intervalo de tiempo durante el que se pretende medir la energía sonora.

#### 1.2.4.8 Nivel de potencia sonora

Se expresa mediante la Ecuación 1.10:

$$L_w(dB) = 10 * \log \left[ \frac{W}{W_o} \right] \quad (\text{Ecuación 1.10})$$

Donde:

$L_w$  = nivel de potencia del sonido [dB].

$W$  = potencia de sonido radiada.

$W_o$  = potencia de referencia, este valor está comprendido entre 10 – 12 Watts.

#### 1.2.4.9 Nivel de presión sonora

Se expresa mediante la Ecuación 1.11:

$$L_p(dB) = 10 * \log \left[ \frac{p^2}{p_o^2} \right] \quad (\text{Ecuación 1.11})$$

Donde:

$L_p$  = nivel de presión del sonido [dB].

$p$  = presión del sonido instantánea.

$p_o$  = presión de referencia, el valor habitual es  $20\mu Pa$  ( $2 * 10^{-5} Nw/m^2$ ).

#### 1.2.4.10 Nivel de intensidad del sonido

Se expresa mediante la Ecuación 1.12:

$$L_i(dB) = 10 * \log \left[ \frac{I}{I_o} \right] \quad (\text{Ecuación 1.12})$$

Donde:

$L_i$  = nivel de intensidad del sonido [dB].

$I$  = intensidad del sonido instantánea.

$I_o$  = intensidad de referencia, el valor habitual esta entre  $10 - 12 \text{ w/m}^2$ .

#### 1.2.4.11 Nivel de energía sonora

Se expresa mediante la ecuación 1.13:

$$L_E(dB) = 10 * \log \left[ \frac{E}{E_o} \right] \quad (\text{Ecuación 1.13})$$

Donde:

$L_E$  = nivel de energía del sonido [dB].

$E$  = energía del sonido instantánea.

$E_o$  = energía de referencia, el valor habitual es  $1 * 10^{-12} \text{ Joules}$ .

#### 1.2.4.12 Tono

Es una propiedad del sonido usado para distinguir entre un sonido grave o bajo de un sonido agudo o alto, y se distinguen por su rango de frecuencias que va desde:

- Tonos graves: 20 a 300 Hz.
- Tonos medios: 300 a 2000 Hz.
- Tonos agudos: 2000 a 20000 Hz.

#### 1.2.5 Ruido Acústico

El ruido se define como un sonido de alta tonalidad que causa una sensación desagradable al oído, este es considerado un fenómeno subjetivo porque un mismo ruido puede causar reacciones distintas en las personas [9].

El ruido acústico se presenta cuando se mezclan ondas sonoras de frecuencias y amplitudes distintas.

### **1.2.5.1 Tipos de ruido**

El ruido acústico se puede clasificar en función del tiempo o de la frecuencia.

### **1.2.5.2 Clasificación del ruido acústico en función del tiempo**

#### **1.2.5.2.1 Ruido estacionario**

Se caracteriza porque el nivel de presión sonora no varía en el tiempo o presenta pequeñas fluctuaciones menores o iguales a 5dB entre el valor máximo y mínimo en un periodo de 1 minuto, un ejemplo son los ventiladores, bombas o equipos de procesos [18].

#### **1.2.5.2.2 Ruido fluctuante**

Se caracteriza porque el nivel de presión sonora varía en el tiempo con valores superiores a 5 dB entre el nivel máximo y mínimo en un periodo de 1 minuto, un ejemplo es el paso de un avión, el paso del tren, o la alarma de un reloj despertador [18].

#### **1.2.5.2.3 Ruido Impulsivo**

Se caracteriza porque el nivel de presión acústica se presenta por impulsos, con ascensos bruscos y duración breve (periodo inferior a 1 segundo) en relación al transcurso entre impulsos que supera el intervalo de 1 segundo, un ejemplo es la explosión de dinamita, el disparo de un revolver, la caída de un material, entre otros [10].

#### **1.2.5.2.4 Ruido de fondo**

Se caracteriza porque el ruido prevalece en el entorno luego de eliminar la fuente que provoca el ruido.

### **1.2.5.3 Clasificación del ruido acústico en función de la frecuencia**

#### **1.2.5.3.1 Ruido blanco**

Se caracteriza porque su respuesta a la frecuencia es una distribución uniforme en el espectro, su energía se mantiene constante como se observa en la Figura 1.6. Un ejemplo es la lluvia intensa o un televisor que no está en sintonía [10]. Fonéticamente suena “shhhhhhhhhhh...” o “ssssssssssss...”

### 1.2.5.3.2 Ruido rosado

Se caracteriza porque el nivel de energía disminuye en 3 decibelios por banda de octava, provocando una respuesta inversamente proporcional a la frecuencia como se observa en la Figura 1.6. Un ejemplo son las interferencias radiofónicas [10]. Fonéticamente suena “fffffffffffffffffffff...”

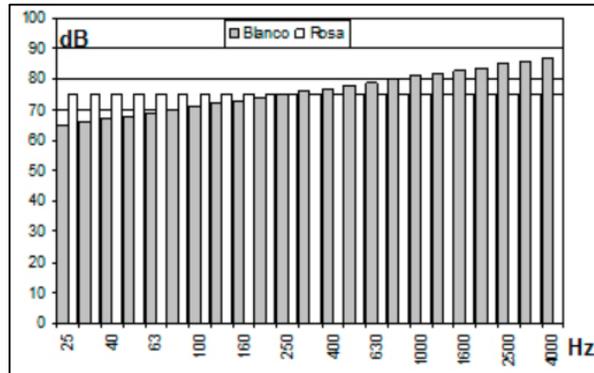


Figura 1.6: Longitud de onda acústica. Fuente: [19]

La banda de octavas es un intervalo de frecuencias comprendido entre dos valores que tienen una relación de 2, los centros de bandas de octavas adyacentes también están separadas en una relación de 2 y se encuentran normalizadas por la “*International Organization for Standardization*” ISO para valores redondeados de 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 y 16000 Hz; una banda de tercio de octava es la tercera parte de una banda de octava. Estas bandas aparecen debido a la complejidad que representa el analizar cada una de las componentes del rango de frecuencias audibles [19][20].

La anchura de los filtros de octava y tercio de octava se calcula mediante la Ecuación 1.14 y Ecuación 1.15, respectivamente.

$$f_2 - f_1 = 0.707 f_c \quad (\text{Ecuación 1.14})$$

Con  $f_2 = 2 f_1$

$$f_2 - f_1 = 0.232 f_c \quad (\text{Ecuación 1.15})$$

Con  $f_2 = \sqrt[3]{2} f_1$

Donde:

$f_1$  y  $f_2$  son las frecuencias externas de cada banda

$f_c$  es la frecuencia central de cada banda

### **1.2.5.3.3 Ruido tonal**

Se caracteriza por presentar armónicos a la frecuencia fundamental, el ruido emitido por una fuente está concentrado en una parte estrecha del espectro o la energía se centra en una frecuencia única [9].

## **1.3 Mantenimiento predictivo empleando emisión acústica**

El mantenimiento predictivo se basa en un conjunto de técnicas que permiten realizar la medición, seguimiento y monitoreo de condiciones operativas de una máquina o instalación, mediante el empleo de diferentes equipos, con el objetivo de mantener en las mejores condiciones de operación a la máquina o instalación.

### **1.3.1 Monitoreo de la condición**

Es el proceso de monitorización de parámetros físicos, asociados con la operación de la maquinaria, con el propósito de determinar la integridad de la misma. También se describe como la medición de diversos parámetros relacionados con la condición mecánica de la maquinaria (tales como la vibración, la temperatura del cojinete, presión de aceite, residuos de aceite y el rendimiento), que hace que sea posible determinar si la maquinaria esta en buena o mala condición mecánica [21].

La prevención de fallas en los equipos y minimizar los paros por reparaciones o mantenimiento son prioridades claves que se pueden reducir mediante el monitoreo de condición [1].

Las tecnologías de monitoreo de condición ampliamente utilizados son:

- Análisis de vibraciones.
- Emisión acústica.

- Medición de tensiones.
- La termografía.
- Análisis de aceite.
- Monitoreo de parámetros de proceso / rendimiento.
- Condición física de los materiales.

La tecnología de emisión acústica se puede aplicar a una amplia gama de maquinaria debido a la transmisión, por medio de la estructura, de la onda EA desde la posición del sensor a la región de interés [22]; algunos ejemplos de aplicación se detallan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Maquinaria en donde se utiliza el análisis EA. Fuente: [22]

Tipo de Máquina	Fallos						
	Rodamiento deteriorado	Roce en junta mecánica	Desgaste	Contaminación de lubricante y pérdida de lubricante	Desalineación severa	Fallos en el montaje	Monitorización de procesos incluyendo fugas, rendimiento, etc.
Bomba	X	X	X	X	X	X	X
Caja de engranajes	X		X	X	X	X	X
Motor eléctrico	X			X	X	X	
Turbina de vapor	X	X		X	X	X	X
Turbina industrial de gas	X	X		X	X	X	X
Generador eléctrico	X			X		X	
Motor diésel			X				X
Procesos de mecanizado	X		X	X			
Ventilador o soplador	X			X	X		X
Máquina rotativa de baja velocidad (típicamente <60rev/min)	X			X	X	X	X
Componentes de la máquina, por ejemplo, válvulas, intercambiadores de calor, etc.			X	X		X	X
Compresores (aire, gas, etc.)	X	X	X	X	X	X	X

### **1.3.2 Técnicas para el mantenimiento predictivo usando emisiones acústicas**

Dentro de los métodos, no destructivos, empleados para el monitoreo está el análisis acústico que se deriva de la técnica del ultrasonido, la cual se concentra en estudiar las ondas de esfuerzo a altas frecuencias (desde 30 a 800 kHz), los métodos aplicados dentro del ultrasonido son: la medición de impulsos de choque “*Shock Pulse Meter*” SPM, el análisis de ondas de tensión “(*Stress Wave Analyzer*)” SWAN y el análisis de emisiones acústicas “*Acoustic Emission Analyzer*” [23].

#### **1.3.2.1 Medición de impulsos de choque “*Shock Pulse Meter*”**

Esta técnica es usada para determinar el estado de los rodamientos dentro de una máquina, las asperezas superficiales presentes en las caras de rodadura de los elementos rodantes provocan impactos entre la pista de rodadura y el elemento rodante, esto hace que se desarrolle ondas de presión de naturaleza ultrasónica, que se transmiten por el material del rodamiento y pasan a los asientos del mismo. Se dice que la secuencia de los impulsos de choque está relacionado directamente con el estado de salud del rodamiento. La medición se realiza mediante transductores piezoeléctricos [24].

#### **1.3.2.2 Análisis de ondas de tensión “*Stress Wave Analyzer*”**

Es una técnica usada para medir fricción, choque, y la transferencia de carga dinámica entre las partes móviles de la maquinaria de rotación. Permite la detección y el análisis de sonidos de alta frecuencia que viajan a través de una estructura de la máquina. Un sensor ubicado en la carcasa de la máquina detecta las ondas de tensión transmitidas por la estructura de la máquina. El sensor de medición necesita tener un cristal piezoeléctrico que convierte la amplitud de tensión a una señal eléctrica [25].

#### **1.3.2.3 Análisis de emisión acústica “*Emission Acoustic Analyzer*”**

Es una técnica que se basa en análisis de las señales de emisión acústica generadas por la fricción existente durante el funcionamiento de los distintos componentes de una máquina.

El análisis de la señal involucra la evaluación de las características de la onda; las características evaluadas se apegan al análisis de una onda de vibración mecánica.

El análisis de emisión acústica (EA) es un método confiable para examinar el comportamiento de los materiales sometidos a deformación bajo tensión, se basa en la detección y la conversión de las ondas elásticas de alta frecuencia en señales eléctricas utilizando transductores piezoeléctricos ajustados a la superficie de la estructura y la salida de cada sensor piezoeléctrico se amplifica a través de un preamplificador de bajo ruido, la señal se filtra para eliminar cualquier ruido extraño y se procesa en un equipo electrónico adecuado [26].

### **1.3.3 Ventajas y limitaciones del análisis de señales acústicas en el mantenimiento predictivo.**

Analizar una señal captada mediante sensores acústicos, permite obtener la información necesaria para conocer el estado de un componente dentro de la máquina, sus ventajas y limitaciones están relacionadas al análisis de señales por vibración mecánica.

#### **Ventajas**

- Es un método de detección pasiva que supervisa la respuesta dinámica del sistema a la carga o el medio ambiente aplicado.
- Permite la detección de las fuentes activas y procesos de degradación cambiantes, dependiendo de las propiedades del material y la geometría de la estructura, desde varios metros de distancia.
- Permite una vigilancia global de toda la estructura y es capaz de localizar un defecto de crecimiento en la estructura bajo prueba por el uso de un número suficiente de sensores.
- Ofrece una supervisión dinámica en tiempo real de cualquier discontinuidad que crece bajo la tensión adecuada aplicada [27].
- Permite seguir la evolución en tiempo real de un defecto hasta que representa un peligro para el proceso de producción y los operarios.

- Permite programar, de forma anticipada, el suministro del repuesto y la mano de obra necesaria para reparar al componente que presente el fallo, reduciendo el tiempo de parada.
- Los sensores pueden captar fuentes de sonido en áreas que no son accesibles por otros métodos [8].

### **Limitaciones**

- La toma de señales puede resultar complicado debido a la presencia de ruido proveniente de fuentes externas al entorno donde se realiza la medición o a la ubicación de otras máquinas que estén operando dentro del mismo campo de medición acústico.
- Requiere de instrumentación costosa y personal especializado que se encargue de procesar la información de manera periódica [28].
- Debido a la sensibilidad a otras fuentes de ultrasonidos, se requiere sensores altamente especializados y procesamiento de señales que permitan aislar apropiadamente el comportamiento que se busca de la señal EA [1].
- Dificultad para la elaboración, interpretación y clasificación de la información inteligente de los datos recogidos en el monitoreo [29].

#### **1.3.4 Emisiones acústicas en máquinas rotativas**

Las emisiones acústicas son generadas por componentes de las máquinas rotativas tales como cojinetes, rodamientos, engranajes, ejes y los componentes estructurales.

En máquinas rotativas la EA es el resultado de la suma de un conjunto de ondas elásticas transitorias, producto del contacto de dos componentes que están en movimiento relativo. Impacto, fatiga cíclica, corrosión, fricción, turbulencia, pérdida de material, ruido externo, cavitación, fugas, entre otros son las fuentes más comunes que nos dan como resultado la emisión acústica [2].

## **1.4 Medición de emisiones acústicas**

De acuerdo al tipo de fuente de sonido y al medio por donde se propague la onda acústica se determinaran las diferentes tipos de sensores que en la actualidad existen para la recolección de datos.

### **1.4.1 Principio de funcionamiento de los medidores acústicos**

Existe una diversa línea de sensores de onda acústica de alta sensibilidad que se ajustan a las diferentes necesidades, varios tamaños, formas, rangos de frecuencia, temperatura y estilos de envasado se encuentran en el mercado y ayudan a satisfacer las diversas necesidades de la industria [30].

Los principios de medición de los sensores combinan fenómenos mecánicos y acústicos con la conversión electromecánica lo que permite convertir una señal acústica en una señal eléctrica [31]. De acuerdo al principio de medición los sensores pueden ser capacitivos, piezoeléctricos o electrodinámicos.

#### **1.4.1.1 Sensores acústicos capacitivos**

Consta de una carcasa que en su parte interna está formado por una membrana muy fina llamada diafragma, sensible a las variaciones de presión sonora, y por otra placa posterior fija y paralela al diafragma como se observa en la Figura 1.7.

La distancia entre el diafragma y la placa posterior forma un condensador con una capacidad que varía al variar la posición del diafragma. La Ecuación 1.16 muestra la relación entre las variables eléctricas que crean ese principio físico, en el cual se describe que la polarización del condensador se realiza a un nivel fijo de corriente continua ( $q$ ) por medio de un circuito con alta constante de tiempo, la variación de la capacidad ( $C$ ) cambia la tensión ( $V$ ) en sus terminales [31] [32].

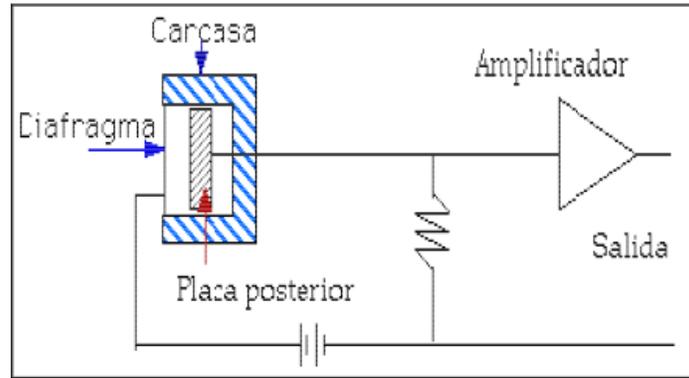


Figura 1.7: Esquema del principio de funcionamiento de un sensor capacitivo. Fuente: [31]

La ecuación fundamental de un condensador es:

$$V = \frac{q}{C} \quad (\text{Ecuación 1.16})$$

#### 1.4.1.2 Sensores acústicos piezoeléctricos

Este tipo de sensores constan en su parte interior con un diafragma y un cristal piezoeléctrico, la presión del aire ejerce una fuerza en el diafragma y esta fuerza se transmite hacia el cristal piezoeléctrico, los cristales utilizados son el cuarzo y la turmalina; Este tipo de sensores son los más empleados para medir señales de vibración, ruido y emisiones acústicas o ultrasonido.

El efecto piezoeléctrico es propio de los cristales de cuarzo, como se observa en la Figura 1.8, en el que una carga ( $q$ ) es producida a través del cristal cuando a este se le aplica una fuerza [2]. En la Ecuación 1.17 se muestra la relación entre las variables eléctricas que se crean en este principio físico.

$$q = S * F \quad (\text{Ecuación 1.17})$$

Dónde:

S = factor de sensibilidad.

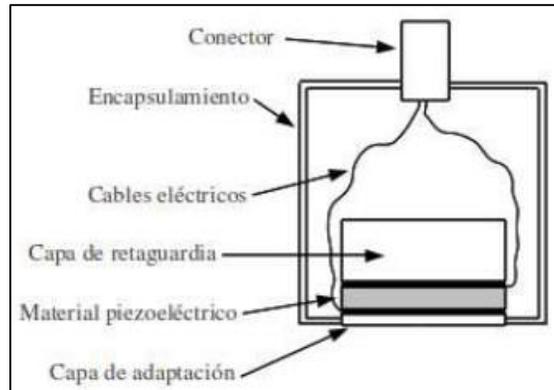


Figura 1.8: Esquema del principio de funcionamiento de un sensor piezoeléctrico. Fuente: [33]

### 1.4.1.3 Sensores acústicos electrodinámicos

Mediante la velocidad con el que la presión sonora se comunica al diafragma se produce una fuerza electromotriz en la bobina móvil que se encuentra inmerso en un campo magnético. La Figura 1.9 muestra el efecto electrodinámico.

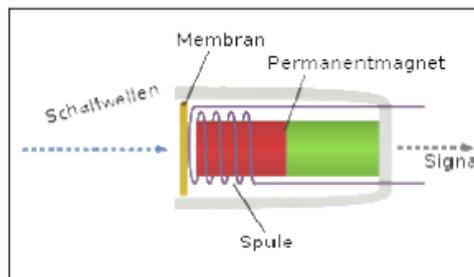


Figura 1.9: Esquema del principio de funcionamiento de un sensor electrodinámico. Fuente: [31]

### 1.4.2 Sensores de Emisión Acústica

En el campo acústico se encuentra dos tipos de sensores que permiten la recolección de las señales; el micrófono (transductor sin contacto) y el sensor acústico (transductor de contacto) sirven para la detección de las ondas acústicas, utilizan los mismos principios de funcionamiento.

### 1.4.2.1 Sensor acústico o transductor de contacto

Como se observa en la Figura 1.10, el sensor acústico de contacto es un transductor de ondas longitudinal destinada para su uso en contacto directo con una pieza de ensayo, los sensores de contacto utilizan el principio piezoeléctrico.



Figura 1.10: Transductor de contacto. Fuente: [34]

### 1.4.2.2 Micrófono o transductor sin contacto

Es un transductor electroacústico que permite convertir las vibraciones producidas por las ondas sonoras, debidas a la presión acústica ejercida sobre su cápsula, en energía eléctrica y permite grabar sonidos de cualquier lugar o elemento [35]. La Figura 1.11 muestra el micrófono utilizado en la toma de señales acústicas en este proyecto.



Figura 1.11: Micrófono.

Para la recolección de datos mediante transductores de contacto o micrófono se requiere de módulos diseñados especialmente para cada tipo de transductor, en los elementos comunes de los módulos se tiene un amplificador, filtro, sumador y convertidores ADC.

### 1.4.2.3 Módulo para sensor acústico

El sensor acústico entrega una variación de tensión según el cambio de presión captado por la membrana [2]. La Figura 1.12 muestra las etapas necesarias para la adquisición de las señales de emisión acústica.

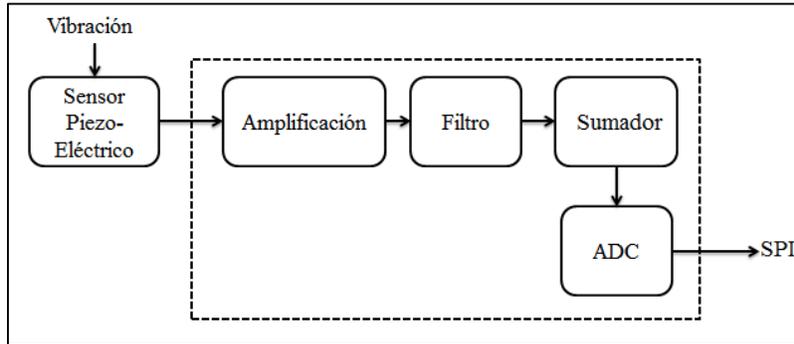


Figura 1.12: Módulo de emisión acústica. Fuente: [2]

Los sensores acústicos trabajan apegados a los componentes emisores de ondas acústicas, su montaje requiere de adhesivos especiales que mantengan al sensor en su posición correcta y toma la señal de manera directa desde la estructura [2].

### 1.4.2.4 Módulo para micrófono

El micrófono entrega como dato la variación de tensión según la variación de presión que capta la membrana. El micrófono recoge señales que se mueven a través del aire, se requiere ubicar al micrófono en una posición específica que recepte las señales de forma directa desde la fuente emisora. La Figura 1.13 muestra las etapas necesarias para la adquisición de datos mediante micrófono.

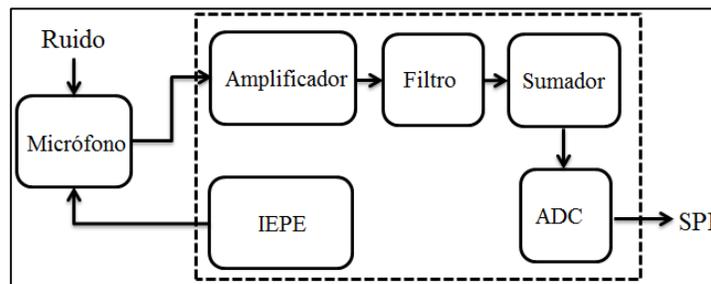


Figura 1.13: Módulo de emisión acústica. Fuente: [2]

Los componentes que conforman los módulos para levantar los datos de señales acústicas son necesarios para garantizar las señales de ingreso en Sistemas de Procesamiento Inteligentes (SPI).

### **Amplificador**

Es un dispositivo utilizado para incrementar la señal que ingresa desde el sensor acústico o micrófono obteniendo la señal aumentada a la salida, su función es incrementar la intensidad de corriente, la tensión o la potencia de la señal de entrada.

### **Filtro**

El filtrado se utiliza para eliminar las componentes de frecuencia que no coinciden con el rango espectral del sensor utilizado, con esto se logra eliminar ruidos electromagnéticos generados por fuentes que no son parte de la máquina rotativa [2].

### **Sumador**

Es un circuito lógico que realiza la suma aritmética de las señales analógicas o digitales.

### **Conversor ADC**

Son componentes electrónicos diseñados para convertir señales analógicas en señales digitales [2].

### **Piezoeléctricos electrónicos integrados “*Integrated Electronic Piezoelectric*” (IEPE)**

Son una clase de sensores piezoeléctricos que incorporan un amplificador electrónico y utilizar un solo conector coaxial de dos polos para la entrada de alimentación y salida de señal. Los micrófonos y otros sensores de vibración son construidos con una interfaz compatible con IEPE [36].

#### **1.4.2.5 El campo de medición para micrófono**

El campo de sonido influye en la presión sonora que se mide. Se obtiene la precisión más alta cuando se apunta el micrófono directamente a la fuente [37].

Existen 3 tipos de micrófonos diseñados según el tipo de campo a medir entre ellos están:

- Micrófono de campo libre.- Utilizado en áreas donde no están presentes ondas sonoras reflejadas.
- Micrófono de incidencia aleatoria.- Utilizado para mediciones en un campo difuso.
- Micrófono de presión.- Utilizado para medir la presión de sonido en el lado de una cavidad.

El equipo utilizado de forma general en las industrias para la medición de la presión sonora es el sonómetro.

### 1.4.3 El Sonómetro

Es un equipo básico para mediciones directas del nivel de presión del sonido, cuando no es necesario conocer el espectro de frecuencias. Este equipo se pueden utilizar fácilmente en sitios donde está presente un problema de ruido [37], por ejemplo: una fábrica.

Como se observa en la Figura 1.14, el equipo consta de: micrófono, preamplificador, redes de ponderación, amplificador, rectificador de RMS y medidor que muestra el nivel de sonido en dB.

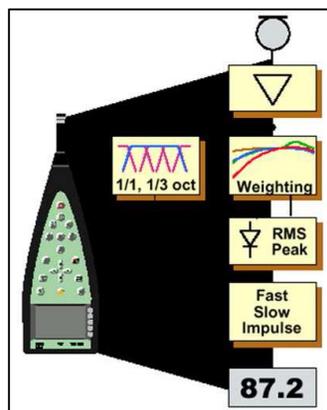


Figura 1.14: Sonómetro. Fuente: [37]

De acuerdo con su exactitud, existen tres tipos de medidores de nivel de sonido especificados por ANSI “*American National Standards Institute*” y IEC “*International Electrotechnical Commission*”.

Tipo 0: Dispositivos de precisión para uso en laboratorio.

Tipo 1: Dispositivos de precisión.

Tipo 2: Dispositivos para uso general.

Tipo 3: Dispositivos de inspección.

Para un laboratorio se tiene un dispositivo de Tipo 0. La precisión exacta de la medición de nivel de sonido es, por supuesto, depende de varios factores, un dispositivo tipo de 1 tiene un error inferior a 1 dB, un tipo 2 tiene error inferior a 2 dB [37].

## **1.5 Análisis acústico**

El análisis acústico lleva consigo el procesamiento de la señal, esta puede realizarse en el dominio del tiempo, dominio de la frecuencia y dominio de tiempo-frecuencia. Las técnicas en el dominio de tiempo y la frecuencia se componen de la forma de onda y el análisis estadístico respectivamente.

### **1.5.1 Adquisición de datos en máquinas rotativas**

Una parte fundamental en el análisis acústico es una correcta adquisición de datos de forma segura, que será hecha por el recolector y analizador que toma muestras a tiempo real durante un intervalo dado, los datos son registrados en un ordenador o en la pantalla del instrumento utilizado.

#### **1.5.1.1 Análisis en el dominio de tiempo de las señales acústicas**

La señal en el dominio de tiempo es compleja, esta señal representa de forma visual el valor instantáneo del movimiento y es el producto de la suma de todos los componentes de frecuencia individuales que están presentes.

Para el diagnóstico de errores con la señal en el dominio del tiempo, los métodos estadísticos se aplican invariablemente. Los parámetros estadísticos más comunes son: la raíz cuadrada media (RMS), el factor de cresta (CF), el valor pico (PK), asimetría (SK) y kurtosis (KT). Actualmente aparecen parámetros que se hacen muy populares como el espectro de la entropía (EN) y la función de densidad de probabilidad (PDF) [38].

### **1.5.1.2 Análisis en el dominio de la frecuencia de las señales acústicas**

El espectro es un gráfico de amplitud de la señal como función de la frecuencia. Una máquina genera vibración tanto por los componentes individuales, por su montaje y la instalación.

Cada componente de una máquina genera frecuencias específicas identificables, por tanto un espectro de frecuencia dado se puede atribuir directamente a uno de los componentes de la máquina. Análisis de espectro es el resultado de tomar la transformada de Fourier de un espectro de potencia en dB. El espectro es utilizado a menudo para detectar armónicos [38].

Como indican los módulos para la adquisición de la señal acústica, existe un procesamiento de la señal antes de ser almacenada en el ordenador. Lo más común es la descomposición espectral basada en el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier, “*Fast Fourier Transform*” (FFT).

#### **1.5.1.2.1 La transformada rápida de Fourier “*Fast Fourier Transform*” (FFT)**

La FFT es un algoritmo de computadora que calcula la Transformada Discreta de Fourier (TDF) de manera rápida y eficaz, permitiendo adaptar la TDF para el uso con computadoras digitales. La cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo condicionan el rango de frecuencias.

El rango de frecuencias que cubre la FFT va a depender de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo [39].

El uso de la FFT permite el procesamiento de una señal en forma digital, que dentro del campo investigativo conlleva a reconocer y clasificar patrones en las señales acústicas.

### **1.5.2 Procesamiento digital de señales acústicas**

El procesamiento digital está dividido en 4 etapas.

**Espacio de representación.-** Es el espacio transformado desde el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia en donde se puede observar cómo influye un determinado fallo debido a que genera una componente individual ligada a una amplitud específica.

**Estimación de características.-** Es el cálculo de las características que permitan diferenciar los posibles fallos que se presentan en la máquina, facilitando el proceso de clasificación; se obtiene un conjunto de características que ayudan a la interpretación de señales y mejoran el rendimiento de clasificación, de esta manera se reducen la dimensión del espacio de características y el costo computacional.

**Extracción de características relevantes.-** Es el complemento a la estimación de características, a través de un análisis estadístico se reduce el conjunto de características sin perder precisión y se optimiza el proceso de clasificación en tiempo, llegando a eliminar todas aquellas características que no aportan información o que dan información repetitiva.

**Clasificación de señales.-** Mediante un índice de rendimiento se determina la capacidad de generalización y la efectividad para discriminar tipos de fallos, tomando como base un pequeño conjunto de características que contenga la mayor cantidad de información del proceso [40].

## **1.6 Termografía.**

La termografía infrarroja se define como la técnica de producir una imagen de luz infrarrojo invisible para la visión del ser humano y permite detectar con precisión un cambio de temperatura en un elemento, basado en la medición de los niveles de radiación del espectro infrarrojo.

### **1.6.1 Principios básicos en el estudio de termografía**

#### **1.6.1.1 Calor**

Es la forma de energía que se produce con el movimiento cinético de las moléculas de un cuerpo, también se define como el intercambio de energía que se produce en cualquier proceso en donde el sistema no es aislado. El calor se expresa en calorías (cal).

### 1.6.1.2 Transferencia de calor

Es el flujo de energía desde un cuerpo con temperatura alta hacia un cuerpo con menor temperatura y se puede dar a través de un medio (conducción), entre una superficie y un fluido (convección) y por emisión de energía desde el propio cuerpo (radiación).

Para el estudio termográfico nos centramos en la transferencia de calor por radiación.

### 1.6.1.3 Radiación

*“La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita”* [41]. El transporte de energía se genera mediante las ondas electromagnéticas.

### 1.6.1.4 Radiación Infrarroja

Infra quiere decir abajo, por lo tanto infrarrojo es el nivel de energía de la luz bajo la luz roja; la luz roja está dentro del nivel máximo visible para el ser humano.

La radiación infrarroja cubre tres bandas de longitudes de ondas diferentes que se las categorizan en clase A, B y C, las cuales se las presenta en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2: Tipos de radiación infrarroja. Fuente [42]

<b>Tipo de radiación</b>	<b>Tipo de onda</b>	<b>Rango de longitud de onda</b>
IR-A	Onda corta	760 nm – 2000 nm
IR-B	Onda media	2000 nm – 4000 nm
IRC	Onda larga	4000 nm – 10000 nm

## 1.6.2 Espectro electromagnético

En el espectro electromagnético mostrado en la Figura 1.15 se presenta todas las ondas electromagnéticas dispuestas en función de la frecuencia y la longitud de onda, el espectro de longitud de onda de los rangos de la luz infrarroja va aproximadamente desde 1 mm hacia abajo hasta aproximadamente 760 nm.

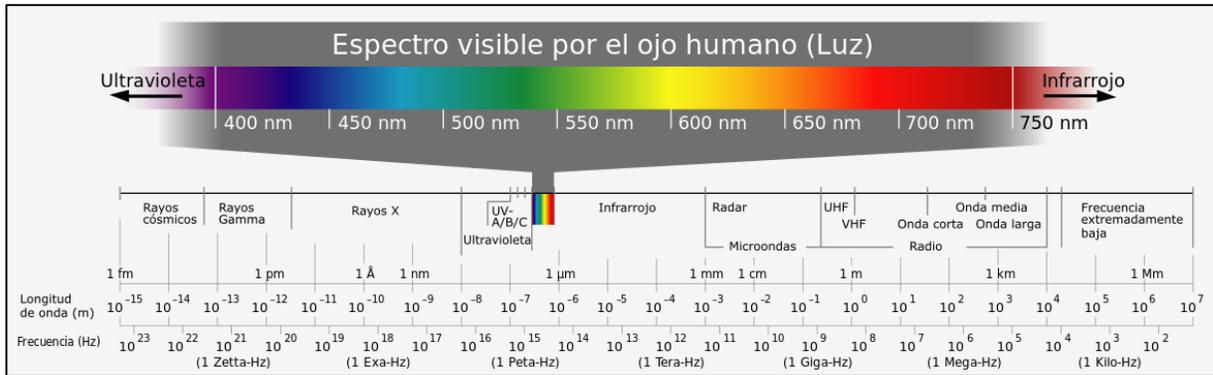


Figura 1.15: Longitud de onda electromagnética. Fuente: [43]

El ser humano sólo pueden ver la luz en el espectro visible, mostrado en la Figura 1.15, a longitudes de onda que varían desde aproximadamente 400 nm hasta aproximadamente 760 nm.

La velocidad ( $c$ ) de propagación de la radiación se presenta en la Ecuación 1.18, que relaciona la longitud de la onda ( $\lambda$ ) y la frecuencia ( $f$ ).

$$c = \lambda * f \quad (\text{Ecuación 1.18})$$

Para un medio en vacío la velocidad de la luz es 299.792.458 m/s.

De acuerdo con la teoría cuántica, la energía se irradia y absorbe en elementos discretos de energía (llamado cuantos de luz o fotones de energía), que son proporcionales a la frecuencia, y se la calcula mediante la Ecuación 1.19.

$$E_{rad} = h * f \quad (\text{Ecuación 1.19})$$

Donde:

$E_{rad}$  = energía de radiación.

$h$  = constante de Planck ( $h = 6.6256 * 10^{-34} J.s$ ).

$f$  = frecuencia.

### 1.6.2.1 Ley fundamental de la radiación

En la actualidad la rama de la ciencia que estudia radiación se fundamenta en cuatro leyes básicas: ley de Planck, ley de desplazamiento de Wien, ley de Stefan-Boltzmann y ley de Kirchhoff.

La termografía aprovecha la radiación que emite una superficie de un cuerpo, y se la establece mediante la ley de Stefan-Boltzmann descrita en la Ecuación 1.20.

$$E_{emitida} = \varepsilon * A * T^4 \quad (\text{Ecuación 1.20})$$

Donde:

$E_{emitida}$  = energía radiante emitida por un cuerpo.

$\varepsilon$  = emisividad.

$A$  = constante de Stefan-Boltzmann  $A = 5,7 * 10^8 [W \frac{m^2}{K^4}]$ .

$T$  = temperatura absoluta del cuerpo [K].

### 1.6.2.2 Formas en las que se presenta la radiación

Todo objeto con temperatura superior al cero absoluto (0 Kelvin) emite radiación electromagnética en forma de rayos que entran en la porción infrarroja del espectro electromagnético, la energía radiada sólo puede ser captada por un detector de infrarrojos que depende del coeficiente de emisividad de la superficie que se mide [44] [45].

Dentro de la cámara termográfica se registra la radiación de onda larga (emitida, reflejada y transmitida) resultante de los cuerpos que se encuentran dentro del campo visible para la cámara [46].

La cámara termográfica toma como señal de entrada la radiación infrarroja y genera una imagen de un espectro de colores, cada uno de los colores indica una temperatura distinta, la temperatura más elevada aparece en color blanco.

### 1.6.3 Emisividad

La emisividad es la proporción de radiación térmica infrarroja emitida por una superficie y la energía irradiada debido a la diferencia de temperatura con el entorno.

A mayor temperatura que se encuentre un objeto, mayor es la emisión de energía infrarroja del mismo. La emisividad va desde 0 (reflector perfecto) hasta 1 (emisor perfecto). Un valor de emisividad cercano a 0 significa que la superficie es mejor aislante por reflexión [47].

#### 1.6.3.1 Coeficiente de emisividad ( $\epsilon$ )

El coeficiente de emisividad relaciona la radiación de energía térmica de un objeto real con la radiación si éste fuera un cuerpo negro, su resultado es un número adimensional y se calcula mediante la Ecuación 1.21.

$$\epsilon = \frac{\text{radiación emitida por una superficie}}{\text{radiación emitida si fuera un cuerpo negro}} \quad (\text{Ecuación 1.21})$$

#### 1.6.3.2 Cuerpo negro

Es un objeto considerado ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él, la radiación incidente no se refleja o pasa a través del cuerpo negro. Es un sistema físico idealizado utilizado para el estudio de la emisión de radiación electromagnética.

Un cuerpo negro es un cuerpo que recibe radiación a temperatura de cero absoluto y tiene un coeficiente  $\epsilon = 1$

### 1.6.4 La termografía infrarroja

Es un ensayo no destructivo que proporciona, a distancia y sin ningún contacto una imagen térmica de un objeto cualesquiera, en la imagen se visualiza las distintas temperaturas a la que se encuentra las superficies de los componentes de la máquina. La distribución anormal de la temperatura captada en la imagen se relaciona a un fallo existente dentro de la máquina [48].

Esta técnica permite diagnosticar cualquier tipo de origen de calentamiento dentro del mantenimiento eléctrico, de edificios, de hornos o calderas, de fricción mecánica, de flujo de fluido, entre otros.

Una máquina en funcionamiento emite energía desde su superficie, la energía viaja en forma de ondas electromagnéticas a la velocidad de la luz; esta energía es directamente proporcional a la temperatura en la superficie, lo que significa que a mayor calor, mayor cantidad de energía emitida. Estas ondas están en el espectro infrarrojo, por ello es necesario utilizar instrumentos que transforme esta energía en un espectro visible para poder observar y analizar su distribución [49].

### **1.6.5 Inspección termográfica**

La inspección termográfica permite evaluar, mediante imágenes infrarrojas, la condición de una máquina o una línea de proceso cuando está en operación, permitiendo encontrar fallos en sus componentes. La inspección termográfica es aplicable en la industria, la medicina y la industria aeroespacial para revelar fallos de funcionamiento, fugas, pérdidas de materiales, exfoliación, contaminación, fricción, dolor, tumores, entre otros.

La inspección térmica puede ser realizada mediante imagen radiométrica y la imagen térmica o firmas térmicas.

#### **1.6.5.1 Imagen radiométrica**

Las imágenes radiométricas se utilizan como sensores de temperatura sin contacto. El objetivo de la proyección de imagen es para monitorear, chequear, o comparar las temperaturas de superficie de un objeto o de las diferencias de temperatura, permitiendo conocer con precisión la temperatura absoluta [50].

#### **1.6.5.2 Imagen térmica**

Permiten conocer con precisión las temperaturas relativas, sin tener en cuenta los parámetros necesarios para lograr temperaturas absolutas precisas.

Es importante tener en cuenta que la contaminación de una superficie produce una alteración en la emisividad superficial del material, con lo que se puede obtener resultados incorrectos.

Las diferencias en la emisividad superficial del objeto reflejado se pueden determinar sólo si los niveles de energía de objeto y el fondo son diferentes y la radiación de fondo es uniforme [50].

### **1.7 Mantenimiento predictivo empleando termografía infrarroja**

Dentro del mantenimiento predictivo, la termografía infrarroja ha pasado a ser una de las técnicas más utilizadas por parte de las empresas, siendo las aplicaciones comunes el supervisar sistemas de distribución de energía eléctrica y la infraestructura, sin embargo cualquier fenómeno que presente un impacto en el flujo de calor es probable que sea detectable, por lo tanto se pueden obtener imágenes infrarrojas.

#### **1.7.1 Ventajas y limitaciones del análisis termográfico infrarrojo en el mantenimiento**

Las ventajas que nos proporciona la termografía dentro del mantenimiento son:

- La tasa de inspección es rápida, se realiza sin detener los procesos productivos, a distancia, sin contacto físico, no necesita acoplamiento de montaje, con lo que se considera de baja peligrosidad para la persona que realiza la inspección.
- Permite detectar de manera precisa los puntos deficientes en una línea de proceso y localizar un elemento defectuoso.
- Es aplicable a todos los campos donde exista irradiación térmica, con un seguimiento del defecto en tiempo real.
- Muestra la gravedad del defecto lo que permite programar las necesidades de mantenimiento en el momento más oportuno.
- Los resultados son relativamente fáciles de interpretar debido a que se han obtenido en formatos de imagen o de vídeo con lo cual se facilita informes precisos al personal de mantenimiento [51].

- Las aplicaciones son variadas y numerosas.
- Es una herramienta única de inspección para algunas tareas de control.

Entre las limitaciones del uso de la termografía en el mantenimiento predictivo, se tiene:

- Capacidad limitada para la identificación de defectos internos en la medida que el defecto no se manifieste externamente por incremento de la temperatura.
- Los reflejos solares pueden enmascarar o confundir defectos.
- El estado de carga del elemento bajo análisis puede influir en la determinación de las anomalías [52].
- El calentamiento no uniforme de la superficie dificulta la estimulación en superficies grandes de manera rápida y uniforme.
- Las pérdidas térmicas, convección y radiación de calor podrían inducir contrastes no esenciales que afectan a la fiabilidad de la interpretación.
- El alto costo de la cámara de infrarrojos, y las unidades de estimulación térmica para la termografía activa.
- Capacidad para detectar solamente los defectos que ocasionen un cambio medible de la propiedad térmica de la superficie inspeccionada.
- Capacidad de inspeccionar un espesor limitado de material bajo la superficie.
- Variaciones de emisividad debido a materiales de baja emisividad o superficie con pintura [51].

### **1.7.2 Termografía infrarroja en máquinas rotativas**

Basando en la medición de energía irradiada y longitudes de onda de infrarrojos, a través de una cámara térmica, la imagen térmica se aplica actualmente para el monitoreo de condiciones de la máquina y el campo del diagnóstico.

El monitoreo de la condición para el diagnóstico de fallos en una máquina rotativa requiere de técnicas de procesamiento de señales que se apliquen al procesamiento de los datos adquiridos de las imágenes infrarrojas.

Para el procesamiento de señales unidimensionales se utiliza la técnica de la transformada rápida de Fourier (FFT), que también puede ser empleada como una herramienta de

procesamiento de señales de imágenes en dos dimensiones (2D). Aunque en la actualidad la transformada wavelet discreta 2D (2D-DWT) sobresale en el campo de procesamiento de imágenes. La enorme dimensión de datos resultantes de la descomposición de la imagen dificulta el almacenamiento y el procesamiento de los mismos, por lo que es necesario un proceso de extracción de la información útil preservando tanto como sea posible los rasgos característicos que indican las condiciones y los fallos de la máquina [53].

### 1.7.3 Tipos de cámaras termográficas infrarrojo

Las principales cámaras de infrarrojos utilizados para la termografía infrarroja se pueden clasificar de acuerdo con el espectro infrarrojo en el que operan:

#### 1.7.3.1 Infrarrojo de media onda “*Mid-Wave Infrared*” (MWIR)

Cámara generalmente rápida ( $>100$  Hz para una matriz detectable de  $640 \times 512$ ), muy sensible (NEDT - ruido diferencial de temperatura equivalente bajo como de 15 mK) usan como material detector indio o antimonio y posee conjuntos de plano focal, lo que requiere enfriamiento criogénico (aprox. 77 K, utilizando nitrógeno líquido o motores Stirling) [51].

#### 1.7.3.2 Infrarroja de onda larga “*Large-Wave Infrared*” (LWIR)

Micro-bolómetros generalmente más lenta ( $< 60$  Hz para una matriz de detectores  $512 \times 640$ ) y menos sensible que las cámaras MWIR (NEDT  $> 60$  mK) pero no requieren enfriamiento criogénico [51]. La Figura 1.16 muestra como está formado el detector del micro-bolómetro.

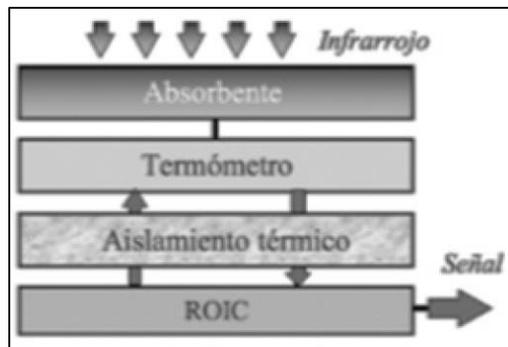


Figura 1.16: Detector térmico no refrigerado. Fuente: [54]

La cámara de infrarrojo utiliza el sistema de captura de imagen mediante la matriz de plano focal “*Focal Plane Array*” (FPA).

Elegir un sistema de imagen para una aplicación en particular depende de variables como las temperaturas de las muestras a medir, la exactitud en la medida, la facilidad de uso, y la longitud de onda apropiada para la aplicación [50].

### 1.7.3.3 Matriz de plano focal “*Focal Plane Array*” (FPA)

Son los tipos más comunes de los sistemas actuales. En un FPA, cada pixel que compone una imagen de infrarrojo se mide con un detector individual teniendo detectores dispuestos en un plano en la matriz bidimensional o en una matriz unidimensional que proporciona imágenes de línea [50], como se observa en la Figura 1.17.

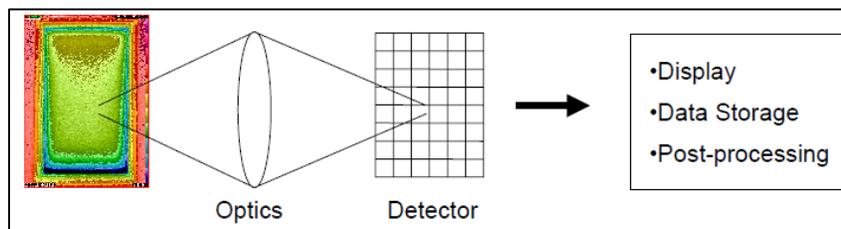


Figura 1.17: Detector matriz de plano focal. Fuente: [50]

**Pixel** es la más pequeña unidad homogénea en color que compone una imagen digital, sea ésta una fotografía, un fotograma de video o un gráfico [55].

