

SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLA EN PISTA EXTERNA, PISTA INTERNA,
ELEMENTOS RODANTES Y CANASTILLA DE RODAMIENTOS CÓNICOS TIPO
30203 USANDO SEÑALES DE ULTRASONIDO.

AUTORES:

OMAR ANDRÉS ARDILA SANCHEZ

GUSTAVO ANDRÉS MARTÍNEZ GORDILLO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2013

SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLA EN PISTA EXTERNA, PISTA INTERNA,
ELEMENTOS RODANTES Y CANASTILLA DE RODAMIENTOS CÓNICOS TIPO
30203 USANDO SEÑALES DE ULTRASONIDO.

AUTORES:

OMAR ANDRÉS ARDILA SANCHEZ
GUSTAVO ANDRÉS MARTÍNEZ GORDILLO

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Mecánico

DIRECTOR

ING. JABID EDUARDO QUIROGA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2013

DEDICATORIA

A mi madre Elda:

Por haberme apoyado en el transcurso de mi formación personal, espiritual y profesional. Gracias por tu amor incondicional.

A mi padre Hernando:

Por su incondicional apoyo y el ejemplo de su carácter. Por su total confianza depositada en mi trabajo y sus palabras de apoyo.

A mis hermanos Ender, Monica y Alejandra.

A la memoria de Benjamin Franklin.

Omar Andrés Ardila.

“Fija tu rumbo a una estrella y podrás sortear cualquier tormenta”

Leonardo Da Vinci

DEDICATORIA

A DIOS:

Por la enorme capacidad que me ha dado y por sus constantes e infinitas bendiciones.

Y a mi Madre, por supuesto:

Con tu gran ejemplo de dedicación e inagotable resistencia y con el incondicional amor y apoyo que siempre me has brindado, has conseguido ser, y por siempre lo serás, mi gran orgullo.

María Helga Gordillo, muchas gracias, esto es para ti.

MAMI, ¡TE AMO!

Gustavo Andrés Martínez Gordillo.

NEVER GIVE UP!.

AGRADECIMIENTOS:

Los autores expresan su agradecimiento a:

Al Ing. Msc. Jabid Quiriga por brindarnos su colaboración y asesoría en el desarrollo de este proyecto.

A todos los profesores de la escuela de Ingeniería Mecánica por compartir su conocimiento y estar dispuestos a formarnos como profesionales.

A todos los integrantes de la división de mantenimiento tecnológico por su colaboración y disposición para el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. MARCO TEÓRICO	21
1.1 DESGASTE	21
1.1.1 Desgaste por adhesión	21
1.1.2 Desgaste por abrasión	22
1.1.3 Desgaste por fatiga	22
2. TEORÍA FÍSICA DE ULTRASONIDO	24
2.1 DEFINICIÓN DE ULTRASONIDO	24
3. FALLAS EN RODAMIENTOS	28
3.1 DEFECTOS LOCALIZADOS	28
3.2 DEFECTOS DISTRIBUIDOS	28
3.3 GEOMETRÍA Y NOMENCLATURA DE RODAMIENTOS	29
4. CARACTERÍSTICAS DEL BANCO DE PRUEBAS	31
5. ANÁLISIS DE SEÑALES ULTRASÓNICAS PARA DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS	32
5.1 ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA	32
5.2 LA TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER	32
5.3 LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER	33
5.4 FUNCIONES DE VENTAJA FIJA	34
6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	35
6.1 DESVIACIÓN ESTANDAR	35
6.2 KURTOSIS	36
6.3 ASIMETRÍA	37
6.3.1 Asimetría a la izquierda	38
6.3.2 Asimetría a la derecha	38
6.4 VALOR RMS (ROOT MEAN SQUARE) DE UN VECTOR	38
7. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	39

7.1 SENSOR ULTRASÓNICO	41
7.1.1 Características	42
7.2 OSCILOSCOPIO	43
7.2.1 Características principales	44
8. METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN	46
8.1 INDUCCIÓN DE FALLAS	47
8.1.1 Fallas en pista externa	49
8.1.2 Fallas en canastilla	50
8.1.3 Fallas en elementos rodantes	52
8.1.4 Fallas en pista interna	53
9. ANÁLISIS DE RESULTADOS	55
9.1 MÉTODO DE LA DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA	57
9.2 MÉTODO SK (SPECTRAL KURTOSIS)	67
9.3 MÉTODO RMS (ROOT MEAN SQUARE)	77
CONCLUSIONES	86
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	90