### 1.7.4 Cámara termográfica

La cámara termográfica permite ver la cantidad de energía a partir de la radiación infrarroja en imágenes visibles para el ojo humano. La imagen digital termográfica producida por una cámara infrarroja es llamada termografía o termograma.

El núcleo de la cámara es el detector de infrarrojos el cual absorbe la energía infrarroja emitida por el objeto y la convierte en voltaje eléctrico o corriente.

En la termografía cada píxel está presente con un valor específico de temperatura, y el contraste de la imagen es producto de las diferencias en la temperatura de la superficie del

objeto, el análisis termográfico infrarrojo ofrece una señal en dos dimensiones y se puede analizar un punto caliente específico o pequeñas zonas [56].

La Figura 1.18 muestra el proceso de captación de imágenes térmicas infrarrojas que realiza la cámara termográfica.

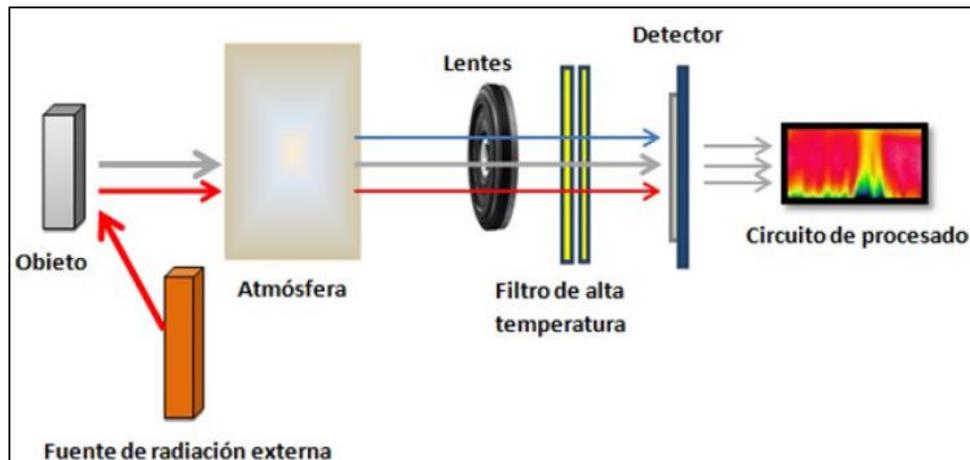


Figura 1.18: Captación de imágenes térmicas infrarrojas. Fuente: [46]

### 1.7.5 Características de una cámara termográfica.

Las principales características a tener presente en una cámara termográfica son los siguientes:

- La resolución o número de puntos de medida (pixel).
- El tamaño de la pantalla de la cámara.
- El rango de temperaturas que la cámara es capaz de medir.
- La distancia que debe existir entre la cámara y la máquina a ser medida.
- La duración de la batería, esto permite realizar varias mediciones en una sola sesión.
- El software que acompaña a la cámara.
- La capacidad de almacenamiento de información [57].

## 1.8 Análisis de imágenes termográfica infrarrojo

Al análisis de una imagen termográfica infrarrojo permite evaluar estadísticamente el funcionamiento de un elemento dentro de una máquina o la evolución de un fallo.

En la Figura 1.19 se muestra el proceso de evaluación, el cual involucra desde la adquisición y visualización de los datos, el pre-procesamiento, el procesamiento, extracción de características y el análisis, cada uno de estos representa una etapa.

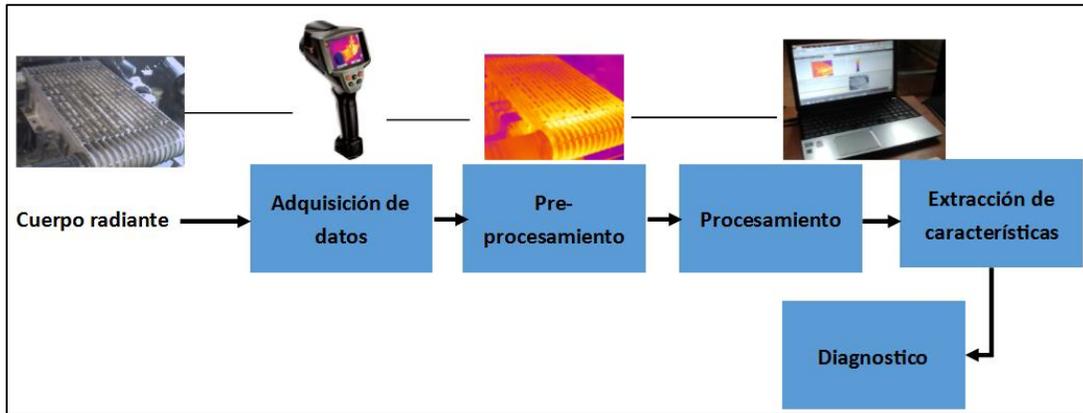


Figura 1.19: Sistema de diagnóstico de fallos por termografía infrarroja.

### 1.8.1 Adquisición y visualización de imágenes

Se captura una imagen o una secuencia de imágenes desde una cámara y se almacena en una memoria de almacenamiento a través de una tarjeta de adquisición, logrando una manipulación básica de la imagen [58].

### 1.8.2 Pre-procesamiento

Permite eliminar el efecto vignetting, el ruido y corregir los pixeles defectuosos a través de técnicas de filtrado de la imagen, cuyos parámetros pueden ser modificados [58].

El efecto vignetting es la reducción del brillo o la saturación en la periferia con respecto al centro de una imagen [59].

### 1.8.3 Procesamiento

El procesamiento incluye técnicas de mejoramiento térmico de contraste, contraste absoluto diferencial, permite hacer operaciones lógicas y aritméticas entre imágenes y se puede modificar el color de una imagen o de una secuencia de imágenes a través de una función de pseudo-color [58].

La transformada rápida de Fourier y transformada discreta Wavelet son algoritmos de computadora que permiten procesar la información a partir de la imagen termográfica [58].

Uno de los métodos más utilizados para mejorar la imagen está basado en la descomposición de modo empírico bidimensional; la idea central de la descomposición de modo empírico bidimensional “*Bidimensional Empirical Mode Descompositition*” (BEMD) es el proceso de tamizado para descomponer cualquier imagen dada en las componentes de frecuencia de la señal [60].

#### **1.8.4 Extracción de características en imágenes térmicas**

La extracción de características se realiza mediante el análisis de componentes principales “*Principal Component Analysis*” PCA y el análisis de componentes independientes “*Independent Component Analysis*” ICA.

Tiene como objetivo encontrar una forma sencilla y eficaz de transformar las señales originales en un conjunto de características útiles de la imagen; las características de una imagen termográfica consisten de histograma, espectral, textura y color. El histograma presenta características estadísticas que representan la distribución del nivel de gris de intensidad de la imagen. Funciones de histograma constan de media, desviación estándar, asimetría, la energía, la entropía, y la curtosis [60].

#### **1.8.5 Diagnóstico mediante imágenes térmicas**

“*Diagnóstico es el estudio de los síntomas y síndromes para determinar la naturaleza de los fallos o fracasos de los objetos técnicos*” [61].

- Un síntoma es una percepción, hecha por medio de observaciones y medidas humanas, que pueden indicar la presencia de una condición anormal con una cierta probabilidad.
- Un síndrome es un conjunto de síntomas que colectivamente indican o caracterizan a una condición anormal.

El diagnóstico de la imagen incluye la evaluación mediante algoritmos de clasificación como las máquinas de soporte vectorial (SVMs), fuzzy k-vecino más cercano (FkNN), resonancia adaptativa red neuronal teoría-Kohonen ART-KNN) y Parzen red neuronal probabilística (PPNN) [62].

# CAPÍTULO 2

## **2 CONFIGURACIÓN Y BASE DE DATOS DE LOS SISTEMAS MECÁNICOS ROTATIVOS**

En este capítulo se presenta un resumen de los indicadores de condiciones más utilizados para analizar las señales de emisión acústica y las imágenes térmicas infrarrojas; también se presenta la configuración del sistema mecánico rotativo, se establece el protocolo para la designación de las pruebas de fallos combinados y se establece las bases de datos realizadas en este proyecto.

Sistema mecánico rotativo son máquinas que tiene en común el transformar un determinado tipo de energía (eólica, hidráulica, eléctrica, química, entre otros) en energía de tipo mecánico que aparece en forma de movimiento giratorio en un eje.

### **2.1 Indicadores de condición para señales acústicas e imágenes termográficas**

Indicador de condición “*Condition Indicator*” (CI) representa un valor estadístico de la forma de la onda o del espectro. Para señales acústicas se evalúan en el dominio del tiempo y el dominio de la frecuencia.

Los indicadores de condición son parámetros que permiten cuantificar la condición de los componentes de una máquina, lo que resulta en una evaluación del funcionamiento permitiendo el monitoreo de la condición de una máquina o equipo.

#### **2.1.1 Monitoreo de la condición**

Es la ciencia y tecnología que se encarga de la evaluación del funcionamiento de una máquina y/o su condición, mediante la detección y recopilación de información y datos que indican el estado actual, y la predicción de posibles fallos utilizando técnicas y modelos matemáticos que determinan su comportamiento en tiempo real [63][64][65][66].

El monitoreo y las principales técnicas utilizadas en el monitoreo de la condición se presentan en [63] y se resumen a continuación.

El monitoreo de la condición es un proceso que se fundamenta en:

- Toma de datos de manera periódica, continua o semi-continua.
- Aplicación de técnicas de diagnóstico adecuadas a la técnica utilizada.
- Análisis y validación de los datos recolectados.
- Elaboración de resultados con acciones recomendadas que incrementen la confiabilidad de la máquina.

Las principales técnicas disponibles en la actualidad para el monitoreo de la condición de máquinas y equipos son:

- Análisis de vibraciones.
- Gestión de lubricación.
- Emisión acústica.
- Termografía infrarroja.
- Medición ultrasónica del flujo de fluidos.
- Variables de proceso.
- Medición y análisis de niveles de sonido.
- Monitoreo eléctrico de máquina dinámico y estático.

La investigación se centra en identificar los indicadores de condición utilizados en la emisión acústica y la termografía infrarroja.

### **2.1.2 Normas para el monitoreo de condición mediante emisiones acústica**

Las normas de monitoreo de la condición de máquina se presenta en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1: Normas técnicas usadas en el monitoreo de condición de máquinas con emisión acústica.

<b>Norma</b>	<b>Nombre</b>
ISO 22096: 2007	Monitorización de estado y diagnóstico de máquinas - Emisión Acústica – <i>“Condition monitoring and diagnostics of machines -- Acoustic emission”</i>
ISO / TR 13115: 2011	Ensayos no destructivos - Métodos para la calibración absoluta de transductores de emisión acústica por la técnica de la reciprocidad – <i>“Non-destructive testing -- Methods for absolute calibration of acoustic emission transducers by the reciprocity technique”</i>
ISO 18436-6: 2014	Monitorización de estado y diagnóstico de máquinas - Requisitos para la calificación y evaluación de personal - Parte 6: Emisión Acústica – <i>“Condition monitoring and diagnostics of machines -- Requirements for qualification and assessment of personnel -- Part 6: Acoustic emission”</i>
ISO 13347-3: 2004	Ventiladores industriales - Determinación de los niveles de potencia sonora del ventilador en condiciones estandarizadas de laboratorio - Parte 3: Métodos de superficie envolvente – <i>“Industrial fans -- Determination of fan sound power levels under standardized laboratory conditions -- Part 3: Enveloping surface methods”</i>
ISO / TR 25107: 2006	Ensayos no destructivos - Directrices para los programas de formación de Ensayos No Destructivos – <i>“Non-destructive testing -- Guidelines for NDT training syllabuses”</i>
ISO 3744: 2010	Acústica - Determinación de los niveles de potencia de sonido y los niveles de energía acústica de fuentes de ruido utilizando presión sonora - Métodos de ingeniería para condiciones de campo libre sobre un plano reflectante – <i>“Acoustics -- Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure -- Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane”</i>
ISO 3745: 2012	Acústica - Determinación de los niveles de potencia sonora de fuentes y niveles de energía acústica de fuentes de ruido utilizando presión sonora - Métodos de precisión para salas anecoicas y habitaciones semi-anecoicas – <i>“Acoustics -- Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure -- Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms”</i>
ISO 11204: 2010	Acústica - Ruido emitido por máquinas y equipos - Determinación de los niveles de presión acústica de emisión en el puesto de trabajo y en otras posiciones especificadas aplicando correcciones ambientales exactas – <i>“Acoustics -- Noise emitted by machinery and equipment -- Determination of emission sound pressure levels at a work station and at other specified positions applying accurate environmental corrections”</i>
ISO 12714: 1999	Ensayos no destructivos - inspección de emisiones acústicas - calibración secundaria de sensores de emisión acústica – <i>“Non-destructive testing -- Acoustic emission inspection -- Secondary calibration of acoustic emission sensors”</i>

ISO 12713: 1998	Ensayos no destructivos - inspección de emisiones acústicas - Calibración primaria de transductores – <i>“Non-destructive testing -- Acoustic emission inspection -- Primary calibration of transducers”</i>
ISO 12716: 2001	Ensayos no destructivos - inspección de emisiones acústicas – Vocabulario – <i>“Non-destructive testing -- Acoustic emission inspection -- Vocabulary”</i>

### 2.1.3 Normas para el monitoreo de condición mediante termografía infrarroja

Las normas de monitoreo de estado de máquinas o equipos se presentan en la Tabla 2.2, seleccionar de forma cuidadosa las condición experimentales y los procedimientos de análisis de datos da como resultado un alto grado de precisión en la medición de temperatura basado en termografía infrarroja, lo cual reduce las falsas alarmas y fallas repentinas [67].

Tabla 2.2: Normas técnicas usadas en el monitoreo de condición de máquinas con termografía infrarroja.

Norma	Nombre
ISO 10878: 2013	Ensayos no destructivos - La termografía infrarroja – Vocabulario – <i>“Non-destructive testing -- Infrared thermography -- Vocabulary”</i>
ASTM E1213 - 97(2009)	Método de prueba estándar para la diferencia de temperatura resoluble mínima para sistemas de imagen térmica – <i>“Standard Practice for Minimum Resolvable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems”</i>
ASTM-E1311- 89(2010)	Método de prueba estándar para la diferencia de temperatura mínima detectable por los sistemas de imágenes térmicas – <i>“Standard Practice for Minimum Detectable Temperature Difference for Thermal Imaging Systems”</i>
ASTM-E1543- 00(2011)	Método de prueba estándar para la diferencia de temperatura de ruido equivalente de sistemas de imagen térmica – <i>“Standard Test Method for Noise Equivalent Temperature Difference of Thermal Imaging Systems”</i>
ASTM-E1862- 97(2010)	Métodos de prueba estándar para la medición y compensación de temperatura reflejada utilizando radiómetros de imágenes infrarrojas – <i>“Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers”</i>
ASTM-E1933- 99a(2010)	Métodos de prueba estándar para medir y compensar la emisividad utilizando radiómetros de imágenes infrarrojas – <i>“Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers”</i>

ASTME1934-99a(2014)	Guía estándar para el examen de equipos eléctricos y mecánicos con termografía infrarroja – <i>“Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography”</i>
ISO 18434-1:2008	Monitorización de estado y diagnóstico de máquinas - Termografía - Parte 1: Procedimientos generales – <i>“Condition monitoring and diagnostics of machines -- Thermography -- Part 1: General procedures”</i>
ISO 18436-7:2014	Monitorización de estado y diagnóstico de máquinas - Requisitos para la calificación y evaluación de personal - Parte 7: Termografía – <i>“Condition monitoring and diagnostics of machines -- Requirements for qualification and assessment of personnel -- Part 7: Thermography”</i>
IS 12782(1989)	Directrices para el uso de la termografía para el monitoreo de los componentes industriales – <i>“Guidelines for Using Thermography for Monitoring of Industrial Components [MTD 21: Non-Destructive Testing]”</i>

#### 2.1.4 Indicadores de condición para engranajes utilizando emisiones acústicas

La técnica de la emisión acústica aplicada al monitoreo de la condición consiste en analizar la actividad a alta frecuencia de ondas elásticas que se trasladan por la estructura y están presentes en el orden de 25 kHz hasta 1 MHz.

Debido a que la técnica de emisión acústica es una técnica no-direccional, un sensor EA es suficiente en contraste a la técnica de vibraciones mecánicas que puede requerir información de tres ejes. La emisión acústica se produce a nivel microscópico, es sensible y ofrece oportunidades para la identificación de defectos en una etapa más temprana en comparación con otras técnicas de monitoreo de condición [68].

Para la detección de fallo en engranaje, las ondas EA se producen por la interacción de dos medios en movimiento relativo y los sistemas de monitoreo escuchan la EA y realizan el procesamiento de la señal en el dominio de tiempo y dominio de frecuencia para identificar fallos en la etapa temprana de la formación [69].

A continuación se presenta las técnicas basadas en análisis de emisiones acústicas divididas en dos grupos principales de procesamiento como son el análisis en el dominio del tiempo

y el análisis en el dominio de la frecuencia, cada uno de estos contienen distintos indicadores.

#### 2.1.4.1 Indicadores de condición para el 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 la emisión acústica [70]. 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 característica no estacionarias [71].

Para mejorar el rendimiento del análisis de engranaje se fundamenta el análisis basado en las operaciones en el tiempo promedio sincronizado “*Time synchronous averaging*” (TSA). La TSA es adecuado para el análisis de la caja de cambios, en el cual la señal acústica del engranaje bajo análisis es separado de las señales de otros engranajes y/o fuentes de ruido en la caja de cambios que no son sincrónicos con ese engranaje [72].

La aplicación exitosa de la TSA en el análisis de señales de vibración proporciona oportunidades para el procesamiento de señales de EA, básicamente todo tipo de indicadores de condición de detección de fallos se puede evaluar en la señal de TSA [73].

En la Tabla 2.3 se presenta los principales indicadores de condición para el análisis de señales EA en el dominio del tiempo.

Tabla 2.3: CI para señales EA en el dominio del tiempo.

Nombre	Formula	Referencia	Utilidad
Media de la señal	$p_1 = \bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_i$	[68]	Identifica el punto medio de la señal. Es bastante sensible a interferencias o valores atípicos que se obtienen en la adquisición de la señal.

Raíz media cuadrática ( <i>RMS- Root Mean Square</i> )	$p_2 = RMS$ $= \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$	[68] [74] [75] [76] [77] [78] [79] [80] [14]	Útil en seguimiento del nivel de ruido general, para la detección de elementos giratorios desequilibrados y en ondas sinusoidales. Mide el contenido de potencia en la firma de vibración, muy efectiva en la detección de desbalanceo en maquinaria rotativa. No es sensible para detectar fallo incipiente en máquinas.
Desviación estándar ( <i>STD - Standard Deviation</i> )	$p_4 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_i)^2}$	[68]	Permite cuantificar el nivel de variabilidad y dispersión que presentan las amplitudes con respecto a la relación de energía.
El nivel máximo de la señal	$p_5 = p_{ico} = \max x_i $	[68] [74] [80] [81]	Se define simplemente el nivel de señal máximo instantáneo. El valor pico en la evolución del estado de rodamientos es un valor estadístico. Es el valor máximo de la señal en un intervalo de tiempo seleccionado. Este parámetro normalmente no se usa solo.
Asimetría ( <i>Sk - Skewness</i> )	$p_6 = S_K = \frac{\sum_{n=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{RMS^3}$	[68] [14]	Asimetría es el tercer momento central normalizado, y representa una medida de la simetría. Una distribución o conjunto de datos, se dice que es simétrica si se ve igual a la izquierda y a la derecha del punto central.
Cuarto momento - Curtosis	$p_7 = Kurt$ $= \frac{N \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{RMS^4}$	[73] [68] [75] [80] [14] [81] [82]	Estos tipos de señales serán producidos por una caja de cambios dañada. El valor de curtosis será mayor para una caja de cambios dañado que para una caja de cambios en buen estado.
Factor de impulso ( <i>IF - Impulse Factor</i> )	$p_{11} = \frac{p_5}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N  x_i }$	[68]	Permite centralizar el valor RMS para reducir la imprecisión ocasionada por problemas en la adquisición.
Varianza	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$	[14]	Es la varianza de los puntos de la señal de la muestra. Se calcula como el promedio cuadrado de la desviación de cada número respecto a su media.

Factor de cresta ( <i>CF - Crest Factor</i> )	$CF = \frac{P2P}{RMS}$	[75] [14] [14] [81]	Indica el daño en una etapa temprana. Puede ser usado para detectar cambios de vibración impulsivos tales como rotura de los dientes en un engranaje, degradación de un cojinete o un defecto en el anillo exterior de un rodamiento. Es utilizado en dispositivos de control de calidad caja de cambios.
Operador de Energía ( <i>EO - Energy Operation</i> )	$EO = \frac{N^2 \sum_{i=1}^N (\Delta x_i - \Delta \bar{x})^4}{(\sum_{i=1}^N (\Delta x_i - \Delta \bar{x})^2)^2}$	[72] [81]	Se calcula como la curtosis normalizada de la señal donde cada punto se calcula como la diferencia de dos puntos de la vecindad al cuadrado de la señal original.
Relación de Energía ( <i>ER- Energy Ration</i> )	$ER = \frac{\sigma(d)}{\sigma(r)}$ $= \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (d_i - \bar{d})^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x_i - \bar{x})^2}}$	[81]	La energía se transfiere desde la señal del componente regular de engrane con el resto de la señal de acuerdo a como el desgaste progresa. Es útil para indicar un gran desgaste, donde más de un diente en el engranaje está dañado.
Orden-cero Gráfico de mérito <i>FM0</i>	$FM0 = \frac{P2P}{\sum_{i=1}^N A(i)}$	[73] [81]	Compara el valor pico de la señal sincrónica promedió a la energía de la señal normal. Es un fuerte indicio de fallas mayores en un engranaje. Se utiliza para la detección de cambios importantes en el engranaje. No es un buen indicador para daño menor en los dientes del engranaje.
FM4:	$FM4 = \frac{N \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^4}{(\sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2)^2}$	[75] [81]	Es útil para detectar fallos sólo para un número limitado de engranajes.
NA4	$NA4 = \frac{N \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^4}{\left(\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N (r_{ij} - \bar{r}_j)^2\right)^2}$	[75] [81]	Es una versión mejorada de FM4. Si el daño en el engranaje se extiende de un diente a otro diente el valor de NA4 crece. Es una técnica útil para detectar la aparición de fallos y el desarrollo continuo de los daños en los equipos mecánicos.

NA4*	$NA4^* = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (r(n) - \bar{r})^4}{\left( \frac{1}{M'} \sum_{m=1}^{M'} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (r_m(n) - \bar{r}_m)^4 \right)}$	[81]	Se utiliza cuando el daño del engranaje avanza rápidamente. NA4* crece cuando el daño progresa.
NB4	$NB4 = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (e(n) - \bar{e})^4}{\left( \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left( \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (e_m(n) - \bar{e}_m)^4 \right) \right)}$	[81]	Es una técnica útil para detectar daño a los dientes de manera localizada. Sirve para detectar daños menores en los dientes del engranaje.
Delta RMS	$\Delta RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_m(i)^2} - \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_{m-1}(i)^2}$	[81]	Es la diferencia entre dos valores RMS consiguientes. Se centra en la tendencia de la vibración y es sensible a los cambios de la señal de vibración. El parámetro es sensible a los cambios de carga.
Factor de nivel de banda lateral (SLF - sideband level factor)	$SLF = \frac{R_{l-1}(x) + R_{l+1}(x)}{RMS_x}$	[73] [81]	Para una caja de cambios en buen estado este factor es cercano a cero. SLF es un buen indicador de daño de un solo diente o daño en el eje del engranaje.

Donde:

$x_i$  es el i-ésimo elemento en la evolución temporal de  $x$ .

$N$  es el número de datos de la señal  $x$ .

$\bar{x}$  es la media de conjunto de datos  $x$ .

$\Delta \bar{x}$  valor medio de la señal  $\Delta x_i = x_{i+1}^2 - x_i^2$ .

$A(i)$  es la amplitud del armónico i-ésimo de frecuencia.

$\bar{d}$  es el valor de la diferencia de la señal.

$d_i$  es el i-ésimo punto de la señal diferencial en el registro de tiempo.

$r_i$  es el i-ésimo punto en el registro de tiempo de la señal residual.

$\bar{r}$  es la media de la señal residual.

$r_{ij}$  es el  $j$ -ésimo punto en el registro de tiempo de la señal residual.

$j$  es el registro de la hora actual.

$i$  es el número de puntos de datos por la lectura.

$M$  es el registro de tiempo actual en el conjunto de ejecución.

$M'$  es la varianza de la señal residual para cajas de engranajes saludables.

$m$  es el índice de registro de tiempo de ejecución del conjunto.

$Max(x)$  es el valor máximo de  $x$ .

$Min(x)$  es el valor mínimo de  $x$ .

$R_{l,-1}(x)$  es la amplitud de la banda lateral de primer orden lado izquierdo.

$R_{l,+1}(x)$  es la amplitud de la banda lateral de primer orden lado derecho.

Otros indicadores de condición en el dominio del tiempo como: raíz media absoluta, factor de holgura, factor de forma, envolvente, demodulación, FM4\*, M6A, NB4\*, 5th momento, 6th momento, histograma límite inferior, entropía, coeficiente de varianza, coeficiente de energía, coeficiente de curtosis, señal residual, índice de banda lateral, índice de energía, amplitud de pico a pico y operador de energía de Teager, aparecen en las referencias: [68][70][72][73][75][81][83][84][85][86][87][88][89][90][91].

#### **2.1.4.2 Indicadores de condición para el análisis en el dominio de la frecuencia**

Los parámetros de condición se obtienen por medio del espectro de la señal acústica. En la actualidad estos parámetros indican de mejor manera los fallos en la maquinaria rotativa, en comparación a las características 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 [92]. En la Tabla 2.4 se presenta un conjunto de los principales indicadores de condición para el dominio de la frecuencia.

Tabla 2.4: CI para señales EA en el dominio de la frecuencia.

Nombre	Formula	Referencia	Utilidad
Frecuencia Media ( <i>MF-Mean Frequency</i> )	$p_{12} = \bar{k} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K s(k)$	[68] [88] [93] [94] [95] [96] [97]	Indica la energía acústica en el dominio de la frecuencia.
Varianza	$p_{13} = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (s(k) - \bar{k})^2$	[68] [96] [97]	Es un indicador de la variabilidad de la amplitud de la señal en el espectro con respecto a la frecuencia media.
Asimetría	$p_{14} = \frac{\sum_{k=1}^K (s(k) - \bar{k})^3}{K(\sqrt{p_{13}})^3}$	[68] [96] [97]	Mide la estabilidad del espectro con respecto a la MF.
Curtosis	$p_{15} = \frac{\sum_{k=1}^K (s(k) - \bar{k})^4}{Kp_{13}^2}$	[68] [96] [97]	Es útil para el monitoreo de condición en rodamientos y engranajes.
Frecuencia central	$p_{16} = \frac{\sum_{k=1}^K f_k s(k)}{\sum_{k=1}^K s(k)}$	[68] [88] [94] [95] [96] [97] [98]	Es útil como referente de normalización del rango de frecuencias presentes en la señal.
Desviación estándar (STDF)	$p_{17} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (f_k - p_{16})^2 s(k)}{\sum_{k=1}^K s(k)}}$	[68] [88] [94] [95] [96] [97] [98]	Describe el grado de convergencia del espectro de potencia.
Raíz media cuadrática (RMSF)	$p_{18} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K f_k^2 s(k)}{\sum_{k=1}^K s(k)}}$	[68] [88] [94] [95] [96] [97]	Define el nivel de vibración global de la máquina, y es la medida utilizada con las normas internacionales de vibración.

Donde:

$s(k)$  es la transformada de Fourier para  $k = 1, 2, \dots, K$ .

$K$  es el número de líneas del espectro.

$f_k$  es el valor de la frecuencia de la línea  $K$ .

Otros indicadores de condición en el dominio de la frecuencia como: señal residual, curtosis espectral, heterodine, análisis de banda ancha, momento frecuencial, entre otros se estudian en las referencias [72][68][75][88][96][97][99].

### **2.1.5 Indicadores de condición para sistemas rotativos utilizando termografía**

El uso de la termográficas encuentra amplias aplicaciones en el mantenimiento y la evaluación de los estados técnicos de máquinas, procesos industriales y de fabricación. Las inspecciones termográficas de objetos conlleva a evaluar, de manera cíclica, el estado técnico de un componente o la identificación de un posible fallo y la evaluación cuantitativa del potencial daño [100].

El concepto de un sistema de monitoreo basado en imágenes térmicas infrarrojo para un diagnóstico continuo de la maquinaria permite observar el objeto en su funcionamiento y estimar los parámetros de diagnóstico. Los parámetros son funciones de tiempo de funcionamiento y permiten detectar fallas tempranas en las máquinas, así como pronosticar un período de operación segura.

La imagen termográfica puede ser tratada como una imagen digital descrita por una función discreta de valores de temperatura de dos variables  $T(x, y)$ , donde:  $x, y$  son las coordenadas del sistema de coordenadas que determinan la resolución espacial de la imagen [101].

La clasificación de los indicadores de condición para imágenes termográficas se realizan dependiendo del número de píxeles usados para definir una característica local, se pueden clasificar en primer orden (1 píxel), segundo orden (2 píxeles) y de orden superior (más de 3 píxeles) [102].

#### **2.1.5.1 Histograma**

Pueden ser considerados como características basados en estadísticas que proporcionan información sobre la distribución de niveles de gris de la imagen; el nivel de gris de la

imagen térmica depende de la temperatura y es variable [62]. La Tabla 2.5 resume los indicadores de condición basados en el histograma de primer orden.

De las referencias [62][103][60] se determina la probabilidad del histograma de primer orden considerando a una imagen ( $I$ ) y se calcula mediante la Ecuación 2.1 teniendo en cuenta que toda la dimensión de la imagen es  $N \times N$ .

$$P(i) = \frac{N(i)}{M} \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

Donde:

$M$  es el número de píxeles distintos de cero en una imagen.

$N(i)$  es el número de píxeles del nivel de gris.

$P(i)$  es la probabilidad de densidad en el histograma normalizado.

El nivel de gris de una imagen es la cantidad de luz o energía procedente de los distintos objetos o detalles que se encuentran en la imagen.

Tabla 2.5: CI basadas en histograma para imágenes térmicas infrarrojas.

Nombre	Formula	Referencia	Utilidad
Media	$\bar{\mu}_x = \sum_{i=0}^{G-1} i \cdot P(i)$	[101] [62] [103] [60] [104]	Da un poco de información sobre el brillo general de la imagen. La imagen térmica se puede clasificar de acuerdo con sus intensidades de color.
Desviación estándar	$\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=0}^{G-1} (i - \bar{\mu})^2 \cdot P(i)}$	[101] [62] [60] [104]	Da información sobre el contraste. Describe la propagación de los datos, por lo que una imagen de alto contraste tendrá una alta varianza. Usando esto, se puede clasificar varias imágenes térmicas de las condiciones de la máquina.

Asimetría	$S = \frac{1}{\sigma_i^3} \sqrt{\sum_{i=0}^{G-1} (i - \bar{\mu})^3 \cdot P(i)}$ $= \frac{\bar{\mu} - modo}{\sigma_i}$	[101] [62] [60] [104]	Mide la asimetría respecto a la media en la distribución de nivel de gris.
Energía	$E = \sum_{i=0}^{G-1} [P(i)]^2$	[101] [62] [60] [104]	Medida que indica cómo se distribuyen los niveles de gris. La energía tiene un valor máximo de 1 para una imagen con un alto valor de constante, y se hace cada vez más pequeña a medida los valores de píxel se distribuyen a través de los valores de nivel de grises.
Entropía	$E_t = \sum_{i=0}^{G-1} P(i) \cdot \log_2[P(i)]$	[101] [43] [60] [104]	Es una medida de la cantidad de bits necesaria para codificar los datos de imagen. Como los valores de los píxeles de la imagen se distribuyen entre más niveles de gris, la entropía aumenta. Una imagen compleja tiene mayor entropía que una simple imagen.
Curtosis	$K = \sum_{i=0}^{G-1} \frac{(i - \bar{\mu})^4}{\sigma^4}$	[101] [62] [60] [104]	Es una medida que caracteriza la planicidad de la distribución de nivel de gris.

Donde:

$G$  es el número total de niveles de gris disponibles en la imagen y va desde 0 a 255.

*modo* se define como el pico o el valor más alto de temperatura.

### 2.1.5.2 Textura

Para una gran gama de texturas: ninguna textura por sí misma puede discriminar si están de acuerdo en sus estadísticas de segundo orden. El método estadístico utilizado en el análisis de textura se fundamenta en la definición de las distribuciones de probabilidad conjunta de pares de píxeles. El histograma de segundo orden se define como una matriz de co-ocurrencia entre dos píxeles vecinos ubicados a una distancia  $d$  y dirección  $\theta$  en la imagen,

esta matriz se convierte en la estimación de la probabilidad conjunta,  $p_{\theta}(i, j)$  teniendo en particular valores  $i$  y  $j$ . La imagen  $I(x, y)$  con un conjunto de niveles de intensidad discreta  $G$  crea una matriz  $(i, j)$ , en donde:  $i = I(x_1, y_1)$  y  $j = I(x_2, y_2)$  [101].

Los indicadores de condición que definen características de textura son: segundo momento angular, co-relación, contraste, valor absoluto, diferencia inversa, entropía y probabilidad máxima, estos se encuentran en la referencia [101][105].

### **2.1.5.3 Otros indicadores**

Otros indicadores de condición que se aplican en el análisis de la imagen térmica se basan en una matriz diferencia tono-gris que intentar definir medidas de textura correlacionados con la percepción humana de texturas. Entre los indicadores están tosquedad, contraste, ajeteo, complejidad y fuerza de textura; estos indicadores se estudian en [101].

## **2.2 Banco de vibraciones, disposición de fallos y configuración de fallos combinados en engranajes, rodamientos y ejes**

### **2.2.1 Banco de vibraciones**

El banco de vibraciones usado para el levantamiento de datos de señales de vibración mecánicas, señales acústicas e imágenes termográficas está equipado para realizar simulación en fallos dentro de un sistema mecánico rotativo completamente equipado, el cual involucra fallos en engranes, fallos en rodamientos, aplicación de carga radial y axial a eje de transmisión, desbalanceo y desalineación en ejes de transmisión; consta de 4 unidades de trabajo que desarrollan funciones específicas dentro del banco de vibraciones.

La descripción completa del banco de vibraciones se establece en el proyecto: “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” realizada por Santiago Niveló y David Romero bajo la dirección del Ing. Vinicio Sánchez [106]. Las cuatro unidades de trabajo que conforman el banco de vibraciones son:

- Unidad de sistemas rotativos
- Unidad de mando
- Unidad motriz.- tiene como principal elemento el Motor 1, en la Figura 2.1 se presenta los elementos que constituyen la unidad motriz; el Motor 2 es usado para generar perturbación o ruido acústico al sistema. En la Tabla 2.6 se resume las características de cada elemento. El acoplamiento de la unidad motriz por banda-polea se muestra en [106].

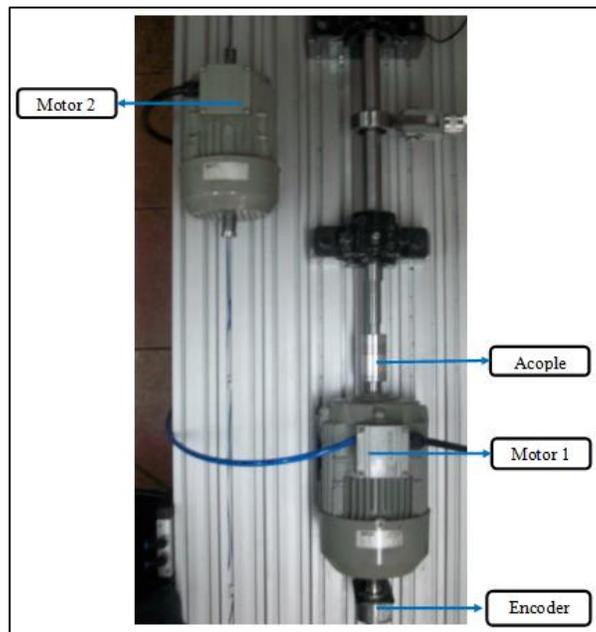


Figura 2.1: Unidad motriz.

Tabla 2.6: Descripción de los elementos de la unidad motriz. Fuente: [106][107]

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
Motor 1	Marca SIEMENS, modelo 1LA7 090-4YA60, alimentación trifásica de 220 VAC, potencia de 2 HP, 1700 rpm
Motor 2	Marca SIEMENS, modelo LA7 083-4YA60, alimentación trifásica de 220 VAC, potencia de 1.5 HP, 1650 rpm
Encoder	Marca SICK, modelo DFS60B-S4PL10000 (1036723)
Acople	Marca, modelo, tipo matrimonio.

- **Unidad de carga**

### 2.2.2 Disposición de fallos

La disposición de fallos ha sido el resultado de una investigación realizada en el proyecto: “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” realizado por Marcos Carangui bajo la dirección del Ing. Vinicio Sánchez [107], un resumen de los fallos con los que cuenta el banco de vibraciones tanto en engranajes como en rodamientos se muestra en [106].

#### 2.2.2.1 Fallo en engranajes y rodamientos

Los tipos de fallos presentes para engranajes y rodamientos se estudian en [106][107].

#### 2.2.2.2 Designación de engranajes y rodamientos para la caja reductora y el sistema de transmisión.

La Figura 2.2 muestra la designación para engranajes y rodamientos dentro de la caja reductora.

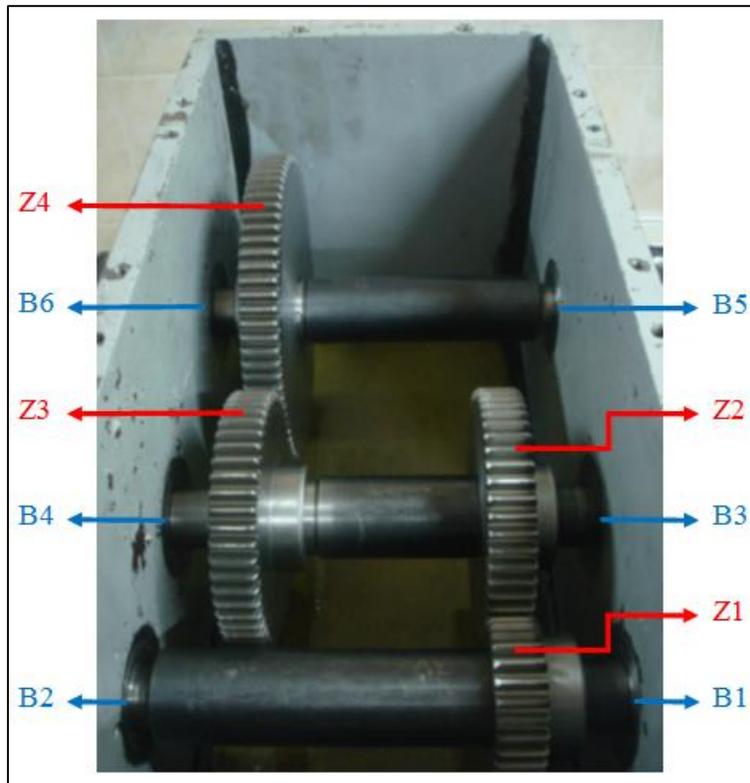


Figura 2.2: Designación de engranajes y rodamientos en la caja reductora. Adaptado de: [107]

Para la caja reductora, las características técnicas de los engranajes y las características técnicas de los rodamientos rígidos de bolas de una hilera NTN 6005ZC3/0G se presentan en [106].

En la Figura 2.3 se presenta la designación para los rodamientos en el eje de transmisión.

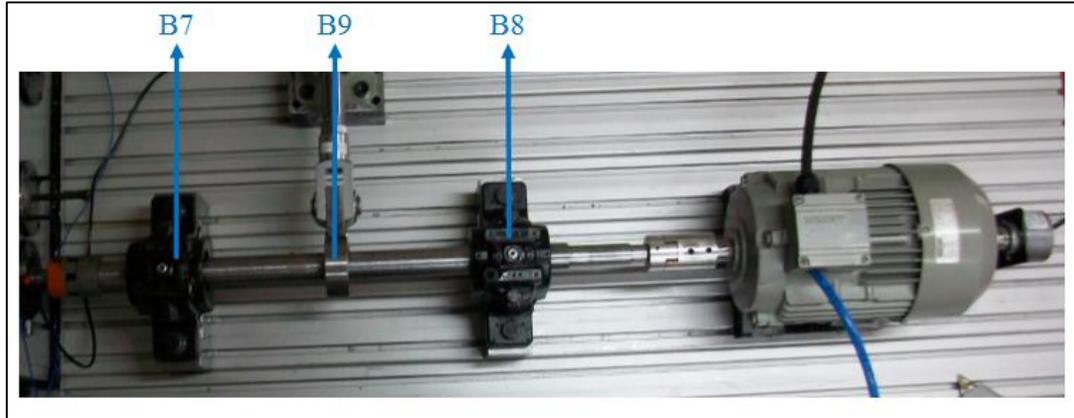


Figura 2.3: Designación de rodamientos en eje de trasmisión.

En la Figura 2.4 se presenta las características de los rodamientos de rodillos cónicos de doble hilera SKF 22207 EK/C3 utilizados para montar el eje de trasmisión (B7 y B8), y la Figura 2.5 presenta las características del rodamiento rígido de bolas de una hilera SKF 61906-2RS1 utilizado para transmitir la carga radial al eje de transmisión (B9).

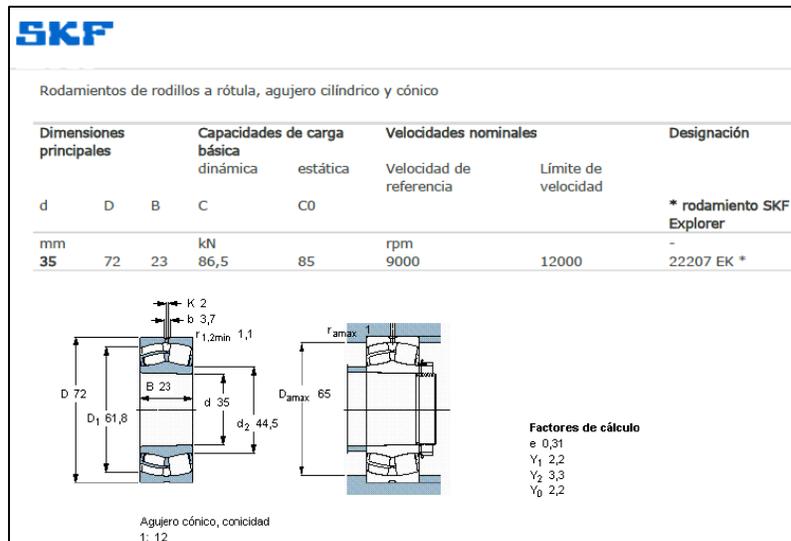


Figura 2.4: Características técnicas de rodamiento SKF 22207 EK/C3. Fuente:[108]

Dimensiones principales			Capacidades de carga básica		Velocidades nominales		Designación
d	D	B	dinámica	estática	Velocidad de referencia	Límite de velocidad	
			C	$C_0$			* rodamiento SKF Explorer
mm			kN		rpm		-
30	47	9	7,28	4,55	-	8500	<b>61906-2RS1</b>

The figure shows two technical drawings of the SKF 61906-2RS1 bearing. The left drawing is a front view showing dimensions: outer diameter D = 47 mm, inner diameter d = 30 mm, and thickness B = 9 mm. It also indicates fillet radii  $r_{1,2min} = 0,3$  mm. The right drawing is a side view showing dimensions: outer diameter  $D_{amax} = 45$  mm, inner diameter  $d_{amin} = 32$  mm, and  $d_{amax} = 34$  mm. It also indicates fillet radii  $r_{amax} = 0,3$  mm. Below the drawings, the calculation factors are listed:  $k_r = 0,02$  and  $f_0 = 14$ .

Figura 2.5: Características técnicas de rodamiento SKF 61906-2RS1. Fuente: [109]

### 2.2.2.3 Disponibilidad de fallos en engranajes y rodamientos

Los engranajes y rodamientos con fallos construidos están a disponibilidad dentro del laboratorio y se presentan en [106].

### 2.2.2.4 Perturbaciones en el eje de transmisión

El sistema rotativo está diseñado para generar las siguientes perturbaciones mecánicas:

- Desbalanceo estático y dinámico
- Desalineación de ejes paralela y angular
- Carga axial y radial

### 2.2.2.5 Perturbación de ruido sonoro

Las perturbaciones de ruido son señales no deseadas que ingresan al sistema de medición de señales acústicas y que no se pueden evitar; se desplazan por el aire y afectan de manera directa al sensor de medición acústico que recibe éstas señales a la par con las señales producidas por los fallos introducidos en el sistema mecánico rotativo.

El ruido generado por el sistema de refrigeración del motor 1 y el ruido generado por el motor 2 encendido, como se ve en la Figura 2.1, han sido establecidas como perturbaciones sonoras que ingresan al sistema y son registrados por el micrófono.

Según la norma ISO 9614:1 dice: “Si los niveles de presión sonora de las fuentes externas a la superficie de medición son menores en al menos 10 dB a los niveles de presión sonora generados por la fuente bajo ensayo, estas fuentes parásitas no tendrán gran influencia en la medición” [110].

El ruido generado por el sistema de refrigeración del motor 1 esta designado como un ruido de fondo producto del flujo de aire a presión dentro del motor. El ruido del motor 2 encendido esta designado como un ruido mecánico cíclico causado por el movimiento del rotor.

La presión sonora generada de forma individual por el aire de refrigeración del motor 1 y el motor 2 encendidos generan la presión sonora que se presenta en la Tabla 2.7, la misma que fue establecida según la norma ISO 3745. Las mediciones realizadas según la norma ISO 3745 para las dos perturbaciones presentes en el sistema se muestran en el Anexo A1.

Tabla 2.7: Presión sonora de las fuentes de ruido.

	<b>Unidad</b>	<b>Presión sonora</b>
P	Refrigeración de motor 1	71.125 dB
	Motor 2	63.48 dB

Para la base de datos 1 el sistema de refrigeración del motor 1 permanece encendido durante todas las tomas de datos realizadas y la perturbación del motor 2 se considera en 40 de las 100 combinaciones realizadas.

### **2.2.3 Configuración de fallos combinados en engranajes, rodamientos y ejes**

En el estudio realizado en [106] se establecen las consideraciones que se toman en cuenta para realizar la configuración de los fallos, mismos que están de acorde con las condiciones reales de la maquinaria en la industria. Para realizar la configuración de fallos se realizó una parametrización que indica, mediante números, el tipo de fallo dando un total de 5184 combinaciones de fallos en los engranajes, rodamientos y ejes del sistema mecánico rotativo en el cual se adaptó el rodamiento B9 sometido a carga radial y las perturbaciones

sonoras. La Tabla 2.8 muestra parte de la combinación de fallos y la Tabla 2.9 especifica la asignación del tipo de elemento que presenta el fallo.

Tabla 2.8: Combinación de fallos. Adaptado de: [106]

	Z1-Z3	Z2-Z4	S-CAJA	B1 – B3 – B5	B2 – B4 – B6	B7 – B8 – B9	S4	P
Combinación 1	1	1	1	1	1	1	1	1
Combinación 2	1	2	1	4	2	1	1	2
Combinación 3	1	2	1	4	3	1	1	1
Combinación 4	1	3	1	1	1	1	1	1
Combinación 5	1	3	1	1	3	1	1	2
Combinación 6	1	3	1	1	4	1	1	1
Combinación 7	1	3	1	2	1	1	1	1
Combinación 8	1	3	1	2	2	1	1	1
Combinación 9	1	3	1	2	3	3	6	2
Combinación 10	1	3	1	3	1	1	1	1
Combinación 11	1	3	1	3	2	1	1	1
Combinación 12	1	3	1	3	3	1	1	2

Tabla 2.9: Elementos del sistema. Adaptado de: [106]

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-B9	Rodamiento 7 y 8 del eje de transmisión
P	Perturbación por refrigeración y motor 2

## 2.3 Instrumentación acústica y termográfica

### 2.3.1 Instrumentación acústica

Para la recolección de datos de señales acústicas se utilizó el siguiente equipo:

- Software de control y recolección de datos
- Tarjeta de adquisición de datos
- Sensor acústico

- Micrófono

### 2.3.1.1 Características del software para recolección de datos

Fue desarrollado en la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca, está diseñado para registrar y guardar las señales acústicas de forma automática de acuerdo a los parámetros de prueba, velocidad y carga que el usuario le asigne. Se lo estudia en [106].

### 2.3.1.2 Tarjeta de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición “*Data Acquisition Systems*” DAQ utilizada para la muestra de señales acústicas se observa en la Figura 2.6, consta de Chasis NI CompactDAQ Ethernet y 802.11 Wi-Fi de 1 ranura, marca NATIONAL INSTRUMENTS, modelo NIDeDAQ9191, serie 16C6910 y un módulo IEPE y entrada analógica AC / DC, modelo NI 9234, 4 canales, 24 Bits,  $\pm 5$  V, velocidad de muestreo de 51.2 kS/s por canal. Los canales recolectan las señales acústicas y señales de vibración mecánica.

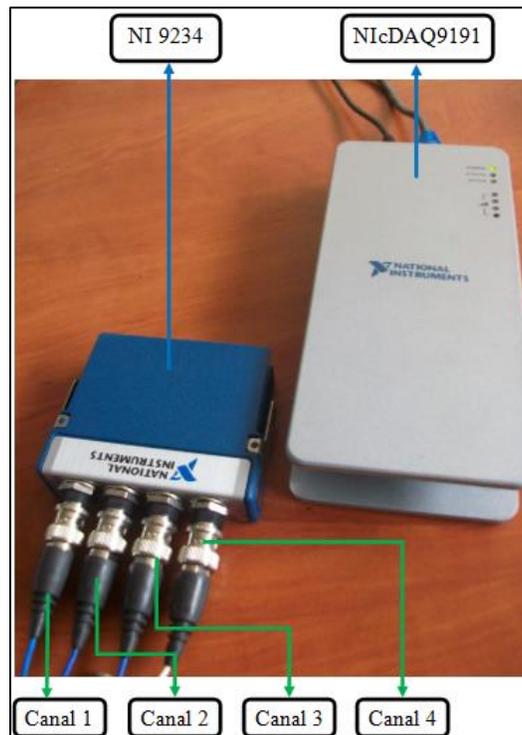


Figura 2.6: Tarjeta de adquisición de datos NATIONAL INSTRUMENTS.

### 2.3.1.3 Sensor acústico

El sensor utilizado para medir la emisión acústica se observa en la Figura 2.7, es de marca PANAMETRICS, modelo V109, serie 305384, frecuencia de muestreo de 5MHz.



Figura 2.7: Sensor acústico PANAMETRISCS V109.

El sensor acústico V109-RM es un transductor de contacto de ángulo recto, para este proyecto el montaje se lo realiza mediante cera especial.

### 2.3.1.4 Micrófono

El micrófono utilizado en la recolección de datos se observa en la Figura 2.8, es de marca PCB PIEZOTRONICS, modelo 377B02, preamplificador PCB HT426E01, rango de frecuencia de 5 a 10000 Hz. Los datos técnicos del micrófono y el preamplificador se encuentran en el Anexo A2 y Anexo A3 respectivamente.

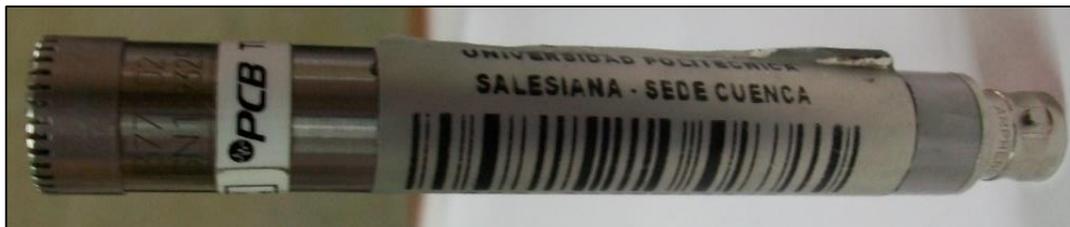


Figura 2.8: Micrófono y preamplificador PCB PIEZOTRONICS.

### 2.3.2 Instrumentación termográfica

La cámara termográfica utilizada para la recolección de imágenes termográficas infrarrojas se observa en la Figura 2.9, es de marca TESTO, modelo 882. Las características técnicas de la cámara se presentan en el Anexo A4.



Figura 2.9: Cámara termográfica TESTO 882.

El software usado para visualizar y procesar las imágenes termográficas es IRSoft y se observa en la Figura 2.10, el cual consta de varias herramientas que permiten una evaluación precisa de la imagen.

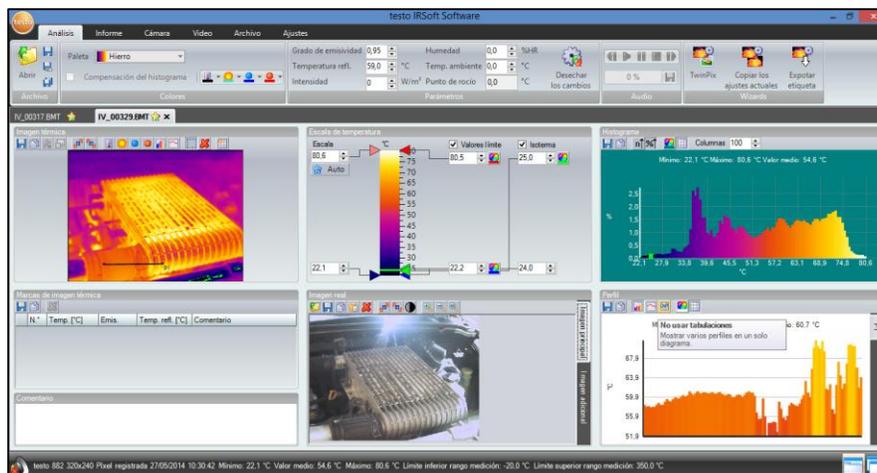


Figura 2.10: Software IRSoft.

En la base de datos 2, sección 2.5.2.2, se establece una base de datos con señales de vibración mecánicas para los cuales se utiliza una nueva tarjeta de adquisición, acelerómetros uniaxiales, acelerómetro triaxial y tacómetro.

Para la recolección de datos de vibraciones mecánicas en la base de datos 2 se utiliza la tarjeta de adquisición marca ERBESSD INSTRUMENTS, mostrada en la Figura 2.11 la cual consta de dos canales de entrada de señales.

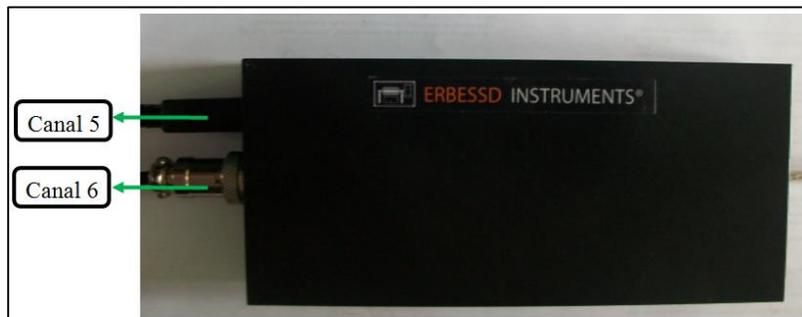


Figura 2.11: Tarjeta de adquisición de datos ERBESSD INSTRUMENTS.

El acelerómetro uniaxial utilizado para la recolección de datos se observa en la Figura 2.12 (a), es un acelerómetro de marca PCB PIEZOTRONICS, modelo 352C03, sensibilidad 10.06 mV/g y rango de medición  $\pm 500$  g pk; el acelerómetro triaxial se observa en la Figura 2.12 (b), es de marca ERBESSD INSTRUMENTS, sensibilidad 330 mV/g, rango de frecuencia de 1 a 8000 Hz; el tacómetro se observa en la Figura 2.12 (c) es de marca COMPACT INSTRUMENT, modelo VLS5/T/LSR.

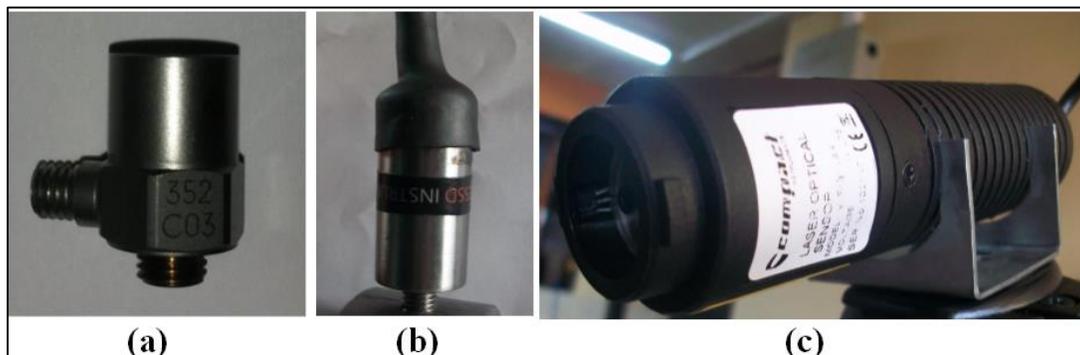


Figura 2.12: (a) Sensor uniaxial, (b) Sensor triaxial, (c) Tacómetro.

### 2.3.3 Lubricación de caja de engranajes y nivel de aceite

Para la caja de engranajes se ha designado el lubricante Gulf EP Lubricant HD 220, el método de lubricación utilizado es por salpicadura y el nivel ideal de lubricante será del 35% de la totalidad de la caja, estos datos han sido establecidos en el estudio realizado en [106][107]. Las características del aceite utilizado se muestran en el Anexo A5.

### 2.3.4 Posición del sensor acústico y del micrófono

La ubicación del sensor acústico es sobre la superficie por la cual se transporta la emisión acústica, el desplazamiento se genera a nivel superficial dentro de la caja de engranajes y se ubica el sensor lo más cercano a la fuente de emisión acústica. El uso del sistema de lubricación en la caja de engranajes restringe la ubicación del sensor y el micrófono en la parte interna por lo tanto el sensor acústico se ubica en la entrada de movimiento de la caja de engranajes y el micrófono se ubica sobre la tapa de la caja de engranajes como se observa en la Figura 2.13. Para esto se define un sistema coordenado sobre el sistema mecánico rotativo, esto permite diferenciar la posición y dirección de ubicación del sensor y el micrófono. El sistema coordenado utilizado es el mismo que se utiliza en [106].

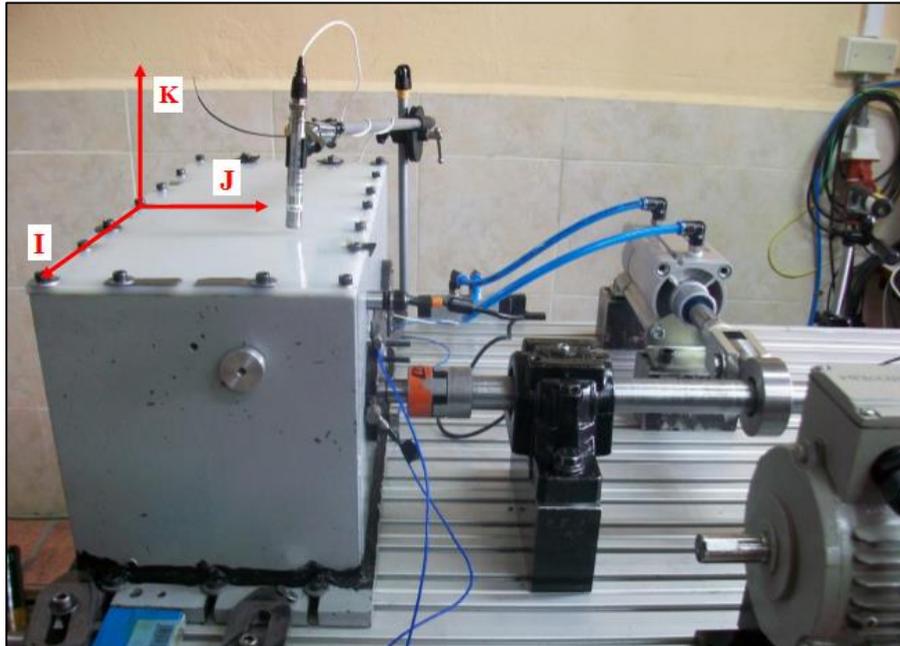


Figura 2.13: Sistema coordenado definido para el sistema mecánico rotativo.

## 2.4 Protocolo para la toma de señales acústicas e imágenes termográficas

El protocolo establecido para la toma de señales acústicas e imágenes termográficas considera el sistema rotativo que involucra la caja de engranajes y el eje de transmisión, la posición de los fallos dentro del sistema y la ubicación de los sensores acústicos y cámara termográfica para la recolección de señales. El protocolo para las señales de vibración mecánicas se presentan en [106].

### 2.4.1 Nomenclatura de los elementos del sistema rotativo

La nomenclatura utilizada en la caja de engranajes se presenta en la Figura 2.14, en donde se establece la designación a los ejes, los engranajes y los rodamientos.

En la Figura 2.15 se presenta la nomenclatura para designar a la carga axial, carga radial, desbalanceo, eje de transmisión y los rodamientos de los soportes.

En la Figura 2.16 se muestra la nomenclatura utilizada para designar las fuentes de ruido acústico.

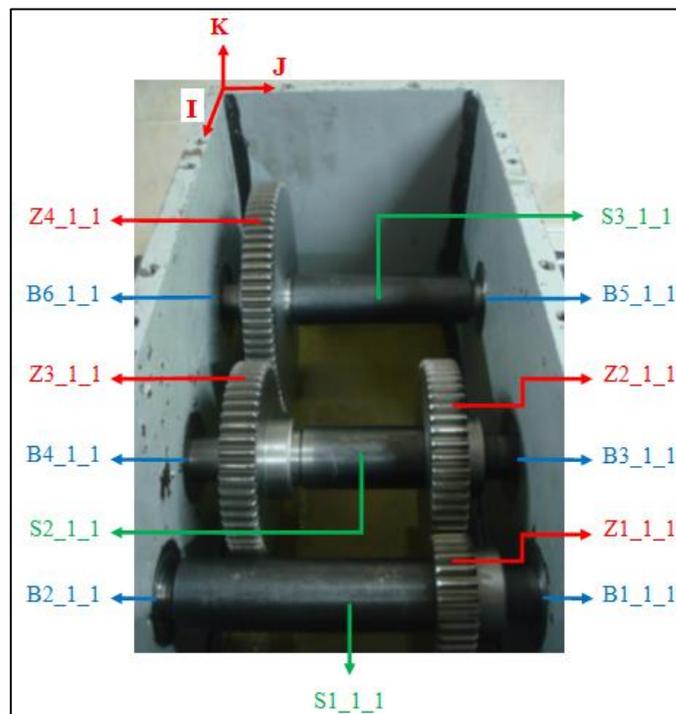


Figura 2.14: Nomenclatura de elementos de la caja de engranajes. Adaptado de: [106]

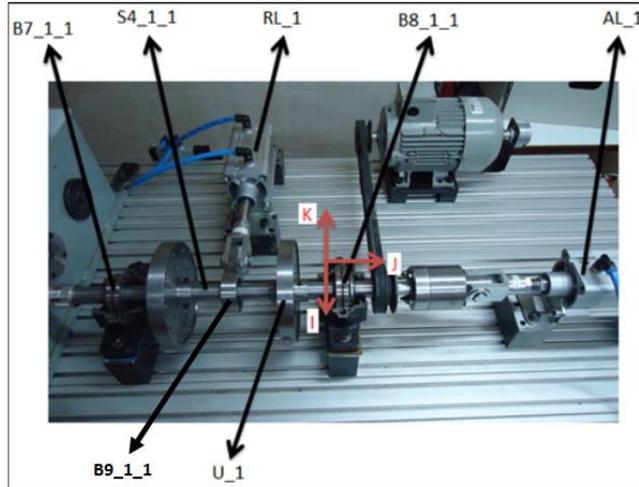


Figura 2.15: Nomenclatura para carga axial, carga radial, eje de transmisión y desbalanceo. Adaptado de: [106]

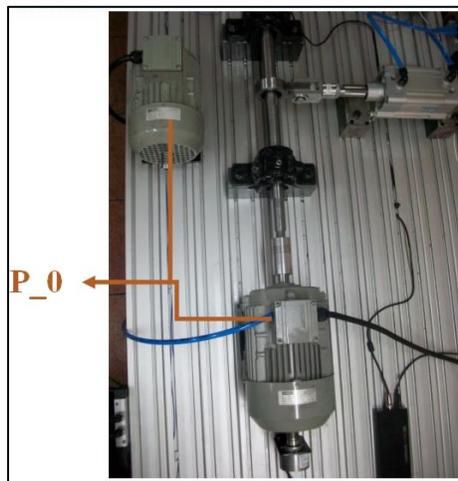


Figura 2.16: Nomenclatura para fuentes de ruido acústico.

### 2.4.2 Nomenclatura para ubicación de sensor acústico, micrófono y cámara termográfica

Para la caja de engranaje el sensor acústico es ubicado en dirección del eje coordenado J1 J2, J3, J4, J5 o J6, en la parte de las tapas de los rodamientos y el micrófono está ubicado en dirección K10 o K11 sobre la tapa de la caja de engranajes. En la Figura 2.17 se observa las direcciones establecida para ubicar el sensor, el micrófono y la cámara termográfica. Solo los ejes utilizados por los sensores acústicos y la cámara termográfica se muestran en la gráfica.

Las distancias de ubicación del micrófono en la caja de engranaje, para el presente proyecto, se muestran en el Anexo B1.

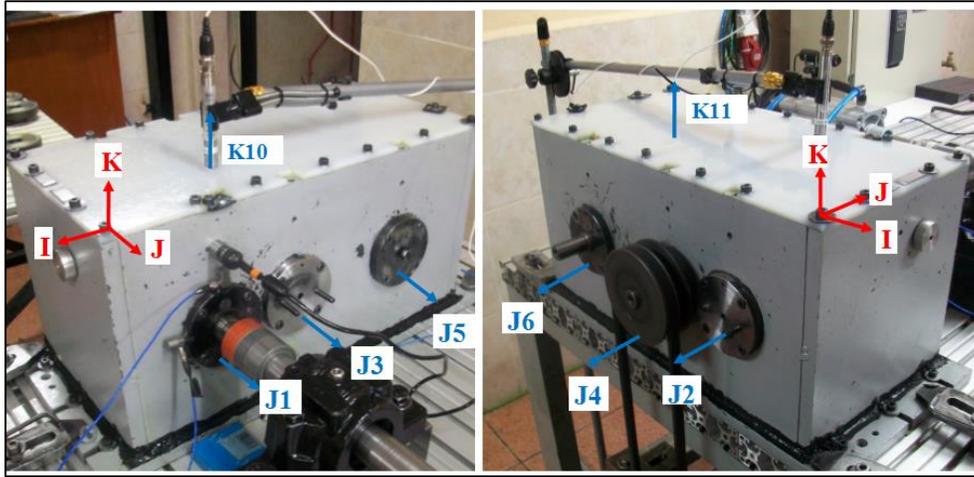


Figura 2.17: Nomenclatura para sensores acústicos en caja de engranajes.

Para el eje de transmisión montado sobre chumaceras la ubicación del sensor acústico y el micrófono está en la dirección K7, K8 y K9; para la ubicación de la cámara termográfica se establece la dirección I7, I8 I9; esto se observa en la Figura 2.18.

Las distancias de ubicación del micrófono en el eje de transmisión, para el presente proyecto, se muestran en el Anexo B2 y las distancias de ubicación de la cámara termográfica para el eje de transmisión, en el presente proyecto, se muestran en el Anexo B3.

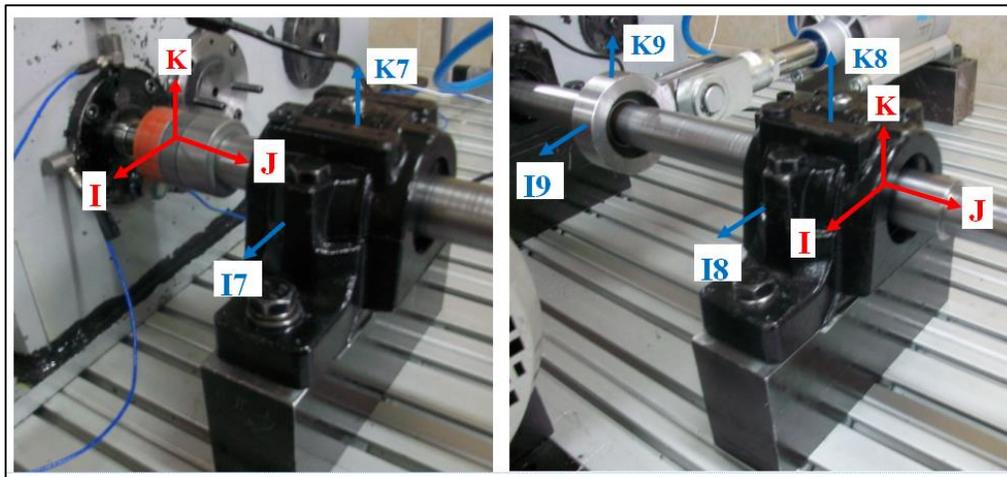


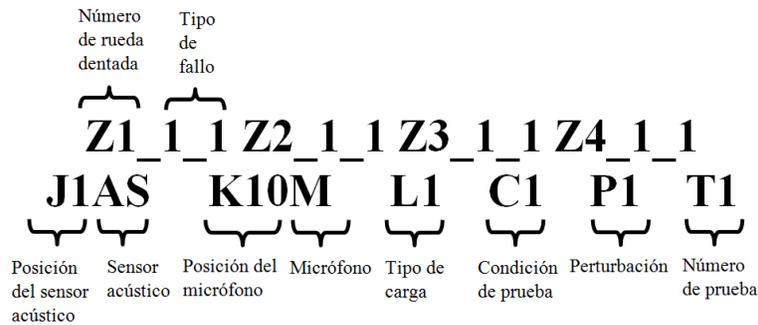
Figura 2.18: Nomenclatura para sensores acústicos y cámara termográfica en chumaceras.

## 2.4.3 Nomenclatura para base de datos de señales acústicas

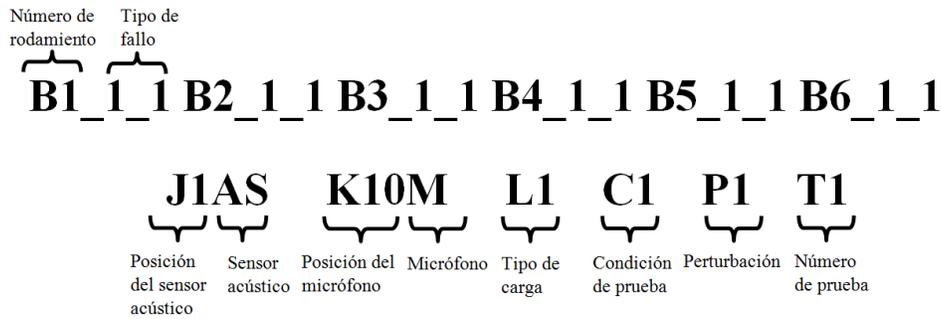
### 2.4.3.1 Nomenclatura para caja de engranajes

La nomenclatura utilizada para el levantamiento de datos de señales acústicas dentro de la caja de engranajes se fundamenta en la Figura 2.14, Figura 2.16 y Figura 2.17, dando la siguiente designación:

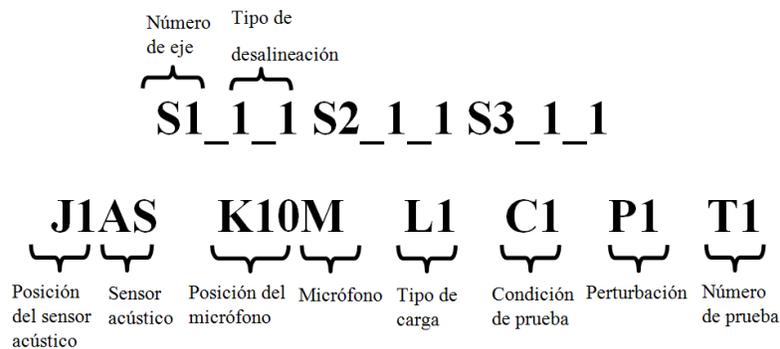
- Para engranajes:



- Para rodamientos:



- Para ejes:



La designación numérica de fallos para engranajes, la designación numérica de fallos para rodamientos, la designación numérica de fallos para ejes y la designación numérica de los tipos de cargas aplicables al sistema se presentan en [106].

Las condiciones de prueba C1, C2 y C3 se presentan en la sección 2.5.2.

En la Tabla 2.10 se resume la designación numérica para las posiciones del sensor acústico y micrófono. La Tabla 2.11 resume las perturbaciones P1 y P2 aplicables a la prueba.

Tabla 2.10: Designación numérica de posición de sensores acústicos y cámara térmica.

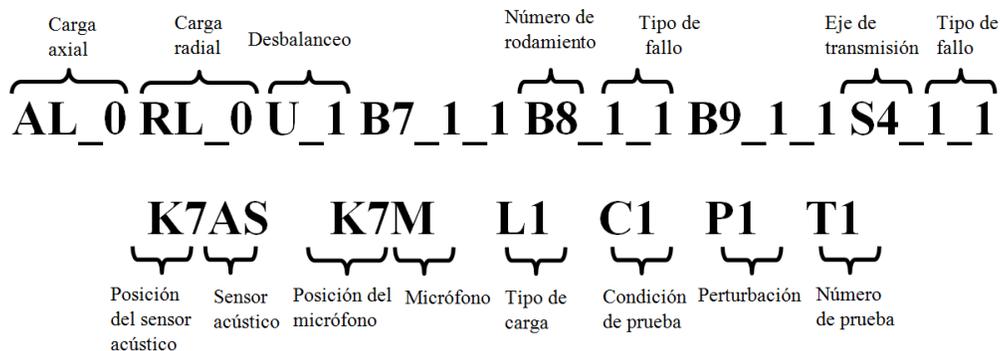
Designación	Significado
J1-J6	Posición en el eje J del sensor acústico y cámara térmica 1 al 6 respectivamente
J10-J11	Posición en el eje J de cámara térmica 10 y 11 respectivamente
K10-K11	Posición en el eje K del micrófono y cámara térmica 10 y 11 respectivamente

Tabla 2.11: Designación numérica de perturbaciones.

Designación	Significado
P	Perturbación
0	Desactivado refrigeración de motor 1 y motor 2
1	Activado refrigeración de motor 1
2	Activado motor 2

### 2.4.3.2 Nomenclatura para eje de transmisión

La nomenclatura utilizada para el levantamiento de datos de señales acústicas en el eje de transmisión se fundamenta en la Figura 2.15, Figura 2.16 y Figura 2.18, dando la siguiente designación:



La designación numérica de fallos para el eje de transmisión y la designación numérica de fallos por carga axial, carga radial y desbalanceo se establecen en [106]. La designación numérica adaptada de fallos para rodamientos se presenta en la Tabla 2.12; mientras que la Tabla 2.13 resume la designación numérica para las posiciones del sensor acústico y del micrófono.

Tabla 2.12: Designación numérica de fallos en rodamientos. Adaptado de: [106]

<b>Designación</b>	<b>Significado</b>
B7-B8	Rodamientos 7 al 8 respectivamente
1_1	Rodamiento sin fallo
2_1	Rodamiento con fallo en la pista exterior
3_1	Rodamiento con fallo en el elemento rodante
B9	Rodamiento 9
1_1	Rodamiento sin fallo

Tabla 2.13: Designación numérica para posición de sensores acústicos y cámara térmica.

<b>Designación</b>	<b>Significado</b>
I7-I8-I9	Posición en el eje I de cámara térmica 7, 8 o 9 respectivamente
K7-K8-K9	Posición en el eje K del micrófono y el sensor acústico 7, 8 o 9 respectivamente

### 2.4.3.3 Nomenclatura para combinación en caja de engranajes y eje de transmisión

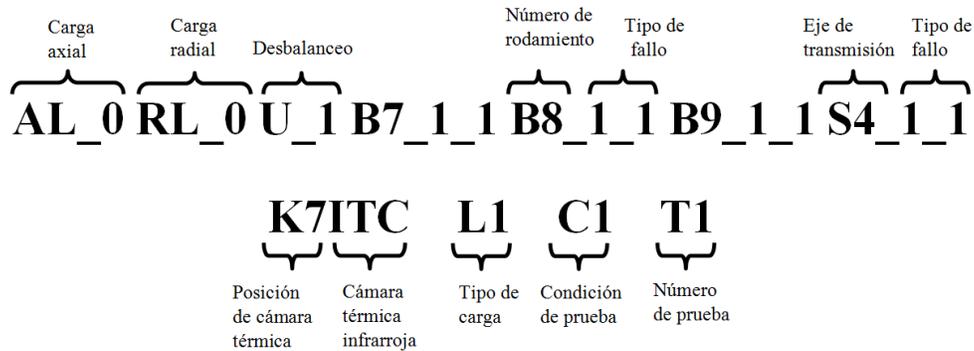
La nomenclatura utilizada para el levantamiento de datos de señales acústicas en caja de engranajes y el eje de transmisión es la combinación de las designaciones propuestas de forma individual para cada uno de los casos y queda de la siguiente manera:

**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 B9\_1\_1 S4\_1\_1 J1AS K10M  
K7AS K7M L1 C1 P1 T1**

## 2.4.4 Nomenclatura para base de datos de imágenes termográficas

### 2.4.4.1 Nomenclatura para eje de transmisión

La nomenclatura utilizada para el levantamiento de datos de imágenes termográficas en el eje de transmisión se fundamenta en la Figura 2.15 y la Figura 2.18, dando la siguiente designación:



La designación numérica de fallos por carga axial, carga radial y desbalanceo, la designación numérica de fallos para rodamientos y los fallos para el eje de transmisión se establecen en [106]. La designación numérica para la ubicación de la cámara termográfica se presenta en la Tabla 2.13.

## 2.5 Levantamiento y almacenamiento de la base de datos de señales acústicas e imágenes termográficas

Las bases de datos de señales de vibración mecánicas, señales acústicas e imágenes termográfica, establecidas en este proyecto están destinadas a generar avances investigativos en:

- Estudiantes universitarios
- Estudiantes de pregrado
- Estudiantes de maestrías
- Estudiantes de doctorados
- Para todas las personas que se interesen en el tema de vibraciones, emisiones acústicas y termografía infrarroja.

### 2.5.1 Condiciones ambientales de laboratorio

Las condiciones establecidas dentro del laboratorio se resumen en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14: Condiciones ambientales del laboratorio. Fuente: [106]

Temperatura máxima Cuenca	24.5 °C
Temperatura mínima Cuenca	7.6 °C
Altitud de Cuenca	2.550 metros sobre el nivel del mar
Presión en Cuenca	0.68 ATM

### 2.5.2 Bases de datos

Se han designado dos bases de datos con condiciones distintas para cada una de ellas, las cuales son las siguientes:

Base de datos 1 – Señales de emisión acústica.

Base de datos 2 – Señales de emisión acústica, imágenes térmica y vibraciones mecánicas.

Base de datos 3 – Señales de vibraciones mecánicas.

Las condiciones y características para cada base de datos se estudian a continuación.

#### 2.5.2.1 Base de datos 1

El grupo completo de combinaciones para la base de datos 1 se estudió en la sección 2.2, de la cual se elige las combinaciones con fallos en los elementos a ensayar.

La selección de los fallos en los elementos del sistema rotativo es la misma presentada en [106], lo que se pretende en el presente proyecto es hacer el levantamiento de una base de datos acústica con la finalidad de emprender estudios con este tipo de señales mediante dos tipos de transductores (sensor acústico y micrófono), de esta manera se podrá hacer investigaciones comparativas entre señales acústicas y vibraciones mecánicas. Se realizaron 100 pruebas en dos grupos.

- GRUPO 1.- 50 combinaciones de fallos en los elementos del sistema, utilizando una sola etapa de la caja de engranajes

- GRUPO 2.- 50 combinaciones de fallos en los elementos del sistema, utilizando las dos etapas de la caja de engranajes

Todas las pruebas tienen ruido acústico por refrigeración del motor 1 y de cada grupo se toman 20 pruebas que incluyen perturbación del motor 2, ver Figura 2.1.

Las condiciones C1 se presentan en la Tabla 2. 15.

Tabla 2.15: Condiciones C1 para base de datos 1.

Parámetro	Valor	
Velocidad de adquisición - DAQ NATIONAL INSTRUMENTS	51000 Hz	
Velocidad de adquisición - DAQ ERBESSD INSTRUMENTS	22000 Hz	
Velocidad de adquisición de tacómetro	1 pulso/rev.	
Tiempo de adquisición de cada prueba	7 s	
Velocidad de rotación	V1	940 RPM
	V2	1130 RPM
	V3	1320 RPM
	V4	1500 RPM
Carga	L1	900 W
	L2	1150 W
	L3	1400 W
Repeticiones de cada prueba	10	

El resultado de la base de datos 1 da:

- 120 muestras por sensor para cada una de las combinaciones realizadas dándonos un total de 12000 muestras de señal del sensor acústico y 12000 muestras de señal del micrófono.

En los Anexo C1 y Anexo C2 se presentan las pruebas que se llevaron a cabo para una y dos etapas respectivamente, cada uno de ellos con su respectiva nomenclatura.

### 2.5.2.2 Base de datos 2

La termografía infrarroja mide el valor de temperatura mediante imágenes térmicas que son captadas del sistema rotativo; se realiza una revisión bibliográfica con el objetivo de conocer los estudios realizados sobre el diagnóstico de fallos mediante termografía

infrarroja en sistemas mecánicos rotativos, la Tabla 2.16 resume los fallos que se han estudiado en otros laboratorios.

Tabla 2.16: Estudios realizados en diagnóstico de fallos aplicando termografía infrarroja.

Referencia	Tipo de fallo	Dimensiones de fallo	Características de prueba
[62] [60] [53] [111]	Desalineación	Eje de 30mm de diámetro	Motor de 0.5 HP. Velocidad de giro 3450 rpm. Cámara FLIR-A-40.
	Fallo en rodamiento		
	Desbalanceo		
[56]	Desalineación		Motor de 1 HP.  Cámara FLIR-A310.
	Desbalanceo		
	Rotor roto	Agujero de 7.938 mm de diámetro	
	Daño en rodamiento-pista exterior	Agujero de 2mm de diámetro	
[112] [113]	Daño en pista externa del rodamiento	Rugosidad menor a 0.2 $\mu\text{m}$	Motor de 1 HP. Velocidades de 1000, 2000 y 3000 rpm. Cámara SILVER 450 M.

La base de datos 2 se centra en la recolección de señales para determinar la vida útil de un rodamiento sometido a carga radial dentro del sistema rotativo que incluye el eje de transmisión, para ello se considera dos grupos de pruebas a realizar:

#### 2.5.2.2.1 Base de datos 2 – Grupo 1

Esta base de datos incluye señales de vibración mecánica, señales acústicas e imágenes térmicas. La posición de los acelerómetros uniaxial (1 y 2), acelerómetro triaxial (5), el sensor acústico (3), la cámara térmica (4) y el tacómetro (6) se observan en la Figura 2.19.

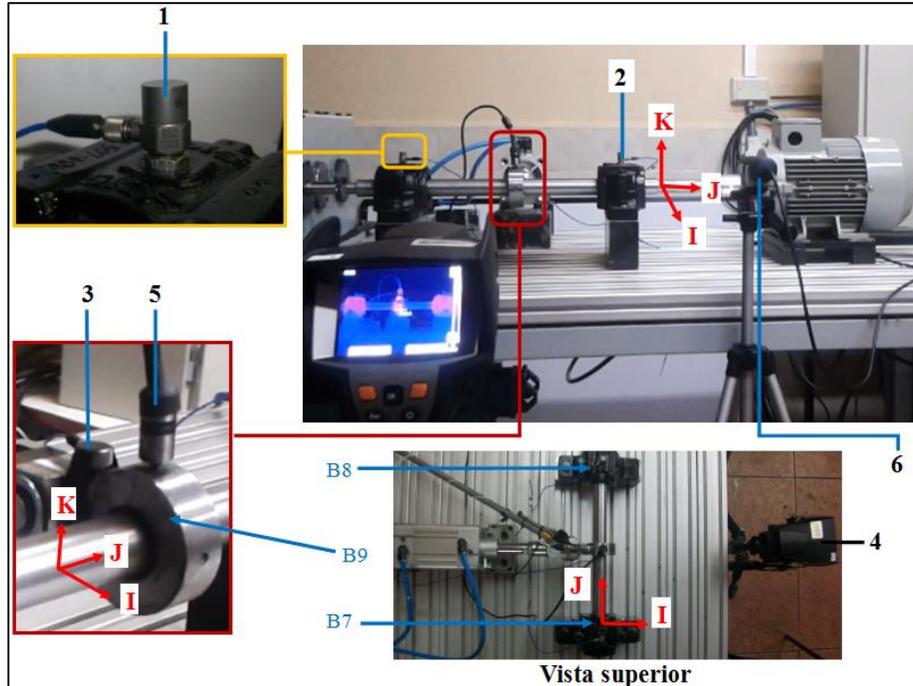


Figura 2.19: Configuración del sistema para base de datos 2. Pruebas 1, 2 y 3.

En el sistema de eje de transmisión, mostrado en la Figura 2.19, el montaje para la base de datos 2 utiliza en B7 y B8 rodamientos de bolas a rótula SKF 1207 EKTN9/C3 sobre manguitos de fijación SKF H 207, en la Figura 2.20 se presenta las características de este rodamiento. En B9 se utiliza rodamiento rígido de bolas de una hilera NTN 6906LLU para transmitir la carga radial al eje de transmisión, en la Figura 2.21 se presenta las características del rodamiento.

Dimensiones principales			Capacidades de carga básica		Velocidades nominales		Designación
$d_1$	D	B	dinámica	estática	Velocidad de referencia	Límite de velocidad	Rodamiento + manguito de fijación
mm			kN	$C_0$	rpm		-
30	72	17	19	6	20000	13000	<b>1207 EKTN9 + H 207</b>

Factores de cálculo	
$k_r$	0,04
$e$	0,23
$Y_1$	2,7
$Y_2$	4,2
$Y_0$	2,8

Figura 2.20: Características técnicas de rodamiento SKF 1207 EKTN9/C3. Fuente: [114]

<b>NTN Part Number</b>	6906LLU	
<b>Weight</b>	N/A (lbs) / N/A (kg)	
<b>DIMENSIONS</b>		
<b>DIMENSION</b>	<b>IMPERIAL</b>	<b>METRIC</b>
Bore d	1.1811 (in)	30.000 (mm)
O.D.D.	1.8504 (in)	47.000 (mm)
Width B or W	0.3543 (in)	9.000 (mm)
rs min	0.0118 (in)	0.300 (mm)
D1 max	1.7992 (in)	45.700 (mm)
a max	0.0669 (in)	1.700 (mm)
b min	0.0374 (in)	0.950 (mm)
ro max	0.0098 (in)	0.250 (mm)
rns min	0.0118 (in)	0.300 (mm)
D2 max	1.9606 (in)	49.800 (mm)
f max	0.0335 (in)	0.850 (mm)
da min	1.2598 (in)	32.000 (mm)
da max	1.3386 (in)	34.000 (mm)
Da max	1.7717 (in)	45.000 (mm)
ras max	0.0118 (in)	0.300 (mm)
Dx min	1.9882 (in)	50.500 (mm)
Cy max	0.0906 (in)	2.300 (mm)
Cz min	0.0354 (in)	0.900 (mm)
rnas max	0.0118 (in)	0.300 (mm)

Figura 2.21: Características técnicas de rodamiento NTN 6906LLU. Fuente: [115]

Para la base de datos 2-1 se realizan tres pruebas que incluyen condiciones de carga distintas. Las condiciones generales de C2-1, C2-2 y C2-3 para la realización de la base de datos 2 se resumen en la Tabla 2.17.

Tabla 2.17: Condiciones C2-1, C2-2 y C2-3 para base de datos 2.

<b>Parámetro</b>		<b>Valor</b>	
Velocidad de adquisición - DAQ NATIONAL INSTRUMENTS		51000 Hz	
Velocidad de adquisición - DAQ ERBESSD INSTRUMENTS		22000 Hz	
Velocidad de adquisición de tacómetro		1 pulso/rev	
Periodicidad en la toma de las señales		30 minutos	
Velocidad de rotación		1700 RPM	
Repeticiones de cada prueba		1	
	Presión en el cilindro de carga radial	Presión	Carga
Prueba 1		2 bar	986.1 N
Prueba 2		3 bar	1479.14 N
Prueba 3		4 bar	1972.18 N
	Tiempo para fallo de rodamiento	Teórico	Real
Prueba 1		71 h	148 h
Prueba 2		21 h	26 h
Prueba 3		9 h	12 h 30 min

El protocolo para el cálculo de la vida útil del rodamiento sometido a carga radial se muestra en el Anexo D1, mediante el cual se determina la cantidad de muestras que se realizan. Este cálculo de la vida útil del rodamiento fue realizado por el Ing. Juan Fernando López M.Sc.

En el Anexo D2 se presenta las pruebas que se realizaron con vibraciones mecánicas y señales acústicas mientras que en el Anexo D3 se presenta las pruebas que se realizaron con termografía infrarroja, cada base de datos con sus respectivas nomenclaturas. En el Anexo D4 se presenta la información de cada una de las mediciones realizadas para la base de datos 2.

Los parámetros de ingreso de datos dentro de la cámara termográfica se resumen en la Tabla 2.18, los cuales fueron establecidos de acuerdo a las condiciones del sistema mecánico rotativo.

Tabla 2.18: Parámetros de calibración de la cámara termográfica.

Parámetro	Valor	
	C2-1 – C2-3	C2-4 – C2-9
Emisividad del material	0.94	0.49
Temperatura reflejada	20 °C	21 °C
Temperatura ambiente	20 °C	21 °C
Humedad relativa	60 %	63 %

La emisividad es la proporción de radiación térmica infrarroja emitida por una superficie y la energía irradiada debido a la diferencia de temperatura con el entorno.

La temperatura reflejada es la temperatura ambiente de los cuerpos cercanos y que se reflejan en la superficie que se está midiendo.

La temperatura ambiente es el valor que mide un termómetro en un punto cualquiera del ambiente.

La humedad relativa es la relación porcentual entre la humedad absoluta del aire y la humedad absoluta del aire saturado para una misma temperatura; indica la facilidad con que el aire evapora al agua. Para la ciudad de Cuenca se presenta la Tabla 2.19 que indica la humedad relativa promedio de acuerdo a cada mes del año [116].

Tabla 2.19: Humedad relativa en la ciudad de Cuenca. Fuente: [116]

Humedad relativa para la ciudad de Cuenca												
	MES											
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Máx.	83,74	84,60	85,66	86,30	85,46	85,02	83,24	83,06	81,48	81,32	84,18	83,34
Media	62,97	63,54	64,51	65,14	65,21	61,56	62,71	62,94	61,12	59,33	62,66	62,70
Mín.	42,20	42,48	43,36	43,98	44,96	38,10	42,18	42,82	40,76	37,34	41,14	42,06
Amplitud	41,54	42,12	42,30	42,32	40,50	46,92	41,06	40,24	40,72	43,98	43,04	41,28

### 2.5.2.2.2 Base de datos 2 – Grupo 2

Los datos recolectados incluyen señales de vibración mecánica, señales acústicas e imágenes térmicas. La posición de los acelerómetros uniaxial (1 y 2), el sensor acústico (3), el micrófono (4) y la cámara térmica (5) se observan en la Figura 2.22. La cámara termográfica centra su enfoque en el rodamiento sometido a carga axial y a este rodamiento se ha retirado el lubricante propio del mismo y se le ha introducido partículas de distintos materiales con el fin de acelerar el tiempo de vida útil del rodamiento.

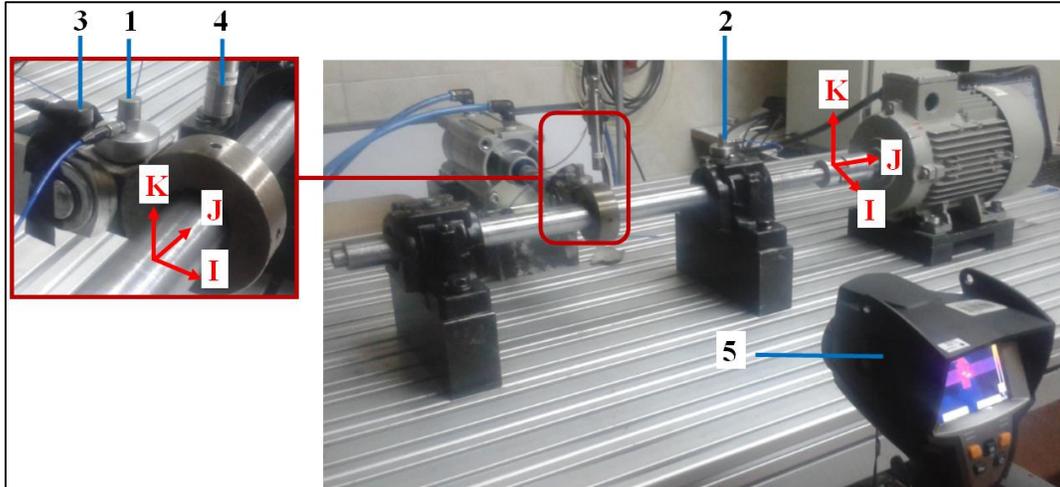


Figura 2.22: Configuración del sistema para base de datos 2. Pruebas 4, 5, 6, 7, 8 y 9.

En el sistema de eje de transmisión se observa en la Figura 2.19 e incluye los mismos tipos de rodamientos.