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Microfracturas metálicas por fatiga	23
FIGURA 2. Nomenclatura de rodamientos	29
FIGURA 3. Esquema del sistema de adquisición de datos	40
FIGURA 4. Sensor ULTRA-TRAK 750™	41
FIGURA 5. Osciloscopio RIGOL DS1102	43
FIGURA 6. Sistema de adquisición de datos	45
FIGURA 7. Dimensiones del rodamiento NSK 30203	47
FIGURA 8: Falla en pista externa nivel incipiente	49
FIGURA 9: Falla en pista externa nivel intermedio	49
FIGURA 10: Falla en pista externa nivel desarrollado	50
FIGURA 11: Falla en canastilla nivel incipiente	50
FIGURA 12: Falla en canastilla nivel intermedio	51
FIGURA 13: Falla en canastilla nivel desarrollado	51
FIGURA 14: Falla en elementos rodantes nivel incipiente	52
FIGURA 15: Falla en elementos rodantes nivel intermedio	52
FIGURA 16: Falla en elementos rodantes nivel desarrollado	53
FIGURA 17: Falla en pista interna nivel incipiente	53
FIGURA 18: Falla en pista interna nivel intermedio	54
FIGURA19: Falla en pista interna nivel desarrollado	58
FIGURA 20: Densidad espectral de potencia de la señal del rodamiento sin falla en un rango de [0-100]kHz	58
FIGURA 21: : Pista externa nivel incipiente para un rango de [0-100] kHz	59
FIGURA 22: : Pista externa nivel intermedio para un rango de [0-100]kHz	59
FIGURA 23: : Pista externa nivel desarrollado para un rango de [0-100] kHz	60
FIGURA 24: Tres niveles de falla para pista externa en el rango de máxima sensibilidad del sensor.	60

FIGURA 25: : Pista interna nivel incipiente para un rango de [0-100] kHz	61
FIGURA 26: : Pista interna nivel intermedio para un rango de [0-100] kHz	61
FIGURA 27: Pista interna nivel desarrallado para un rango de [0-100]kHz	62
FIGURA 28: Tres niveles de falla para pista interna en el rango de máxima sensibilidad del sensor.	62
FIGURA 29: Elementos rodantes nivel incipiente para un rango de [0-100] kHz	63
FIGURA 30: Elementos rodantes nivel intermedio para un rango de [0-100] kHz	63
FIGURA 31: Elementos rodantes nivel desarrollado para un rango de [0-100] kHz	64
FIGURA 32: Tres niveles de falla para elementos rodantes en el rango de máxima sensibilidad del sensor.	64
FIGURA 33: Canastilla nivel incipiente para un rango de [0-100] kHz	65
FIGURA 34: Canastilla nivel intermedio para un rango de [0-100] kHz	65
FIGURA 35: Canastilla nivel desarrollado para un rango de [0-100] kHz	66
FIGURA 36: Tres niveles de falla para canastilla en el rango de máxima sensibilidad del sensor.	66
FIGURA 37: Valor de kurtosis para cinco pruebas en los tres niveles de severidad en pista externa.	69
FIGURA 38: Tendencia de la kurtosis promedio para los tres niveles de severidad en pista externa.	70
FIGURA 39: Valor de kurtosis para cinco pruebas en los tres niveles de severidad en pista interna.	71
FIGURA 40 Tendencia de la kurtosis promedio para los tres niveles de severidad en pista interna.	72
FIGURA 41 : Valor de kurtosis para cinco pruebas en los tres niveles de severidad en elementos rodantes.	73
FIGURA 42 : Tendencia de la kurtosis promedio para los tres niveles de severidad en elementos rodantes.	74

FIGURA 43 : Valor kurtosis para 5 pruebas en los tres niveles de severidad en canastilla.	75
FIGURA 44: Tendencia de la kurtosis promedio para los tres niveles de severidad en canastilla.	76
FIGURA 45: Valor de RMS para cinco pruebas en los tres niveles de severidad en pista externa.	78
FIGURA 46: Tendencia del valor RMS promedio para los tres niveles de severidad en pista externa.	79
FIGURA 47: Valor de RMS para cinco pruebas en los tres niveles de severidad en pista interna	80
FIGURA 48: Tendencia del valor RMS promedio para los tres niveles de severidad en pista interna.	81
FIGURA 49: Valor de RMS para cinco pruebas en los tres niveles de severidad en elementos rodantes	82
FIGURA 50: Tendencia del valor RMS promedio para los tres niveles de severidad en elementos rodantes.	83
FIGURA 51: Valor de RMS para cinco pruebas en los tres niveles de severidad en canastilla	84
FIGURA 52: Tendencia del valor RMS promedio para los tres niveles de severidad en canastilla.	85

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. Información técnica del rodamiento NSK 30203	48
TABLA 2: Resultados de algunos parámetros estadísticos de los diferentes vectores.	56
TABLA 3: Convenciones para las gráficas.	67
TABLA 4: Media y desviación estandar para kurtosis de las 5 pruebas para los tres niveles de severidad en pista externa.	69
TABLA 5: Media y desviación estandar para kurtosis de las 5 pruebas para los tres niveles de severidad en pista interna.	71
TABLA 6: Media y desviación estandar para kurtosis de las 5 pruebas para los tres niveles de severidad en elementos rodantes	73
TABLA 7: Media y desviación estandar para kurtosis de las 5 pruebas para los tres niveles de severidad en canastilla	75
TABLA 8: Media y desviación estandar para RMS de las 5 pruebas para los tres niveles de severidad en pista externa.	78
TABLA 9: Media y desviación estandar para RMS de las 5 pruebas para los tres niveles de severidad en pista interna.	80
TABLA 10: Media y desviación estandar para RMS de las 5 pruebas para los tres niveles de severidad en elementos rodantes.	82
TABLA 11: Media y desviación estandar para RMS de las 5 pruebas para los tres niveles de severidad en canastilla.	84