En segundo grupo de pruebas para la base de datos 2 contiene seis pruebas que incluyen condiciones de carga distintas. La cámara se calibra a los valores mostrados en la Tabla 2.18. Estas condiciones generales se resumen en la Tabla 2.20.

Tabla 2.20: Condiciones C2-4, C2-5, C2-6, C2-7, C2-8 y C2-9 para base de datos 2.

<b>Parámetro</b>		<b>Valor</b>	
Velocidad de adquisición - DAQ NATIONAL INSTRUMENTS		51000 Hz	
Velocidad de rotación		23 Hz	
Repeticiones de cada prueba		1	
	Presión en el cilindro de carga radial	Presión	Carga
Prueba 4		2 bar	986.1 N
Prueba 5		2 bar	986.1 N
Prueba 6		3 bar	1479.14 N
Prueba 7		3bar	1479.14 N
Prueba 8		1 bar	493.05 N
Prueba 9		1 bar	493.05 N
Prueba 4	Tiempo para fallo de rodamiento	45 min	
Prueba 5		24 min	
Prueba 6		2 h 8 min	
Prueba 7		46 min 40 seg	
Prueba 8		46 min 15 seg	
Prueba 9		4 h 56 min 35 seg	
Prueba 4	Periodicidad en la toma de las señales	5 min	
Prueba 5		1 min	
Prueba 6		1 min	
Prueba 7		25 seg	
Prueba 8		25 seg	
Prueba 9		25 seg	
Prueba 4	Material insertado en el rodamiento	partículas de acero de transmisión	
Prueba 5		abrasivo de carburo de silicio	
Prueba 6		abrasivo de carburo de silicio	
Prueba 7		abrasivo de carburo de silicio	
Prueba 8		abrasivo de carburo de silicio	
Prueba 9		abrasivo de carburo de silicio	

En el Anexo D2 se presenta las pruebas que se realizaron con vibraciones mecánicas y señales acústicas mientras que en el Anexo D3 se presenta las pruebas que se realizaron con termografía infrarroja, cada base de datos con sus respectivas nomenclaturas.

El resultado de la base de datos 2 da:

- Prueba 1: 297 muestras de señales de vibración mecánica y acústica por cada sensor y 297 imágenes térmicas.
- Prueba 2: 53 muestras de señales de vibración mecánica y acústica por cada sensor y 53 imágenes térmicas.
- Prueba 3: 26 muestras de señales de vibración mecánica y acústica por cada sensor y 26 imágenes térmicas.
- Prueba 4: 11 muestras de señales de vibración mecánica y acústica por cada sensor y 10 imágenes térmicas.
- Prueba 5: 23 muestras de señales de vibración mecánica y acústica por cada sensor y 23 imágenes térmicas.
- Prueba 6: 129 muestras de señales de vibración mecánica y acústica por cada sensor y 129 imágenes térmicas.
- Prueba 7: 113 muestras de señales de vibración mecánica y acústica por cada sensor y 113 imágenes térmicas.
- Prueba 8: 112 muestras de señales de vibración mecánica y acústica por cada sensor y 112 imágenes térmicas.
- Prueba 9: 713 muestras de señales de vibración mecánica y acústica por cada sensor y 713 imágenes térmicas.

#### **2.5.2.2.3 Cálculo de emisividad**

En la medición termográfica, el valor de la emisividad del material en el que se está realizando la medición es un parámetro fundamental del cual dependerá la correcta medición de los valores de temperatura. Para el sistema rotativo se determina el coeficiente de emisividad para el material de las chumaceras en donde van acoplados B7 y B8, también se realiza la medición del coeficiente de emisividad sobre el material del pistón en donde va acoplado B9.

El método utilizado para determinar la emisividad de los materiales se observa en [46], para la realización de la medición se debe esperar que el sistema se estabilice térmicamente. El tiempo de estabilización del sistema se lo realizó en 45 minutos.

Los valores de emisividad de los materiales de la chumacera y del pistón se presentan en la Tabla 2.21 y el cálculo de la emisividad del material de la chumacera y del pistón se presenta en el Anexo D5 y D6 respectivamente.

Tabla 2.21: Emisividad del sistema rotativo.

Material	Emisividad $\epsilon$
Chumacera	0.94
Pistón	0.49

### 2.5.2.3 Base de datos 3

Para la base de datos 3 se crea un nuevo protocolo para señales de vibración mecánicas en el eje de transmisión y la caja de engranajes con el objetivo de mejorar la disposición de la información al momento de ser requerida. El nuevo protocolo creado se presenta a continuación.

#### 2.5.2.3.1 Protocolo para la toma de señales de vibración mecánicas en el sistema de eje de transmisión.

El sistema de eje de transmisión se muestra en la Figura 2.23.

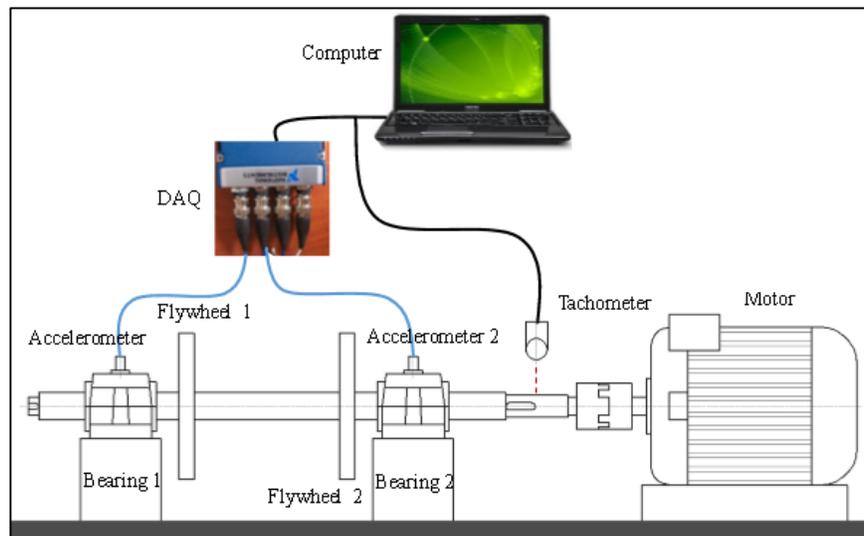


Figura 2.23: Sistema de eje de transmisión.

Se usa tres canales de adquisición de datos presentados en la Tabla 2.22.

Tabla 2.22: Canales de adquisición de datos.

Designación	Significado
A1	Acelerómetro uniaxial 1
A2	Acelerómetro uniaxial 2
T1	Tacómetro

Condiciones C3 para adquisición de datos se presentan en la Tabla 2.23.

Tabla 2.23: Condiciones C3 para base de datos 3.

Parámetro	Valor	
Velocidad de adquisición de acelerómetros	50000 Hz	
Velocidad de adquisición de tacómetro	1 pulso/rev.	
Tiempo de adquisición de cada prueba	20 s	
Frecuencia de rotación	F1	8 Hz
	F2	10 Hz
	F3	15 Hz
Carga	L1	Sin volante
	L2	1 volante
	L3	2 volantes
Repeticiones de cada prueba	5 (R1, R2, ... , R5)	

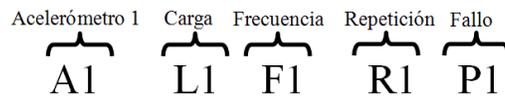
Los fallos severos construidos en los rodamientos de bolas a rótula SKF 1207 EKTN9/C3 para realizar esta base de datos son: fallo en la pista externa, fallo en la pista interna y fallo en el elemento rodante. Los planos de cada uno de los fallos severos construidos se presentan en el Anexo E1, E2, y E3 respectivamente. La designación y descripción de los fallos severos en rodamientos 1207 EKTN9/C3 se presenta en la Tabla 2.24.

Tabla 2.24: Fallos severos en Rodamiento 1207 EKTN9/C3.

Designación	Descripción	Imagen
H	Rodamiento en buenas condiciones	
I	Rodamiento con fallo en la pista interna <i>Una picadura en la bola de 1.8 mm de diámetro y cono de 120°</i>	

O	Rodamiento con fallo en la pista externa  <i>Una picadura en la bola de 2 mm de diámetro y cono de 120°</i>	
B	Rodamiento con fallo en el elemento rodante  <i>Una picadura en la bola de 2.4 mm de diámetro y cono de 120°</i>	

La nomenclatura para la designación del fallo en eje de transmisión es:



La base de datos 3 se ejecuta en 7 fallos en sistema rotativo del eje de transmisión combinando fallos severos en rodamientos bajo las condiciones C3. Los patrones de fallos se presentan en la Tabla 2.25, y todas las pruebas se presentan en la Tabla 2.26.

Tabla 2.25: Patrones de fallos.

<b>Fallo</b>	<b>Combinación</b>	<b>Descripción</b>
P1	H1H2	<i>“Healthy bearing 1, Healthy bearing 2”</i>
P2	I1 H2	<i>“Inner race fault bearing 1, Healthy bearing 2”</i>
P3	O1H2	<i>“Outer race fault bearing 1, Healthy bearing”</i>
P4	B1H2	<i>“Ball fault bearing 1, Healthy bearing 2”</i>
P5	I1O2	<i>“Inner race fault bearing 1, Outer race fault bearing 2”</i>
P6	I1B2	<i>“Inner race fault bearing 1, Ball fault bearing 2”</i>
P7	O1B2	<i>“Outer race fault bearing 1, Ball fault bearing 2”</i>

Tabla 2.26: Número total de pruebas.

<b>Canal</b>	<b>Carga</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>Repetición</b>	<b>Fallo</b>
A1	L1	F1	R1	P1
A2	L2	F2	R2	P2
	L3	F3	R3	P3
			R4	P4
			R5	P5
				P6
				P7

La configuración de fallos realizado para la base de datos 3 se presenta en el Anexo E4.

El resultado de la base de datos 3 da:

- 45 muestras de señales de vibración mecánica por cada sensor para un solo fallo dando un total de 315 muestras por sensor.

El Anexo E4 presenta las pruebas que se realizan para vibraciones mecánicas, cada base de datos con sus respectivas nomenclaturas.

### **2.5.3 Software de control y adquisición de base de datos para el banco de vibraciones**

El software para la captura de datos para la base de datos 1 es el mismo que fue utilizado en [106][107]. Se tiene canales de entradas de señal que se generan desde los distintos sensores, la tarjeta de adquisición marca NATIONAL INSTRUMENTS, mostrada en la Figura 2.6, tiene 4 canales de entrada que reciben señal de 1 sensor acústico (Canal 1), 2 acelerómetros uniaxiales (Canal 2 y Canal 3), y 1 micrófono (Canal 4); la tarjeta de adquisición marca ERBESSD INSTRUMENTS, mostrada en la Figura 2.11, tiene 2 canales de entrada que reciben señal de un tacómetro (Canal 5) y un acelerómetro triaxial (Canal 6).

Para la base de datos 2 se utilizan dos nuevo software de adquisición de datos, el primero con las dos tarjetas de adquisición manteniendo la misma designación de canales, se automatiza la cámara termográfica desde la unidad de mando eléctrico para capturar la imagen térmica al mismo tiempo que se está adquiriendo la señal de vibración mecánica y acústica; también se elimina el ruido eléctrico generado por el cargador de batería del computador portátil suprimiendo la carga 2 segundos antes de la captura de la señal y se activa la carga 2 segundos después.

El segundo software mostrado en la Figura 2.24 recoge señales solo de los 4 canales de la tarjeta marca NATIONAL INSTRUMENTS y para la cámara termográfica y la carga de batería de la computadora el proceso es el mismo descrito anteriormente. El software controla la frecuencia teórica de rotación, el tiempo de adquisición de la señal y los

intervalos de tiempo en los que se captaran las señales y crea un archivo en .mat con los datos captados por el acelerómetro 1, acelerómetro 2, el sensor acústico y el micrófono.

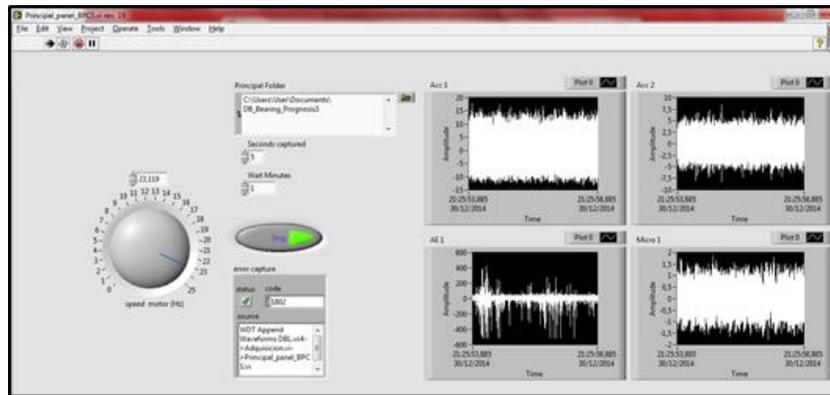


Figura 2.24: Software para adquisición de señales en base de datos 2. Pruebas 4, 5, 6, 7, 8, y 9.

Para la base de datos 3 se utiliza un nuevo software de adquisición de datos mostrado en la Figura 2.25, éste controla 2 canales de entrada de señal a la tarjeta de adquisición NATIONAL INSTRUMENTS para 2 acelerómetros uniaxiales. El software controla la frecuencia teórica de rotación y permite el ingreso de la frecuencia real de rotación. También permite asignar el tipo de carga, la frecuencia de rotación, el número de repetición de la prueba y el tipo de fallo, con esta asignación es creado el archivo en .mat con los datos captados por el acelerómetro 1 y acelerómetro 2.

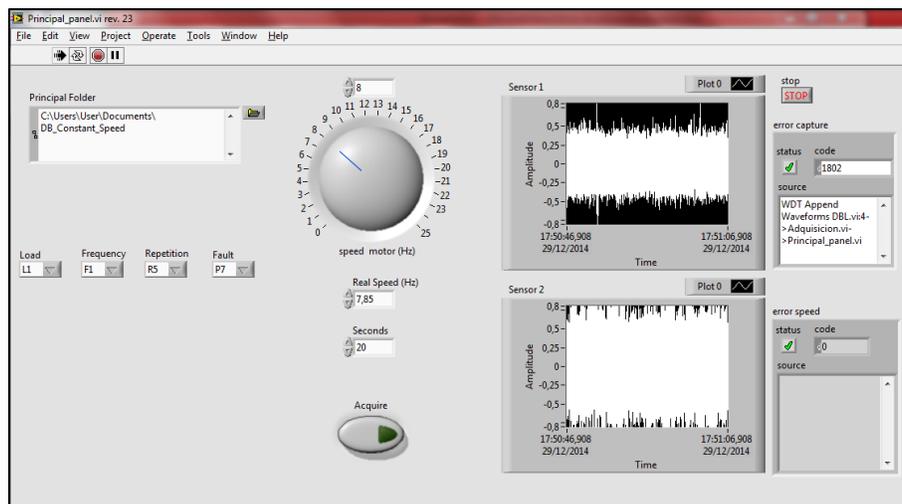


Figura 2.25: Software para adquisición de señales en base de datos 3.

#### **2.5.4 Almacenamiento de base de datos**

Las bases de datos que se generan en este proyecto son accesible a toda persona o institución que esté realizando investigaciones sobre señales de vibración mecánicas, señales acústicas e imágenes térmicas infrarrojas y están disponibles en los Laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.

# CAPÍTULO 3

### **3 GUÍA DE PRÁCTICAS**

En este capítulo se elabora la guía de práctica para detectar fallos en engranajes rectos mediante señales de vibraciones mecánicas y la guía de práctica para evaluar fallos en sistemas rotativos mediante imágenes termográficas. Estas guías de prácticas sirven para fortalecer los conocimientos teóricos en estudiantes de pregrado en las áreas de metrología, mantenimiento y materias afines, proyectando estas técnicas del mantenimiento predictivo en la industria.

#### **3.1 Descripción del sistema mecánico rotativo para la guía de prácticas**

El sistema mecánico rotativo con el que se cuenta en el laboratorio de Ingeniería Mecánica ha sido diseñado y construido con el fin de contribuir a la investigación en el campo de las vibraciones mecánicas, emisiones acústicas y termografía infrarroja.

La Figura 3.1 muestra los distintos equipos de análisis de las señales producidas por el sistema mecánico y que son utilizados para generar las guías de práctica.

Dentro del sistema mecánico rotativo se permite simular fallos en la caja de engranajes rectos o ejes de transmisión aplicando perturbaciones tales como: carga radial, carga axial, desalineación, desbalanceo y ruido acústico.

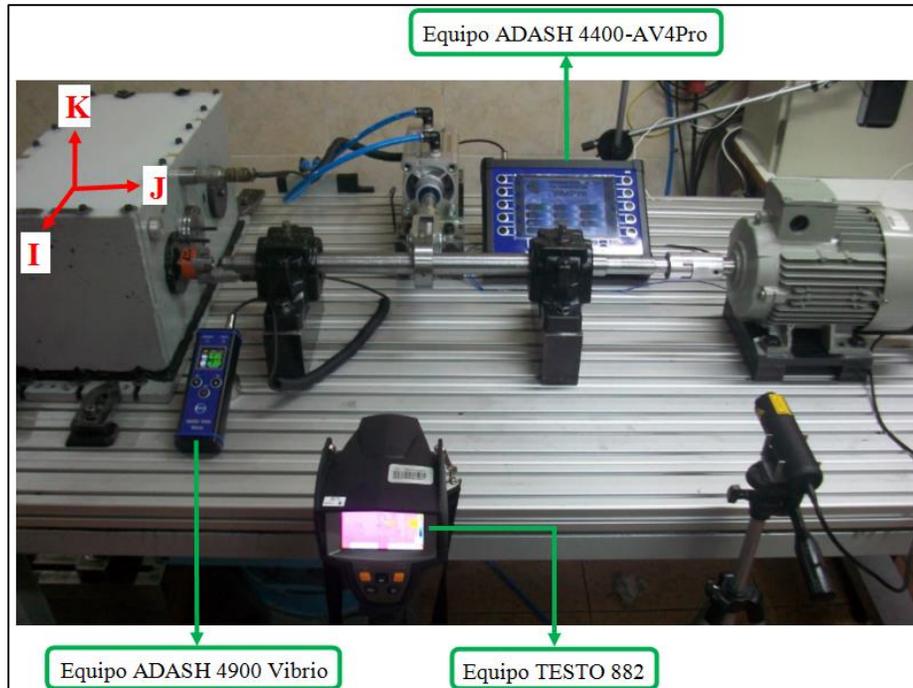


Figura 3.1: Equipos de medición de vibraciones y termografía para sistema mecánico rotativo.

### 3.2 Descripción del equipo “ADASH 4400-VA4Pro”

El equipo ADASH 4400-VA4Pro es un instrumento usado en medición y análisis de vibraciones mecánicas especialmente en sistema mecánicos rotativos, se utiliza dentro de los laboratorios de Ingeniería Mecánica y Automotriz de la Universidad. Las partes del equipo, el panel de control y los modos de medición del equipo se resumen en [106].

#### 3.2.1 Medidor de vibraciones ADASH 4900 Vibrio

El medidor de vibraciones ADASH 4900 Vibrio mide la vibración de una máquina de forma precisa, con esto se determina la condición, la fuente y el nivel de daño en caso de existir. El medidor es capaz de hacer todas las mediciones de diagnóstico de vibración básica requeridas, esto es: estado de los rodamientos, lubricación, fallos mecánicos (desalineación, desequilibrio, holguras mecánicas y resonancia).

El instrumento mostrado en la Figura 3.2 permite la conexión a audífonos para escuchar la señal de vibración, lo cual es útil para la caja de cambios y el diagnóstico de rodamiento. El instrumento está diseñado para ser un equipo técnico estándar para el personal de mantenimiento [117].



Figura 3.2: Equipo ADASH 4900-Vibrio III.

El equipo ADASH 4900-Vibrio utiliza acelerómetros piezoeléctricos tipo A 102-A1, mostrado en la Figura 3.3 (a), el montaje se lo puede realizar mediante base magnética ADASH A 1102, Figura 3.3 (b) o por tornillo y utiliza un conector Amphenol MS3106A10SL-4S, Figura 3.3 (c). La Figura 3.3 (d) muestra el acelerómetro listo para ser usado.

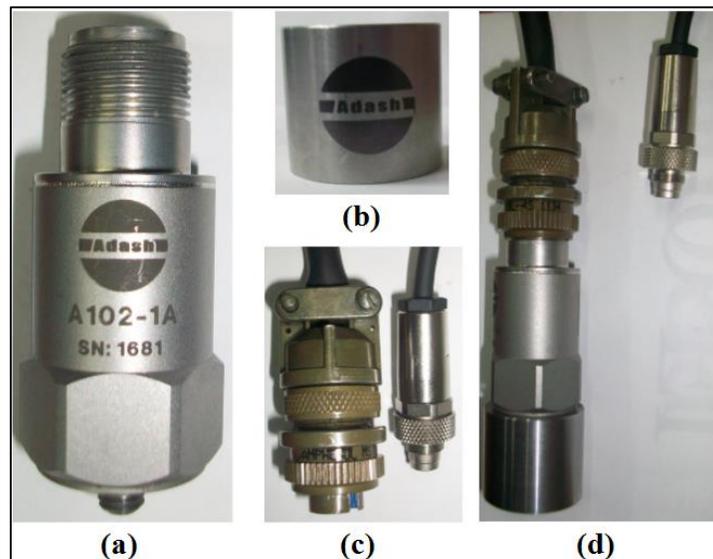
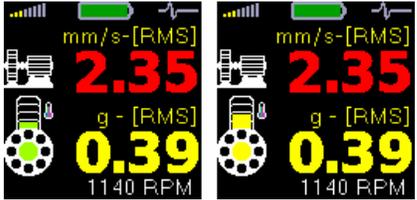
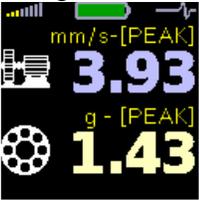
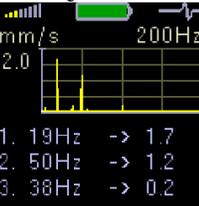


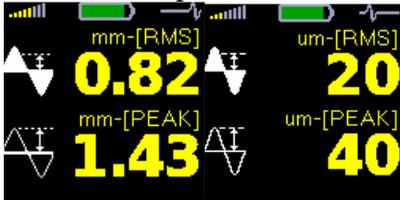
Figura 3.3: (a) Acelerómetro A 102-1A, (b) Base magnética A 1102, (c) Conector Amphenol MS3106A10SL-4S, (d) Acelerómetro armado para ser usado.

El panel de control de equipo cuenta con 3 botones para entrar a los modos de medición del equipo, una vez pulsado el botón de encendido/apagado [Ⓞ] se muestra el modo sin datos medidos y la medición comienza automáticamente, para cambiar el modo de medición se selecciona los botones [▼ ▲].

Los modos de medición del equipo se resumen en la Tabla 3.1

Tabla 3.1: Modos de medición del equipo ADASH 4900-Vibrio III. Fuente: [117]

Modo de medición	Función
<p>Valores RMS totales</p> 	<p>Mide valores de vibración RMS en los rangos:            10 Hz - 1000 Hz en mm/s            0,5 kHz - 16 kHz en g            El color de rodamiento se determina con respecto a la temperatura medida.            Valores de velocidad de giro de la máquina.            Utiliza colores, verde – amarillo – rojo, para determina la severidad de fallo y temperatura.</p>
<p>Valores globales PEAK</p> 	<p>Mide valores de vibración de los picos en los intervalos:            10 Hz - 1000 Hz en mm/s            0,5 kHz - 16 kHz en g</p>
<p>Espectro 200 Hz- detección de aflojamiento</p> 	<p>Analiza FFT de las vibraciones en el rango:            2 Hz - 200 Hz en mm/s RMS, con pantalla de 3 picos máximos encontrados.            Los picos se clasifican de acuerdo al tamaño de la amplitud de vibración.</p>
<p>Señal de tiempo para el diagnóstico rodamiento de rodillos</p> 	<p>La medición de la señal en el tiempo y las vibraciones en el rango:            0,5 kHz - 16 kHz en g            Muestra señal de tiempo real medido y el valor g de la Envolvente.</p>

<p>Vibraciones en las rangos de frecuencia</p> 	<p>Mide valores de vibración RMS en los rangos:  0,5 kHz - 16 kHz en g  1,5 kHz - 16 kHz en g  kHz - 16 kHz en g.  Útil en caja de cambios y rodamiento.</p>
<p>Sistema experto FASIT</p> 	<p>Mide los niveles de gravedad de los fallos de la máquina y una barra de temperatura en el lado derecho.</p>
<p>RMS general y desplazamiento pico</p> 	<p>Mide valores en el rango 2-200 Hz en mm o <math>\mu\text{m}</math>.</p>

### 3.3 Descripción del equipo “Testo 882”

El equipo Testo 882, mostrado en la Figura 3.4, fue adquirido por la Universidad para realizar pruebas de laboratorio en las carreras de Ingeniería Mecánica, Eléctrica, Electrónica, Industrial y Automotriz.



Figura 3.4: Cámara TESTO 882.

### **3.3.1 Cámara Termográfica Testo 882**

El equipo Testo 882 es una cámara termográfica de uso extremadamente versátil en los programas de inspección industrial. La configuración de la cámara será el punto de partida previo a la realización de una captura de imagen.

Antes de empezar a utilizar el equipo debe tener en cuenta recomendaciones generales como son:

- Utilizar el equipo dentro de las condiciones y parámetros especificados en los datos técnicos. Sin exponerlo a ningún tipo de fuerzas externas.
- No exponer la cámara hacia el sol u otras fuentes de radiación intensas mientras está realizando alguna medición, esto causará daños al detector de la cámara.
- Dar mantenimiento al equipo siguiendo los pasos que se prescriben en el manual de instrucciones del equipo.
- Utilizar las baterías recargables adecuadas a fin de evitar posibles daños causados por picos de corriente o sustancias químicas dispersas en el interior de la cámara.
- No exponer el equipo a fuertes impactos, agua, fuego o temperaturas superiores a 60 °C y evite guardarlo junto a objetos metálicos.
- Cargar la batería en la estación de carga recomendada [118].

### **3.3.2 Aplicaciones de la cámara termográfica Testo 882**

La cámara termográfica permite determinar la distribución de la temperatura en una superficie, sus aplicaciones más comunes son:

- Evaluación energética de edificios mediante la inspección a sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado.
- Mantenimiento preventivo mediante la inspección a sistemas eléctricos y/o maquinaria industrial.

- Supervisión de los procesos en una línea de producción para garantizar la calidad [118].

### **3.3.3 Características técnicas de la cámara termográfica Testo 882**

La cámara termográfica Testo 882 tiene un diseño ergonómico tipo pistola, entre las características principales de la cámara esta:

- Campo de visión de alta calidad de 32 ° x 23 °
- Detector de 320 x 240 pixeles
- Sensibilidad térmica <50 mK
- Rango de temperatura de -30°C hasta 350 °C
- Cámara digital integrada con iluminación por LEDs
- Enfoque motriz
- Reconocimiento automático del punto frío/caliente
- Modo Solar
- Filtro protector para la lente
- Tarjeta SD de 2 GB para aproximadamente 1000 imágenes
- Distancia mínima de enfoque de 20 cm

Las especificaciones técnicas completas de la cámara Testo 882 se muestra en el Anexo A3.

### **3.3.4 Panel de control de la cámara termográfica.**

El control básico de la cámara es mediante 8 botones que tienen por objetivo controlar y hacer uso de las características con las que cuenta el equipo. En la Figura 3.5 se observa el panel de control de la cámara y en la Tabla 3.2 se resume las funciones de cada uno de los botones.

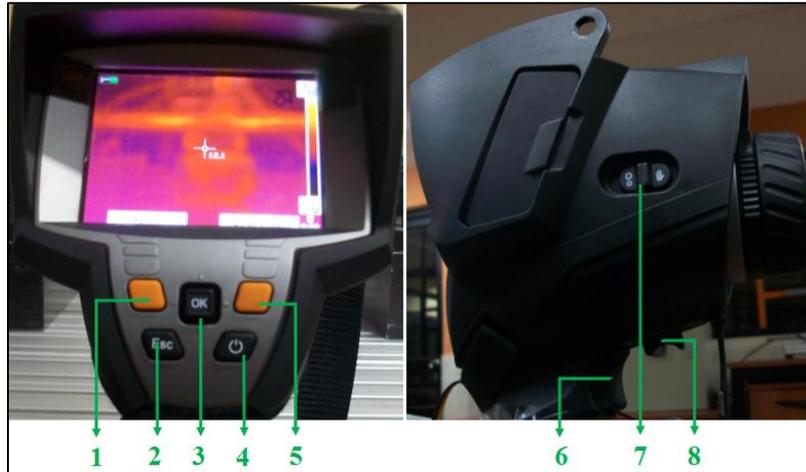


Figura 3.5: Disposición de botones en el panel de control del equipo Testo 882.

Tabla 3.2: Funciones de los botones del panel de control de la cámara termográfica. Fuente: [119]

Botón		Función
1		Botón de función, abre la función asignada al botón de selección rápida que se muestra en la parte inferior izquierda de la pantalla.
2		Botón [Esc], cancela una acción cualesquiera que se está por asignar en la cámara termográfica.
3		Botón [OK], al ser presionado abre el menú y sirve para confirmar la selección de alguna función. Al mover el botón OK hacia arriba, abajo, derecha e izquierda, este funciona como palanca de mando para seleccionar las funciones de la cámara termográfica.
4		Botón [⏻], enciende y apaga la cámara termográfica.
5		Botón de función, abre la función asignada al botón de selección rápida que se muestra en la parte inferior derecha de la pantalla.
6		Botón disparador, captura y guarda la imagen térmica.
7		Botón de Selección de modo de enfoque, realiza el enfoque automático o el control manual del enfoque de la imagen térmica.
8		Botón de Motor de control de enfoque, realiza el enfoque automático de la imagen térmica. Funciona cuando está activado el modo automático de enfoque.

### 3.3.5 Software testo IRSoft

El software testo IRSoft se utiliza para el análisis, procesamiento y archivo de las imágenes grabadas por la cámara termográfica Testo 882, también permite la presentación de informes por la clara presentación de los datos y permite realizar ajustes en la cámara termográfica. Como se observa en la Figura 3.6, el programa consta de tres partes:

a.- Herramienta de análisis de imagen

b.- Espacio de trabajo, se divide en 7 áreas:

1. Imagen térmica
2. Escala de temperatura
3. Histograma
4. Marcas de imagen térmica
5. Imagen real
6. Perfil
7. Observaciones

c.- Barra de estado



Figura 3.6: Software de análisis IRSoft.

### 3.4 Selección de fallos de caja de engranajes y sistema de eje de transmisión.

La disponibilidad de fallos en engranajes dentro de la caja reductora y la disponibilidad de rodamientos dentro del sistema de eje de transmisión se establecen por separado y cada uno de ellos servirá para elaborar las guías de práctica correspondientes.

El análisis de vibraciones mecánicas se realiza en la caja de engranes mediante el equipo ADASH 4400-AV4Pro y el equipo ADASH 4900 Vibrio; el análisis de imágenes térmicas se realiza en el sistema de eje de transmisión con el equipo Testo 882 y el software IRSoft.

#### 3.4.1 Fallos en caja de engranajes

Los fallos en engranajes rectos tienen la designación mostrada en la Figura 3.7, para ello se establecen las siguientes condiciones:

1. El fallo estará presente solo en un engranaje de la Etapa 1 (Z1 o Z2)
2. La carga del sistema estará aplicada en el eje 2 (S2).
3. Los rodamientos estarán en buenas condiciones.

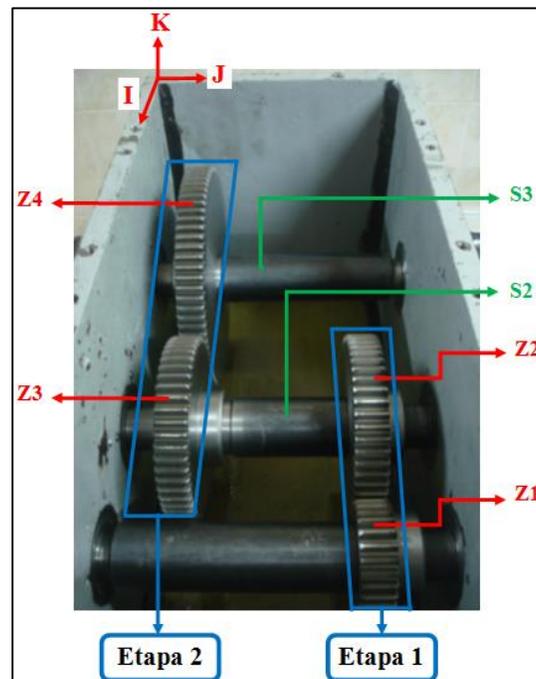


Figura 3.7: Designación de engranajes rectos en la caja reductora.

La designación numérica de los fallos para engranajes en la Etapa se presenta en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Designación numérica para realizar combinación de fallo - Caja reductora.

<b>Designación</b>		<b>Significado</b>
Z1		Rueda dentada 1
1	1_1	Sin fallo
2	2_1	Fallo por desgaste
3	3_1	Fallo por fatiga superficial
Z2		Rueda dentada 2
1	1_1	Sin fallo
2	2_2	Fallo por rayado
3	3_3	Fallo por rotura del diente al 100 %

Con esta designación establecida se proporciona 4 combinaciones de fallos en la Etapa 1, los mismos se presentan en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Combinación de fallos para la Etapa 1.

	<b>Z1</b>	<b>Z2</b>
Combinación 1	1	2
Combinación 2	1	3
Combinación 3	2	1
Combinación 4	3	1

### 3.4.2 Fallos en el sistema de eje de transmisión

Para el sistema de eje de transmisión, mostrado en la Figura 3.8, se encuentran fallos disponibles para los rodamientos, los cuales se presentan en [106].

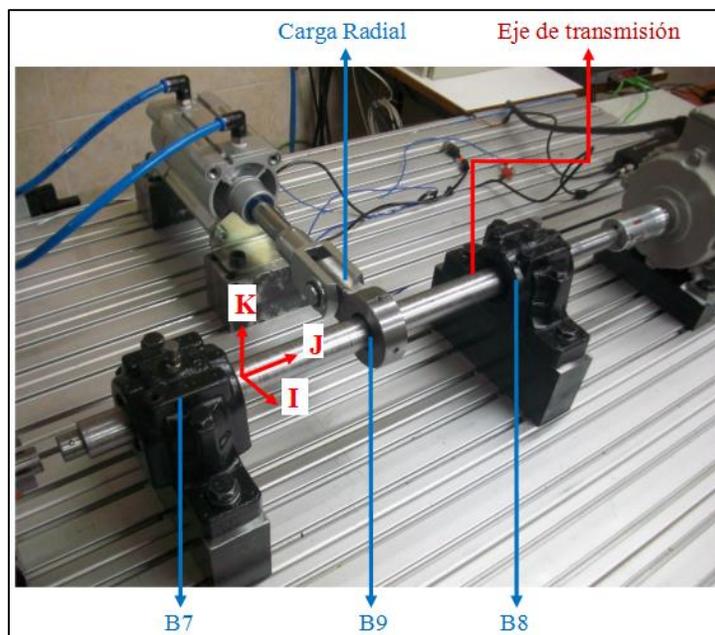


Figura 3.8: Designación de rodamientos en el sistema de eje de transmisión.

Se establece la designación numeración de los fallos como se muestran en la Tabla 3.5; este sistema trabaja con perturbación por carga radial.

Tabla 3.5: Designación numérica para combinación de fallo - Eje de transmisión. Adaptado de: [106]

Designación	Significado
B7 - B8	
1	Sin fallo
2	Fallo pista exterior
3	Fallo del elemento rodante
Carga Radial en B9	
1	Sin carga
2	Con carga radial

Con esta designación establecida se muestra de 8 combinaciones de fallos en el sistema de eje de transmisión que se observa en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Combinación de fallos para eje de transmisión.

	B7	B8	CARGA RADIAL en B9
Combinación 1	1	2	2
Combinación 2	1	3	2

Combinación 3	2	1	2
Combinación 4	3	1	2

### 3.5 Elaboración de la guía de prácticas

El proceso para la elaboración y validación de las guías de práctica ha sido adaptado de [106], el cual se presenta en la Figura 3.9, en donde se muestra el diagrama de flujo que indica paso a paso cada característica que se debe implementar para que el resultado cumpla con la finalidad de la guía de prácticas.

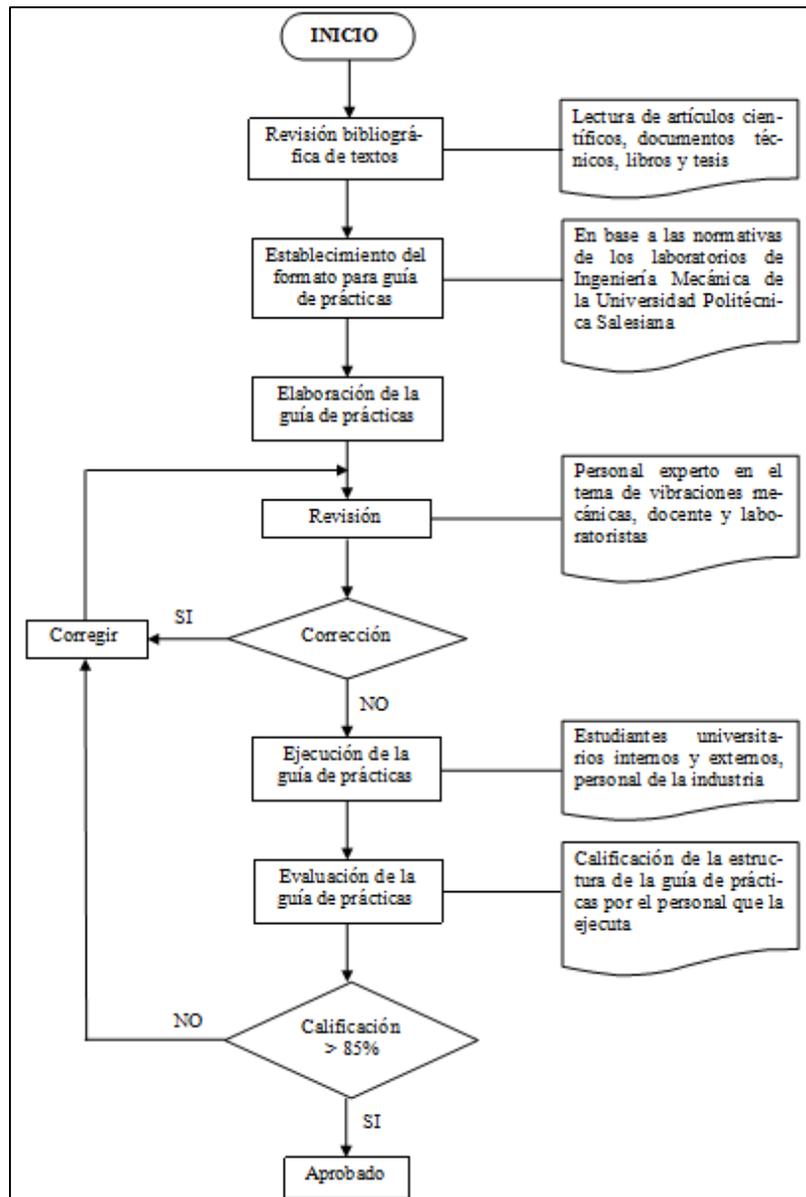


Figura 3.9: Proceso para la elaboración y validación de una guía de prácticas. Adaptado de: [106]

Cada paso establecido en el diagrama de flujo se indica a continuación:

### 3.5.1 Revisión de textos

La revisión de información sobre vibraciones mecánicas en caja de engranajes y termografía infrarroja en rodamientos ha sido el primer paso para la elaboración de la guía de prácticas, la Tabla 3.7 resume toda la información que ha sido útil:

Tabla 3.7: Información bibliográfica para realización de guías de prácticas.

<b>Vibraciones Mecánicas - Caja de Engranajes</b>		<b>Termografía Infrarroja – Rodamientos</b>	
Libros	[120][121][63][122][123]	Libros	[124][125][51][45]
Artículos científicos	[126][127]	Artículos científicos	[128][62]
Tesis	[129][130]	Tesis	[46][131]
Normas	[132][133]	Normas	[66][134]
Documentos	[117][135][136]	Documentos	[119][137][138]

### 3.5.2 Formato para guía de prácticas

El formato establecido en la guía de prácticas cumple con las especificaciones mostradas en [106], la estructura cumple con cada uno de los siguientes puntos:

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

- Glosario

### **3.5.3 Guías de Practicas**

#### **3.5.3.1 Guía de prácticas para detectar fallos en engranajes rectos mediante señales de vibraciones mecánicas.**

Las guías de prácticas elaboradas para detectar fallos en engranajes rectos se han planteado con el objetivo de que el estudiante complemente sus conocimientos teóricos mediante la práctica en el uso del equipo de análisis de vibraciones y el equipo medidor de vibraciones llegando al análisis del espectro de vibraciones para diferentes fallos aplicados en la caja de engranajes rectos.

La práctica planteada para detectar fallos en engranajes rectos es la siguiente:

- Practica 1- **DETECCIÓN DE FALLOS EN CAJA DE ENGRANAJES MEDIANTE SEÑALES DE VIBRACIONES MECÁNICAS**, tiene por objetivo el análisis del espectro de vibración generado al introducir un fallo dentro de la caja de engranajes rectos. La guía de práctica se presenta en el Anexo F1.

#### **3.5.3.2 Guía de prácticas para evaluar fallos en sistemas rotativos mediante imágenes termográficas infrarrojas.**

La guía de práctica elaborada para evaluar fallos en sistemas rotativos mediante termografía se ha planteado con el fin de complementar el estudio teórico de la transferencia de calor por radiación aplicado a ejes de transmisión, rodamientos y chumaceras.

Las prácticas planteadas para evaluar fallos en sistemas rotativos son las siguientes:

- Practica 2.- **USO DE LA CÁMARA TERMOGRÁFICA TESTO 882– TERMOGRAFÍA INFRARROJA**, tiene por objetivo el uso y configuración del equipo Testo 882 aplicado a sistemas mecánicos o eléctricos en funcionamiento. La guía de práctica se presenta en el Anexo F2.

- Practica 3.- **EVALUACIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS – TERMOGRAFÍA INFRARROJA**, tiene por objetivo analizar la imagen termográfica generado al introducir un fallo en rodamiento dentro del sistema rotativo. La guía de práctica se presenta en el Anexo F3.

#### **3.5.4 Revisión de las guías de práctica**

La revisión de las guías fueron realizadas por 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”, Juan Fernando López M.Sc experto en el tema de “Análisis de vibraciones” y René Vinicio Sánchez “Director de tesis” quienes aportaron con sugerencias y recomendaciones en la parte narrativa y estructural, tales como:

- Corrección en la presentación de la práctica
- Corrección en los objetivos
- Corrección de la exposición de la guía de prácticas
- Corrección en el procedimiento de la guía de prácticas

#### **3.5.5 Ejecución de la práctica**

Las guías de prácticas fueron ejecutadas por:

- 13 estudiantes de Ingeniería Mecánica e Ingeniería Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana que ejecutaron las Prácticas 1, 2 y 3.
- 9 estudiantes de Ingeniería Industrial de la Universidad Estatal de Cuenca que ejecutaron las Prácticas 1, 2 y 3.
- 22 estudiantes que cursan la asignatura de Mantenimiento de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad que ejecutaron la Práctica 1.

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

- Corregir la estructura del procedimiento de la guía de prácticas
- Agregar imágenes para que el procedimiento sea claro y preciso
- Tener una mejor resolución en algunas imágenes
- Agregar pasos necesarios en el procedimiento de la guía de prácticas debido a que la realizan personas que no conocen por completo sobre el tema

### **3.6 Validación de las guías de prácticas**

La evaluación de las guías de prácticas se realizó en el laboratorio de máquinas herramientas y el laboratorio de vibraciones mecánicas usando los equipos correspondientes.

#### **3.6.1 Evaluación de la guía de prácticas**

El formato para evaluar las guías de prácticas, ejecutadas por los estudiantes, analiza ciertos puntos como son:

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

La “Ficha de valoración de guías de práctica” se muestra en [106], en la cual se presenta una evaluación de 21 puntos como máxima, para la aprobación de la guía de práctica como válida se debe obtener una calificación superior al 85% de los puntos.

La evaluación realizada por cada estudiante a las guías de prácticas se presenta en el Anexo F4.

### 3.6.2 Resultados de la evaluación de las guías de prácticas

Los resultados producto de la evaluación a cada uno de los estudiantes y personal de la industria, luego de la ejecución de cada una de las prácticas, se muestra en tres grupos a continuación:

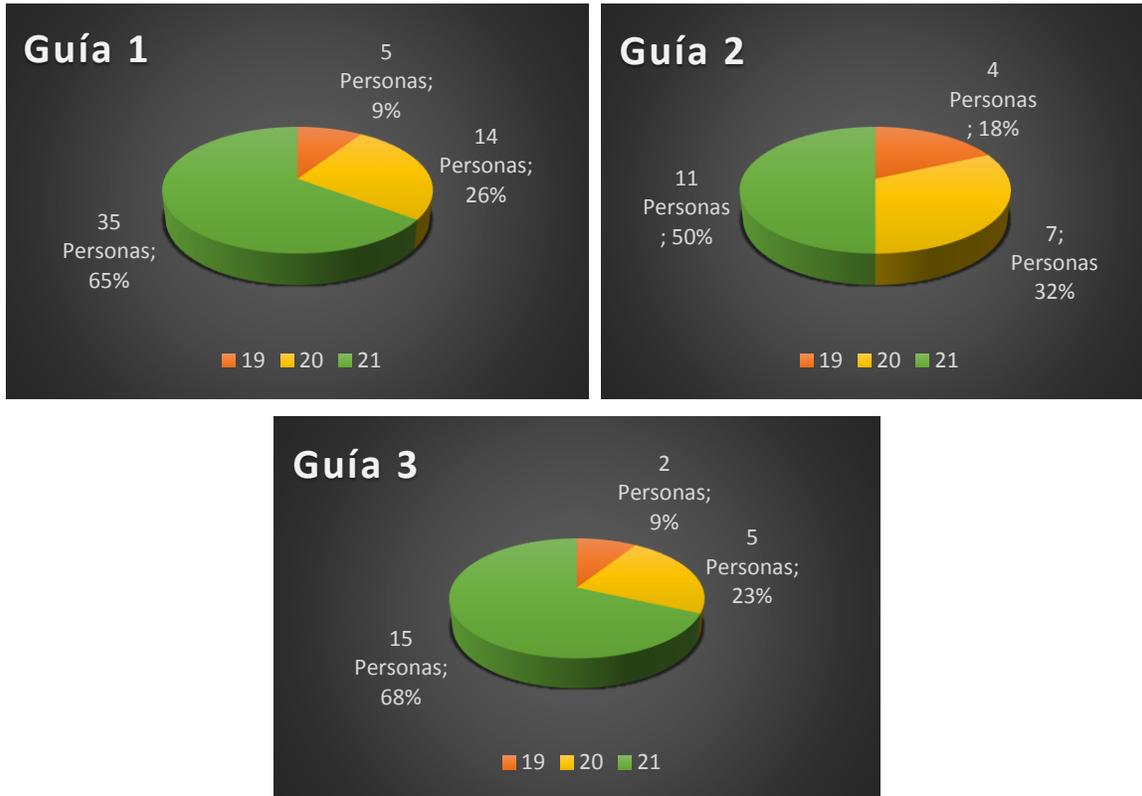


Figura 3.10: Resultados de la validación de las guías de prácticas.

Las calificación mínima recibida es de 19/21 puntos que equivale a 90,48% con lo cual se supera el valor mínimo establecido al inicio de la elaboración de las guías de prácticas que es de 85%.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

- El aporte generado en este proyecto permite conocer las ventajas y limitaciones de la emisión acústica y la termografía infrarroja desarrolladas dentro de las técnicas para el monitoreo de la condición y el diagnóstico de fallos, esto permite complementar el estudio sobre vibraciones mecánicas aportando con los conocimientos teóricos básicos que involucran la termografía y la emisión acústica dentro de un sistema mecánico rotativo.
- En este proyecto se presentan 3 bases de datos en donde: la primera base de datos es el complemento al estudio desarrollado sobre vibraciones mecánicas realizado dentro del grupo de investigación previo a este proyecto y se aporta con señales de emisión acústicas, la segunda base de datos proporciona pruebas para determinar la vida útil del rodamiento NTN 6906LLU sometido a carga radial aportando con señales de vibraciones mecánicas, emisión acústica e imágenes termográficas y la tercera base de datos proporciona información sobre fallos severos en rodamientos aportando señales de vibración mecánica; estas bases de datos representan un aporte a la investigación y pueden ser utilizadas para el entrenamiento de sistemas inteligentes de detección de fallos y/o para desarrollar estudios sobre el diagnóstico y pronóstico de fallos.
- Con el uso de un nuevo protocolo para designar el tipo de prueba realizado se establece una nueva nomenclatura que facilita su entendimiento, acorta el nombre de la muestra y facilita la accesibilidad a sus datos con lo cual se mejora la disponibilidad de los datos hacia las personas que requieran estas señales de vibración mecánicas.
- Con las guías de prácticas establecidas en este proyecto sobre el análisis de señales de vibraciones mecánicas usando los equipos de medición de vibraciones y sobre la evaluación de imágenes térmicas infrarrojas captadas por la cámara termográfica se consiguió ampliar el conocimiento en el manejo y funcionamiento de los equipos, en el análisis de espectros y en el procesamiento de imágenes térmicas en

estudiante quienes están en la capacidad de determinar el estado de una caja de engranajes o de un sistema de eje de transmisión y detectar fallos en engranajes rectos y rodamientos con la ayuda de las funciones de los medidores de vibraciones Adash VA4Pro y Adash 4900 o la cámara Testo 882.

## **RECOMENDACIONES**

- Para futuras pruebas en donde se utilice carga radial sobre el eje de transmisión se debe construir un nuevo eje utilizando aceros especiales o aceros bonificados tales como el Assab 705 o Assab 718 que presentan mejores características como mayor resistencia al desgaste y alta dureza, 310 HB de dureza promedio, para evitar la deformación y flexión del eje, de esta manera se evita un fallo por la desalineación que puede ocurrir entre el eje y el motor, también se evita el desgaste del eje.
- Utilizar materiales aislantes de ruido eléctrico dentro del montaje de los acelerómetros para garantizar que los datos recolectados por los acelerómetros estén libres del ruido eléctrico o evitar el ruido en un alto porcentaje.
- Adquirir equipo de medición de emisión acústica y tarjeta de adquisición de datos respectiva que ayuden en la recolección de señales acústicas y que sean propias de los laboratorios de la Universidad.
- Utilizar las guías de práctica, presentadas en este proyecto, en la formación del conocimiento de estudiantes de pregrado y personal de la industria que se desempeñe dentro del mantenimiento.

## **TRABAJOS FUTUROS**

- Realizar una base de datos para caja de engranajes sobre señales de velocidad angular instantánea en el eje de transmisión de entrada de movimiento mediante un encoder que genera un número fijo de pulsos eléctricos y una tarjeta de adquisición que genera un pulso de reloj de alta frecuencia.
- Generar la disponibilidad de la base de datos vía on-line de acuerdo al nuevo protocolo establecido con la finalidad de hacer más fácil y manejable los datos a las personas que quieran disponer de ellos.
- Diseñar o estructurar el laboratorio de manera que se pueda obtener una cámara semi-anechoica para evitar que señales de emisión acústica ajenas al sistema sean captadas por el micrófono.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] M. A. ELFORJANI, «Condition Monitoring of Slow Speed Rotating Machinery Using Acoustic Emission Technology», Thesis or dissertation, Cranfield University, 2010.
- [2] B. A. CARDONA NOREÑA, «Desarrollo de un sistema de adquisición y medición simultáneo de señales de máquinas rotativas empleando emisión acústica, vibraciones mecánicas y velocidad», masters, Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, 2013.
- [3] M. MÖSER, *Engineering acoustics: an introduction to noise control*, 2nd ed. Dordrecht ; New York: Springer, 2009.
- [4] C. A. POO BARRERA, «Infrasonidos y ondas acústicas de gravedad», Thesis, Universidad Austral de Chile, Valdivia - Chile, 2002.
- [5] «Ultrasonidos e Infrasonidos - Las ondas y el sonido», *Efectos sonoros*. [En línea]. Disponible en: <https://sites.google.com/site/lasondasyelsonido/efectos-sonoros/ultrasonidos-e-infrasonidos>. [Accedido: 07-jul-2014].
- [6] J. P. GUILLEN PEÑARRETA, «Ultrasonido». [En línea]. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos90/ultrasonido-frecuencia/ultrasonido-frecuencia.shtml>. [Accedido: 14-nov-2014].
- [7] FISIC, «Características del Sonido», *Física*. [En línea]. Disponible en: <http://www.fisic.ch/cursos/primer-medio/caracter%C3%ADsticas-del-sonido/>. [Accedido: 14-jul-2014].
- [8] A. SIDOROVA, «Aplicación del método de la emisión acústica en la monitorización de las estructuras de hormigón», Master thesis, Universidad Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2011.
- [9] M. A. NARVÁEZ MEJÍA y S. M. GÓMEZ PROAÑO, «Elaboración de un manual de procedimientos para la medición de parámetros acústicos y vibraciones mecánicas», Escuela Politècnica Nacional, Quito - Ecuador, 2008.
- [10] D. X. MONTALVO ECHEVERRÍA y F. E. GALLEGOS GUZMÁN, «Diseño de una cámara anecoica y una cámara reverberante», Escuela Politècnica Nacional, Quito - Ecuador, 2008.
- [11] R. F. BARRON, *Industrial noise control and acoustics*. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [12] LABORATORIO DE INGENIERÍA SÍSMICA, «Tipos de Ondas Sísmicas». [En línea]. Disponible en: <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=7>. [Accedido: 07-jul-2014].
- [13] M. R. KAPHLE, A. TAN, D. THAMBIRATNAM, y T. H. T. CHAN, «Review: acoustic emission technique - opportunities, challenges and current work at QUT», en *Faculty of Built Environment and Engineering; School of Engineering Systems; School of Urban Development*, Queensland University of Technology, Brisbane, Qld, 2011.
- [14] D. ZURITA MILLÁN, «Mechanical fault detection by means of AE analysis», mar. 2013.
- [15] A. C. ISBERT, *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Universidad Politècnica de Catalunya, 1998.

- [16] M. P. NORTON y D. G. KARCZUB, *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*. Cambridge University Press, 2003.
- [17] D. A. BIES, *Engineering noise control: theory and practice*, 4th ed. London ; New York: Spon Press/Taylor & Francis, 2009.
- [18] ASOCIACIÓN CHILENA DE SEGURIDAD, «Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo». 15-sep-1999.
- [19] INASEL, «Tipos de ruidos», *Acustipedia*. [En línea]. Disponible en: <http://www.inasel.com/Acustipedia/Conceptos-generales/Tipos-de-ruidos.html>. [Accedido: 09-jul-2014].
- [20] F. SEGUÉS, «Conceptos básicos de ruido ambiental», 14-mar-2007. [En línea]. Disponible en: <http://infodigital.opandalucia.es/bvial/handle/10326/720>. [Accedido: 09-jul-2014].
- [21] C. M. HARRIS y A. G. PIERSOL, Eds., *Harris' shock and vibration handbook*, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2002.
- [22] ISO, «ISO 22096:2007 - Condition monitoring and diagnostics of machines -- Acoustic emission». 2007.
- [23] 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 San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2004.
- [24] F. C. GÓMEZ DE LEÓN, *Tecnología del mantenimiento industrial*. Editum, 1998.
- [25] C. B. BOARD, «Stress wave analysis of turbine engine faults», en *2000 IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2000, vol. 6, pp. 79-93 vol.6.
- [26] «MISTRAS NDT Products & Systems - Acoustic Emission Technology, AE, AE Technology, NDT Inspection, Nondestructive Test». [En línea]. Disponible en: <http://www.mistrasgroup.com/products/technologies/acousticemission.aspx>. [Accedido: 27-may-2014].
- [27] J. BOHSE, «Acoustic Emission.», en *Handbook of technical diagnostics - Fundamentals and Application to Structures and Systems*, New York: Springer, 2012, pp. 137 - 160.
- [28] M. D. L. V. PIEDRA DIAZ y R. A. ARMAS CARDONA, «Las vibraciones mecánicas y su aplicación al mantenimiento predictivo», Centro de Altos Estudios Gerenciales, Caracas -Venezuela, 2001.
- [29] D. MBA, «Development of Acoustic Emission Technology for Condition Monitoring and Diagnosis of Rotating Machines: Bearings, Pumps, Gearboxes, Engines, and Rotating Structures», *Shock Vib. Dig.*, vol. 38, n.º 1, pp. 3-16, ene. 2006.
- [30] «MISTRAS NDT Products & Systems - Acoustic Emission, Acoustic Emission Sensors, AE Sensors». [En línea]. Disponible en: <http://www.mistrasgroup.com/products/solutions/acousticemission/sensors/>. [Accedido: 26-may-2014].
- [31] L. A. ZABALA BARRAGÁN, «Diseño e Implementación de Prototipo Robot Publicitario para la Escuela de Ingeniería Electrónica», Thesis, 2011.
- [32] D. ROCHA HERNANDEZ, «Sonómetro Digital», Thesis, 2013.
- [33] E. E. FRANCO G., «Tecnología Ultrasónica y sus aplicaciones en la industria», Colombia.

- [34] OLYMPUS, «Ultrasonic Transducers». Panametrics, Massachusetts - USA.
- [35] A. ENFORCER, «Micrófono». [En línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/73014596/Definicion-de-microfono>. [Accedido: 14-nov-2014].
- [36] NATIONAL INSTRUMENTS «Integrated Electronic Piezoelectric Excitation (IEPE) ». [En línea]. Disponible en: <http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/370466V-01/mxdevconsid/iepe/>. [Accedido: 14-nov-2014].
- [37] S. VANLANDUIT, «Acoustics», Thesis, Vrije Universiteit Brussel.
- [38] P. RAHARJO, «An Investigation of Surface Vibration, Airbourne Sound and Acoustic Emission Characteristics of a Journal Bearing for Early Fault Detection and Diagnosis», doctoral, University of Huddersfield, 2013.
- [39] G. WHITE, *Introducción al Análisis de Vibraciones*. Azima DLI.
- [40] O. CARDONA MORALES, «Análisis tiempo-frecuencia de señales de vibraciones mecánicas para la detección de fallos en máquinas rotativas», masters, Universidad Nacional de Colombia - Sede Manizales, 2011.
- [41] F. P. INCROPERA y D. P. DEWITT, *Fundamentos de transferencia de calor*. Pearson Educación, 1999.
- [42] J. A. SOBRINO, *Teledetección*. Universitat de València, 2001.
- [43] «Espectro electromagnético». [En línea]. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_electromagn%C3%A9tico](http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico). [Accedido: 13-nov-2014].
- [44] R. V. PRAKASH, *Infrared thermography*. Rijeka: InTech, 2012.
- [45] C. MEOLA, *Infrared thermography recent advances and future trends*. Oak Park, Ill.: Bentham Science, 2012.
- [46] D. A. BECERRA BERMEJO y J. B. MOLINA LEÓN, «Caracterización de fallos en la ignición de un motor de combustión interna alternativo Diésel, mediante el uso de termografía infrarroja», Thesis, 2014.
- [47] TERMOGRAFICS, «Termografía aplicada al mantenimiento predictivo de instalaciones y equipos», *La Emisividad*, 19-sep-2011. [En línea]. Disponible en: <http://www.latermografia.com/2011/la-emisividad>. [Accedido: 10-jun-2014].
- [48] S. BAGAVATHIAPPAN, B. B. LAHIRI, T. SARAVANAN, J. PHILIP, y T. JAYAKUMAR, «Infrared thermography for condition monitoring – A review», *Infrared Phys. Technol.*, vol. 60, pp. 35-55, sep. 2013.
- [49] W. OLARTE, M. BOTERO, y B. CAÑÓN, «Técnicas de Mantenimiento Predictivo Utilizadas en la Industria», *Sci. Tech.*, vol. 16, n.º 45, pp. 223-226, ago. 2010.
- [50] B. GRIFFITH, D. TÜRLER, y H. GOUDEY, «Infrared Thermographic Systems. A Review of IR Imagers and Their Use». Chief, 27-jul-2001.
- [51] C. IBARRA CASTANEDO y X. P. MALDAGUE, «Infrared Thermography», en *Handbook of technical diagnostics - Fundamentals and Application to Structures and Systems*, New York: Springer, 2012.
- [52] M. MELO CAMINO, «Mantenimiento Predictivo y Diagnosis de Fallos».
- [53] A. M. YOUNUS y B.-S. YANG, «Intelligent fault diagnosis of rotating machinery using infrared thermal image», *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, n.º 2, pp. 2082-2091, feb. 2012.

- [54] D. L. BALAGEAS, «Termografía infrarroja: una técnica multifacética para la Evaluación No Destructiva (END)», en *IV Conferencia Panamericana de END, Buenos Aires, 2007*.
- [55] «PÍXEL - Definición». [En línea]. Disponible en: <http://www.gsmspain.com/glosario/?palabra=P%CDXEL>. [Accedido: 20-ago-2014].
- [56] L. A. MORALES-HERNANDEZ, R. A. OSORNIO RIOS, J. P. BENITEZ RANGEL, A. GARCIA PEREZ, y R. de J. ROMERO TRONCOSO, «Fault detection in induction motors and the impact on the kinematic chain through thermographic analysis», *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 114, pp. 1-9, sep. 2014.
- [57] S. GARCÍA GARRIDO, *Mantenimiento Predictivo - Técnicas de Mantenimiento Condicional Basadas en la Medición de Variable Físicas*, vol. 3. RENOVETEC, 2009.
- [58] H. BENÍTEZ, H. LOAIZA, B. VACCA, y J. ACEVEDO, «Sistema de Visión Artificial para el Procesamiento y Análisis de Imágenes Infrarrojas», *Ing. Desarro.*, 2007.
- [59] S. F. RAY, *Applied photographic optics lenses and optical systems for photography, film, video and electronic imaging*, 3rd ed. Oxford; Auckland; Boston [etc]: Focal Press, 2002.
- [60] V. T. TRAN, B.-S. YANG, F. GU, y A. BALL, «Thermal image enhancement using bi-dimensional empirical mode decomposition in combination with relevance vector machine for rotating machinery fault diagnosis», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 38, n.º 2, pp. 601-614, jul. 2013.
- [61] H. CZICHOS, «Scope of Technical Diagnostics», en *Handbook of technical diagnostics*, New York: Springer, 2012.
- [62] A. M. YOUNUS, A. WIDODO, y B.-S. YANG, «Evaluation of thermography image data for machine fault diagnosis», *Nondestruct. Test. Eval.*, vol. 25, n.º 3, pp. 231-247, 2010.
- [63] SKF Reliability Maintenance Institute, *Análisis de Vibraciones Categoría 2: ISO 18436 W1203*. SKF, 2010.
- [64] D. P. SAAVEDRA GONZÁLEZ y C. MOLINA VICUÑA, «La Evolución y Perpectivas del Mantenimiento Predictivo Proactivo en la Industria», presentado en VI Congreso Panamericano de Ingeniería de Mantenimiento, México D.F., 2004.
- [65] P. J. QUEVEDO, «Curso sobre Detección, Diagnóstico de Fallos y Control Tolerante», Universitat Politècnica de Valencia, sep-2008.
- [66] ISO, «ISO 13372:2012 - Condition monitoring and diagnostics of machines -- Vocabulary». 2012.
- [67] S. BAGAVATHIAPPAN, T. SARAVANAN, N. P. GEORGE, J. PHILIP, T. JAYAKUMAR, y B. RAJ, «Condition monitoring of exhaust system blowers using infrared thermography», *Insight - Non-Destr. Test. Cond. Monit.*, vol. 50, n.º 9, pp. 512-515, oct. 2008.
- [68] T. H. LOUTAS, G. SOTIRIADES, I. KALAITZOGLOU, y V. KOSTOPOULOS, «Condition monitoring of a single-stage gearbox with artificially induced gear cracks utilizing on-line vibration and acoustic emission measurements», *Appl. Acoust.*, vol. 70, n.º 9, pp. 1148-1159, sep. 2009.

- [69] W. WANG, A. VINCO, N. PAVLOV, N. WANG, M. HAYES, y C. O'MATHUNA, «A rotating machine acoustic emission monitoring system powered by multi-source energy harvester», 2013, p. 5.
- [70] A. S. SAIT y Y. I. SHARAF ELDEEN, «A Review of Gearbox Condition Monitoring Based on vibration Analysis Techniques Diagnostics and Prognostics», en *Rotating Machinery, Structural Health Monitoring, Shock and Vibration*, vol. 5, T. Proulx, Ed. Springer New York, 2011, pp. 307-324.
- [71] N. R. SAKTHIVEL, V. SUGUMARAN, y S. BABUDEVASENAPATI, «Vibration based fault diagnosis of monoblock centrifugal pump using decision tree», *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, n.º 6, pp. 4040-4049, jun. 2010.
- [72] E. BECHCOEFER, Y. QU, J. ZHU, y D. HE, «Signal Processing Techniques to Improve an Acoustic Emissions Sensor», abr. 2014.
- [73] Y. QU, D. HE, J. YOON, B. VAN HECKE, E. BECHHOEFER, y J. ZHU, «Gearbox Tooth Cut Fault Diagnostics Using Acoustic Emission and Vibration Sensors - A Comparative Study», *Sensors*, vol. 14, n.º 1, pp. 1372-1393, ene. 2014.
- [74] A. REZAEI, A. DADOUCHE, V. WICKRAMASINGHE, y W. DMOCHOWSKI, «A Comparison Study Between Acoustic Sensors for Bearing Fault Detection Under Different Speed and Load Using a Variety of Signal Processing Techniques», *Tribol. Trans.*, vol. 54, n.º 2, pp. 179-186, ene. 2011.
- [75] Y. QU, E. BECHHOEFER, D. HE, y J. ZHU, «A new acoustic emission sensor», Chicago.
- [76] L. G. KAMDE, S. A. PATIL, y A. P. U. GUJAR, «Identification of Acoustic Emission Source and Comparative Study on the Diagnosis of a Spur Gearbox», 2012.
- [77] C. K. TAN y D. MBA, «Identifying seeded defects in gearboxes with Acoustic Emission; Limitations», en *The 26 th European conference on Acoustic Emission testing, EWGAE*, 2004, pp. 567-578.
- [78] C. K. TAN y D. MBA, «Limitation of Acoustic Emission for Identifying Seeded Defects in Gearboxes», *J. Nondestruct. Eval.*, vol. 24, n.º 1, pp. 11-28, mar. 2005.
- [79] C. K. TAN y D. MBA, «The source of Acoustic Emission during meshing of spur gears», en *The 26 th European conference on Acoustic Emission testing, EWGAE*, 2004, pp. 559-565.
- [80] A. M. AL-GHAMD y D. MBA, «A comparative experimental study on the use of acoustic emission and vibration analysis for bearing defect identification and estimation of defect size», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 20, n.º 7, pp. 1537-1571, oct. 2006.
- [81] P. VEČEŘ, M. KREIDL, y R. ŠMÍD, «Condition Indicators for Gearbox Condition Monitoring Systems», *Acta Polytech.*, vol. 45, n.º 6, ene. 2005.
- [82] D. HE, P. MANON, R. LI, S. SEÇKINER, y E. BECHHOEFER, «Gear Fault Location Detection for Split Torque Gearbox using AE Sensors», *Annu. Conf. Progn. Health Manag. Soc.*, p. 9, 2010.
- [83] V. T. DO, P. MAYANK, T. PATEL, y M. J. ZUO, «Literature Survey on Acoustic Data Analysis for Fault Detection and Diagnosis of Gearbox Systems», Technical Report, Department of Mechanical Engineering, University of Alberta, 2010.

- [84] A. BENAVENT CLIMENT, A. GALLEGO, y J. M. VICO, «An acoustic emission energy index for damage evaluation of reinforced concrete slabs under seismic loads», *Struct. Health Monit.*, vol. 11, n.º 1, pp. 69-81, ene. 2012.
- [85] K. R. AL-BALUSHI, A. ADDALI, B. CHARNLEY, y D. MBA, «Energy Index technique for detection of Acoustic Emissions associated with incipient bearing failures», *Appl. Acoust.*, vol. 71, n.º 9, pp. 812-821, sep. 2010.
- [86] M. LEBOLD, K. McCLINTIC, R. CAMPBELL, C. BYINGTON, y K. MAYNARD, «Review Of Vibration Analysis Methods For Gearbox Diagnostics And Prognostics», *Proceedings of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, pp. 623-634, may 2000.
- [87] P. GUPTA y S. WADHWANI, «Feature Selection by Genetic Programming, And Artificial Neural Network-based Machine Condition Monitoring», *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 1, n.º 4, pp. 177 - 181, abr. 2012.
- [88] M. HOSEINI, Z. LIU, T. TAO, y M. J. ZUO, «Original Features Used for Condition Monitoring of Planetary Gearboxes», Technical Report, University of Alberta, 2011.
- [89] B. BAGHERI, H. AHMADI, y R. LABBAFI, «Application of data mining and feature extraction on intelligent fault diagnosis by Artificial Neural Network and k-nearest neighbor», en *2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2010, pp. 1-7.
- [90] Y. LEI y M. J. ZUO, «Gear crack level identification based on weighted K nearest neighbor classification algorithm», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 23, n.º 5, pp. 1535-1547, jul. 2009.
- [91] J. J. ZAKRAJSEK, D. P. TOWNSEND, y H. J. DECKER, «An Analysis of Gear Fault Detection Methods as Applied to Pitting Fatigue Failure Data», ene. 1993.
- [92] H. YANG, J. MATHEW, y L. MA, «Vibration feature extraction techniques for fault diagnosis of rotating machinery: a literature survey», *Asia- Pacific Vibration Conference*, nov. 2003.
- [93] H. TOWSYFYAN, P. RAHARJO, F. GU, y A. BALL, «Characterization of Acoustic Emissions from Journal Bearings for Fault Detection», *NDT 2013*, sep. 2013.
- [94] Y. LEI, M. J. ZUO, Z. HE, y Y. ZI, «A multidimensional hybrid intelligent method for gear fault diagnosis», *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, n.º 2, pp. 1419-1430, mar. 2010.
- [95] X. ZHAO, M. J. ZUO, y Z. LIU, «Diagnosis of pitting damage levels of planet gears based on ordinal ranking», en *2011 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*, 2011, pp. 1-8.
- [96] Y. LEI, Z. HE, y Y. ZI, «A new approach to intelligent fault diagnosis of rotating machinery», *Expert Syst. Appl.*, vol. 35, n.º 4, pp. 1593-1600, nov. 2008.
- [97] Y. LEI, Z. HE, Y. ZI, y Q. HU, «Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple ANFIS combination with GAs», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, n.º 5, pp. 2280-2294, jul. 2007.
- [98] H. Q. WANG y P. CHEN, «Fault diagnosis of centrifugal pump using symptom parameters in frequency domain», *Agric. Eng. Int. CIGR EJournal*, 2007.

- [99] Q. HE, F. KONG, y R. YAN, «Subspace-based gearbox condition monitoring by kernel principal component analysis», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 21, n.º 4, pp. 1755-1772, may 2007.
- [100] M. FIDALI, «An idea of continuous thermographic monitoring of machinery», presentado en 9th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography, Krakow - Poland, 2008, p. 8.
- [101] A. MATERKA y M. STRZELECKI, «Texture analysis methods—a review», *Tech. Univ. Lodz Inst. Electron. COST B11 Rep. Bruss.*, pp. 9–11, 1998.
- [102] S. TAIB, M. S. JADIN, y S. KABIR, *Thermal Imaging for Enhancing Inspection Reliability: Detection and Characterization*. INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [103] M. EFTEKHARI, M. MOALLEM, S. SADRI, y M.-F. HSIEH, «A novel indicator of stator winding inter-turn fault in induction motor using infrared thermal imaging», *Infrared Phys. Technol.*, vol. 61, pp. 330-336, nov. 2013.
- [104] V. ASHISH, «Review on thermal image processing techniques for machine condition monitoring», *Int. J.*, vol. 3, n.º 3, may 2014.
- [105] R. A. LERSKI, K. STRAUGHAN, L. R. SCHAD, D. BOYCE, S. BLÜML, y I. ZUNA, «MR image texture analysis—An approach to tissue characterization», *Magn. Reson. Imaging*, vol. 11, n.º 6, pp. 873-887, 1993.
- [106] S. V. NIVELÓ JARA y D. J. ROMERO RODRÍGUEZ, «Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas para sistemas mecánicos rotativos con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en rodamientos», Thesis, Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2014.
- [107] 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», Thesis, 2014.
- [108] SKF, «Rodamientos de rodillos a rótula, agujero cilíndrico y cónico». [En línea]. Disponible en: <http://www.skf.com/es/products/bearings-units-housings/roller-bearings/spherical-roller-bearings/cylindrical-and-tapered-bore/index.html?prodid=1550532207&imperial=false>. [Accedido: 23-ago-2014].
- [109] SKF, «Rodamientos rígidos de una hilera de bolas». [En línea]. Disponible en: <http://www.skf.com/es/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row/index.html?prodid=1010281906&imperial=false>. [Accedido: 11-sep-2014].
- [110] J. A. P. VILLALOBO, O. A. RAMOS, A. J. U. MANZANELLI, H. H. CONTRERA, y D. A. NOVILLO, «Análisis de ruidos de motores eléctricos aplicando intensimetría sonora», *Mecánica Comput.*, vol. 31, pp. 4029 - 4045, nov. 2012.
- [111] A. M. YOUNUS y B.-S. YANG, «Wavelet co-efficient of thermal image analysis for machine fault diagnosis», en *Prognostics and Health Management Conference, 2010. PHM '10.*, 2010, pp. 1-6.
- [112] W. KIM, J. SEO, y D. HONG, «Infrared Thermographic Inspection of Ball Bearing; Condition Monitoring for Defects under Dynamic Loading Stages», *18th World Conence Nondestruct. Test.*, abr. 2012.

- [113] W. KIM, J. SEO, H. YOON, N. CHOI, y D. HONG, «Infrared Thermographic Diagnosis for Fault Detection of the Bearings under stage of Abrasion», *5th Pan Am. Conf. NDT*, oct. 2011.
- [114] SKF, «Rodamientos de bolas a rótula sobre manguitos de fijación». [En línea]. Disponible en: <http://www.skf.com/es/products/bearings-units-housings/ball-bearings/self-aligning-ball-bearings/on-an-adapter-sleeve/index.html?prodid=1140521207&imperial=false>. [Accedido: 11-sep-2014].
- [115] «Resultados de búsqueda de rodamiento | Rodamientos de NTN». [En línea]. Disponible en: <http://www.ntnamericas.com/es/productos/busqueda-de-rodamiento/resultados-de-busqueda-de-rodamiento/datasheet?pid=2412&cid=RBSRD&ctc=B>. [Accedido: 11-sep-2014].
- [116] M. P. PESANTES MOYANO, «Confort térmico en el área social de una vivienda unifamiliar en Cuenca-Ecuador», Universidad de Cuenca, Cuenca - Ecuador, 2012.
- [117] ADASH Ltd, «User's Guide Adash 4900 - Vibrio III».
- [118] TESTOUSA, «Testo Thermal Imagers - Home. Testo 882- Instruction Manual.» [En línea]. Disponible en: <http://www.testousa.com/thermal/>. [Accedido: 18-jun-2014].
- [119] TESTO, «Testo 882 - Termal Image- Instruction manual».
- [120] R. PASCUAL JIMENEZ, *Análisis de Vibraciones en Máquinas Rotatorias*. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2011.
- [121] J. M. PINTOR BOROBIA, «Vibraciones en Máquinas», en *Elementos de Máquinas y Vibraciones*, Universitas Navarrens.
- [122] R. FRENZ, *The use of vibration analysis in the condition assessment of rotating equipment*. 2002.
- [123] E. P. MARÍN, *La medición y el análisis de vibraciones en el diagnóstico de máquinas rotatorias*. Cuba: Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento, 1997.
- [124] S. MELGOSA REVILLAS, «Guía de la termografía infrarroja - Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética». Gráficas Arias Montano, S.A., 16-nov-2011.
- [125] X. MALDAGUE, *Infrared Methodology and Technology*. CRC Press, 1994.
- [126] A. JAISWAL, K. S. ZAKIYUDDIN, y V. V. SHUKLA, «Fault Diagnosis of Gear by Vibration Analysis», *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET)*, vol. 3, n.º 1, pp. 26-32, sep. 2013.
- [127] G. DIWAKAR, M. R. S. SATYANARAYANA, y P. R. KUMAR, «Detection of Gear fault using vibration analysis», *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng. Website Wwww Ijetae Com ISSN*, vol. 2, n.º 9, pp. 2250-2459, 2012.
- [128] G.-M. LIM, Y. ALI, y B.-S. YANG, «The Fault Diagnosis and Monitoring of Rotating Machines by Thermography», en *Engineering Asset Management and Infrastructure Sustainability*, J. MATHEW, L. MA, A. TAN, M. WEIJNEN, y J. LEE, Eds. Springer London, 2012, pp. 557-565.
- [129] W. GARCÍA GONZÁLEZ, «Análisis causa raíz mediante vibraciones a compresor aerzen de tornillo», Universidad Veracruzana, Coatzacoalcos - Veracruz, 2011.
- [130] Á. A. DEDES ROZAS, «Análisis de vibraciones en caja de engranajes», Universidad de Concepción, 2009.
- [131] D. SIEGEL, «Evaluation of Health Assessment Techniques for Rotating Machinery», University of Cincinnati, 2009.

- [132] ISO, «ISO 10816-1:1995 - Mechanical vibration -- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts -- Part 1: General guidelines». .
- [133] ISO, «ISO 2041:2009 - Mechanical vibration, shock and condition monitoring -- Vocabulary». .
- [134] ISO, «ISO 18434-1:2008 - Condition monitoring and diagnostics of machines -- Thermography -- Part 1: General procedures». .
- [135] ADASH Ltd, «Manual de usuario: ADASH VA4Pro». 2011.
- [136] A-MAQ, «Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico». 2005.
- [137] TESTO, «IRSoft PC-Software - Instruction manual». .
- [138] M. Á. CARMONA ÁVILA, L. LÓPEZ GONZALES, A. PILIADO CEDILLO, R. C. SÁNCHEZ TREJO, y E. TORRES GARCÍA, «Manual de Procedimiento Termográfico». 19:07:39 UTC.

# ANEXOS

## **ANEXO A**

# **PRESIÓN SONORA DE FUENTES DE RUIDO ACÚSTICO Y CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE EQUIPOS**

**Anexo A1 Cálculo de la presión sonora de acuerdo a la norma ISO 3745 literal C**  
 - “Array of microphone positions in a free field”. Con  $r = 1$  m.

No.	Coordenadas			Presión sonora	
	x/r	y/r	z/r	Sistema de Refrigeración [dB]	Motor 2 [dB]
1	-1,00	0	0,05	69,7	64,7
2	0,49	-0,86	0,15	75,7	63,3
3	0,48	0,84	0,25	72,3	65,1
4	-0,47	0,81	0,35	71,5	66,8
5	-0,45	-0,77	0,45	71,8	65,8
6	0,84	0	0,55	74,9	63,6
7	0,38	0,66	0,65	74,4	66,3
8	-0,66	0	0,75	72,9	63,5
9	0,26	-0,46	0,85	73,6	63,8
10	0,31	0	0,95	73,8	64,4
11	1	0	-0,05	72,5	62,5
12	-0,49	0,86	-0,15	70,2	65,6
13	-0,48	-0,84	-0,25	72,5	60,8
14	0,47	-0,81	-0,35	68,9	61,7
15	0,45	0,77	-0,45	68,8	63,4
16	-0,84	0	-0,55	69	61,1
17	-0,38	-0,66	-0,65	66,5	62,2
18	0,66	0	-0,75	68,7	62,3
19	-0,26	0,46	-0,85	67,1	61,3
20	-0,31	0	-0,95	67,7	61,4
<b>Promedio</b>				<b>71,125</b>	<b>63,48</b>

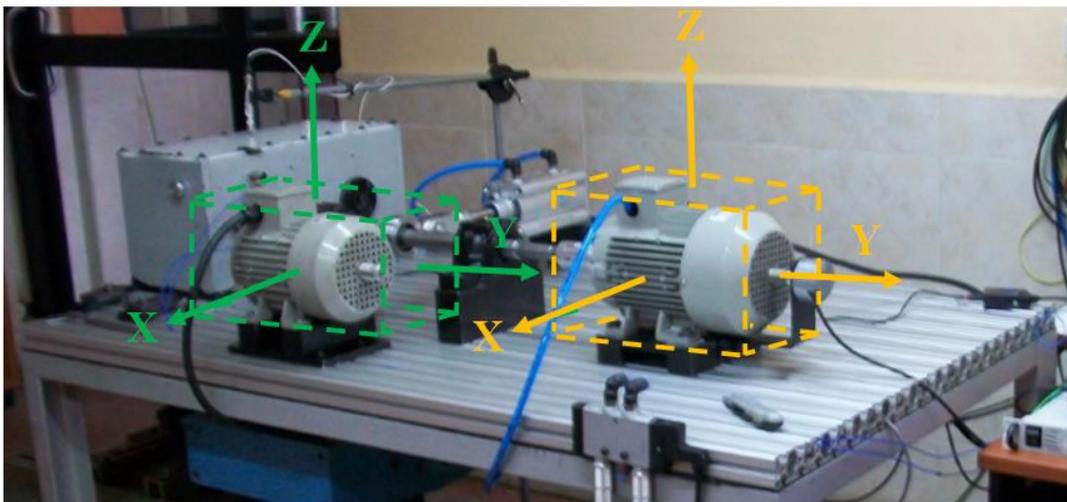


Figura A1: Sistema coordinado usado para medir presión sonora de fuentes de ruido acustico.

Model Number <b>377B02</b>	<h2 style="margin: 0;">PRECISION CONDENSER MICROPHONE</h2>	Revision: G ECN #: 42515																																																																																							
<p><b>Performance</b></p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 33%;">Nominal Microphone Diameter</td> <td style="width: 33%; text-align: center;"><b>SI</b></td> <td style="width: 33%;"></td> </tr> <tr> <td>Frequency Response Characteristic(at 0° incidence)</td> <td style="text-align: center;">1/2"</td> <td style="text-align: center;">Free-Field</td> </tr> <tr> <td>Open Circuit Sensitivity(at 250 Hz)</td> <td style="text-align: center;">50 mV/Pa</td> <td style="text-align: center;">50 mV/Pa</td> </tr> <tr> <td>Open Circuit Sensitivity(± 1.5 dB)(at 250 Hz)</td> <td style="text-align: center;">-26 dB re 1 V/Pa</td> <td style="text-align: center;">-26 dB re 1 V/Pa</td> </tr> <tr> <td>Frequency Range(± 1 dB)</td> <td style="text-align: center;">5 to 10,000 Hz</td> <td style="text-align: center;">5 to 10,000 Hz</td> </tr> <tr> <td>Frequency Range(± 2 dB)</td> <td style="text-align: center;">3.15 to 20,000 Hz</td> <td style="text-align: center;">3.15 to 20,000 Hz</td> </tr> <tr> <td>Lower Limiting Frequency(-3 dB)</td> <td style="text-align: center;">1 to 2.4 Hz</td> <td style="text-align: center;">1 to 2.4 Hz</td> </tr> <tr> <td>Resonant Frequency(90° Phase Shift)</td> <td style="text-align: center;">10,400 Hz</td> <td style="text-align: center;">10,400 Hz</td> </tr> <tr> <td>Dynamic Range(3% Distortion Limit)</td> <td style="text-align: center;">&gt;146 dB re 20 µPa</td> <td style="text-align: center;">&gt;146 dB re 20 µPa</td> </tr> <tr> <td>Dynamic Range(Cartridge Thermal Noise)</td> <td style="text-align: center;">&lt;15 dB(A) re 20 µPa</td> <td style="text-align: center;">&lt;15 dB(A) re 20 µPa</td> </tr> <tr> <td>Standards Designation(IEC 61094-4)</td> <td style="text-align: center;">µPa</td> <td style="text-align: center;">µPa</td> </tr> <tr> <td><b>Environmental</b></td> <td style="text-align: center;">WS2F</td> <td style="text-align: center;">WS2F</td> </tr> <tr> <td>Temperature Range(Operating)</td> <td style="text-align: center;">-40 to +302 °F</td> <td style="text-align: center;">-40 to +150 °C</td> </tr> <tr> <td>Temperature Coefficient of Sensitivity(+14 to +122°F (-10 to +50°C))</td> <td style="text-align: center;">0.005 dB/°F</td> <td style="text-align: center;">0.009 dB/°C</td> </tr> <tr> <td>Static Pressure Coefficient(at 250 Hz)</td> <td style="text-align: center;">-0.013 dB/kPa</td> <td style="text-align: center;">-0.013 dB/kPa</td> </tr> <tr> <td>Influence of Humidity(0 to 100%, non-condensing)</td> <td style="text-align: center;">-0.1 to 0.1 dB</td> <td style="text-align: center;">-0.1 to 0.1 dB</td> </tr> <tr> <td>Influence of Axial Vibration(0.1g (1 m/s<sup>2</sup>))</td> <td style="text-align: center;">63 dB re 20 µPa</td> <td style="text-align: center;">63 dB re 20 µPa</td> </tr> <tr> <td>Long Term Stability(150°C (302°F))</td> <td style="text-align: center;">&gt;2 hrs/dB</td> <td style="text-align: center;">&gt;2 hrs/dB</td> </tr> <tr> <td><b>Electrical</b></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Capacitance(Polarized)</td> <td style="text-align: center;">12 pF</td> <td style="text-align: center;">12 pF</td> </tr> <tr> <td>Polarization Voltage</td> <td style="text-align: center;">0 V</td> <td style="text-align: center;">0 V</td> </tr> <tr> <td><b>Physical</b></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Housing Material</td> <td style="text-align: center;">Stainless Alloy</td> <td style="text-align: center;">Stainless Alloy</td> </tr> <tr> <td>Venting</td> <td style="text-align: center;">Rear</td> <td style="text-align: center;">Rear</td> </tr> <tr> <td>Mounting Thread(Preamplifier)</td> <td style="text-align: center;">0.4606 - 60 UNS</td> <td style="text-align: center;">11.7 mm - 60 UNS</td> </tr> <tr> <td>Mounting Thread(Grid)</td> <td style="text-align: center;">0.5 - 60 UNS</td> <td style="text-align: center;">12.7 mm - 60 UNS</td> </tr> <tr> <td>Size (Diameter x Height)(with grid)</td> <td style="text-align: center;">0.52 in x 0.64 in</td> <td style="text-align: center;">13.2 mm x 16.2 mm</td> </tr> <tr> <td>Size (Diameter x Height)(without grid)</td> <td style="text-align: center;">0.5 in x 0.6 in</td> <td style="text-align: center;">12.7 mm x 15.3 mm</td> </tr> <tr> <td>Weight</td> <td style="text-align: center;">0.28 oz</td> <td style="text-align: center;">7.8 gm</td> </tr> </table> <p><i>All specifications are at room temperature unless otherwise specified. In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.</i></p> <p>ICP® is a registered trademark of PCB Group, Inc.</p>			Nominal Microphone Diameter	<b>SI</b>		Frequency Response Characteristic(at 0° incidence)	1/2"	Free-Field	Open Circuit Sensitivity(at 250 Hz)	50 mV/Pa	50 mV/Pa	Open Circuit Sensitivity(± 1.5 dB)(at 250 Hz)	-26 dB re 1 V/Pa	-26 dB re 1 V/Pa	Frequency Range(± 1 dB)	5 to 10,000 Hz	5 to 10,000 Hz	Frequency Range(± 2 dB)	3.15 to 20,000 Hz	3.15 to 20,000 Hz	Lower Limiting Frequency(-3 dB)	1 to 2.4 Hz	1 to 2.4 Hz	Resonant Frequency(90° Phase Shift)	10,400 Hz	10,400 Hz	Dynamic Range(3% Distortion Limit)	>146 dB re 20 µPa	>146 dB re 20 µPa	Dynamic Range(Cartridge Thermal Noise)	<15 dB(A) re 20 µPa	<15 dB(A) re 20 µPa	Standards Designation(IEC 61094-4)	µPa	µPa	<b>Environmental</b>	WS2F	WS2F	Temperature Range(Operating)	-40 to +302 °F	-40 to +150 °C	Temperature Coefficient of Sensitivity(+14 to +122°F (-10 to +50°C))	0.005 dB/°F	0.009 dB/°C	Static Pressure Coefficient(at 250 Hz)	-0.013 dB/kPa	-0.013 dB/kPa	Influence of Humidity(0 to 100%, non-condensing)	-0.1 to 0.1 dB	-0.1 to 0.1 dB	Influence of Axial Vibration(0.1g (1 m/s <sup>2</sup> ))	63 dB re 20 µPa	63 dB re 20 µPa	Long Term Stability(150°C (302°F))	>2 hrs/dB	>2 hrs/dB	<b>Electrical</b>			Capacitance(Polarized)	12 pF	12 pF	Polarization Voltage	0 V	0 V	<b>Physical</b>			Housing Material	Stainless Alloy	Stainless Alloy	Venting	Rear	Rear	Mounting Thread(Preamplifier)	0.4606 - 60 UNS	11.7 mm - 60 UNS	Mounting Thread(Grid)	0.5 - 60 UNS	12.7 mm - 60 UNS	Size (Diameter x Height)(with grid)	0.52 in x 0.64 in	13.2 mm x 16.2 mm	Size (Diameter x Height)(without grid)	0.5 in x 0.6 in	12.7 mm x 15.3 mm	Weight	0.28 oz	7.8 gm
Nominal Microphone Diameter	<b>SI</b>																																																																																								
Frequency Response Characteristic(at 0° incidence)	1/2"	Free-Field																																																																																							
Open Circuit Sensitivity(at 250 Hz)	50 mV/Pa	50 mV/Pa																																																																																							
Open Circuit Sensitivity(± 1.5 dB)(at 250 Hz)	-26 dB re 1 V/Pa	-26 dB re 1 V/Pa																																																																																							
Frequency Range(± 1 dB)	5 to 10,000 Hz	5 to 10,000 Hz																																																																																							
Frequency Range(± 2 dB)	3.15 to 20,000 Hz	3.15 to 20,000 Hz																																																																																							
Lower Limiting Frequency(-3 dB)	1 to 2.4 Hz	1 to 2.4 Hz																																																																																							
Resonant Frequency(90° Phase Shift)	10,400 Hz	10,400 Hz																																																																																							
Dynamic Range(3% Distortion Limit)	>146 dB re 20 µPa	>146 dB re 20 µPa																																																																																							
Dynamic Range(Cartridge Thermal Noise)	<15 dB(A) re 20 µPa	<15 dB(A) re 20 µPa																																																																																							
Standards Designation(IEC 61094-4)	µPa	µPa																																																																																							
<b>Environmental</b>	WS2F	WS2F																																																																																							
Temperature Range(Operating)	-40 to +302 °F	-40 to +150 °C																																																																																							
Temperature Coefficient of Sensitivity(+14 to +122°F (-10 to +50°C))	0.005 dB/°F	0.009 dB/°C																																																																																							
Static Pressure Coefficient(at 250 Hz)	-0.013 dB/kPa	-0.013 dB/kPa																																																																																							
Influence of Humidity(0 to 100%, non-condensing)	-0.1 to 0.1 dB	-0.1 to 0.1 dB																																																																																							
Influence of Axial Vibration(0.1g (1 m/s <sup>2</sup> ))	63 dB re 20 µPa	63 dB re 20 µPa																																																																																							
Long Term Stability(150°C (302°F))	>2 hrs/dB	>2 hrs/dB																																																																																							
<b>Electrical</b>																																																																																									
Capacitance(Polarized)	12 pF	12 pF																																																																																							
Polarization Voltage	0 V	0 V																																																																																							
<b>Physical</b>																																																																																									
Housing Material	Stainless Alloy	Stainless Alloy																																																																																							
Venting	Rear	Rear																																																																																							
Mounting Thread(Preamplifier)	0.4606 - 60 UNS	11.7 mm - 60 UNS																																																																																							
Mounting Thread(Grid)	0.5 - 60 UNS	12.7 mm - 60 UNS																																																																																							
Size (Diameter x Height)(with grid)	0.52 in x 0.64 in	13.2 mm x 16.2 mm																																																																																							
Size (Diameter x Height)(without grid)	0.5 in x 0.6 in	12.7 mm x 15.3 mm																																																																																							
Weight	0.28 oz	7.8 gm																																																																																							
<p><b>OPTIONAL VERSIONS</b></p> <p>Optional versions have identical specifications and accessories as listed for the standard model except where noted below. More than one option may be used.</p>																																																																																									
<p><b>NOTES:</b></p> <p>[1] Typical                  [2] Prepolarized                  [3] re 1 kHz</p>																																																																																									
<p><b>SUPPLIED ACCESSORIES:</b></p> <p>Model/ACS-20 Calibration of Precision Condenser Microphones (1)</p>																																																																																									
Entered: AP	Engineer: MT	Sales: MV																																																																																							
Date: 5/2/2014	Date: 5/2/2014	Date: 5/2/2014																																																																																							
Approved: MT	Spec Number:	29289																																																																																							
 <p>3425 Walden Avenue, Depew, NY 14043                  Phone: 716-684-0001                  Fax: 716-684-0987                  E-Mail: info@pcb.com</p>																																																																																									



## Anexo A4 Características técnicas de cámara termografica TESTO 882

Características imagen infrarroja	
Resolución de infrarrojos	320 x 240 píxeles
Sensibilidad térmica (NETD)	< 50 mK a +30 °C
Campo de visión/distancia mínima de enfoque	32° x 23° / 0.2 m
Resolución geométrica (IFOV)	1.7 mrad
SuperResolution (píxel/IFOV) - opcional	640 x 480 píxeles / 1.1 mrad
Frecuencia de actualización	33 Hz*
Foco	manual y motor
Banda de espectro	7.5 ... 14 µm
Características imagen visual	
Tamaño de imagen/distancia mínima de enfoque	640 x 480 píxeles / 0.4 m
Representación de imágenes	
Visualización de imagen	LCD de 3.5" con 320 x 240 píxeles
Posibilidades de visualización	solo imagen IR / solo imagen real / imagen IR y real
Salida de vídeo	USB 2.0
Paletas de color	10 (hierro, arco iris, arco iris HC, frío-caliente, azul-rojo, gris, gris invertido, sepia, Testo, hierro HT)
Medición	
Rango de temperatura	-30 ... +100 °C / 0 ... +350 °C (ajustable)
Medición de altas temperaturas - opcional	+350 ... +550 °C
Exactitud	±2 °C, ±2 % del v.m. / (±3 % del v.m. a +350 ... +550 °C)
Ajuste emisividad/temperatura reflejada	0.01 ... 1 / manual
Funciones de medición	
Visualización de la distribución de humedad superficial (con introducción manual)	✓
Medición de humedad con sensor de humedad por radio (transmisión automática de lecturas en tiempo real)**	(✓)
Modo Solar	✓
Funciones de análisis	Hasta 2 puntos de medición, auto-detección del punto frío/caliente, isotermas, medición por zona (mín./máx. por área)

\* dentro de la UE, fuera 9 Hz

\*\* Sonda de humedad por radio solo en UE, Noruega, Suiza, EEUU, Canadá, Colombia, Turquía, Brasil, México, Nueva Zelanda, Indonesia

\*\*\* con excepción de EE.UU., China y Japón

Equipamiento de la cámara	
Cámara digital	✓
LEDs de potencia	✓
Enfoque motoriz	✓
Objetivo estándar	32° x 23°
Láser (clasificación de láser 635 nm, clase 2)***	✓
Grabación de voz	Auricular con micrófono conectado por cable
Transmisión de vídeo (mediante USB)	✓
Memorización de imágenes	
Formato de archivo	.bmt, exportación en formato .bmp, .jpg, .png, .csv, .xls
Memoria extraíble	Tarjeta SD 2GB (aprox. 1.000 imágenes)
Alimentación de corriente	
Tipo de pila	Batería de iones de litio de recarga rápida, recambiable
Tiempo de funcionamiento	4 horas
Opciones de carga	en el aparato/en la estación de recarga (opcional)
Funcionamiento con alimentación de red	sí
Condiciones del entorno	
Rango de temperaturas de servicio	-15 ... +40 °C
Rango de temperaturas de almacenamiento	-30 ... +60 °C
Humedad del aire	20 ... 80 %HR sin condensación
Tipo de protección de la carcasa (IEC 60529)	IP 54
Vibración (IEC 60068-2-6)	2G
Datos característicos físicos	
Peso	aprox. 900 g
Dimensiones (largo x ancho x altura) en mm	152 x 108 x 262 mm
Montaje del trípode	M6
Carcasa	ABS
Software para PC	
Requisitos del sistema	Windows XP (Service Pack 3), Windows Vista, Windows 7 (Service Pack 1), Windows 8, interfaz USB 2.0
Normas, revisiones, garantía	
Normativa UE	2004/108/CE
Garantía	2 años

✓ Incluido en el suministro  
(✓) opcional

## Anexo A5 Características técnicas del aceite Gulf EP Lubricant HD 220

Grado de Viscosidad ISO		32	46	68	100	150	220
<b>Cumple las siguientes Especificaciones</b>							
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
<b>Propiedades Típicas</b>							
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
Índice de Viscosidad	D 2270	99	98	98	98	97	96
Punto de Inflamación, °C	D 92	208	210	224	230	240	242
Punto de Escurrecimiento, °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

## **ANEXO B**

# **PLANOS DE UBICACIÓN DE MICRÓFONO Y CÁMARA TERMOGRÁFICA**

**Anexo B1 Plano coordenado para ubicación de micrófono para sistema de caja de engranajes.**

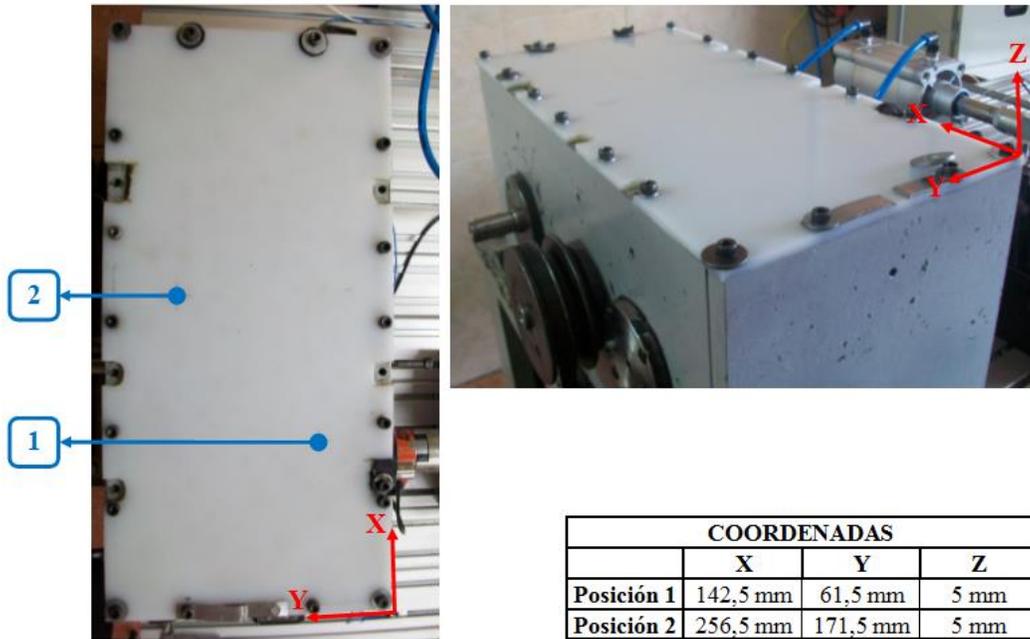


Figura B1: Ubicación de micrófono para sistema de caja de engranajes.