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A: Código .mat utilizado para analizar la señal en el dominio de la frecuencia	91
ANEXO B: Método para producir una falla en la pista interna de un rodamiento NSK 30203.	92

RESUMEN

TÍTULO: SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLA EN PISTA EXTERNA, PISTA INTERNA, ELEMENTOS RODANTES Y CANASTILLA DE RODAMIENTOS CÓNICOS TIPO 30203 USANDO SEÑALES DE ULTRASONIDO*.

AUTORES: OMAR ANDRÉS ARDILA SANCHEZ
GUSTAVO ANDRÉS MARTÍNEZ GORDILLO**

PALABRAS CLAVE: Fallas, Lubricación, Rodamientos cónicos, Ultrasonido.

DESCRIPCIÓN:

El objeto del presente trabajo de grado, es contribuir con la misión de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, de formar profesionales de alta calidad, fomentando la utilización de la tecnología del Ultrasonido para la detección de fallas tempranas en rodamientos cónicos NSK 30203.

Las fallas en rodamientos, es una de las causas más significativas de paradas no previstas en la maquinaria industrial. La mayoría de las fallas de un rodamiento en operación, se manifiestan por cualquiera de las siguientes causas: Defectos de fabricación, mala instalación, exceso o falta de lubricación, carga sobredimensionada y fatiga. A su vez, estas fallas pueden clasificarse en tres categorías, dependiendo del grado de severidad de la misma: leve, intermedia y desarrollada. La falla en un rodamiento puede presentarse en cualquiera de sus partes componentes: pista externa, canastilla, elementos rodantes y pista interna. Cuando un rodamiento con una falla se encuentra en operación, se produce una vibración de alta frecuencia conocida como ultrasonido ($f > 20$ kHz), dicho cambio de frecuencia es el que se desea detectar, a través de un sensor ultrasónico que permita adquirir la información necesaria para identificar las frecuencias características de falla mediante MATLAB.

La técnica se implementó en el banco de pruebas para detección de fallas mediante emisiones acústicas, que se encuentra en el laboratorio de vibraciones mecánicas de la escuela de Ingeniería Mecánica.

* Proyecto de grado.

** Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Ing. JABID EDUARDO QUIROGA.

SUMMARY

TITULO: FAULT DETECTION SYSTEM IN INNER RING, OUTER RING, ROLLERS AND CAGE OF 30203 TYPE CONICAL BEARINGS USING ULTRASONIC SIGNALS*.

AUTHORS: OMAR ANDRÉS ARDILA SANCHEZ
GUSTAVO ANDRÉS MARTÍNEZ GORDILLO**

KEY WORDS: Faults, Lubrication, Conical bearings, Ultrasound.

DESCRIPTION:

The aim of this project is to contribute to the UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER's mission to educate high quality professionals, promoting the use of the ultrasonic technology to detect early faults in NSK 30203 conical bearings.

Faults in bearings is one of the main reasons machines stop unexpectedly in the industry. Most of the faults in bearings while working are produced by these reasons: factory's faults, a wrong installation, over lubrication, lack of lubrication, overloads or fatigue. These faults can also be classified into three categories, depending on how severe the fault is: slight, intermediate and/or developed. The bearing's fault can appear in any of its parts: inner ring, outer ring, rollers or cage. When a faulty bearing is working, this one produces a high frequency vibration known as ultrasound ($f > 20$ KHz), those frequency changes are the feature we want to detect by using an ultrasonic sensor in order to obtain the necessary information to identify the typical frequencies of the fault through MATLAB.

The technique was developed in the proof bank to detect faults by using acoustic signals, located in the mechanical vibrations laboratory of the mechanical engineering school.

* Degree Work.

** Universidad Industrial de Santander. Physical-Mechanical Engineering. Mechanical Engineering School. Director Eng. JABID EDUARDO QUIROGA.

INTRODUCCIÓN

Las fallas en los rodamientos que soportan los elementos rotativos de la maquinaria moderna es una de las principales causas de paros no previstos en distintas líneas de producción de la industria mundial, generando pérdidas económicas significativas y reduciendo la vida útil de los diferentes equipos implicados en la manufactura de un producto y/o en el buen funcionamiento de un proceso. En un mundo industrial que exige competitividad, es necesario que toda organización cuente con un plan de mantenimiento que permita prolongar la vida útil de los rodamientos, y por consiguiente, disminuir la probabilidad de que se presente un paro no previsto. Para esto, y dependiendo del nivel de criticidad del sistema a mantener en buenas condiciones, se aplica la rama del mantenimiento conocida como mantenimiento predictivo, la cual se enfoca en determinar cuál es el estado del sistema mecánico a analizar (en este caso el rodamiento), aprovechando que estos dan algún tipo de aviso antes de que fallen, presentándose como cambios anormales en las condiciones de operación. Al identificar estos cambios, y el lugar en el que se producen, se pueden tomar las acciones necesarias para corregir esa tendencia a la falla.