**Anexo B2 Plano coordenado para ubicación de micrófono para sistema de eje de transmisión.**

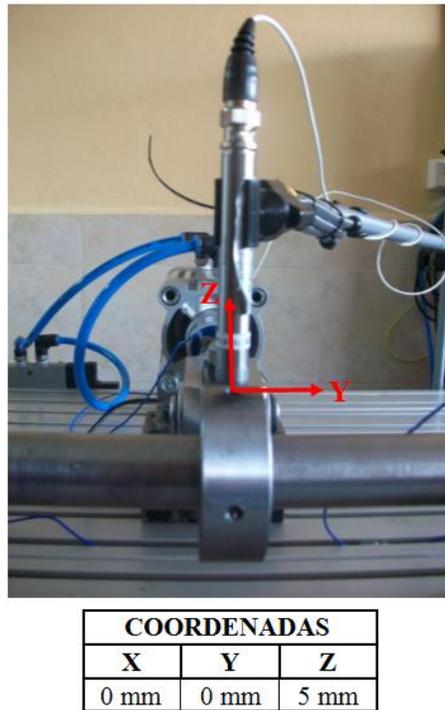


Figura B2: Ubicación de micrófono para sistema de eje de transmisión..

**Anexo B3 Plano coordenado para ubicación de la cámara termográfica para sistema de eje de transmisión.**



COORDENADAS		
X	Y	Z
470 mm	590 mm	995 mm

Figura B3: Ubicación de cámara termográfica para sistema de eje de transmisión.

## **ANEXO C**

### **BASE DE DATOS 1**

Anexo C1 Combinación de fallos en una etapa en caja reductora

Combinación #	Z1	Z2	S-CAJA	B1 B3 - CAJA	B2 B4 - CAJA	B-EJE	S4	Nomenclatura
1	1	1	1	1	1	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 T1
1,1	1	1	1	1	1	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 P2 T1.1
2	1	1	1	1	2	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 B1_1_1 B2_2_1 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 P2 T2
3	1	1	1	1	4	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_4_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 T3
4	1	1	1	2	2	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 B1_2_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_2_2 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 P2 T4
5	1	1	1	2	3	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 B1_1_1 B2_3_1 B3_2_2 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 P2 T5
6	1	1	1	3	2	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 B1_3_1 B2_2_1 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 T6
7	1	1	1	3	3	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_3_2 B4_3_2 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 P2 T7
8	1	1	1	3	4	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 B1_3_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_4_2 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 T8
9	1	1	1	4	1	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_4_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 P2 T9
10	1	1	1	4	3	2	6	Z1_1_1 Z2_1_1 B1_4_2 B2_3_1 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_1 U_0 B7_2_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 T10
11	1	2	1	1	3	1	1	Z1_1_1 Z2_2_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_3_2 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 T11

12	1	2	1	1	4	1	1	Z1_1_1 Z2_2_2 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_4_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T12
13	1	2	1	2	1	1	1	Z1_1_1 Z2_2_3 B1_1_1 B2_1_1 B3_2_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T13
14	1	2	1	2	4	1	1	Z1_1_1 Z2_2_1 B1_2_2 B2_4_2 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T14
15	1	2	1	3	1	1	1	Z1_1_1 Z2_2_2 B1_1_1 B2_1_1 B3_3_2 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T15
16	1	2	1	3	3	1	1	Z1_1_1 Z2_2_3 B1_3_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_3_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T16
17	1	2	1	3	4	3	6	Z1_1_1 Z2_2_1 B1_1_1 B2_4_1 B3_3_2 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_3_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T17
18	2	2	1	2	4	1	1	Z1_2_1 Z2_2_2 B1_2_1 B2_4_2 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T18
19	2	2	1	3	1	1	1	Z1_2_1 Z2_2_3 B1_1_1 B2_1_1 B3_3_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T19
20	2	2	1	3	2	1	1	Z1_2_1 Z2_2_1 B1_3_2 B2_1_1 B3_1_1 B4_2_2 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T20
21	2	2	1	3	3	1	1	Z1_2_1 Z2_2_2 B1_1_1 B2_3_2 B3_3_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T21
22	2	2	1	4	2	1	1	Z1_2_1 Z2_2_3 B1_4_1 B2_2_1 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T22
23	2	2	1	4	3	1	1	Z1_2_1 Z2_2_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_4_2 B4_3_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T23
24	2	3	1	1	2	1	1	Z1_2_1 Z2_3_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_2_2 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T24
25	2	3	1	1	3	1	1	Z1_2_1 Z2_3_2 B1_1_1 B2_3_2 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T25
26	2	3	1	1	4	3	6	Z1_2_1 Z2_3_3 B1_1_1 B2_4_1 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_1 U_0 B7_3_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T26

27	2	3	1	2	1	1	1	Z1_2_1 Z2_3_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_2_2 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T27
28	2	3	1	2	3	1	1	Z1_2_1 Z2_3_2 B1_2_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_3_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T28
29	2	3	1	2	4	1	1	Z1_2_1 Z2_3_3 B1_1_1 B2_4_2 B3_2_2 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T29
30	2	3	1	3	3	1	1	Z1_2_1 Z2_3_1 B1_3_2 B2_3_2 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T30
31	2	3	1	3	4	1	1	Z1_2_1 Z2_3_2 B1_1_1 B2_1_1 B3_3_1 B4_4_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T31
32	2	3	1	4	1	1	1	Z1_2_1 Z2_3_3 B1_4_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T32
33	2	3	1	4	3	1	1	Z1_2_1 Z2_3_1 B1_1_1 B2_3_1 B3_4_2 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T33
34	2	3	1	4	4	3	6	Z1_2_1 Z2_3_2 B1_4_1 B2_4_2 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_3_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T34
35	3	1	1	1	1	1	1	Z1_3_1 Z2_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T35
36	3	1	1	1	2	1	1	Z1_3_1 Z2_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_2_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T36
37	3	1	1	1	3	1	1	Z1_3_1 Z2_1_1 B1_1_1 B2_3_2 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T37
38	3	1	1	2	1	1	1	Z1_3_1 Z2_1_1 B1_2_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T38
39	3	1	1	2	4	1	1	Z1_3_1 Z2_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_2_2 B4_4_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T39
40	3	1	1	3	2	2	6	Z1_3_1 Z2_1_1 B1_3_2 B2_1_1 B3_1_1 B4_2_2 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_1 U_0 B7_2_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T40
41	3	1	1	3	2	1	1	Z1_3_1 Z2_1_1 B1_1_1 B2_2_1 B3_3_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T41

42	3	1	1	3	1	1	1	Z1_3_1 Z2_1_1 B1_3_2 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T42
43	3	1	1	4	1	1	1	Z1_3_1 Z2_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_4_2 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T43
44	3	1	1	4	2	1	1	Z1_3_1 Z2_1_1 B1_4_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_2_2 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T44
45	3	1	1	4	4	1	1	Z1_3_1 Z2_1_1 B1_1_1 B2_4_2 B3_4_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T45
46	3	2	1	1	1	1	1	Z1_3_1 Z2_2_2 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T46
47	3	2	1	1	3	1	1	Z1_3_1 Z2_2_3 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_3_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T47
48	3	2	1	1	4	1	1	Z1_3_1 Z2_2_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_4_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T48
49	3	2	1	2	1	1	1	Z1_3_1 Z2_2_2 B1_1_1 B2_1_1 B3_2_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T49
50	3	2	1	2	3	2	6	Z1_3_1 Z2_2_3 B1_2_2 B2_3_2 B3_1_1 B4_1_1 S1_1_1 S2_1_1 AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_2_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T50

Anexo C2 Combinación de fallos en dos etapas en caja reductora

Combinación #	Z1-Z3	Z2-Z4	S-CAJA	B1 - B3 - B5	B2 - B4 - B6	Bn-EJE	S4	Nomenclatura
1	1	1	1	1	1	1	1	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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 T1
1,1	1	1	1	1	1	1	1	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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 P2 T1.1
2	1	2	1	4	2	1	1	Z1_1_1 Z2_2_1 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_4_1 B2_2_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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 P2 T2
3	1	2	1	4	3	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_2_1 B1_4_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_3_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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K11M L1 C1 P1 T3
4	1	3	1	1	1	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_3_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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K11M L1 C1 P1 T4
5	1	3	1	1	3	1	1	Z1_1_1 Z2_3_1 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_3_2 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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 P2 T5
6	1	3	1	1	4	1	1	Z1_1_1 Z2_3_2 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_4_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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 T6
7	1	3	1	2	1	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_3_2 B1_1_1 B2_1_1 B3_2_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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K11M L1 C1 P1 T7
8	1	3	1	2	2	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_3_1 B1_1_1 B2_2_2 B3_1_1 B4_1_1 B5_2_2 B6_1_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K11M L1 C1 P1 T8
9	1	3	1	2	3	3	6	Z1_1_1 Z2_3_3 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_3_1 B5_2_1 B6_1_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_1 U_0 B7_3_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 P2 T9
10	1	3	1	3	1	1	1	Z1_1_1 Z2_3_1 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 B5_3_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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 T10

11	1	3	1	3	2	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_3_2 B1_3_2 B2_2_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 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 T11
12	1	3	1	3	3	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_3_1 B1_3_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_3_2 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 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 P2 T12
13	1	3	1	3	4	1	1	Z1_1_1 Z2_3_2 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_3_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 B5_1_1 B6_4_2 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 T13
14	1	3	1	4	1	1	1	Z1_1_1 Z2_3_3 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_4_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 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T14
15	1	3	1	4	3	2	6	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_3_2 B1_1_1 B2_1_1 B3_4_2 B4_3_1 B5_1_1 B6_1_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_2_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 T15
16	1	3	1	4	4	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_3_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_4_1 B4_1_1 B5_1_1 B6_4_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 T16
17	2	1	1	1	1	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_2_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 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 T17
18	2	1	1	1	2	1	1	Z1_2_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_2_2 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 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T18
19	2	1	1	1	3	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_2_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 B5_1_1 B6_3_2 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 T19
20	2	1	1	2	1	1	1	Z1_2_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_2_2 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 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T20
21	2	1	1	2	2	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_2_1 Z4_1_1 B1_2_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_2_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 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T21
22	2	1	1	2	3	3	6	Z1_2_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_2_2 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 B5_1_1 B6_3_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_1 U_0 B7_3_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T22
23	2	1	1	3	1	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_2_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_3_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 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 T23
24	2	1	1	3	2	1	1	Z1_2_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_3_2 B4_2_2 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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 P2 T24
25	2	1	1	3	4	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_2_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_3_1 B4_1_1 B5_1_1 B6_4_2 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K11M L1 C1 P1 T25
26	2	1	1	4	1	1	1	Z1_2_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 B5_4_2 B6_1_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 T26
27	2	1	1	4	3	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_2_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_3_2 B5_4_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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K11M L1 C1 P1 T27
28	2	1	1	4	4	1	1	Z1_2_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 B5_4_2 B6_4_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 P2 T28
29	2	2	1	1	1	1	1	Z1_1_1 Z2_2_2 Z3_2_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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 P2 T29
30	2	2	1	1	2	1	1	Z1_2_1 Z2_2_3 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_2_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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 T30
31	2	2	1	1	3	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_2_1 Z4_2_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 B5_1_1 B6_3_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K11M L1 C1 P1 T31
32	2	2	1	1	4	1	1	Z1_2_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_2_1 B1_1_1 B2_4_2 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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K11M L1 C1 P1 T32
33	2	2	1	2	3	2	6	Z1_1_1 Z2_2_1 Z3_2_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_2_1 B4_3_2 B5_1_1 B6_1_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_2_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 P2 T33
34	3	2	1	2	4	1	1	Z1_3_1 Z2_2_2 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_2_2 B4_1_1 B5_1_1 B6_4_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 T34
35	2	2	1	3	1	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_2_1 Z4_2_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 B5_3_2 B6_1_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K11M L1 C1 P1 T35
36	3	2	1	3	4	1	1	Z1_3_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_2_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_4_2 B5_3_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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K11M L1 C1 P1 P2 T36
37	2	2	1	4	1	1	1	Z1_1_1 Z2_2_3 Z3_2_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 B5_4_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 B9_1_1 S4_1_1 J1AS K10M L1 C1 P1 T37

38	3	2	1	4	3	1	1	Z1_3_1 Z2_2_1 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_4_2 B2_3_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 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 P2 T38
39	2	2	1	4	4	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_2_1 Z4_2_1 B1_4_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_4_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 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 T39
40	3	3	1	1	3	1	1	Z1_3_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_3_2 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 B5_1_1 B6_3_2 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 P2 T40
41	2	3	1	1	4	1	1	Z1_1_1 Z2_3_1 Z3_2_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_4_2 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 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 T41
42	3	3	1	2	1	3	6	Z1_3_1 Z2_3_2 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_2_1 B4_1_1 B5_1_1 B6_1_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_1 U_0 B7_3_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T42
43	2	3	1	2	2	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_2_1 Z4_3_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_2_2 B4_1_1 B5_1_1 B6_2_2 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 P2 T43
44	3	3	1	2	4	1	1	Z1_3_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_3_2 B1_1_1 B2_4_1 B3_1_1 B4_1_1 B5_2_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 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 T44
45	2	3	1	3	1	1	1	Z1_1_1 Z2_3_3 Z3_2_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 B5_3_2 B6_1_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 P2 T45
46	3	3	1	3	2	1	1	Z1_3_1 Z2_3_1 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 B5_3_1 B6_2_1 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 T46
47	2	3	1	3	4	1	1	Z1_1_1 Z2_1_1 Z3_2_1 Z4_3_1 B1_3_2 B2_4_2 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 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 P2 T47
48	3	3	1	4	1	1	1	Z1_3_1 Z2_1_1 Z3_1_1 Z4_3_2 B1_1_1 B2_1_1 B3_4_2 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 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K11M L1 C1 P1 T48
49	2	3	1	4	2	1	1	Z1_1_1 Z2_3_2 Z3_2_1 Z4_1_1 B1_1_1 B2_1_1 B3_1_1 B4_1_1 B5_4_1 B6_2_2 S1_1_1 S2_1_1 S3_1_1 AL_0 RL_0 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T49
50	3	3	1	4	3	3	6	Z1_3_1 Z2_3_3 Z3_1_1 Z4_1_1 B1_4_2 B2_3_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_1 U_0 B7_1_1 B8_3_1 B9_1_1 S4_1_1 JIAS K10M L1 C1 P1 P2 T50

**ANEXO D**

**BASE DE DATOS 2**

**Anexo D1 Cálculo de vida útil de rodamiento NTN 6906 LLU sometido a carga radial – Realizado por: Ing. Juan Fernando López**

**Protocolo de pruebas de vida útil para banco de prueba de fallos en rodamientos.**

- Ubicación de los acelerómetros: Chumaceras en dirección vertical
- Estado del Rodamiento: **Nuevo**

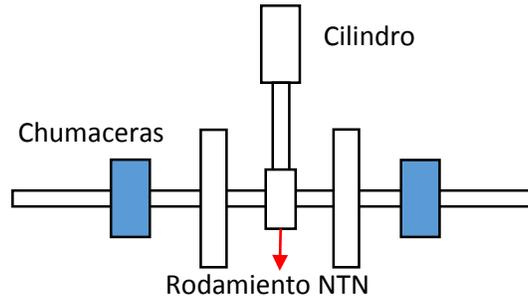


Figura 1: ubicación de los acelerómetros

- Parámetros de la toma de datos:

Parámetro	Valor
Velocidad de adquisición:	51200 Hz
Tiempo de adquisición:	1 segundo
Periodicidad en la toma de las señales	30 minutos
Presión en el cilindro de carga radial	2bar
Tiempo estimado para la falla	100 horas

CAJA DE ENGRANAJES DESACOPLADA

**Calculo de la vida útil**

**Fuerza en el pistón**

Pistón Festo DNCB-80-50-PPV-A

Pmax: 12bar

Calculo de la fuerza

$$F = P * A$$

Donde  $A = \pi r^2$  y  $P$  es la presión de suministro del aire comprimido.

Según catálogo Festo, el diámetro del émbolo es 80mm

Para 1 bar:

$$F = \frac{1bar * 101.325kPa}{1.033bar} * 3.1416 * 0.040^2 = 0.493045kN = 493.045N$$

Se utiliza el siguiente algoritmo en el cálculo de la vida útil. Se asume una velocidad angular de 1700 rpm.

```

%Cálculo de la vida útil de un rodamiento según la norma ISO 281 de 2007
%Se grafica la vida útil versus la carga radial del sistema
clear
clc
close all
%Parámetros de diseño del rodamiento
%Rodamiento NTN 6906 LLU
D=47;      %Diámetro externo del rodamiento [mm]
d=30;      %Diámetro interno del rodamiento [mm]
Dw=8;      %Diámetro del elemento rodante [mm]
Dpw=(D+d)/2; %
i=1;      %Número de hileras del rodamiento
Fa=1;      %Carga axial en el rodamiento [N]
Fr=1;      %Carga radial en el rodamiento [N]
alfa=0;    %Angulo de contacto nominal [grados]
alfa=alfa*pi/180;
Z=14;      %Número de elementos rodantes por hilera
W=1700;    %Velocidad de rotación en rpm
%%%%%%%%%%
%Cr = Carga dinámica básica radial.
bm=1.3;    %Factor obtenido en la tabla 1 de la norma
fc=59.8;   %Factor obtenido en la tabla 2 de la norma
Cr=bm*fc*(i*cos(alfa))^0.7*Z^(2/3)*Dw^1.8;
X=1;      %Se calcula a partir de la tabla 3 de la norma
Y=0;      %Se calcula a partir de la tabla 3 de la norma
Pr=X*Fr+Y*Fa;
%%%%%%%%%%
%Cálculo de la vida útil
L10=(Cr/Pr)^3; % Vida útil en millones de revoluciones

disp(['vida util = ',num2str(L10), ' Millones de revoluciones'])

Fr2=0:0.1:1000; %Fuerza entre 0 y 1000 Newtons
Pr2=X*Fr2+Y*Fa;
L102=(Cr./Pr2).^3;

semilogy(Fr2,L102,'r','LineWidth',2)
title('Carga radial [N] vs Vida útil [millones de rev]')
xlabel('Carga radial [N]')
ylabel('Vida útil en millones de revoluciones')
grid

figure
semilogy(Fr2,(L102/W)/60,'r','LineWidth',2)
title('Carga radial [N] vs Vida útil [horas]')
xlabel('Carga radial [N]')
ylabel('Vida útil en horas')
grid

```

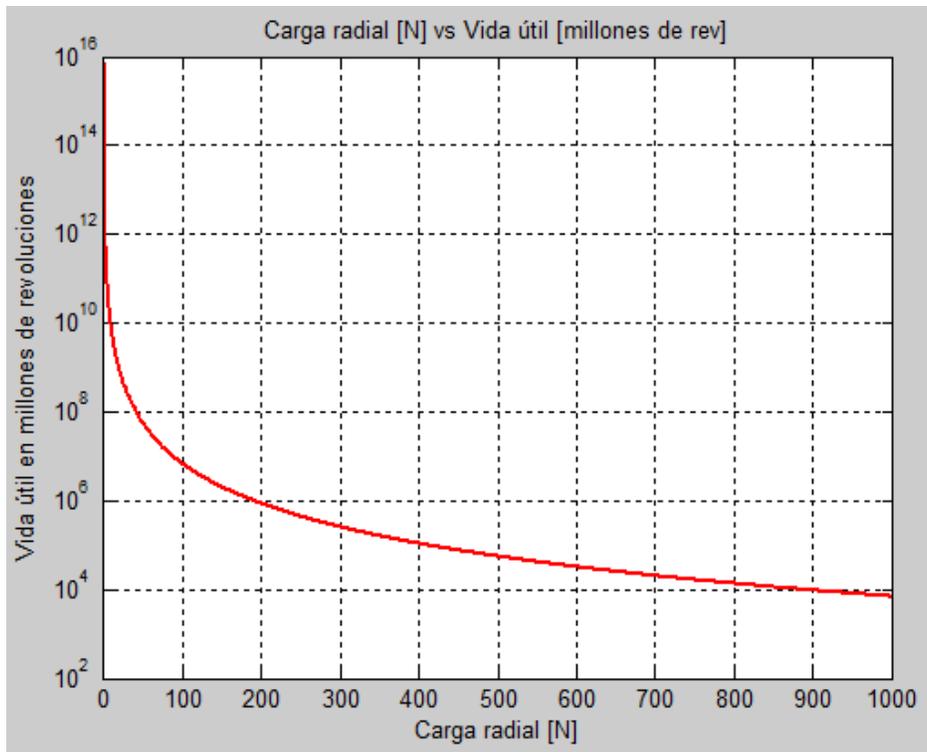


Figura 2: Carga radial vs Vida útil en millones de revoluciones.

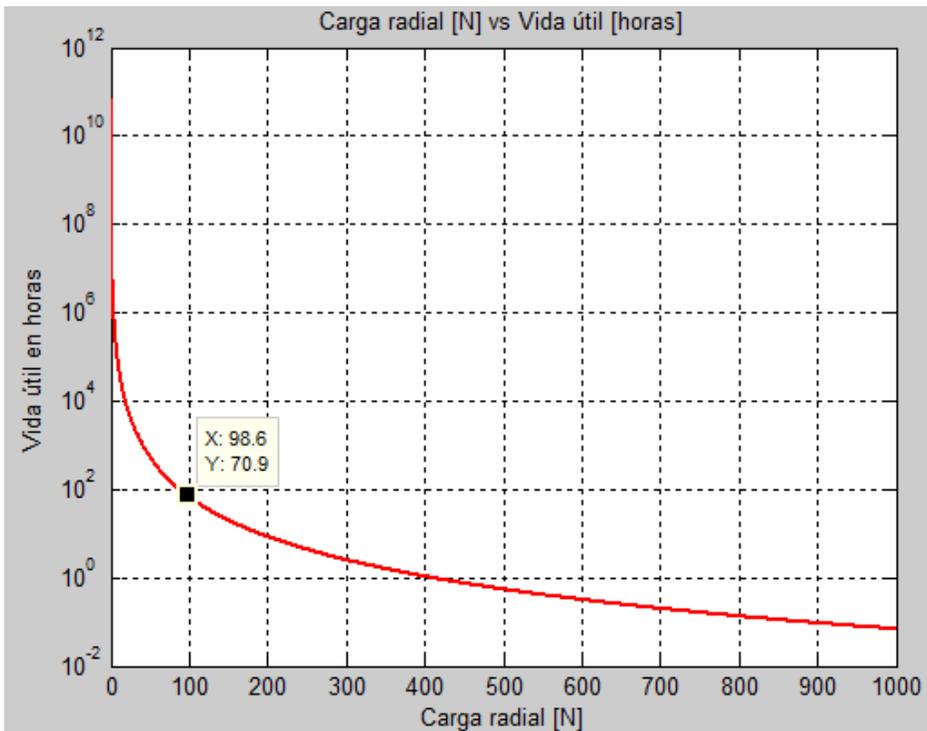


Figura 2: Carga radial vs Vida útil en horas.

Con una presión de 2 bar se obtiene una carga radial de 98.6 N lo cual según la gráfica entrega una vida útil del rodamiento de aproximadamente 70.9 horas.

**Anexo D2 Configuración de fallos en sistema de eje de transmisión para señales de vibración mecánicas y acústicas.**

<b>Prueba</b>	<b>Muestra #</b>	<b>B7 - B8 - B9</b>	<b>S4</b>	<b>Nomenclatura</b>
1	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 K7A1 K8A1 K9A3 K9AS L0 C2-1 T1
2	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 K7A1 K8A1 K9A3 K9AS L0 C2-2 T1
3	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 K7A1 K8A1 K9A3 K9AS L0 C2-3 T1
4	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 K8A1 K9A1 K9AS K9M L0 C2-4 T1
5	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 K8A1 K9A1 K9AS K9M L0 C2-5 T1
6	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 K8A1 K9A1 K9AS K9M L0 C2-6 T1
7	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 K8A1 K9A1 K9AS K9M L0 C2-7 T1
8	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 K8A1 K9A1 K9AS K9M L0 C2-8 T1
9	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 K8A1 K9A1 K9AS K9M L0 C2-9 T1

**Anexo D3 Configuración de fallos en sistema de eje de transmisión para imágenes térmicas.**

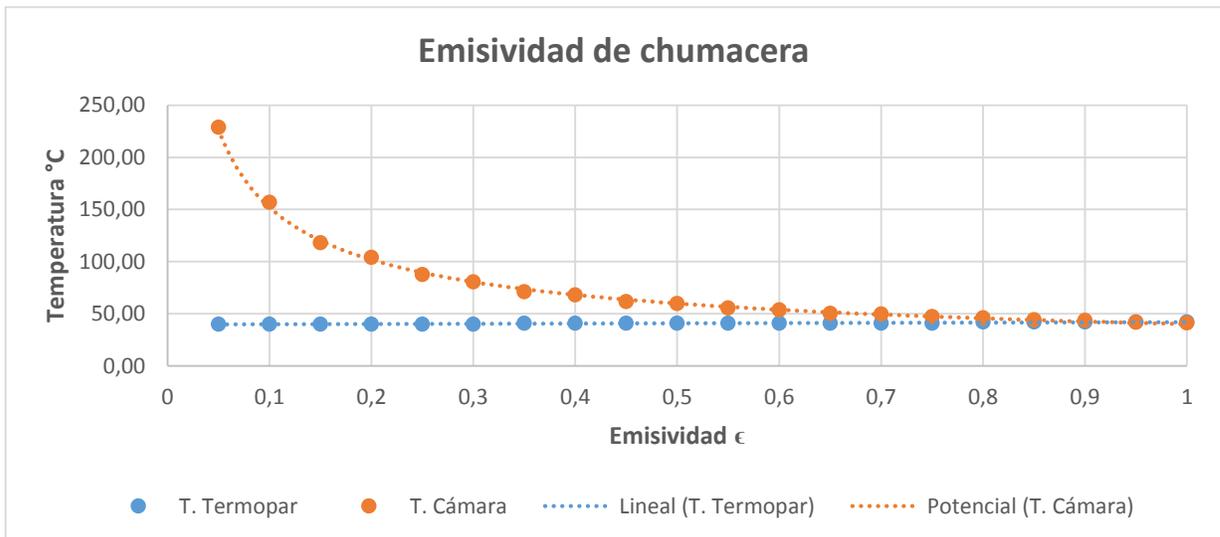
<b>Prueba</b>	<b>Muestra #</b>	<b>B7 - B8 - B9</b>	<b>S4</b>	<b>Nomenclatura</b>
1	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 I9ITC L0 C2-1 T1
2	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 I9ITC L0 C2-2 T1
3	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 I9ITC L0 C2-3 T1
4	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 I9ITC L0 C2-4 T1
5	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 I9ITC L0 C2-5 T1
6	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 I9ITC L0 C2-6 T1
7	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 I9ITC L0 C2-7 T1
8	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 I9ITC L0 C2-8 T1
9	1	1	6	AL_0 RL_1 U_0 B7_1_1 B8_1_1 B9_1_1 S4_1_1 I9ITC L0 C2-9 T1

**Anexo D4 Condiciones C2 de prueba para base de datos 2**

<b><i>PRUEBA 1</i></b>	<b><i>PRUEBA 2</i></b>	<b><i>PRUEBA 3</i></b>
Presión de 2 bares Carga de 98.6 N Rpm teórico: 1700 rpm RPM real: 1732.78 rpm Sin carga de freno  Acelerómetro uniaxial canal 1 en B7 Acelerómetro uniaxial canal 2 en B8 Sensor acústico canal 3 Acelerómetro triaxial en canal 5 en B9 Tacómetro canal 6  Tiempo estimado de pruebas 71 horas Inicio de prueba.- 13:15 – 21/11/2014 Duración de la prueba.- 148h 16min. Fin de la prueba aprox.- 17:31 – 27/11/2014.	Presión de 3 bares Carga de 147.9 N Rpm teórico: 1700 rpm RPM real: 1732.78 rpm Sin carga de freno  Acelerómetro uniaxial canal 1 en B7 Acelerómetro uniaxial canal 2 en B8 Sensor acústico canal 3 Acelerómetro triaxial canal 5 en B9 Tacómetro canal 6  Tiempo estimado de prueba 21 horas. Inicio de prueba.- 19:53 – 29/10/2014 Duración de la prueba.- 26h 1min. Fin de la prueba aprox.- 21:54 – 30/10/2014.	Presión de 4 bares Carga de 197.2 N Rpm teórico: 1700 rpm RPM real: 1732.78 rpm Sin carga de freno  Acelerómetro uniaxial canal 1 en b7 Acelerómetro uniaxial canal 2 en b8 Sensor acústico canal 3 Acelerómetro triaxial en canal 5 en B9 Tacómetro canal 6  Tiempo estimado de pruebas 9 horas. Inicio de prueba.- 22:08 – 12/11/2014 Duración de la prueba.- 10h 37min. Fin de la prueba aprox.- 10:45 – 13/11/2014.

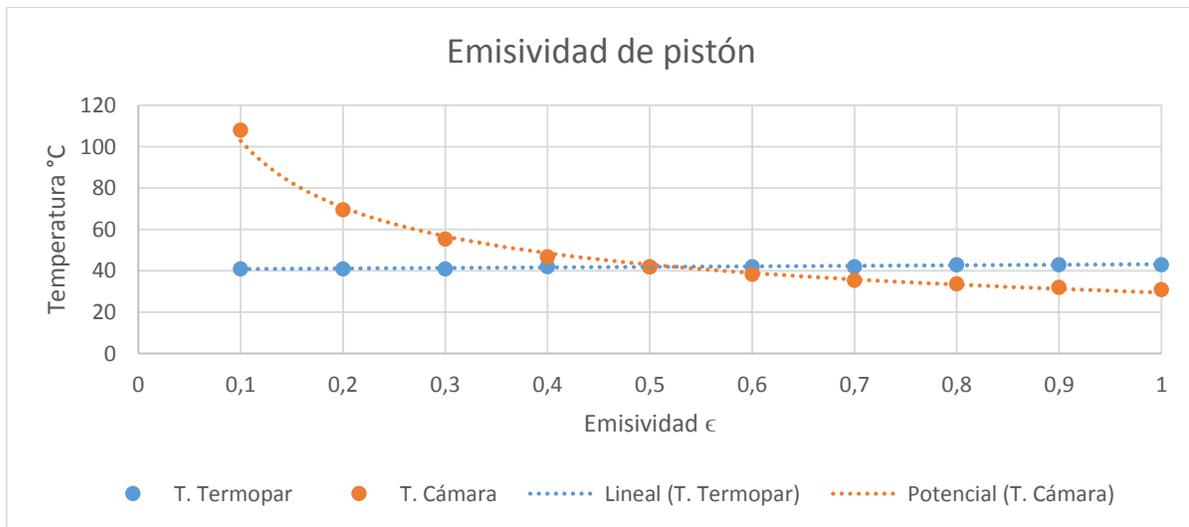
Anexo D5 Determinación del valor de emisividad del material de la chumacera.

Emisividad de chumacera			
Estabilización del sistema	17/10/2014	Condiciones del sistema	
Encendido del sistema	11:08	Velocidad	1322 rpm
Estabilización del sistema	11:54	Carga	1 kW
Temperatura con termopar [°C]		Temperatura con cámara	
		E	T [°C]
40		0,05	229
40		0,1	157
40		0,15	118
40		0,2	104
40		0,25	87,7
40		0,3	80,7
41		0,35	71,2
41		0,4	68,2
41		0,45	61,7
41		0,5	59,8
41		0,55	55,7
41		0,6	53,7
41		0,65	50,5
41		0,7	49,8
41		0,75	47,2
42		0,8	46,2
42		0,85	44,3
42		0,9	43,6
42		0,95	41,8
42		1	41,1



Anexo D6 Determinación del valor de emisividad del material del pistón.

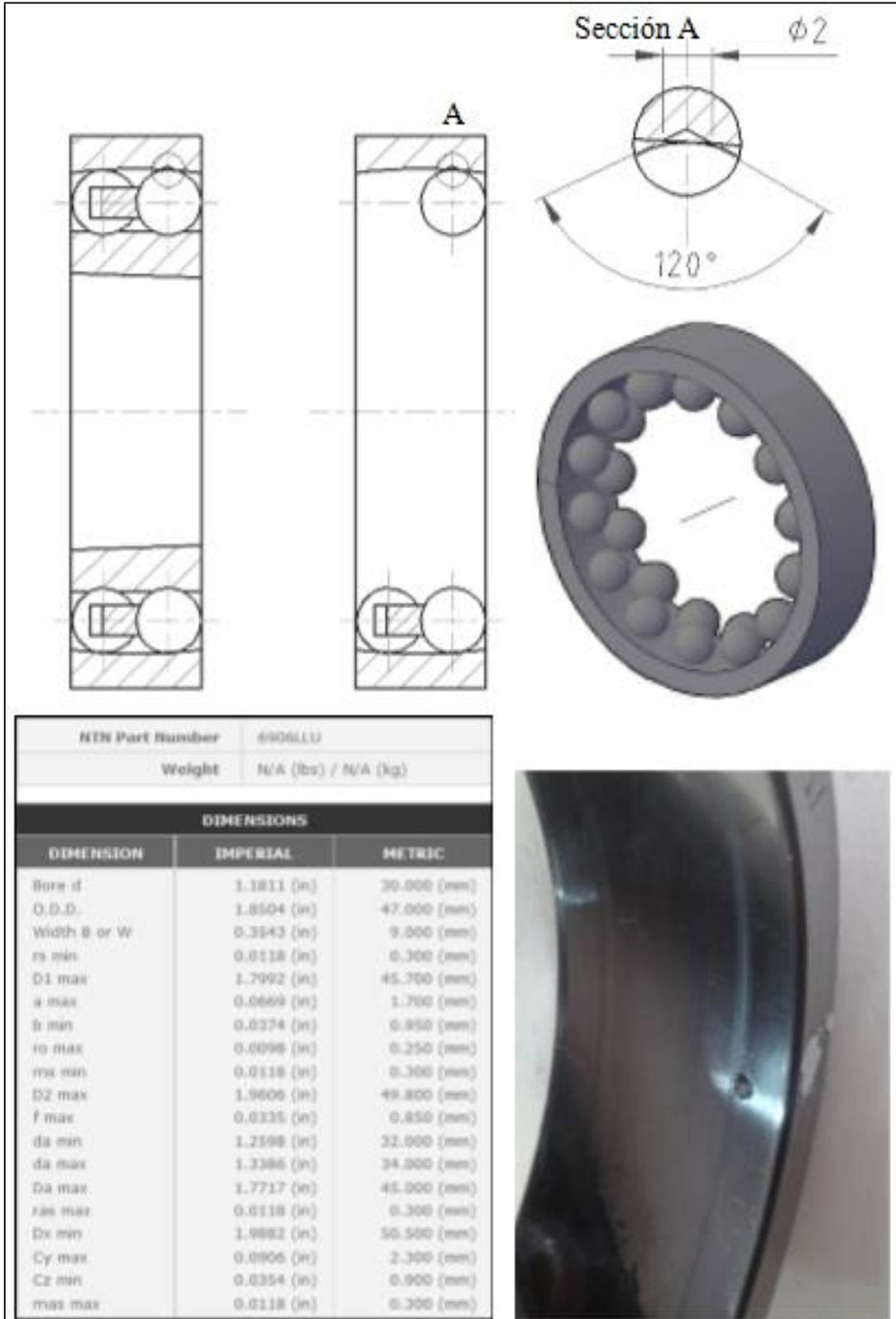
Emisividad de pistón			
Estabilización del sistema	17/10/2014	Condiciones del sistema	
Encendido del sistema	11:08	Velocidad	1322 rpm
Estabilización del sistema	11:54	Carga	1 kW
Temperatura con termopar [°C]		Temperatura con cámara	
		E	T [°C]
41		0,1	108
41		0,2	69,6
41		0,3	55,4
42		0,4	46,8
42		0,5	41,9
42		0,6	38,4
42		0,7	35,5
43		0,8	33,7
43		0,9	32,1
43		1	30,9



**ANEXO E**

**BASE DE DATOS 3**

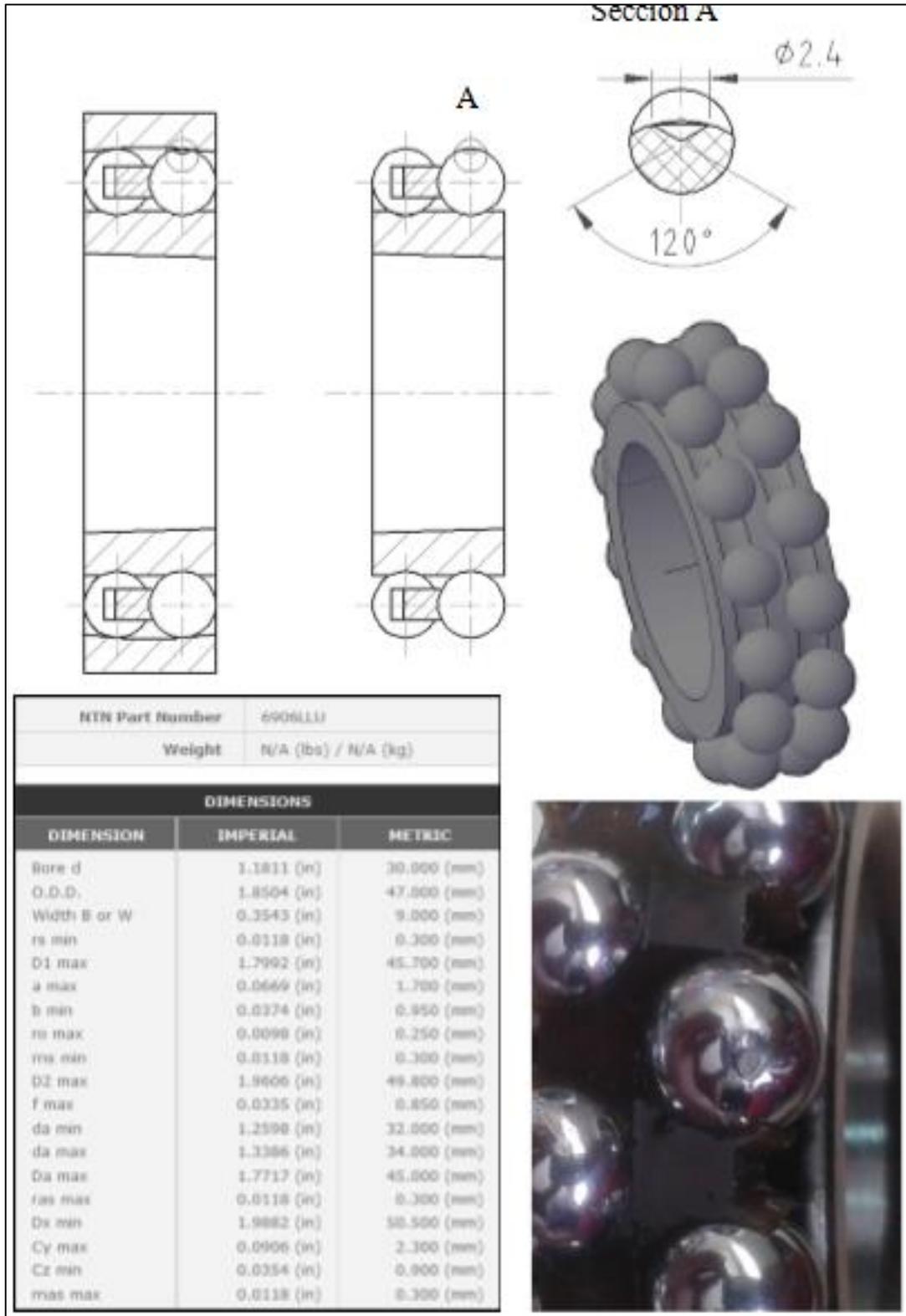
**Anexo E1 Fallo severo en pista externa - rodamiento de bolas a rótula - SKF 1207 EKTN9/C3**



**Anexo E2 Fallo severo en pista interna - rodamiento de bolas a rótula - SKF 1207 EKTN9/C3**



**Anexo E3 Fallo severo en elemento rodante - rodamiento de bolas a rótula - SKF 1207 EKTN9/C3**



**Anexo E4 Configuración de fallos en sistema de eje de transmisión para señales de vibración mecánicas para base de datos 3**

# Prueba	B7	B8	NOMENCLATURA
1	H	H	A1 L1 F1 RI P1
2	I	H	A1 L1 F1 RI P2
3	O	H	A1 L1 F1 RI P3
4	B	H	A1 L1 F1 RI P4
5	I	O	A1 L1 F1 RI P5
6	I	B	A1 L1 F1 RI P6
7	O	B	A1 L1 F1 RI P7

**ANEXO F**

**GUÍAS DE PRÁCTICAS**

# **DETECCIÓN DE FALLOS EN CAJA DE ENGRANAJES MEDIANTE SEÑALES DE VIBRACIONES MECÁNICAS**

Rómulo Guiracocho, egresado de la carrera de Ingeniería Mecánica, correo electrónico:  
[rguiracocho@est.ups.edu.ec](mailto:rguiracocho@est.ups.edu.ec)

Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Mecánica

Asignatura: Análisis de vibraciones, Cuenca – Ecuador, Fecha de entrega: 29 - Enero - 2015

---

## **1. Presentación de la práctica**

En esta práctica se realiza la detección de fallos mediante el análisis del espectro resultante de una señal de vibración mecánica en caja de engranajes rectos usando el medidor de vibraciones ADASH 4900 Vibrio y el analizador de vibraciones ADASH 4400-VA4Pro

## **2. Requisitos y precauciones**

Previo a la realización de esta práctica se deberá de haber cumplido con la práctica: “*USO DEL ANALIZADOR DE VIBRACIONES ADASH VA4Pro*”

- Para la ejecución de la práctica, es de carácter obligatorio el uso de mandil y gafas en los laboratorios.
- Es necesario no portar o vestir elementos sueltos tales como: cadenas, anillos y/o pulseras; en caso de tener el cabello largo mantenerlo recogido.