Existen actualmente varios métodos para identificar estos cambios anormales en las condiciones de operación de un rodamiento: El análisis de vibraciones, la técnica de ENVELOPING y el análisis de emisiones acústicas, son algunos de ellos. Sin embargo recientes investigaciones llevadas a cabo por la NASA¹, han demostrado que la inspección de condición por ultrasonido es una herramienta versátil para determinar el estado de los elementos de máquina y en particular de los rodamientos, teniendo en cuenta que la fricción entre las pistas y los

¹ PEDROUZO TELLO, José y QUINTERO CARRERO, Nelson. La Aplicación del Ultrasonido como Tecnología Complementaria en un Plan de Mantenimiento Predictivo. Sevilla, 2009. Trabajo de grado (Máster en Mantenimiento Industrial y Técnicas de Diagnóstico). Universidad de Sevilla. Departamento de ingeniería mecánica y de los materiales. Disponible en:< http://www.aloj.us.es/notas_tecnicas/Mant_Predict_Compl_Ultrasonido.pdf>.

elementos rodantes por una mala lubricación o por la formación de algún tipo de falla, produce señales de alta frecuencia que no son perceptibles por el oído humano, ni por los métodos mencionados anteriormente. Teniendo en cuenta esta ventaja, se implementó un método alternativo de monitoreo que permitió adquirir las señales de un rodamiento con diferentes niveles de falla en cada una de sus partes componentes, para después ser comparadas con las señales adquiridas de un rodamiento de igual referencia en perfectas condiciones. Para esto se utilizó un transductor de ultrasonido encargado de adquirir las señales de alta frecuencia.

El monitoreo por ultrasonido no debe verse como un reemplazo al análisis de vibraciones, al método de Enveloping o al análisis de emisiones acústicas, sino más bien como un complemento a estas tres técnicas, ya que, como se mencionó anteriormente, permite la identificación de defectos prematuros en rodamientos antes de que estos puedan ser identificados por los métodos tradicionales, logrando de esta forma, disponer de un conjunto de herramientas indispensables que se deben implementar para optimizar un plan de mantenimiento predictivo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 DESGASTE

Desde hace mucho tiempo se ha reconocido al desgaste como el proceso más importante y usualmente perjudicial en los elementos de máquinas, sin embargo, los estudios del fenómeno del desgaste comenzaron relativamente en tiempos recientes. El orden histórico de los estudios tribológicos ha sido: fricción, lubricación y desgaste. En un sentido más general, prácticamente todo lo hecho por el hombre se desgasta, sin embargo las acciones fundamentales que rigen al proceso aún son difíciles de determinar. Inicialmente, en la cronología tribológica, la atención fue puesta en la fricción ya que rige por completo la capacidad de funcionamiento de los elementos de máquinas. Después se exploró la función de los lubricantes para controlar la fricción del desgaste en algunos elementos de máquinas, con poca atención para el detallado mecanismo de desgaste. De hecho, aún es cierto que en la actualidad un ingeniero está mejor capacitado para diseñar un elemento de máquina que soporta cargas conocidas que para especificar la vida de un elemento de máquina, principalmente debido a la falta de la comprensión del desgaste. El desgaste se puede considerar como la pérdida progresiva de la sustancia de la superficie de operación en un cuerpo, que ocurre como resultado de los efectos de la carga y del movimiento relativo en la superficie. El desgaste se clasifica de acuerdo con la naturaleza física del proceso subyacente, como la abrasión, la adhesión y la fatiga.

1.1.1 Desgaste por adhesión. Es el tipo de desgaste más común, ocurre cuando partes de material de una superficie se separan de esta y quedan adheridas a la otra superficie. El volumen del material que se elimina por desgaste es directamente proporcional a la distancia de deslizamiento y a la carga normal aplicada y es inversamente proporcional a la dureza del más suave de los dos materiales.