### ***Requisitos:***

De carácter obligatorio y previo a la realización de la práctica lea los textos sugeridos:

- Análisis espectral [1] pág. 141-161.
- Dinámica de máquinas – engranajes [2] pág. 8.5 – 8.8 y 8.15-8.18.
- Manual de usuario: Adash 4900–Vibrio III [3] pág. 22 – 25, 34, 35.

### ***Precauciones:***

- Verificar que la carga de batería del equipo sea mayor al 50%, por recomendación del fabricante.

## **3. Objetivos**

- Medir la señal de vibración mecánica en una caja de engranajes rectos.
- Analizar el espectro de una señal de vibración mecánica.

#### 4. Equipos, instrumentos y software

Tabla 4.1: Equipos, instrumentos y software

Descripción	Marca	Serie
Cabina eléctrica		
Banco de vibraciones		
Laptop	HP	Pavilion G4
Analizador de vibraciones	ADASH	4400-VA4Pro
Acelerómetro	ADASH	A 102-1A
Base Magnética	ADASH	A 1102
Software	Control de velocidad y carga mediante mandos manuales	

#### 5. Exposición

##### 5.1 Caja de engranajes.

Es un elemento de transmisión que se interpone entre el motor y las máquinas para modificar el número de revoluciones de la misma e invertir el sentido de giro cuando las necesidades de la marcha así lo requieran.

Los engranajes y las cajas de engranajes tienen marcas únicas de vibración que identifican tanto su funcionamiento normal como anormal [2]. La Figura 5.1 muestra la caja de engranajes que se utilizará para la realización de esta práctica.

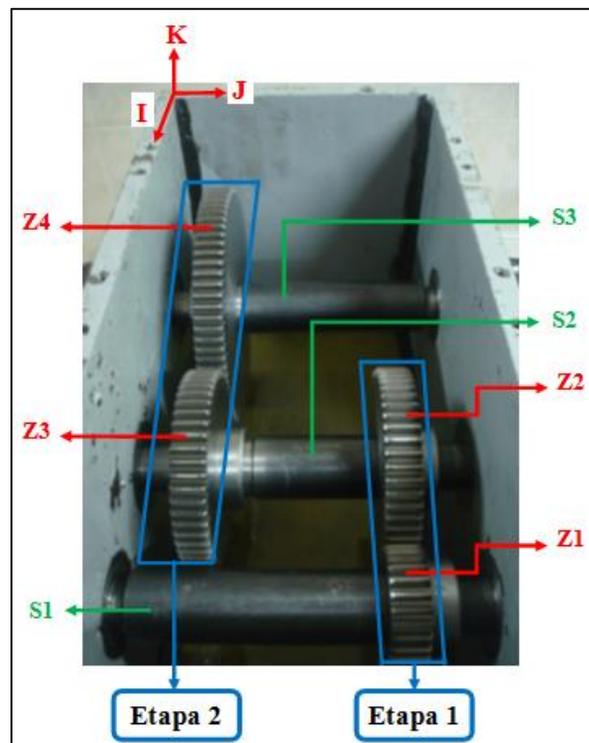


Figura 5.1: Designación de engranajes rectos en la caja reductora.

Los engranajes rectos mostrarán vibración en el plano radial.

## 5.2 Espectro característico de una caja de engranajes

- **En buenas condiciones**

En la Figura 5.2 se observa el espectro característico de una caja de engranes en buenas condiciones.

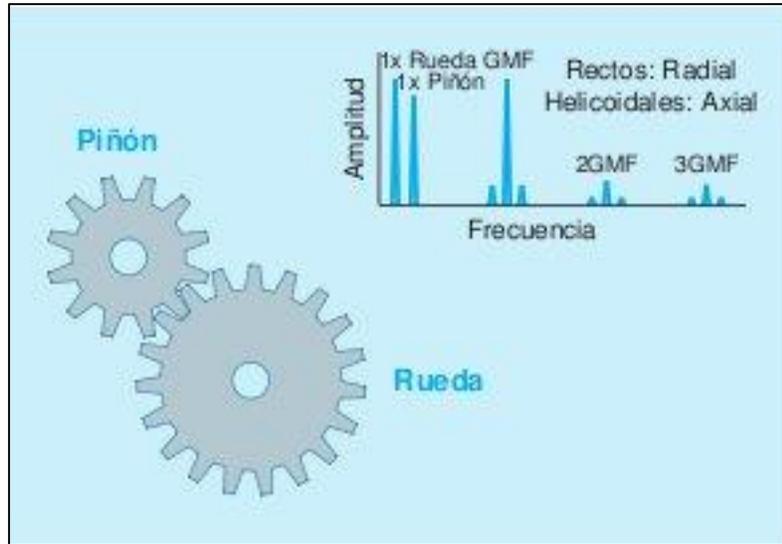


Figura 5.2: Espectro característico de una caja de engranajes en buenas condiciones. Fuente: [4].

**Frecuencias de engrane (GMF):** son propias de cada engranaje y aparecen en el espectro de frecuencia independientemente del estado del engranaje. Su amplitud depende significativamente de la velocidad en el momento de la lectura [4]. Se calculan mediante la Ecuación 5.1.

$$GMF = Z_p * RPM_p = Z_R * RPM_R \text{ [Hz]} \quad (5.1)$$

Donde:

$Z_p$  = número de dientes del piñón.

$Z_R$  = número de dientes de la rueda o corona.

$RPM_p$  = velocidad de giro del piñón [Hz].

$RPM_R$  = velocidad de giro de la rueda o corona [Hz].

El factor de conversión de la velocidad en revoluciones por minuto [rpm] a Hertz [Hz] es mediante la Ecuación 5.2.

$$1 \text{ [rpm]} = \frac{1}{60} \text{ [Hz]} \quad (5.2)$$

La frecuencia **1x Piñón** es la velocidad de giro del piñón siendo esta la velocidad de rotación del motor medida en [Hz].

La frecuencia **1x Rueda** es la velocidad de rotación de la rueda o corona y se determina mediante la Ecuación 5.1 medida en [Hz].

La desviación de la simetría de la señal indica un problema incipiente en el engranaje.

- **En condiciones de fallo**

Un cambio en la vibración básica de una máquina, será indicativo de que algún defecto incipiente se está dando en alguno de sus elementos, provocando un cambio en las condiciones de funcionamiento de la misma.

Los fallos presentes en engranajes se detectan por un incremento de la amplitud de la frecuencia del engrane que presente el fallo, entre los fallos se tiene:

- **Desgaste de diente**

El desgaste de los engranajes provoca picos importantes en la GMF y sus armónicos. Además, el rozamiento excita la frecuencia natural del engranaje, lo cual provoca la aparición de nuevas frecuencias en el espectro que podrían corresponderse con la frecuencia de resonancia del piñón o la corona, dependiendo de cuál de los engranes presente el fallo. Como se muestra en la Figura 5.3, los indicadores principales son:

- Aumento de la amplitud en 1x, 2x y/o 3x GMF.
- Bandas laterales importantes en torno a 1x, 2x y/o 3x GMF a una frecuencia 1x RPM del engranaje desgastado.
- Picos correspondientes a la frecuencia de resonancia del piñón o la corona desgastada.
- Bandas laterales a 1x RPM de la rueda desgastada alrededor de la frecuencia de resonancia. [4][5].

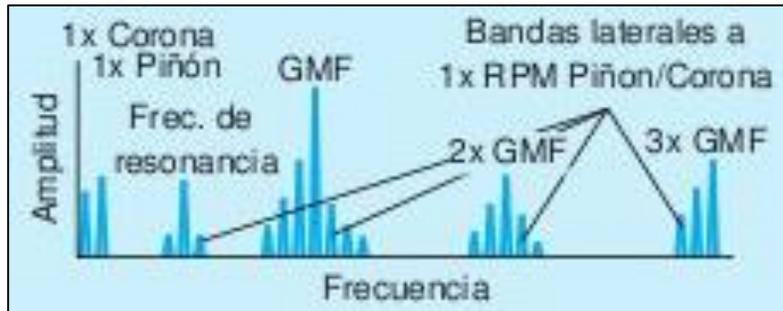


Figura 5.3: Espectro resultante de diente desgastado. Fuente: [4].

- **Picadura de diente.**

El espectro característico de las vibraciones de un engranaje con un diente picado está compuesto por componentes a la frecuencia de engrane y sus armónicos, con bandas laterales en torno a la frecuencia de giro del engrane que contiene la picadura [6].

- **Diente agrietado o roto**

Como se observa en la Figura 5.4, el fallo por diente roto o agrietado genera una alta amplitud en 1X RPM del engranaje que contiene el fallo, además excitará la frecuencia natural del engranaje con fallo mostrando bandas laterales a la velocidad de giro. Esto se detecta mejor al evaluar la forma de onda producida, el tiempo entre los impactos ( $\Delta$ ) corresponderá a 1XRPM del engranaje con fallo [5].

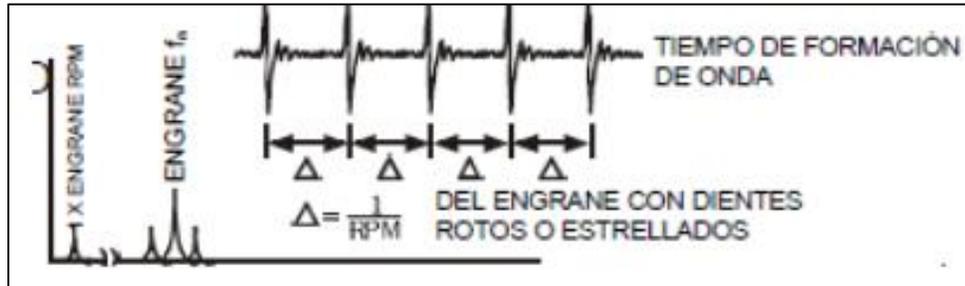


Figura 5.4: Espectro resultante de diente agrietado o roto. Fuente:[5]

**Bandas laterales** son componentes espectrales y son el resultado de modulación de amplitud o de frecuencia. La distancia en frecuencias de las bandas laterales es igual a la frecuencia moduladora, como se observa en la Figura 5.3 las bandas laterales aparecen en torno a GMF y sus armónicos.

Ejemplo:

En una caja reductora de una etapa la frecuencia de giro del piñón es de 8 Hz,  $Z_P=22$  y  $Z_R=45$ .

Calcular GME con la Ecuación 1:

$$GMF = Z_P * RPM_P [Hz] = 22 * 8 [Hz] = 176 [Hz]$$

$$1xPiñón = RPM_P [Hz] = 8 [Hz]$$

$$1xRueda = RPM_R [Hz] = \frac{Z_P * RPM_P [Hz]}{Z_R} = \frac{176 [Hz]}{45} = 3.91 [Hz]$$

“Si el fallo está presente en el piñón, la distancia en frecuencias de las bandas laterales es de 8 Hz y si el fallo está presente en la rueda, la distancia en frecuencias de las bandas laterales es de 3.91 Hz”.

### 5.3 Valores globales de la vibración mecánica - Escala

La amplitud de la vibración, ya sea en el desplazamiento, la velocidad, o la aceleración; se puede representar (escala) de diferentes formas, como se observa en la Figura 5.5.

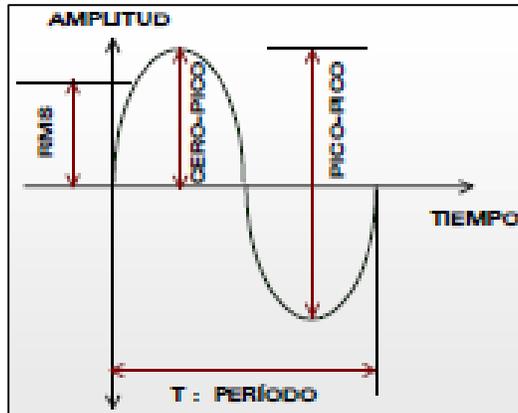


Figura 5.5: Valores característicos de onda. Fuente: [7].

**PICO** es el valor máximo de una magnitud (aceleración, velocidad, desplazamiento) que varía durante cierto intervalo de tiempo.

**PICO-PICO** es la diferencia algebraica entre los valores extremos de una magnitud que varía durante cierto intervalo de tiempo.

**RMS** es una medida de la energía implícita en la vibración.

#### 5.4 Análisis del espectro de vibración

Los pasos necesarios para el análisis del espectro son:

- **Recolección de datos**

Conocer el número de dientes de los engranajes.

- **Analizar el espectro**

Identificar el tipo de medición hecha en el espectro, estas pueden ser deslizamiento, velocidad y aceleración.

Identificar la velocidad de funcionamiento de la máquina.

Identificar picos de los armónicos de la velocidad de funcionamiento (1X, 2X, 3X, etc.)

- **Identificar frecuencias de fallo sospechosas.**

Buscar armónicos a las frecuencias de fallo y verificar los picos.

- **Evaluación de la severidad de la vibración**

Comparar los valores de la amplitud de vibración con los estándares ISO mostrados en la Tabla 5.1. Se utiliza habitualmente la norma estándar de comparación ISO 10816-1.

Tabla 5.1: Valores para evaluar severidad según ISO 10816-1. Fuente: [8].

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)	Insatisfactoria (alerta)
11.20	0.62			Inaceptable (peligro)	
18.00	1.00	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)	Inaceptable (alerta)
28.00	1.56			Inaceptable (peligro)	Inaceptable (peligro)
45.00	2.51				Inaceptable (peligro)

### Clasificación de máquinas

Las máquinas están clasificadas por Clase I, Clase II, Clase III y Clase IV, la descripción para cada una de ellas se presenta en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2: Clasificación de las máquinas según norma ISO 10816-1. Fuente: [9].

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

### 5.5 Fallos en la caja de engranajes

Los fallos en engranajes rectos tienen la designación mostrada en la Figura 5.1 y para ello se establecen las siguientes limitantes:

- El fallo estará presente solo en un engranaje de la Etapa 1 (Z1 o Z2).
- La carga del sistema estará aplicada en el eje 2 (S2).
- Los rodamientos estarán en buenas condiciones.

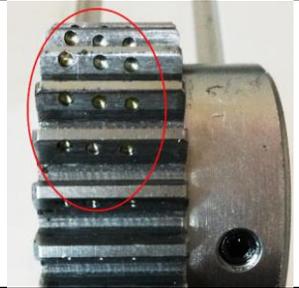
Con lo cual se proporciona 4 combinaciones de fallos en la Etapa 1, los mismos se presentan en la Tabla 5.3

Tabla 5.3: Combinación de fallos para la Etapa 1.

	Z1	Z2
<b>Combinación 1</b>	1	2
<b>Combinación 2</b>	1	3
<b>Combinación 3</b>	2	1
<b>Combinación 4</b>	3	1

La designación numérica de los fallos para engranajes en la Etapa 1 y la Etapa 2 se presenta en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Designación numérica para realizar combinación de fallo - Caja reductora.

Designación		Significado	
1	1_1	Sin fallo	Aplica en Z1 y Z2
<b>Z1</b>		<b>Rueda dentada 1</b>	
2	2_1	Fallo por desgaste <i>Desgaste de 2 líneas a lo largo de la cara del diente</i> <i>Profundidad de 0.4 mm</i> <i>Ancho 0.7 mm</i> <i>Separación entre líneas 0.7 mm</i>	
3	3_1	Fallo por fatiga superficial <i>Agujeros de 2.5 mm de diámetro</i> <i>Cono a 120°</i>	
<b>Z2</b>		<b>Rueda dentada 2</b>	
2	2_2	Fallo por rayado <i>Profundidad de 0.5 mm</i> <i>Ancho 0.7 mm</i> <i>Separación entre líneas 1.2mm</i>	
3	3_3	Fallo por rotura del diente al 100 %	

Para la caja reductora, las características técnicas de los engranajes se presentan en la Tabla 5.5 y en las tapas de los rodamientos se encuentran ubicados rodamientos rígidos de bolas de una hilera NTN 6005ZC3/0G .

Tabla 5.5: Características técnicas de los engranajes.

Engranajes	Módulo	Número de dientes	Altura diente (mm)	Ancho diente (mm)
Z1	2.5	27	5.062	20
Z2	2.5	53	5.062	20

## 6. Proceso y procedimiento

### 6.1 Proceso

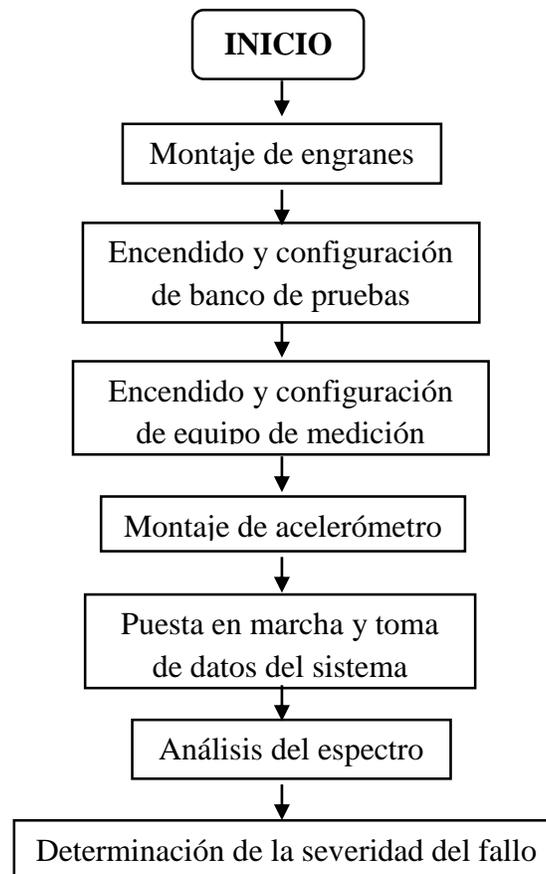


Figura 6.1: Proceso de la práctica.

### 6.2 Procedimiento

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

## 6.2.1 Montaje de engranajes

1. Seleccionar una combinación de fallos de las que se presentan en la Tabla 5.3, etapa 1 (Z1 y Z2) que están disponible en el laboratorio. Llenar la información en la Tabla 6.1 de acuerdo a la información presentada en la Tabla 5.4.

Tabla 6.1: Información del engranaje con fallo

Rueda N°	Designación del fallo	Descripción del fallo

2. Desmontar la banda que conecta la salida de la caja con el freno, mostrado en la Figura 6.2. Ayúdese de llaves hexagonales adecuadas.
3. Destapar la caja de engranaje, retirando los tornillos de sujeción.
4. Desmontar los ejes de la caja de engranaje, quitando las tapas de los rodamientos.
5. Colocar los engranajes en sus respectivos puntos de fijación en cada eje respectivo como se muestra en la Figura 5.1.
6. Montar los ejes en la caja de engranajes, ubicando las tapas de los rodamientos.
7. Colocar banda entre las salidas de la caja de engranajes y el freno de forma alineada, ayúdese de una regla metálica para la alineación.
8. Tapar caja de engranajes y asegurar con los tornillos de sujeción.

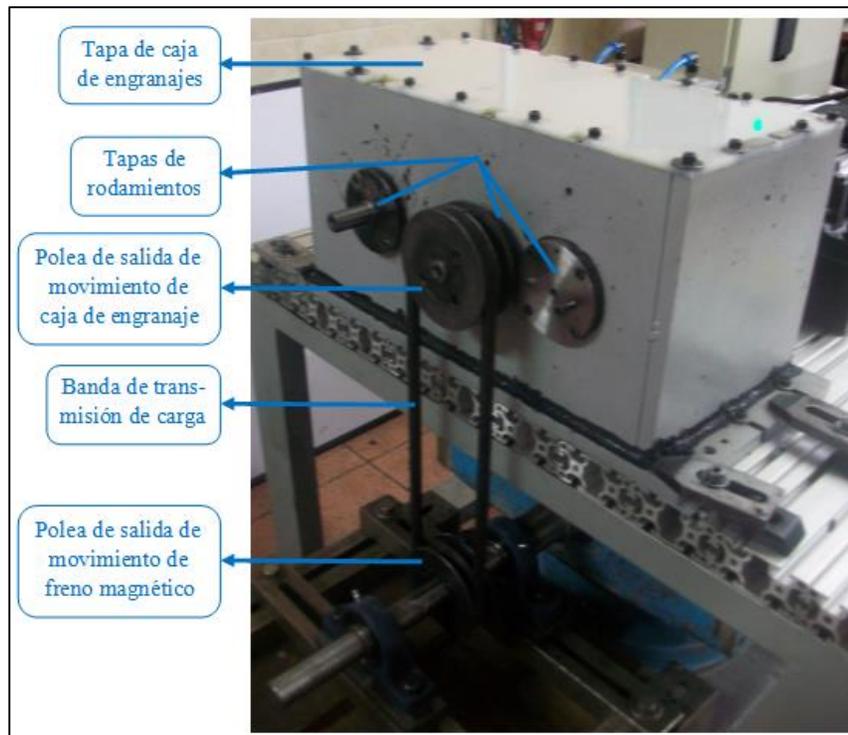


Figura 6.2: Sistema de transmisión de carga al sistema de caja de engranajes.



### 6.2.3 Encendido y configuración de los equipos de medición de vibraciones.

#### *Para ADASH VA4Pro*

1. Conectar cable de Acelerómetro 1 al canal 1 del analizador de vibraciones Adash VA4Pro.
2. Encender el analizador de vibraciones Adash VA4Pro.
3. Configurar equipo.
  - 3.1 Seleccionar el modo “Analizador” y pulsar “OK” (use los botones del cursor para desplazarse por las opciones que presenta el equipo).
  - 3.2 Pulsar “Proyecto”.
  - 3.3 Seleccionar “Nuevo conjunto” y pulsar “OK”.
  - 3.4 Asignar nombre y pulsar “OK”.
  - 3.5 Seleccionar la prueba creada y pulsar “OK”.
  - 3.6 Pulsar la opción “Sensores”.
  - 3.7 Seleccionar “AC 1” y pulsar “OK”.
  - 3.8 Asignar los valores mostrados en la Tabla 6.2 (cambiar valores en caso de ser necesario), seleccionar “Guardar” y pulsar “OK”.

*Tabla 6.2: Configuración de acelerómetro 1*

<b>Parámetros</b>	<b>Asignar</b>
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

- **Medición de ISO RMS**

1. Pulsar opción “Medida”.
2. Seleccionar “Nuevo básico” y pulsar “OK”.
3. Seleccionar la opción “ISO RMS” y pulsar “OK”.
4. Seleccionar “Guardar” y pulsar “OK”.

- **Medición de ESPECTRO**

1. Pulsar opción “Medida”.
2. Seleccionar “Nuevo avanzado” y pulsar “OK”.
3. Asignar los valores mostrados en la Tabla 6.3, seleccionar “Guardar” y pulsar “OK”.

Tabla 6.3: Configuración de analizador

Parámetros	Asignar
Tipo	espectro
Canal	1
Ventana	Hanning
Unidades	mm/s
Zoom de espectro	no
Banda: Fmin[Hz]	10
Rango[Hz]	1600
Líneas	1600
Promediando	lineal
Promedios	4
Solapamiento	50 %

**Para ADASH 4900**

1. Conectar cable de acelerómetro 2 al canal de entrada del equipo Adash 4900 Vibrio.
2. Encender equipo Adash 4900 pulsando el botón de encendido/apagado [⓪].
3. Seleccionar el modo “Valores RMS totales”, mostrado en la Figura 6.4(a) con la ayuda de los botones [▼ ▲].

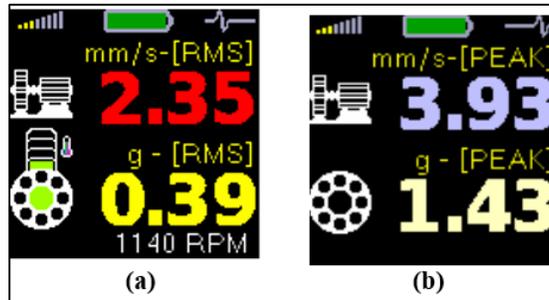


Figura 6.4: (a) Modo RMS Totales, (b) Modo Globales PEAK de equipo Adash 4900.

**6.2.4 Montaje de acelerómetro.**

1. Colocar accesorio de montaje magnético en acelerómetros 1 y 2.
2. Colocar acelerómetro 1 del equipo Adash VA4Pro y el acelerómetro 2 del equipo Adash 4900 en la posición mostrada en la Figura 6.5 para medir vibración en forma vertical.

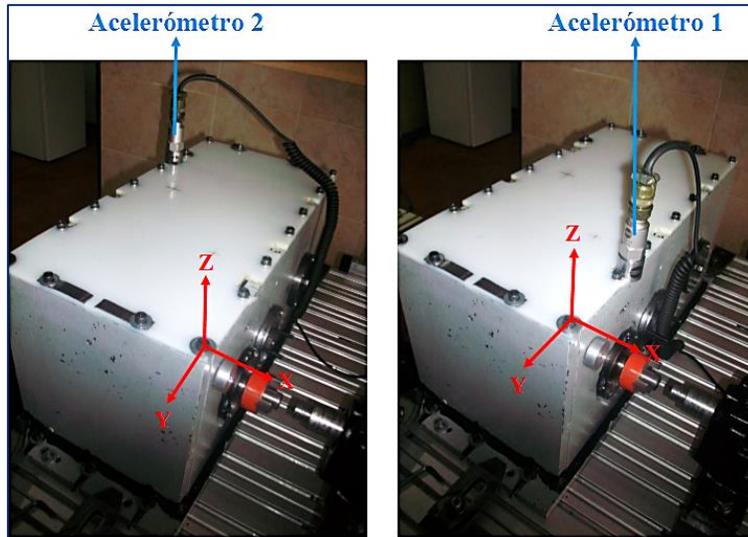


Figura 6.5: Posición de los acelerómetros en la caja de engranajes.

### 6.2.5 Puesta en marcha y toma de datos del sistema.

1. Encender motor pulsando “Hand On” [, en el variador de frecuencia DANFOSS, mostrado en la Figura 6.3.
2. En el software, variar “Source Current In” a 2, variando la perilla.
3. Esperar 1 minuto para que el sistema rotativo se estabilice.

#### *Toma de datos de equipo Adash 4900*

1. Esperar que el equipo Adash 4900 realice la medición de forma automática.
2. Verificar de forma visual que el equipo Adash 4900 haya realizado la medición.
3. Una vez que se hayan estabilizado los valores medidos por el equipo, anotar los valores medidos en la Tabla 6.4.
4. Cambiar al modo “Valores globales PEAK” el equipo Adash 4900, como se observa en la Figura 6.4(b) y esperar que el equipo realice la medición de forma automática.
5. Verificar de forma visual que el equipo Adash 4900 haya realizado la medición.
6. Una vez que se hayan estabilizado los valores medidos por el equipo, anotar los valores medidos en la Tabla 6.4

#### *Toma de datos de equipo Adash VA4Pro*

1. Presionar botón “Medir” en el equipo Adash VA4Pro.
2. Verificar de forma visual que el equipo Adash VA4Pro haya realizado la medición.
4. Pulsar el botón botón STOP [, en el software.

5. Apagar el motor pulsando “OFF”  en el variador de frecuencia DANFOSS.
6. Desmontar los acelerómetros.

### 6.2.6 Evaluar severidad de fallos

1. Guardar una imagen digital del espectro captado en el equipo Adash VA4Pro.
2. Mediante la Ecuación 5.1 y Ecuación 5.2, y con la velocidad de rotación del motor mostrado en el display del variador de frecuencia, calcular y llenar la Tabla 6.4 de los valores teóricos de:
  - Frecuencias de engrane: 1xGMF y 2x GMF.
  - 1x Piñón
  - 1x Rueda

El número de dientes para cada engrane se presentan en la Tabla 5.5.

3. En el espectro captado por el equipo Adash VA4Pro desplazarse en la gráfica mostrada en el equipo mediante los botones del cursor hasta los valores teóricos cercanos de frecuencias de engrane: (1xGMF y 2x GMF), 1x Piñón y 1x Rueda; y llenar los valores de frecuencia y amplitud en la Tabla 6.4.

La Tabla 6.4 presenta los valores teóricos y reales medidos en la caja de engranajes en buenas condiciones que sirven como referencia para ver la variación existente cuando se inserta un fallo al sistema, estos datos fueron obtenidos del espectro que se muestra en la Figura 6.6.

Tabla 6.4: Valores de frecuencias teóricas y reales para caja de engranajes en buenas condiciones y con fallos.

<b>EN BUENAS CONDICIONES</b>					<b>CON FALLO EN RUEDA DENTADA</b>				
<b>Datos del equipo Adash 4900</b>					<b>Datos del equipo Adash 4900</b>				
Valores medidos		<b>0,96</b>	mm/s – [RMS]		Valores medidos			mm/s – [RMS]	
		<b>0,49</b>	g – [RMS]					g – [RMS]	
Valores medidos		<b>3,06</b>	mm/s – [PEAK]		Valores medidos			mm/s – [PEAK]	
		<b>1,51</b>	g – [PEAK]					g – [PEAK]	
<b>Datos del equipo Adash VA4Pro</b>					<b>Datos del equipo Adash VA4Pro</b>				
ISO RMS		<b>1,98</b>	mm/s – [RMS]		ISO RMS			mm/s – [RMS]	
		Teórico	Real				Teórico	Real	
Elementos		F [Hz]	F [Hz]	Amplitud [mm/s] (RMS)	Elementos		F [Hz]	F [Hz]	Amplitud [mm/s] (RMS)
GMF	1 X	<b>574,0875</b>	<b>574,1</b>	<b>0,933</b>	GMF	1 X			
	2 X	<b>1148,175</b>	<b>1148</b>	<b>0,134</b>		2 X			
1x Piñón		<b>21,26</b>	<b>21,5</b>	<b>0,038</b>	1x Piñón				
1x Rueda		<b>10,83</b>	<b>10,8</b>	<b>0,046</b>	1x Rueda				

4. Determinar la severidad del fallo de acuerdo a la Tabla 5.1 y llenar la Tabla 6.6:

Tabla 6.6: Condición de la máquina:

<i>EN BUENAS CONDICIONES</i>		<i>CON FALLO EN RUEDA DENTADA</i>	
“ISO RMS”	[mm/s] (RMS)	“ISO RMS”	[mm/s] (RMS)
Tipo de máquina	Clase (*) _____	Tipo de máquina	Clase (*) _____
Condición		Condición	

\* La clase de máquina se determina de acuerdo a la Tabla 5.2.

- En el espectro medido por el equipo Adash VAPro4 comprobar que las bandas laterales que aparecen en 1x GMF tienen una separación igual a la frecuencia del engrane que contiene el fallo, es decir una separación de “1x Piñón” o “1x Rueda”.
- Presentar el espectro captado por el equipo Adash VA4Pro para la caja de engranajes con fallo en una rueda dentada.

En la Figura 6.6 se presenta el espectro captado por el equipo ADASH VA4Pro sobre la caja de engranajes en buenas condiciones.

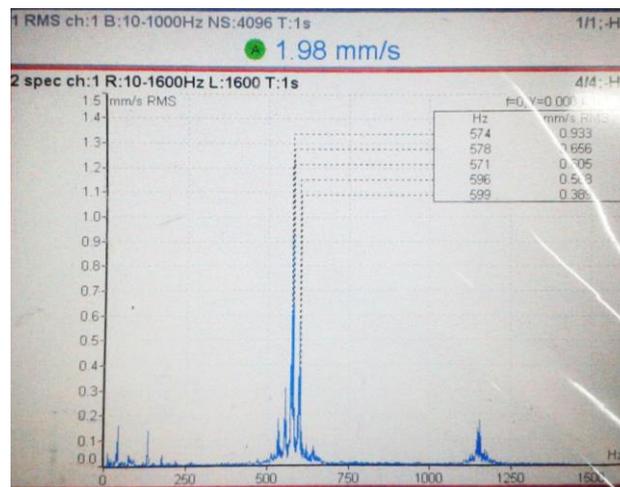


Figura 6.6: Espectro del sistema en buenas condiciones.

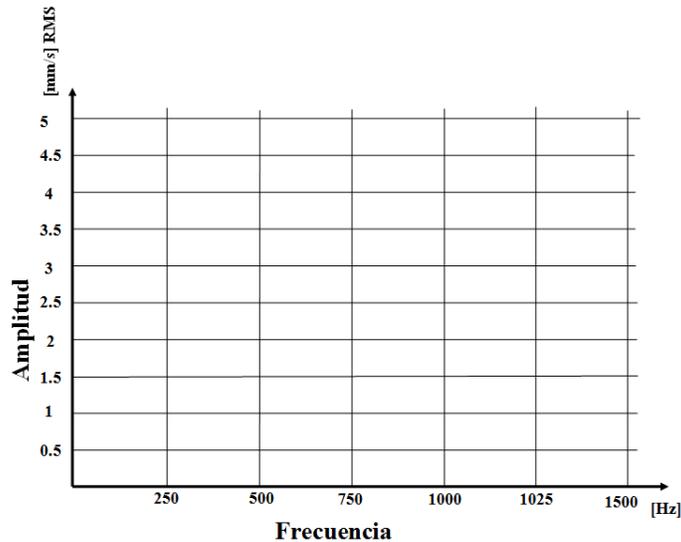


Figura 6.7: Espectro del sistema con fallo en un engranaje.

### 6.2.7 Apagar equipos de medición.

Una vez terminada las mediciones con los equipos, es necesario apagarlos, para ello realizar el siguiente procedimiento.

- **Apagar equipo Adash VA4Pro.**

1. Pulsar la opción “Cerrar Proyecto”.
2. El analizador de vibraciones le muestra el aviso: “¿Guardar los datos?”, pulsar la opción “NO”.
3. Pulsar la opción “Pantalla principal”.
4. Pulsar la opción “Apagar”.
5. El analizador de vibraciones le muestra un aviso: “¿Apagar el equipo?”, pulsar la opción “SI”.
6. Desconectar el cable del acelerómetro.
7. Guardar el analizador de vibraciones.

- **Apagar equipo Adash 4900**

1. Mantener pulsado el botón de encendido/apagado [⏻] por 6 segundo y verificar de forma visual que el equipo este apagado
2. Desconectar el cable del acelerómetro.
3. Guardar el medidor de vibraciones.

### 6.2.8 Apagar banco de pruebas

1. Apagar la unidad de control eléctrico.
2. Cerrar el software de control y apagar el computador portátil.
3. Desconectar puerto USB proveniente de la unidad de control eléctrico al computador.

## **7. Resultados y/o discusión**

### *7.1 Resultados*

---

---

---

---

---

---

### *7.2 Discusión*

---

---

---

---

---

---

## **8. Conclusiones y recomendaciones**

### *Conclusiones*

---

---

---

---

---

---

### *Recomendaciones*

---

---

---

---

---

---

## Referencias

- [1] R. PASCUAL JIMENEZ, «Análisis de Vibraciones en Máquinas Rotatorias», Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile, 2011.
- [2] J. M. PINTOR BOROBIA, «Vibraciones en Máquinas», en *Elementos de Máquinas y Vibraciones*, Universitas Navarrensis.
- [3] ADASH Ltd, «User's Guide Adash 4900 - Vibrio III». .
- [4] SINAIS, «Frecuencias propias de un engranaje», *Curso de análisis de vibraciones*. [En línea]. Disponible en: [http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/engranajes/frecuencias\\_engranajes.html](http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/engranajes/frecuencias_engranajes.html). [Accedido: 06-oct-2014].
- [5] W. GARCÍA GONZÁLEZ, «Análisis causa raíz mediante vibraciones a compresor aeren de tornillo», Universidad Veracruzana, Coatzacoalcos - Veracruz, 2011.
- [6] Á. A. DEDES ROZAS, «Análisis de vibraciones en caja de engranajes», Universidad de Concepción, 2009.
- [7] A-MAQ, «Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico». 2005.
- [8] ISO, «ISO 10816-1:1995 - Mechanical vibration -- Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts -- Part 1: General guidelines». .
- [9] SKF Reliability Maintenance Institute, *Análisis de Vibraciones Categoría 2: ISO 18436 WI203*. SKF, 2010.

## Glosario

**Aceleración.**- Es un vector que especifica la derivada de la velocidad en el tiempo.

**Amplitud.**- Distancia entre los picos positivo y negativo de una onda.

**Bandas laterales:** son frecuencias equidistantes de la frecuencia de engrane. Estas bandas laterales corresponden con la frecuencia de giro del piñón y de la corona. Son muy importantes en el diagnóstico del engrane, ya que indican si la corona o el piñón se encuentran en mal estado.

**Desplazamiento.**- Es una cantidad vectorial que describe el cambio de posición de un cuerpo o partícula con respecto a un sistema de referencia.

**Espectro de frecuencias.**- es un fenómeno de ondas de vibración, sonoras o electromagnéticas que sirve para medir la distribución de amplitudes de una determinada frecuencia.

**Frecuencia.**- Número de ciclos completados en un período determinado de tiempo.

**Frecuencia natural.**- Sólo depende de la masa y la rigidez del sistema.

**Periodo.**- Tiempo necesario para completar un ciclo de movimiento.

**Resonancia.**- Se genera cuando cualquier cambio, incluso muy pequeño, en la frecuencia de la excitación se iguala a la frecuencia natural del sistema.

**Velocidad.**- Es un vector que especifica la derivada del desplazamiento en el tiempo.

**Velocidad crítica.**- Velocidad que corresponde con la frecuencia natural del sistema.

## **USO DE LA CÁMARA TERMOGRÁFICA TESTO 882 - TERMOGRAFÍA INFRARROJA**

Rómulo Guiracocha, egresado de la carrera de Ingeniería Mecánica, correo electrónico:

[rguiracocha@est.ups.edu.ec](mailto:rguiracocha@est.ups.edu.ec)

Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Mecánica

Asignatura: Termografía infrarroja, Cuenca – Ecuador, Fecha de entrega: 29 – Enero - 2015

---

### **1. Presentación de la práctica**

En esta práctica se realizará la toma de imágenes térmicas infrarrojas con la cámara termográfica en un sistema eléctrico o mecánico a fin de entender el funcionamiento de la cámara termográfica Testo 882 y el software de análisis de imágenes termográficas IRSoft.

### **2. Requisitos y precauciones**

- Para la ejecución de la práctica, es de carácter obligatorio el uso de mandil y gafas en los laboratorios.
- Es necesario no portar o vestir elementos sueltos tales como: cadenas, anillos y/o pulseras; en caso de tener el cabello largo mantenerlo recogido.

#### *Requisitos:*

De carácter obligatorio y previo a la realización de la práctica lea los textos sugeridos:

- Guía de la termografía infrarroja [1] pág. 20 – 25, 43 – 46, 55, 57 – 61.
- Manual del usuario: Testo 882 [2] pág. 12, 13, 21, 22.
- Manual de usuario: IRSoft [3] pág. 11 - 20, 27, 28.

#### *Precauciones:*

- Verificar que la carga de batería del equipo sea mayor al 50%, por indicaciones del fabricante.
- Verificar que la cámara tenga insertada la tarjeta micro-SD.
- No exponer la cámara a mediciones superiores a los 350 °C.

### **3. Objetivos**

- Utilizar la cámara termográfica Testo 882.
- Capturar imágenes de un sistema eléctrico o mecánico.
- Analizar la imagen térmica.

#### 4. Equipos, instrumentos y software

Tabla 4.1. Equipos, instrumentos y software

Descripción	Marca	Serie
Cámara Termográfica	Testo	882
Software de análisis de imágenes térmicas	Testo	IRSoft
Sistema eléctrico o mecánico		

#### 5. Exposición

##### Termografía

Es una técnica que permite medir la temperatura superficial a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar mediante la captación de los niveles de radiación infrarroja del espectro electromagnético [1].

##### Radiación térmica infrarroja

Todo cuerpo sobre el cero absoluto de temperatura ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) irradia una energía con una longitud de onda que se encuentra en el infrarrojo ( $0,76 - 1.000 \mu\text{m}$ ), del espectro electromagnético. Un cuerpo a mayor temperatura genera mayor emisión de radiación térmica.

##### Transmisión de calor por radiación

Se lleva a cabo por emisión y absorción de radiación térmica. Esta energía se transfiere a la velocidad de la luz. El calor neto transmitido será la diferencia entre lo que se ha absorbido y lo que se ha emitido.

##### Espectro electromagnético

Se denomina a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. La Figura 5.1 presenta todas las ondas electromagnéticas dispuestas en función de la frecuencia y la longitud de onda. El espectro de longitud de onda de los rangos de la luz infrarroja va aproximadamente desde 1 mm hacia abajo hasta aproximadamente 760 nm (nanómetros).

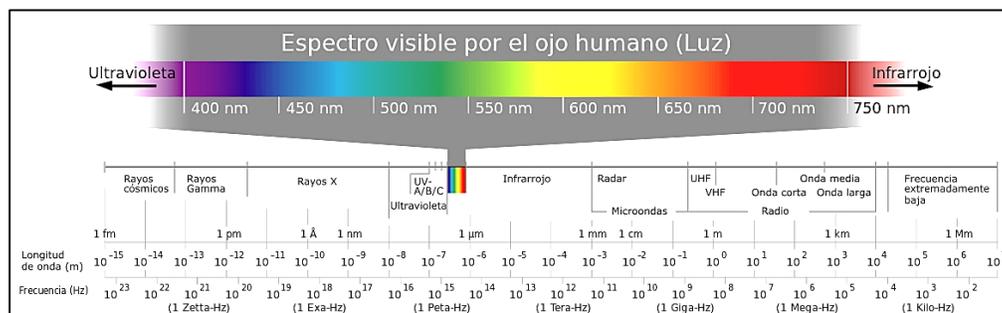


Figura 5.1: Longitud de onda electromagnética. Fuente:[4].

## Cámara termográfica

Es el dispositivo que va a detectar el patrón térmico del cuerpo al que se apunta, en el espectro de la longitud de onda infrarroja y sin entrar en contacto físico con ese cuerpo. La cámara térmica Testo 882 se muestra en la Figura 5.2.



Figura 5.2: Cámara TESTO 882. Fuente: [2].

### Principio de captación de la imagen térmica

El sistema óptico de la cámara hace converger en su detector toda la radiación infrarroja que emite el objeto evaluado, obtiene una respuesta que será leída por la capa electrónica de la cámara. Esa señal se convierte en una imagen electrónica en la pantalla con distintos tonos de color que marcan la distinta radiación infrarroja que emite la superficie estudiada [5].

### Uso del equipo Testo 882

El control general de la cámara se realiza mediante 8 botones que tienen por objetivo controlar y hacer uso de las características con las que cuenta el equipo. En la Figura 5.3 se observa el panel de control de la cámara y en la Tabla 5.1 se resume las funciones de cada uno de los botones.



Figura 5.3: Disposición de botones en el panel de control del equipo Testo 882.

Tabla 5.1: Funciones de los botones del panel de control de la cámara termográfica.

Botón		Función
1		Botón de función, abre la función asignada al botón de selección rápida que se muestra en la parte inferior izquierda de la pantalla.
2		Botón [Esc], cancela una acción cualesquiera que se está por asignar en la cámara termográfica.
3		Botón [OK], al ser presionado abre el menú y sirve para confirmar la selección de alguna función. Al mover el botón OK hacia arriba, abajo, derecha e izquierda, este funciona como palanca de mando para seleccionar las funciones de la cámara termográfica.
4		Botón [⏻], enciende y apaga la cámara termográfica.
5		Botón de función, abre la función asignada al botón de selección rápida que se muestra en la parte inferior derecha de la pantalla.
6		Botón disparador, captura y guarda la imagen térmica.
7		Botón de Selección de modo de enfoque, realiza el enfoque automático o el control manual del enfoque de la imagen térmica. Ubicación lado derecho para enfoque manual y ubicación lado izquierdo para enfoque automático.
8		Perilla de Motor de control de enfoque, realiza el enfoque automático de la imagen térmica, mediante el desplazamiento del mismo. Funciona cuando está activado el modo automático de enfoque.

### Software IRSoft

El software IRSoft se utiliza para el análisis, procesamiento y archivo de las imágenes grabadas por la cámara termográfica Testo 882, también permite la presentación de informes por la clara presentación de los datos y permite realizar ajustes en la cámara termográfica. Como se observa en la Figura 5.4, el programa consta de tres partes:

- a.- Herramienta de análisis de imagen
- b.- Espacio de trabajo, se divide en 7 áreas:
  1. Imagen térmica
  2. Escala de temperatura
  3. Histograma
  4. Marcas de imagen térmica
  5. Imagen real
  6. Perfil
  7. Observaciones
- c.- Barra de estado

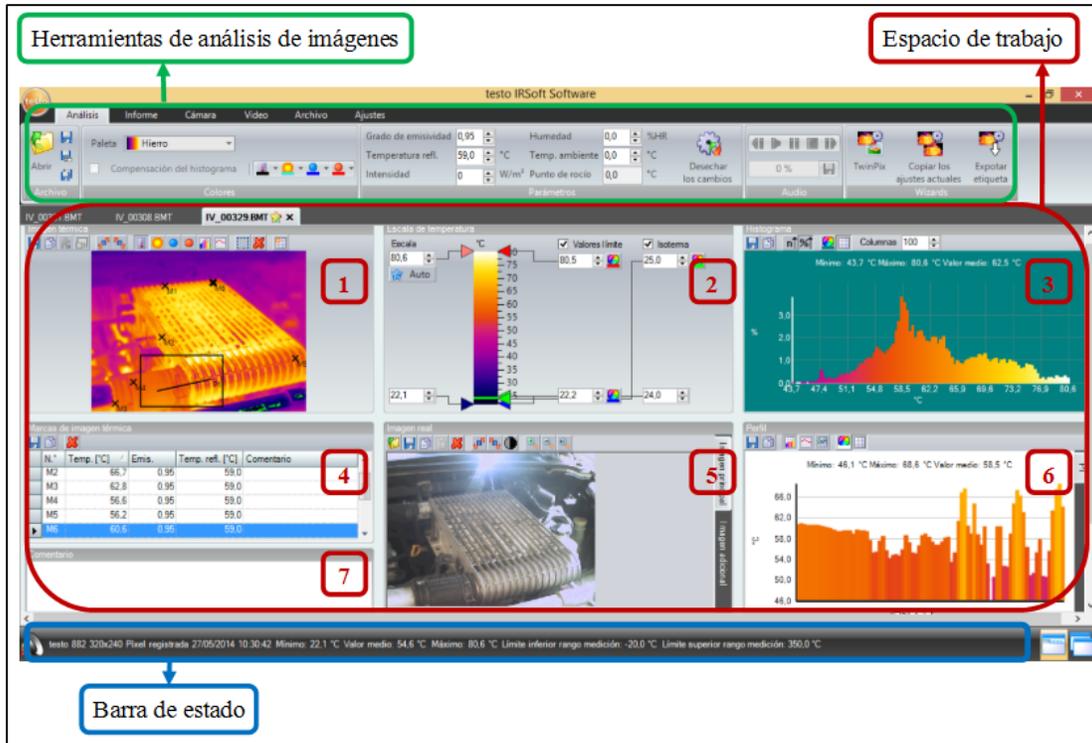


Figura 5.4: Software de análisis IRSoft.