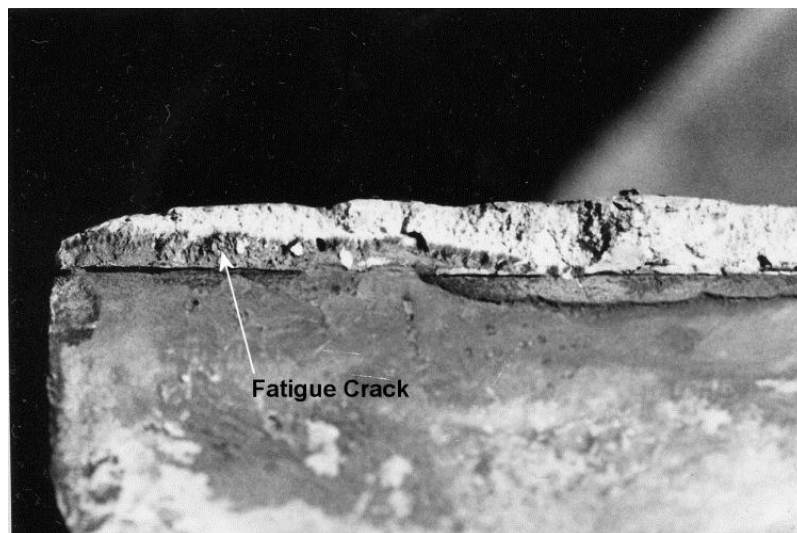
1.1.2 Desgaste por abrasión. Este tipo de desgaste ocurre cuando dos superficies en contacto presentan una dureza significativamente diferente, dando lugar a que las asperezas de la superficie más dura penetren en la superficie más suave, dando lugar a deformaciones permanentes en la segunda.

1.1.3 Desgaste por fatiga. Para contactos no concordantes de los elementos de máquinas, como rodamientos, engranajes, levas, etc., una forma prevalente de falla es el desgaste por fatiga². En estas situaciones la eliminación del material ocurre por la variación cíclica de la carga. El desgaste por fatiga se causa por la propagación del daño sub-superficial debido a cargas cíclicas. A medida que la carga cíclica continúa, se forman fallas o grietas debajo de la superficie. Eventualmente, las fallas se agrupan y se acerca a la superficie. Entonces el material superficial se descompone fácilmente, degradando la superficie del componente y liberando los contaminantes corpusculares que el endurecimiento por deformación produce. El desgaste por fatiga ocurre en elementos de máquinas no concordantes aún en situaciones de buena lubricación. Las cargas cíclicas en la superficie no concordantes causan en el material sólido esfuerzos extremadamente elevados, aunque quizá las superficies nunca tengan contacto directo, debido a la carga y a su naturaleza no concordante. Después de varios millones de estos encuentros las asperezas se fatigarán y una pieza de material se desprenderá de la superficie. Un grupo de elementos de máquinas no concordantes aparentemente idénticos en condiciones idénticas de carga, velocidad, lubricación y entornos pueden presentar una amplia variación en los tiempos de falla. Por tal razón el proceso de desgaste por fatiga se debe tratar estadísticamente. Es decir, es normal que la vida a fatiga de un cojinete redefina en términos de su capacidad estadística para sobrevivir durante un cierto periodo, o por el desgaste permisible antes de que el componente ya no funcione adecuadamente. El único requisito para la falla por fatiga es que el material de la

² HAMROCK, Bernard; JACOBSON, Bo y SCHMID, Steven. Elementos de máquinas. México: McGraw-Hill, 2000. P 345-346.

superficie esté sometido a una carga. En los otros mecanismos de desgaste no sólo se requiere la aplicación de una carga, sino también la existencia de un contacto físico entre las superficies. Si las superficies se separan por una película lubricante, el desgaste por adhesión y abrasión virtualmente se elimina, pero aún puede ocurrir el desgaste por fatiga.

Figura 1. Microfracturas metálicas por fatiga



Fuente: <http://www.forocoches.com/foro/showthread.php?t=1011944&page=5>

2. TEORÍA FÍSICA DEL ULTRASONIDO

2.1 DEFINICIÓN DE ULTRASONIDO

Se denomina ultrasonido, tanto al estudio como a la aplicación de una vibración de las partículas cuya frecuencia es superior al umbral máximo de audición humana, o sea 20.000 Hz , sin embargo algunas frecuencias del margen audible se pueden usar para ciertas aplicaciones ultrasónicas. El margen superior de estas frecuencias es muy elevado, ya que puede llegar hasta 10^9 Hz . La longitud de onda correspondiente a la mínima frecuencia es de unos 20 cm en los sólidos, de 6 cm en los líquidos y de $1,7\text{ cm}$ en el aire; la longitud correspondiente a los valores máximos de frecuencia es de $8 * 10^{-4}\text{ cm}$ en sólidos, de $2,5 * 10^{-4}\text{ cm}$ en los líquidos y de $0,6 * 10^{-4}\text{ cm}$ en el aire.

La existencia del ultrasonido se conoce desde el año 1883, por los trabajos realizados por Galton³ relacionados con los límites de audición humana, al experimentar un resonador de alta frecuencia para medir el límite superior de frecuencia de respuesta del oído humano. El pequeño valor de la longitud de onda del ultrasonido, es el factor que ha permitido en muchos casos la aplicación de estas ondas. Su propagación en los diferentes medios materiales es análoga a la propagación de las ondas sonoras dentro del margen audible, aunque con una absorción mucho mayor, por lo que al aire se puede considerar prácticamente opaco para el ultrasonido. Los métodos para producir estas vibraciones son muy variados, dependiendo de su uso en gran parte, el que se elija uno u otro. Los procedimientos más conocidos y estudiados son los que se fundamentan en la

³ Francis Galton. 16 de febrero de 1822 - 17 de enero de 1911. [polímata](#), [antropólogo](#), [geógrafo](#), [explorador](#), [inventor](#), [meteorólogo](#), [estadístico](#), [psicólogo británico](#) con un amplio espectro de intereses. No tuvo cátedras universitarias y realizó la mayoría de sus investigaciones por su cuenta. Sus múltiples contribuciones recibieron reconocimiento formal cuando, a la edad de 87 años, se le concedió el título de *Sir* o caballero del Reino.

variación de las dimensiones de un sólido al someterlo a diferentes campos. Uno de los más generales es el que se refiere a los materiales que presentan la “piezoelectricidad”, u otros fenómenos análogos, se le da este nombre al fenómeno que aparece en ciertos materiales naturales y sintéticos, al cambiar de dimensiones cuando se aplica una carga eléctrica a las caras del cristal obtenido de estos mismos. En los materiales piezoeléctricos existe un eje a lo largo del cual un campo eléctrico provoca unos cambios de dimensiones apreciables o bien una presión sobre las caras perpendiculares del mismo, da lugar a la aparición de cargas eléctricas en los extremos de dicho eje. La transformación de energía mecánica en eléctrica se denomina *efecto piezoeléctrico directo*, y la producción de energía mecánica al aplicar un potencial eléctrico, se denomina *efecto piezoeléctrico inverso*. El efecto piezoeléctrico directo fue descubierto por los hermanos Curie⁴ en 1880, y el efecto piezoeléctrico inverso lo predijo Lippman en 1881.

El primer intento práctico de aplicar el efecto piezoeléctrico como emisor de ondas ultrasónicas se debe a Langevin en Francia, quien lo empleó durante la primera guerra mundial para sondeos submarinos, utilizando una onda continua para detectar submarinos mediante el eco de dicha onda. Richardson en 1912 y Fressenden en 1914 propusieron el procedimiento para localizar icebergs mediante ultrasonido, siendo este último el que descubrió el método de impulsos que sustituye con ventaja a la emisión continua en muchas de sus aplicaciones. Posteriormente en 1933 Mulhauser estudió la posibilidad de aplicar estas ondas a la inspección de materiales en la industria metalúrgica, debiéndose a Firestone la utilización de impulsos para la inspección de materiales. El empleo de ondas continuas para agitación, fue estudiado por Wood y Loomis en 1927. La idea de acoplar los tratamientos con líquidos para la inspección de materiales se debe a

⁴ Paul-Jacques Curie y Pierre Curie, importantes físicos franceses del siglo XIX. En [1880](#) descubrieron la [piezoelectricidad](#), es decir, el fenómeno por el cual al comprimir un [cristal](#) (cuarzo) se genera un [potencial eléctrico](#).

Sokolov, permitiendo este método la detección ultrasónica de grietas en los mismos.

Los cristales que presentan el efecto piezoeléctrico son los que no tienen centro de simetría y se destacan el cuarzo, la sal de Rochelle⁵, el titanio de bario, el sulfato de litio, etc. Si les aplicamos en vez de un campo continuo, un campo alterno, estos cristales piezoeléctricos vibrarán a una frecuencia propia del ultrasonido y transmitirán su vibración al medio que les rodea. Otro procedimiento para producir ultrasonido es el que se funda en el efecto denominado “magnetostrictivo”, debiéndose su descubrimiento a Joule en 1847 y complementando su estudio Pierce en 1928. Este efecto consiste en el cambio de dimensiones de un determinado material, a causa de una variación del campo magnético a que está sometido, e inversamente una variación de sus dimensiones, provoca un cambio en el campo magnético. Los materiales magnetostrictivo típicos son algunas aleaciones de hierro, níquel y cromo. En ellos, cuando se aplica un campo magnético según el eje de una barra obtenida de los mismos, se logra la orientación de todos los dipolos magnéticos elementales, variando en consecuencia la longitud de la misma.

Recíprocamente una barra polarizada con un campo magnético permanente, tiene sus dipolos magnéticos elementales orientados en una dirección determinada (la del campo), si se logra por medio de una fuerza exterior variar la longitud de la barra, se habrá modificado la dirección de cierto número de estos dipolos elementales, y con ellos el flujo total, produciendo esta variación una fuerza electromotriz utilizable, siendo el efecto inverso.