## 6. Proceso y procedimiento

### 6.1 Proceso

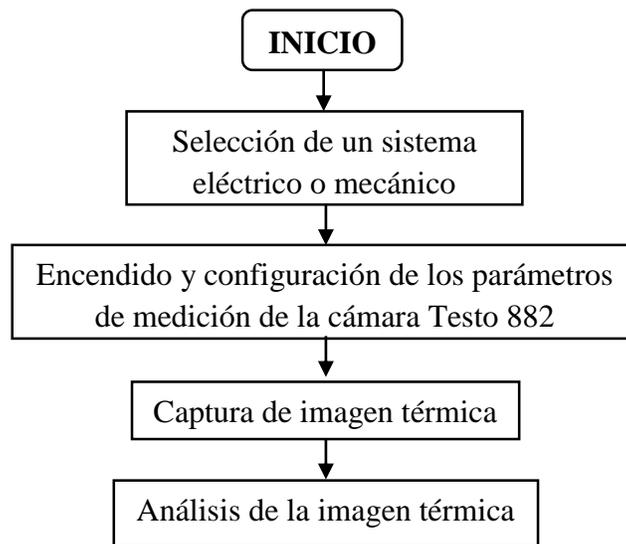


Figura 6.1. Proceso para la configuración.

### 6.2 Procedimiento

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

### 6.2.1 Selección del sistema eléctrico o mecánico

1. Seleccionar un sistema eléctrico (cualquier cabina de mando de sistemas de medición) o sistema mecánico (cualquier motor de una máquina herramienta).
2. Poner a funcionar el sistema eléctrico o mecánico por un tiempo mínimo de 5 minutos para iniciar con la práctica.

### 6.2.2 Encendido y ubicación de cámara termográfica Testo 882

1. Encender la cámara termográfica pulsando el botón [⏻] ubicado en el panel de control de la cámara.
2. Retirar la tapa del lente de la cámara.
3. Ubicar la cámara termográfica aproximadamente a 1 m de distancia con el lente apuntando de forma perpendicular al sistema seleccionado para esta práctica. Ayúdese del trípode en caso de ser necesario.
4. Seleccionar el modo de enfoque manual, situado en la parte lateral de la cámara termográfica.

### 6.2.3 Configuración de la cámara termográfica

Configuración 1 – Ajuste de humedad relativa

1. Pulsar OK.
2. Seleccionar la opción “Funciones de medición” (use el botón OK hacia arriba o hacia abajo como cursor para seleccionar las diferentes opciones) y pulsar OK.
3. Seleccionar la opción “Humedad” y pulsar OK.
4. Pulsar OK en la opción “Temperatura”.
5. Graduar el valor a +22°C y pulsar OK.
6. Desplazar el cursor a la opción “Humedad amb.” y pulsar OK.
7. Colocar el valor redondeado de la humedad relativa media que se muestra en la Tabla 6.1 de acuerdo a la fecha que realice la práctica y pulsar OK.

Tabla 6.1: Humedad relativa promedio en la ciudad de Cuenca. Fuente: [6].

<b>Humedad relativa para la ciudad de Cuenca</b>												
	<b>MES</b>											
	<b>Ene.</b>	<b>Feb.</b>	<b>Mar.</b>	<b>Abr.</b>	<b>May.</b>	<b>Jun.</b>	<b>Jul.</b>	<b>Ago.</b>	<b>Sep.</b>	<b>Oct.</b>	<b>Nov.</b>	<b>Dic.</b>
<b>Máx.</b>	83,74	84,60	85,66	86,30	85,46	85,02	83,24	83,06	81,48	81,32	84,18	83,34
<b>Media</b>	<b>62,97</b>	<b>63,54</b>	<b>64,51</b>	<b>65,14</b>	<b>65,21</b>	<b>61,56</b>	<b>62,71</b>	<b>62,94</b>	<b>61,12</b>	<b>59,33</b>	<b>62,66</b>	<b>62,70</b>
<b>Mín.</b>	42,20	42,48	43,36	43,98	44,96	38,10	42,18	42,82	40,76	37,34	41,14	42,06

8. Pulsar Aplicar con el botón de función izquierdo.

#### Configuración 2 – Ajuste de Rango de medición

1. Pulsar OK.
2. Seleccionar la opción “Funciones de medición” y pulsar OK.
3. Seleccionar la opción “Rango de medición” y pulsar OK.
4. Seleccionar la opción “0,0 ... 350,0” y pulsar OK.

#### Configuración 3 – Ajuste de Emisividad

1. Pulsar OK.
2. Seleccionar la opción “Emisividad” y pulsar OK.
3. Seleccionar la opción “Personalizado”.
4. Mover cursor hacia la derecha y pulsar OK.
5. Cambiar el valor de emisividad a un valor de 0,95 y pulsar OK.
6. Mover el cursor hacia la derecha a la opción “Reflejada Temp.” y pulsar OK.
7. Graduar el valor a +22°C y pulsar OK.
8. Pulsar Aplicar con el botón de función izquierdo.

#### Configuración 4 – Punto frío/caliente

1. Pulsar OK.
2. Seleccionar la opción “Funciones de medición” y pulsar OK.
3. Seleccionar la opción “Punto frío/caliente” y pulsar OK.

#### Configuración 5 – Ajuste de Paleta de colores

1. Pulsar OK.
2. Seleccionar la opción “Paleta” y pulsar OK.
3. Seleccionar la opción “Hierro” y pulsar OK.

### **6.2.4 Captura de imagen térmica**

1. Conseguir el mejor enfoque de la imagen a tomar, girando manualmente el lente de la cámara.
2. Pulsar el disparador de la cámara termográfica y capturar la imagen.
3. Pulsar el disparador nuevamente para guardar la imagen térmica.
4. Colocar la cámara termográfica a 0.5 m del sistema elegido, cambiar el modo de enfoque a automático (mover botón 7), con la ayuda del control de enfoque (botón

- 8) conseguir el mejor enfoque de la imagen. Cambiar la paleta de colores a Arco iris (Configuración 5).
5. Pulsar el disparador de la cámara termográfica y capturar la imagen.
6. Pulsar el disparador nuevamente para guardar la imagen térmica.
7. Colocar la cámara termográfica a 1 m de distancia del sistema elegido, cambiar el modo de enfoque a manual (mover botón 7), conseguir el mejor enfoque de la imagen a tomar, girando manualmente el lente de la cámara. Cambiar el valor de emisividad a 0.75 (Configuración 3) y la paleta de colores a Testo (Configuración 5).
8. Pulsar el disparador de la cámara termográfica y capturar la imagen.
9. Pulsar el disparador nuevamente para guardar la imagen térmica.
10. Apagar el sistema eléctrico o mecánico usado en la práctica.
11. Apagar cámara termográfica pulsando el botón [☺] ubicado en el panel de control de la cámara y tapar el lente de la cámara.

### **6.2.5 Análisis de la imagen térmica.**

1. Extraer tarjeta micro SD de la cámara y descargas fotos en un ordenador.
2. Abrir el software testo IRSoft.
3. Hacer clic en “Open” ubicado en la barra de análisis de imágenes.
4. Seleccionar las tres imágenes térmicas capturadas en esta práctica y pulsar “Abrir”.
5. Hacer clic en la primera imagen (parte superior del espacio de trabajo).
6. Colocar los valores de emisividad, temperatura reflejada, humedad y temperatura ambiente dados para la configuración de la cámara en la barra de herramienta de análisis de imagen.
7. En la sección de colores, de “Palette” ubicado en la barra de herramienta de análisis de imágenes, elegir la opción que proporcione una imagen con mejor visibilidad de la distribución de temperatura.
8. En el cuadro “Thermal image” ubicado en el espacio de trabajo seleccionar la opción “Histogram” [, sacar el histograma del área rectangular más caliente de la imagen.
9. En la Tabla 6.2, llenar los valores de temperatura mínima, máxima y promedio que se muestran en el recuadro Histogram ubicado en el espacio de trabajo.
10. En el cuadro “Thermal image” ubicado en el espacio de trabajo seleccionar la opción “Temperatura profile” [, sacar el perfil lineal de temperatura ubicando una línea desde un punto cualesquiera al punto más caliente de la imagen.
11. En la gráfica de “Temperature scale” ubicado en el espacio de trabajo, activar la opción “Limit values” e “Isotherms” y variar estos valores moviendo las flechas respectivas.
12. Guarde los cambios realizados en la imagen térmica pulsando “Save file” []

13. Capturar y presentar la gráfica de los cambios realizados en la imagen térmica como se muestra en la Figura 6.1.

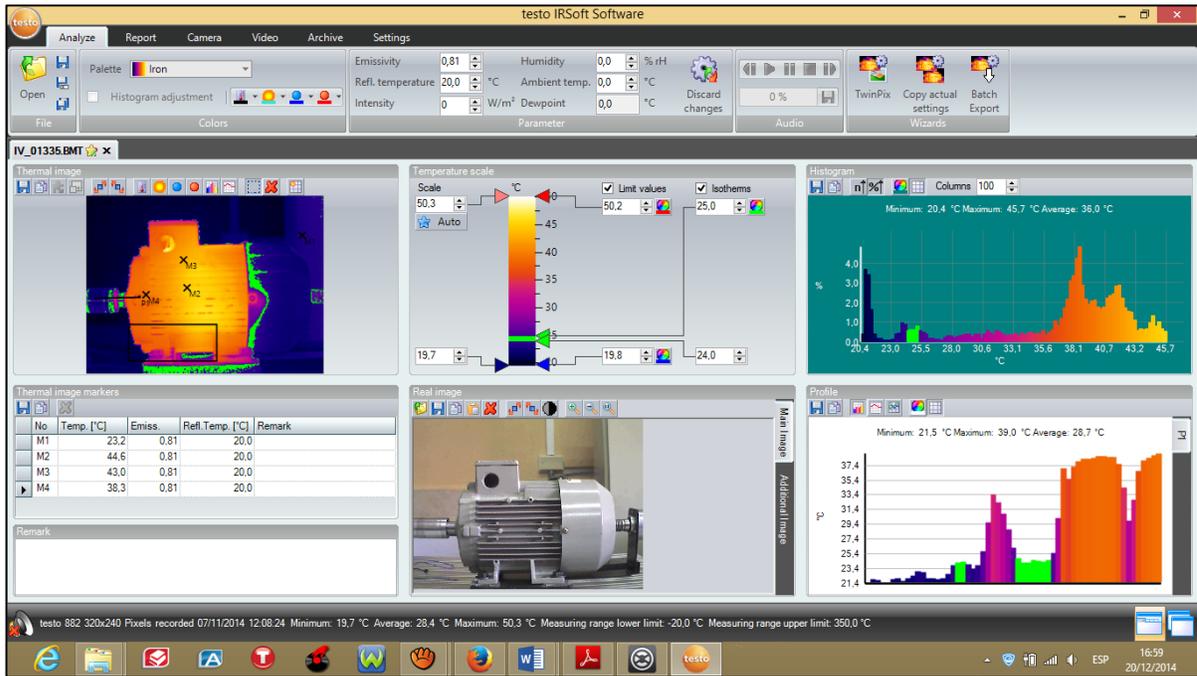


Figura 6.1: Imagen térmica analizada en el software IRSoft.

14. Repetir el análisis de la imagen térmica 2 e imagen térmica 3 capturadas por la cámara.

Tabla 6.2: Valores de temperatura captados en las imágenes térmicas.

Imagen Térmica	Emisividad	Temperatura mínima [°C]	Temperatura máxima [°C]	Temperatura promedio [°C]
1				
2				
3				

## 7. Resultados y/o discusión

### 7.1 Resultados

---



---



---



---



---

---

---

---

## 8. Conclusiones y recomendaciones

### *Conclusiones*

---

---

---

---

---

---

---

---

### *Recomendaciones*

---

---

---

---

---

---

---

---

## Referencias

- [1] S. MELGOSA REVILLAS, «Guía de la termografía infrarroja - Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética». Gráficas Arias Montano, S.A., 16-nov-2011.
- [2] TESTO, «Testo 882 - Termal Image- Instruction manual». .
- [3] TESTO, «IRSoft PC-Software - Instruction manual». .
- [4] «Espectro electromagnético». [En línea]. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_electromagn%C3%A9tico](http://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico). [Accedido: 13-nov-2014].
- [5] TRC, «Análisis termográfico». 2011.
- [6] M. P. PESÁNTES MOYANO, «Confort térmico en el área social de una vivienda unifamiliar en Cuenca-Ecuador», Universidad de Cuenca, Cuenca - Ecuador, 2012.

## **Glosario:**

**Cuerpo negro.-** Es un cuerpo que emite 100% de la radiación que recibe, no absorben la radiación.

**Emisividad.-** Es la relación entre la radiación que emite un cuerpo real y la emitida por un cuerpo negro, para una misma temperatura y longitud de onda.

**Histograma.-** Es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados.

**Humedad.-** Es el agua que impregna un cuerpo o el vapor presente en la atmósfera.

**Isoterma.-** Permite resaltar las partes de una imagen situadas por encima o por debajo de una temperatura, o bien entre uno o varios intervalos de temperatura.

**Radiación térmica.-** Es la transmisión de calor mediante ondas electromagnéticas.

**Temperatura aparente.-** Es la temperatura leída no compensada o corregida en la cámara termográfica. Muestra toda la radiación incidente en la cámara.

**Termografía.-** Es una técnica que permite medir temperaturas a distancia, con exactitud y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar.

## EVALUACIÓN DE FALLOS EN RODAMIENTOS - TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Rómulo Guiracocha, egresado de la carrera de Ingeniería Mecánica, correo electrónico:  
[rguiracocha@est.ups.edu.ec](mailto:rguiracocha@est.ups.edu.ec)

Universidad Politécnica Salesiana, Carrera de Ingeniería Mecánica

Asignatura: Termografía Infrarroja, Cuenca – Ecuador, Fecha de entrega: 29 – Enero - 2015

---

### 1. Presentación de la práctica

En esta práctica se analiza y evalúa, mediante imágenes termográficas, el estado de los rodamientos con y/o sin fallos en un sistema mecánico rotativo.

### 2. Requisitos y precauciones

Previo a la realización de esta práctica se deberá de haber cumplido con la práctica:  
“USO DE LA CÁMARA TERMOGRÁFICA TESTO 882 - TERMOGRAFÍA INFRARROJA”

- Para la ejecución de la práctica, es de carácter obligatorio el uso de mandil y gafas en los laboratorios.
- Es necesario no portar o vestir elementos sueltos tales como: cadenas, anillos y/o pulseras; en caso de tener el cabello largo mantenerlo recogido.

#### *Requisitos:*

De carácter obligatorio y previo a la realización de la práctica lea los textos sugeridos:

- Elementos de un sistema de termografía [1] pág. 17, 18.
- Realización de inspecciones térmicas [2] pág. 25 – 28.
- Inspecting bearings [3] pág. 1, 2.

#### *Precauciones:*

- Verificar que la carga de batería del equipo sea mayor al 50%, por indicación del fabricante.
- Verificar que la cámara tenga insertada la tarjeta micro-SD.
- No exponer la cámara a mediciones superiores a los 350 °C.

### 3. Objetivos

- Analizar y evaluar el estado de rodamientos con y sin fallo dentro de un sistema rotativo mediante imágenes termográficas.

#### 4. Equipos, instrumentos y software

Tabla 4.1. Equipos, instrumentos y software

Descripción	Marca	Serie
Banco de vibraciones		
Cabina eléctrica		
Laptop	HP	Pavilion G4
Cámara Termográfica	Testo	882
Software de análisis de imágenes térmicas	Testo	IRSoft

#### 5. Exposición

##### 5.1 Sistema mecánico rotativo

Son máquinas que tiene en común el transformar un determinado tipo de energía (eólica, hidráulica, eléctrica, química, entre otros) en energía de tipo mecánico que aparece en forma de movimiento giratorio en un eje.

El sistema rotativo de eje de transmisión, mostrado en la Figura 5.1, se utiliza para el desarrollo de esta práctica.

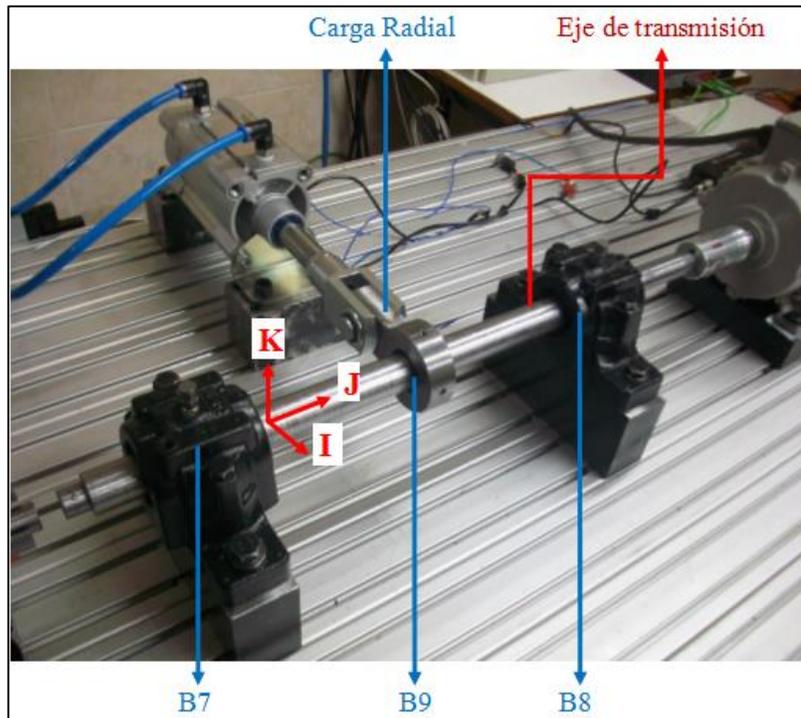


Figura 5.1: Designación de rodamientos en el sistema de eje de transmisión.

## 5.2 Rodamientos.

Es un elemento mecánico que reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a éste por medio de rodadura, que le sirve de apoyo y facilita su desplazamiento.

### Inspección termográfica de rodamientos

Los rodamientos son los elementos más comunes en los equipos mecánicos, de allí la importancia de conocer su comportamiento térmico.

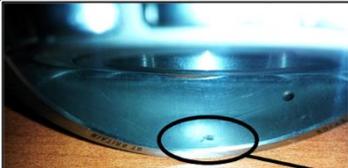
Los problemas en los rodamientos se suelen encontrar comparando sus temperaturas con las temperaturas de superficie de rodamientos similares que funcionan en circunstancias parecidas. En una imagen por infrarrojos, el sobrecalentamiento se muestra como "puntos calientes" y se suele localizar comparándolo con las imágenes térmicas de un equipo similar [3].

Las causas del calentamiento en los rodamientos se originan debido al exceso de fricción en los elementos de rodadura o a problemas con la lubricación. La ventaja de la inspección térmica en rodamientos es la facilidad y rapidez con la que se puede determinar el estado en el que está trabajando el rodamiento; para una mayor precisión del fallo de un rodamiento se complementa el análisis mediante la medición del nivel de vibración mecánica y/o acústica.

### 5.3 Combinación de fallos en rodamientos

Los rodamientos con fallos disponibles en el laboratorio para la realización de esta práctica se presentan en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Fallos construidos en rodamientos SKF 22207 EK/C3. Fuente: [4]

Elemento del rodamiento	Dimensiones del fallo	Imagen de fallo
<b>Rodamiento SKF 22207 EK/C3</b>		
Pista exterior	Picadura de 1.5 mm de diámetro y 0.15mm de profundidad	
Elemento rodante	Picadura de 1.5 mm de diámetro y 0.5 mm de profundidad	

La combinación de fallos planteada para realizar esta práctica establece como limitante que uno de los rodamientos este en buenas condiciones y el otro con fallo. El rodamiento en

buenas condiciones será tomado como referencia para comparar el aumento de temperatura en función del tiempo con respecto al rodamiento con fallo.

La combinación de fallos para el sistema rotativo se presenta en la Tabla 5.2,; en este sistema se trabaja con perturbación por carga radial.

*Tabla 5.2: Combinación de fallos para eje de transmisión.*

	<b>B7</b>	<b>B8</b>	<b>CARGA RADIAL en B9</b>
<b>Combinación 1</b>	Sin fallo	Fallo en pista exterior	Con carga radial
<b>Combinación 2</b>	Sin fallo	Fallo en elemento rodante	Con carga radial
<b>Combinación 3</b>	Fallo en pista exterior	Sin fallo	Con carga radial
<b>Combinación 4</b>	Fallo en elemento rodante	Sin fallo	Con carga radial

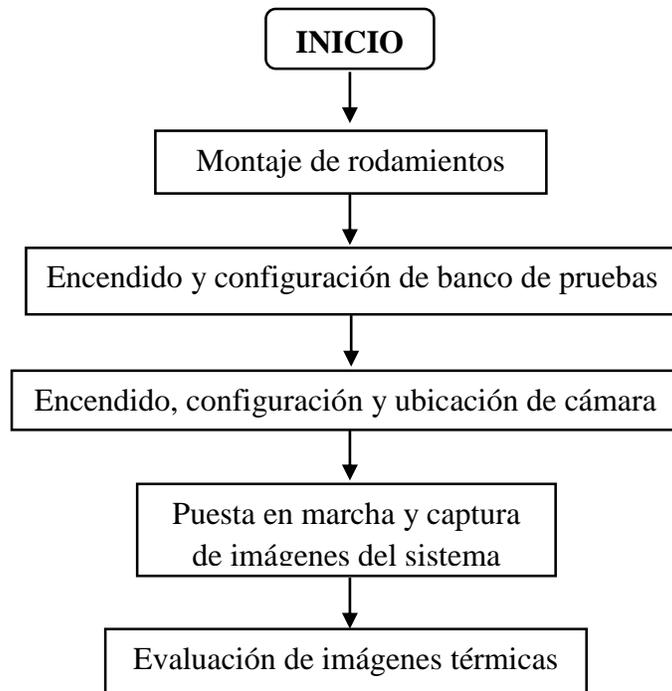
#### **5.4 Análisis termográfico**

Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética y con el uso de instrumentos adecuados, la radiación puede correlacionarse con la temperatura real del cuerpo que la emite. El conocer de forma precisa la temperatura de los componentes permite inferir su condición o estado [4].

Los cambios de temperatura pueden indicar problemas en muchas aplicaciones cotidianas. Con una cámara termográfica es posible hacer comprobaciones visuales rápidas y sencillas de las temperaturas de superficie.

### **6. Proceso y procedimiento**

#### **6.1 Proceso**



*Figura 6.1. Proceso de la práctica.*

## **6.2 Procedimiento**

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

### **6.2.2 Montaje de rodamientos**

1. Seleccionar una combinación de fallos para el sistema rotativo de la Tabla 5.2.
2. Desmontar las tapas de los soportes SKF de los rodamientos B7 y B8, mostrados en la Figura 5.1. Ayúdese de llaves adecuadas para aflojar los pernos.
3. Aflojar tuerca de fijación de los dos manguitos de montaje de rodamiento.
4. Aflojar el acople que une el motor al eje de transmisión.
5. Levantar el eje de transmisión y quitar los rodamientos B7 y B8.
6. Montar los rodamientos B7 y B8 seleccionados para esta práctica, colocar el eje en los soportes y verificar que los rodamientos queden centrados en los soportes.
7. Colocar aceite SAE 30 en los soportes rodamientos B7 y B8.
8. Ajustar el acople que une el motor al eje de transmisión.
9. Ajustar tuerca de fijación de los dos manguitos de montaje de rodamiento.
10. Colocar y ajustar tapas de los soportes de los rodamientos B7 y B8. Ayúdese de llaves adecuadas para ajustar los pernos.

### **6.2.2 Encendido y configuración del banco de pruebas**

1. Encender la unidad de control eléctrico mostrado en la Figura 6.2.

2. Encender el computador portátil.
3. Conectar puerto USB proveniente de la unidad de control eléctrico al computador.
4. Verificar que el variador de frecuencia DANFOSS mantenga encendida la luz de “OFF” [OFF].
5. Configurar software.
  - 5.1 Clic en “INICIO”, seleccionar programa “Control de velocidad de carga mediante mandos manuales para el banco de vibraciones de la UPS sede Cuenca”.
  - 5.2 Con el software abierto, pulsar botón STOP [STOP].
  - 5.3 Modificar Modbus Port a “COM 13”.
  - 5.4 Modificar Serial Port a “COM 9”.
  - 5.5 Variar “RPM Control Velocidad” a la velocidad de “1500 rpm”, variando la perilla.
  - 5.6 Pulsar botón “RUN” [RUN].
6. Verificar valor rpm establecido en el display de variador de frecuencia.

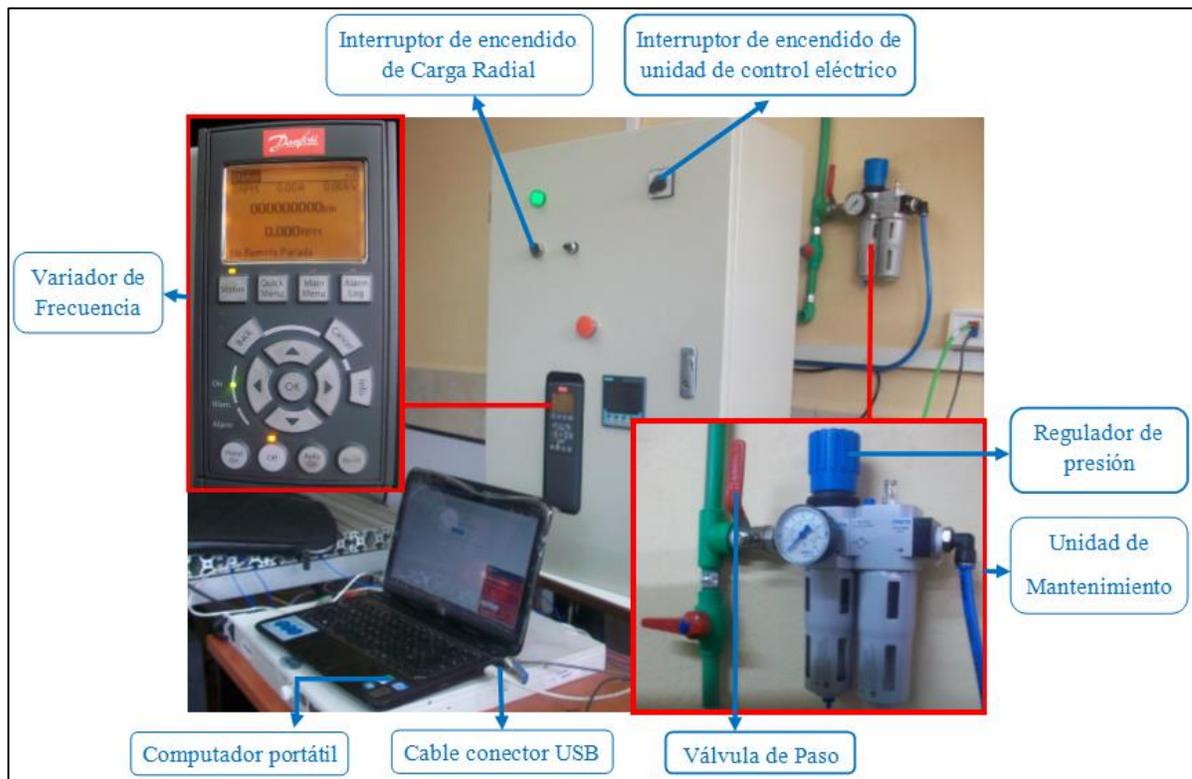


Figura 6.2: Unidad de control eléctrico del banco de pruebas.

### 6.2.3 Encendido, configuración y ubicación de la cámara termográfica

Encendido:

1. Encender cámara termográfica pulsando el botón [⏏] ubicado en el panel de control de la cámara.
2. Retirar la tapa del lente de la cámara.

Configuración:

Configuración 1 – Ajuste de humedad relativa

1. Pulsar OK.
2. Seleccionar la opción “Funciones de medición” (use el botón OK hacia arriba o hacia abajo como cursor para seleccionar las diferentes opciones) y pulsar OK.
3. Seleccionar la opción “Humedad” y pulsar OK.
4. Pulsar OK en la opción “Temperatura”.
5. Graduar el valor a +20°C y pulsar OK.
6. Desplazar el cursor a la opción “Humedad amb.” y pulsar OK.
7. Colocar el valor redondeado de la humedad relativa media que se muestra en la Tabla 6.1 de acuerdo a la fecha que realice la práctica y pulsar OK.

Tabla 6.1: Humedad relativa promedio en la ciudad de Cuenca. Fuente: [6].

<b>Humedad relativa para la ciudad de Cuenca</b>												
	<b>MES</b>											
	<b>Ene.</b>	<b>Feb.</b>	<b>Mar.</b>	<b>Abr.</b>	<b>May.</b>	<b>Jun.</b>	<b>Jul.</b>	<b>Ago.</b>	<b>Sep.</b>	<b>Oct.</b>	<b>Nov.</b>	<b>Dic.</b>
<b>Máx.</b>	83,74	84,60	85,66	86,30	85,46	85,02	83,24	83,06	81,48	81,32	84,18	83,34
<b>Media</b>	<b>62,97</b>	<b>63,54</b>	<b>64,51</b>	<b>65,14</b>	<b>65,21</b>	<b>61,56</b>	<b>62,71</b>	<b>62,94</b>	<b>61,12</b>	<b>59,33</b>	<b>62,66</b>	<b>62,70</b>
<b>Mín.</b>	42,20	42,48	43,36	43,98	44,96	38,10	42,18	42,82	40,76	37,34	41,14	42,06

8. Pulsar Aplicar con el botón de función izquierdo.

Configuración 2 – Ajuste de Rango de medición

1. Pulsar OK.
2. Seleccionar la opción “Funciones de medición” y pulsar OK.
3. Seleccionar la opción “Rango de medición” y pulsar OK.
4. Seleccionar la opción “0,0 ... 350,0” y pulsar OK.

Configuración 3 – Ajuste de Emisividad

1. Pulsar OK.
2. Seleccionar la opción “Emisividad” y pulsar OK.
3. Seleccionar la opción “Personalizado”.
4. Mover cursor hacia la derecha y pulsar OK.
5. Cambiar el valor de emisividad a un valor de 0,94 y pulsar OK.

6. Mover el cursor hacia la derecha a la opción “Reflejada Temp.” y pulsar OK.
7. Graduar el valor a +20°C y pulsar OK.
8. Pulsar Aplicar con el botón de función izquierdo.

#### Configuración 4 – Punto frío/caliente

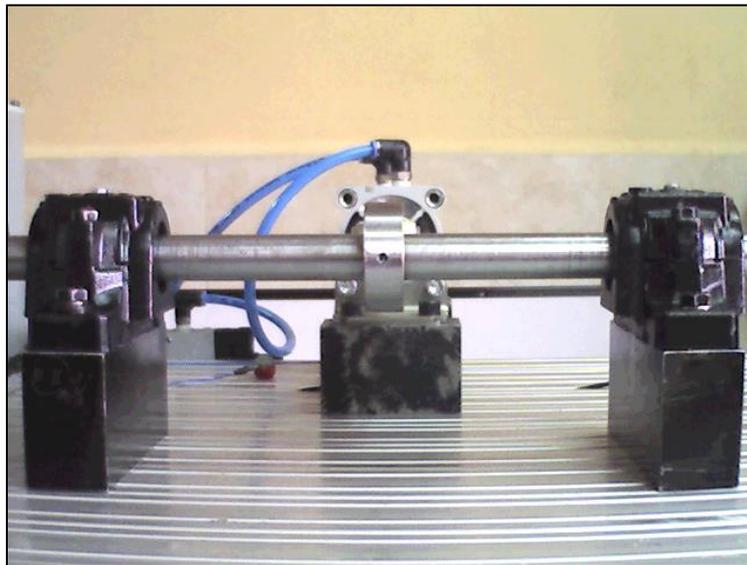
1. Pulsar OK.
2. Seleccionar la opción “Funciones de medición” y pulsar OK.
3. Seleccionar la opción “Punto frío/caliente” y pulsar OK.

#### Configuración 5 – Ajuste de Paleta de colores

1. Pulsar OK.
2. Seleccionar la opción “Paleta” y pulsar OK.
3. Seleccionar la opción “Hierro” y pulsar OK.

#### Ubicación:

1. Ubicar el lente de la cámara termográfica apuntando hacia el sistema rotativo de tal manera que la cámara enfoque todo el sistema de eje de transmisión como se muestra en la Figura 6.3. Ayúdese del trípode.



*Figura 6.3: Enfoque de cámara termográfica para sistema de eje de transmisión.*

2. Seleccionar el modo de enfoque “Automático”, situado en la parte lateral de la cámara termográfica.
3. Con la ayuda del control de enfoque, conseguir el mejor enfoque de la imagen.

#### **6.2.4 Puesta en marcha y captura de imágenes térmicas**

4. Abrir la válvula de paso del aire comprimido ubicado antes de la unidad de mantenimiento mostrado en la Figura 6.2.
5. Graduar a 2 bar la unidad de mantenimiento de aire comprimido mediante el regulador de presión, lo que genera una fuerza radial de 98,6 N.
6. Pulsar el disparador de la cámara termográfica y capturar la imagen.
7. Pulsar el disparador nuevamente para guardar la imagen térmica.
8. Encender motor pulsando “Hand On” [, en el variador de frecuencia DANFOSS.
9. Encender la carga radial, mediante el pulsante ubicado en la unidad de control eléctrico mostrado en la Figura 6.2.
10. Luego de 3 minutos, pulsar el disparador de la cámara termográfica y capturar la imagen; ayúdese de un cronometro para controlar el tiempo.
11. Pulsar el disparador nuevamente para guardar la imagen térmica.
12. Repetir el paso 7 y 8 después cada vez que haya transcurrido 3 minutos, hasta cumplir 15 minutos de funcionamiento del sistema.

### 6.2.5 Apagar banco de pruebas

1. Apagar la carga radial.
2. Pulsar el botón botón STOP [] en el software.
3. Apagar el motor pulsando “OFF” [] en el variador de frecuencia DANFOSS.
4. Apagar la unidad de control eléctrico.
5. Cerrar el software de control y apagar el computador portátil.
6. Desconectar puerto USB proveniente de la unidad de control eléctrico al computador.
7. Apagar cámara pulsando el botón [] en el panel de control de la cámara termográfica.
8. Cerrar la válvula de paso del aire comprimido ubicado antes de la unidad de mantenimiento mostrado en la Figura 6.2.

### 6.2.6 Análisis de imágenes termográficas

1. Extraer tarjeta micro SD de la cámara y descargas fotos en un ordenador.
2. Abrir el software IRSoft.
3. Hacer clic en “Open” ubicado en la barra de análisis de imágenes.
4. Seleccionar las seis imágenes térmicas capturadas en esta práctica y pulsar “Abrir”.
5. Hacer clic en la primera imagen (parte superior del espacio de trabajo).
6. Colocar los valores de emisividad, temperatura reflejada, humedad y temperatura ambiente dados para la configuración de la cámara en la barra de herramienta de análisis de imagen.
7. En la sección de colores, de “Palette” ubicado en la barra de herramienta de análisis de imágenes, elegir la opción que proporcione una imagen con mejor visibilidad de la distribución de temperatura.

8. En el cuadro “Thermal image” ubicado en el espacio de trabajo seleccionar la opción “Histogram” [  ], sacar el histograma del área rectangular más caliente de cada rodamiento, seleccionando por áreas de acuerdo a la Figura 6.4.
9. En la Tabla 6.4, llenar los valores de temperatura mínima, máxima y promedio que se muestran en el recuadro Histogram ubicado en el espacio de trabajo para cada uno de los rodamientos.

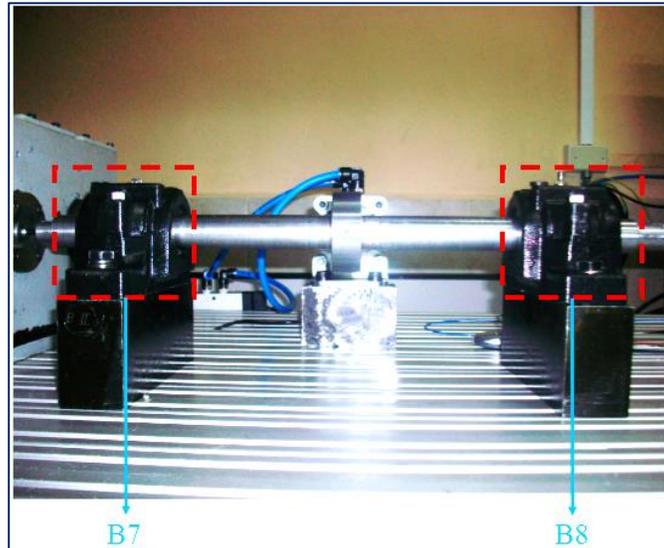


Figura 6.4: Áreas de evaluación para cada rodamiento.

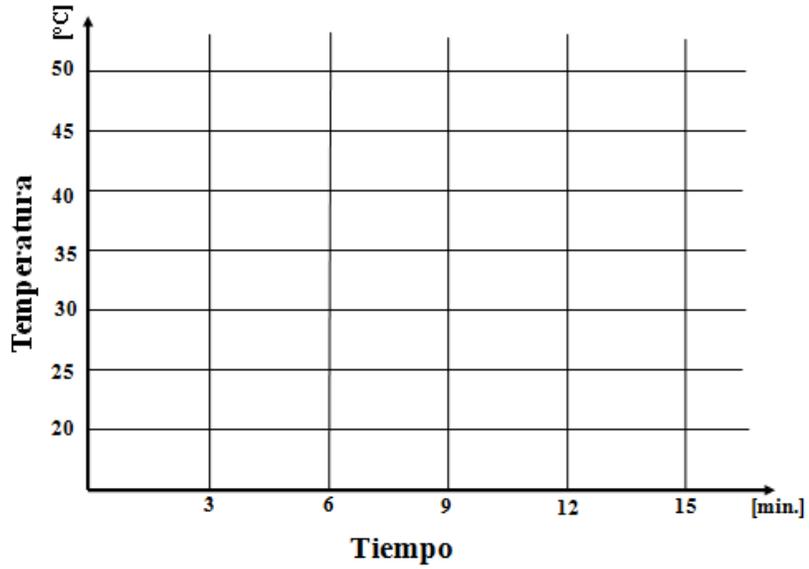
10. Repetir el análisis de las imágenes térmicas 2, 3, 4, 5 y 6 capturadas por la cámara y llenar los valores de temperatura en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2: Puntos de análisis de imágenes térmicas.

Imagen N.	Tiempo [min]	Rodamiento	Tipo de Fallo (*)	Temp. max. [°C]
1	0 min	B7		
		B8		
2	3 min	B7		
		B8		
3	6 min	B7		
		B8		
4	9 min	B7		
		B8		
5	12 min	B7		
		B8		
6	15 min	B7		
		B8		

\* El tipo de fallo es de acuerdo a la designación numérica mostrada en la Tabla 5.3

11. Realizar una gráfica de la evolución de la temperatura en función del tiempo para cada rodamiento.



## 7. Resultados y/o discusión

### 7.1 Resultados

---

---

---

---

---

---

### 7.2 Discusión

---

---

---

---

---

---

---

---

## 8. Conclusiones y recomendaciones

### *Conclusiones*

---

---

---

---

### *Recomendaciones*

---

---

---

---

## Referencias

- [1] M. A. ORTEGA VALENZUELA, «Análisis técnico y de costos para implementar plan de mantenimiento predictivo mediante termografía en cementos Bío Bío.», Thesis, Universidad de Talca (Chile). Escuela de Ingeniería Mecánica., Curico - Chile, 2006.
- [2] M. Á. CARMONA ÁVILA, L. LÓPEZ GONZALES, A. PILIADO CEDILLO, R. C. SÁNCHEZ TREJO, y E. TORRES GARCÍA, «Manual de Procedimiento Termográfico». 19:07:39 UTC.
- [3] FLUKE, «Applications for Thermal Imagers - Inspecting bearings». .
- [4] S. V. NIVELÓ JARA y D. J. ROMERO RODRÍGUEZ, «Establecimiento de una base de datos de señales de vibraciones mecánicas para sistemas mecánicos rotativos con la combinación de diferentes tipos de fallos y elaboración de guías de prácticas para detección de fallos en rodamientos», Thesis, Politécnica Salesiana, Cuenca - Ecuador, 2014.
- [5] VIBROBAL, «Termografía». [En línea]. Disponible en: <http://www.vibrobal.com/index.php/termografia>. [Accedido: 10-oct-2014].
- [6] M. P. PESÁNTES MOYANO, «Confort térmico en el área social de una vivienda unifamiliar en Cuenca-Ecuador», Universidad de Cuenca, Cuenca - Ecuador, 2012.

## Glosario

**Emisividad.-** Es la relación entre la radiación que emite un cuerpo real y la emitida por un cuerpo negro, para una misma temperatura y longitud de onda.

**Humedad.-** Es el agua que impregna un cuerpo o el vapor presente en la atmósfera.

**Isoterma.-** Permite resaltar las partes de una imagen situadas por encima o por debajo de una temperatura, o bien entre uno o varios intervalos de temperatura.

**Termografía.-** Es una técnica que permite medir temperaturas a distancia, con exactitud y sin necesidad de contacto físico con el objeto a estudiar.

**Anexo F4 Registro de validación de guías de prácticas**

<b>VALIDACIÓN DE LAS GUÍAS DE PRÁCTICAS EJECUTADAS POR ESTUDIANTES DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA</b>						
<b>Nombre</b>	<b>Fecha</b>	<b>Institución o Industria</b>	<b>Ciclo</b>	<b>Carrera</b>	<b>Calificación</b>	<b>Guía de práctica #</b>
Enrique Muñoz	06-11-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Décimo	Ingeniería Mecánica	20/21	1
	05-11-2014				20/21	2
	29-10-2014				20/21	3
Genaro Vera	06-11-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Décimo	Ingeniería Mecánica	20/21	1
	30-10-2014				20/21	2
	30-10-2014				19/21	3
Thuesman Montaña	10-12-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	21/21	1
	06-11-2014				20/21	2
	06-11-2014				21/21	3
Fabián Flores	10-12-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	21/21	1
	06-11-2014				19/21	2
	06-11-2014				21/21	3
Sebastián Peralta	12-12-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	21/21	1
	06-11-2014				21/21	2
	06-11-2014				21/21	3
Jonathan Ortiz	12-12-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	21/21	1
	06-11-2014				20/21	2
	06-11-2014				21/21	3
Diego Perugachi	07-11-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Decimo	Ingeniería Mecánica	20/21	1
	07-11-2014				20/21	2
	07-11-2014				19/21	3
	11-12-2014		Noveno		21/21	1

V́ctor Yanza	06-11-2014	Universidad Politécnica Salesiana		Ingeniería Mecánica	20/21	2
	06/11/2014				21/21	3
Benito Arias	11-12-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	19/21	1
	06-11-2014				21/21	2
	06-11-2014				20/21	3
Diego Lasso	11-12-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Noveno	Ingeniería Mecánica	20/21	1
	06-11-2014				21/21	2
	06-11-2014				21/21	3
Jorge Matute	07-11-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Egresad o	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Juan Pablo Marín	05-11-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Decimo	Ingeniería Mecánica	20/21	1
Andrés Cedillo	05-11-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Decimo	Ingeniería Mecánica	20/21	1
V́ctor Araujo	17-11-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Décimo	Ingeniería Mecánica Automotriz	21/21	2
	17-11-2014				21/21	3
Walter Pintado	17-11-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Décimo	Ingeniería Mecánica Automotriz	21/21	2
	17-11-2014				21/21	3
Juan Carlos Tapia	17-11-2014	Universidad Politécnica Salesiana	Décimo	Ingeniería Mecánica Automotriz	21/21	2
	17-11-2014				21/21	3

<b>VALIDACIÓN DE LAS GUÍAS DE PRÁCTICAS EJECUTADAS POR ESTUDIANTES DE LA UNIVERSIDAD ESTATAL DE CUENCA</b>						
Javier Cabrera	04-12-2014	Universidad Estatal de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	20/21	1
	04-12-2014				19/21	2
	11-12-2014				20/21	3
Dominique Baque	04-12-2014	Universidad Estatal de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21	1
	04-12-2014				19/21	2
	11-12-2014				21/21	3
Omar Mogrovejo	04-12-2014	Universidad Estatal de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21	1
	04-12-2014				21/21	2
	11-12-2014				21/21	3
Mayra Lema	04-12-2014	Universidad Estatal de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21	1
	04-12-2014				21/21	2
	11-12-2014				21/21	3
César Marca	04-12-2014	Universidad Estatal de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	20/21	1
	04-12-2014				20/21	2
	11-12-2014				20/21	3
Gabriel Ayavaca	04-12-2014	Universidad Estatal de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21	1
	04-12-2014				21/21	2
	11-12-2014				21/21	3
Jack Siguencia	04-12-2014	Universidad Estatal de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	21/21	1
	04-12-2014				21/21	2
	11-12-2014				21/21	3
Sebastián Quizhpi	04-12-2014	Universidad Estatal de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	19/21	1
	04-12-2014				21/21	2
	11-12-2014				21/21	3
Javier Cabrera	04-12-2014	Universidad Estatal de Cuenca	Noveno	Ingeniería Industrial	20/21	1
	04-12-2014				19/21	2

	11-12-2014			20/21	3
--	------------	--	--	-------	---

<b>VALIDACIÓN DE LAS GUÍAS DE PRÁCTICAS EJECUTADAS POR ESTUDIANTES DE LA MATERIA DE MANTENIMIENTO DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA</b>					
<b>Nombre</b>	<b>Fecha</b>	<b>Ciclo</b>	<b>Carrera</b>	<b>Calificación</b>	<b>Guía de práctica #</b>
Juan Pinguil	22-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Paul Angamarca	22-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Joseph Solórzano	22-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Vinicio Palomeque	22-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	20/21	1
Royer Mendieta	22-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Luis Cordova	22-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Daniel Reinoso	22-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	19/21	1
Felipe Montalvan	22-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	20/21	1
Daniel Vélez	22-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Diego Castanier	22-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	20/21	1
Alexander Cangá	22-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Carlos Beltrán	22-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Cristian Campoverde	22-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Cristian Cornejo	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	20/21	1
Wilmer Cáceres	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Xavier Asitimbay	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Franco Cajas	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Israel Roblez	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Cristian Castillo	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Erika Mendía	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Micaela Villa	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	20/21	1

Juan Carlos Calderón	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Pablo Ávila	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Carlos Buenaño	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	19/21	1
Luis Benavides	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	19/21	1
Andrés Herrera	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Juan Plaza	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
David Montero	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Juan Carlos Pugo	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Freddy Moncayo	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Carlos Mejía	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1
Luis Pacheco	23-01-2015	Quinto	Ingeniería Mecánica	21/21	1