Cuando se emplea algunos de los materiales anteriormente mencionados para transmitir o recibir una onda que se propaga a través de un medio, generalmente

⁵ El Tartrato mixto de potasio y sodio ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) llamado comúnmente Sal de Seignette o *Sal de la Rochelle* fue descubierto en 1672 por Pierre Seignette, farmacéutico de la Rochelle. Es una de las [sales](#) más nobles del [Ácido tartárico](#).

se les hace trabajar a su frecuencia de resonancia, para la cual la energía transmitida es máxima. Aunque conviene que los transductores ultrasónicos emitan un solo tipo de onda, no siempre es posible, a pesar de que se adoptan las máximas precauciones. Las ondas transmitidas pueden provenir de una vibración, bien sea longitudinal o transversal. No obstante, modernamente se consiguen transductores que prácticamente funcionan como un pistón, emitiendo las ondas longitudinalmente en el medio donde se aplican. Sin embargo, la onda propagada en el medio no depende solo de la vibración del transductor, sino también de las condiciones físicas del medio, y del ángulo con que el rayo ultrasónico incide sobre la superficie de separación, así por ejemplo aquellos materiales que pueden transmitir diversos tipos de ondas, lo harán en un tipo u otro, o en ambos según el ángulo de incidencia del rayo, recordemos que la velocidad de propagación de la vibración ultrasónica es diferente para cada uno de los tipos de ondas. Los progresos en la teoría y aplicaciones del ultrasonido llevan un crecimiento exponencial desde hace años, existiendo una enorme variedad de aparatos que responden a especificaciones muy concretas. El interés práctico del empleo del ultrasonido reside, bien sea en el aprovechamiento de la energía transmitida, o bien en el análisis del rayo ultrasónico que pasa de un medio a otro de diferente impedancia acústica, parte de él se refleja y otra se transmite, dependiendo la relación de una a otra de las impedancias acústicas de ambos medios. Las aplicaciones del ultrasonido cubren una gama amplísima de posibilidades que abarcan reacciones químicas, detección de defectos y espesor en materiales metalúrgicos, soldaduras, medicina, bioquímica, acústica submarina, etc. En general las aplicaciones se podrían clasificar en dos grupos:

- ✓ Las que utilizan la energía transmitida para realizar la función que se desee
- ✓ Las que se valen del análisis energético y geométrico del rayo utilizado.

3. FALLAS EN RODAMIENTOS.

3.1 DEFECTOS LOCALIZADOS

Son en general producidos por grietas, hendiduras, rebordes, resaltes, picaduras y descascaramiento. El más común de todos es la picadura de las pistas o de los elementos rodantes, causado cuando una grieta por fatiga originada subsuperficialmente se propaga hacia la superficie hasta que una pieza de metal se desprende superficialmente produciendo un pequeño defecto. La falla por fatiga superficial es acelerada cuando el rodamiento está sobrecargado o sometido a cargas de choque o impacto durante su funcionamiento o instalación y también con el incremento de velocidad.

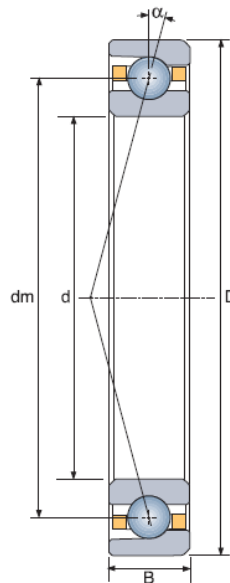
3.2 DEFECTOS DISTRIBUIDOS

Dentro de éstos se encuentran: las rugosidades superficiales, ondulaciones sobre las pistas, desalineamiento de las pistas y elementos rodantes desiguales. Pueden ser causados por errores en la manufactura, inadecuada instalación o debidos al desgaste. Las vibraciones debidas a defectos de manufactura han resultado ser más bajas en la mayoría de los casos, que las debidas a defectos producidos por desgaste o fatiga. La variación de las fuerzas de contacto entre los elementos rodantes y las pistas causa un incremento en el nivel de vibración. Puesto que resulta difícil discernir cuando la vibración es causada por defectos localizados o

distribuidos, es recomendable analizar tanto la frecuencia como la amplitud de las componentes espectrales relacionadas con la vibración⁶.

3.3 GEOMETRÍA Y NOMENCLATURA DE RODAMIENTOS.

Figura 2. Nomenclatura de rodamientos



Fuente: Assembly manual. Bearing Damage Analysis.

Dónde:

- B = Ancho del rodamiento.
- d = Diámetro interior del rodamiento.

⁶ ESTUPIÑAN, Edgar y SAAVEDRA, Pedro. Técnicas de diagnóstico para el análisis de vibraciones de rodamientos. Universidad de Concepción, Chile. 6 p. Disponible en línea: http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos%20PREDICTIVO_archivos/galileo.dim.edec.cl%20mv/articulo_rodamientos_CHILE1.pdf.

- D = Diámetro exterior del rodamiento.
- Z = Número de elementos rodantes.
- d_b = Diámetro del elemento rodante.
- d_m = Diámetro medio del rodamiento = $\frac{D+d}{2}$
- α = Ángulo de contacto.

4. CARACTERÍSTICAS DEL BANCO DE PRUEBAS

Se utilizó el banco de pruebas del proyecto de grado “*Sistema de detección de falla en pista externa de rodamientos cónicos tipo 30203 usando señales acústicas*”⁷ y “*Detección de fallas en rodamientos cónicos por medio de la aplicación de la técnica Enveloping*”⁸, construido especialmente para el análisis de falla en rodamientos cónicos. El banco consta básicamente de tres apoyos en forma de L, dos de los cuales tienen rodamientos de bolas y el otro tiene un rodamiento cónico, al cual, previamente se le ha inducido un falla. Los apoyos donde se encuentran los rodamientos de bolas sostienen el eje y realizan la función de minimizar el movimiento relativo de este cuando se quiten los rodamientos cónicos. El eje está acoplado a un motor de baja potencia.

Para poder realizar las pruebas de condición utilizando ultrasonido, se debe instalar un nuevo sistema de adquisición de datos que se adapte a las características del transductor ultrasónico. Este sistema consta de una fuente de alimentación para el sensor, un osciloscopio y un procesador, en este caso un computador portátil. El análisis en el dominio de la frecuencia se llevó a cabo en ambiente MatLab.

⁷ PAREDES DIAS, Wilmert y QUINTERO MONSALVE, Javier. Sistema de detección de falla en pista externa de rodamientos cónicos tipo 30203 usando señales acústicas. Trabajo de grado para optar el título de ingeniero mecánico. Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica, Bucaramanga, 2010. p 40 - 41.

⁸ QUINTERO CARVALLIDO, Sergio Alfonso y TRUJILLO NAVARRO, Gerson. Detección de fallas en rodamientos cónicos por medio de la aplicación de la técnica de Enveloping. Trabajo de grado para optar el título de ingeniero mecánico. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico-mecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Bucaramanga, 2010. p 56 - 57.

5. ANÁLISIS DE SEÑALES ULTRASÓNICAS PARA DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS

La correcta aplicación del método de inspección por ultrasonido en cualquier organización, implica que antes se haga un análisis para determinar cuáles son los equipos críticos que justifican la aplicación del mismo, y una vez identificados, garantizar que se obtendrá información relevante de dichos equipos. Aplicado correctamente, permite recopilar información sobre el estado de los rodamientos, identificando la presencia de cualquier tipo de defecto en el mismo. Al identificar estos defectos, y el lugar en el que se producen, se pueden tomar las acciones necesarias para corregir esa tendencia a la falla.

5.1 ANÁLISIS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

El análisis de espectros, se define como la transformación de una señal de la representación en el dominio del tiempo, hacia la representación en el dominio de la frecuencia. Esto se debe a que en muchas ocasiones, la forma de onda (gráfica en el dominio del tiempo) no proporciona la suficiente información sobre el estado de un rodamiento. De hecho las señales en el dominio del tiempo se traslapan y la mejor manera de utilizar la gran información que contienen es visualizarla en el espectro (gráfica en el dominio de la frecuencia).

5.2 LA TRANSFORMADA DE FOURIER DISCRETA

La DFT (*Discrete Fourier Transform*) o Transformada Discreta de Fourier, es un tipo de transformada discreta que permite la representación matemática de una función en el dominio de la frecuencia, partiendo de una en el dominio del tiempo.

La entrada de la DFT es una secuencia finita de números reales o complejos, de modo que es ideal para procesar información almacenada en soportes digitales. En particular, la DFT se utiliza comúnmente en procesamiento digital de señales y otros campos relacionados dedicados a analizar las frecuencias que contiene una señal muestreada, también para resolver ecuaciones diferenciales parciales, y para llevar a cabo operaciones como convoluciones o multiplicaciones de enteros largos. Un factor muy importante para este tipo de aplicaciones es que la DFT puede ser calculada de forma eficiente en la práctica utilizando el algoritmo de la transformada rápida de Fourier

5.3 LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

La FFT (*Fast Fourier Transform*) o Transformada Rápida de Fourier, es un algoritmo que permite calcular la DFT. Muy utilizada en una amplia variedad de aplicaciones, desde el tratamiento de señales digitales hasta la resolución de ecuaciones en derivadas parciales. El algoritmo pone algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante. Por ejemplo: la señal de la que se tomaron muestras y que se va a transformar debe consistir de un número de muestras igual a una potencia de dos. La mayoría de los analizadores TRF permiten la transformación de 512, 1024, 2048 o 4096 muestras. El rango de frecuencias cubierto por el análisis TRF depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo.

5.4 FUNCIONES DE VENTANA FIJA

Las ventanas son funciones matemáticas usadas con frecuencia en el análisis y el procesamiento de señales para evitar las discontinuidades al principio y al final de los bloques analizados. En procesamiento de señales, una ventana se utiliza cuando nos interesa una señal de longitud voluntariamente limitada. En efecto, una señal real tiene que ser de tiempo finito; además, un cálculo sólo es posible a partir de un número finito de puntos. Para observar una señal en un tiempo finito, la multiplicamos por una función ventana. En resumen, las ventanas son funciones matemáticas que actúan como filtros, atenuando las discontinuidades de la señal en los extremos del intervalo, esto mejora los datos del análisis de frecuencia. Distintos autores han propuesto muchas ventanas de disminución gradual. Las más utilizadas son las siguientes:

$$\text{Ventana de Bartlett: } \omega[n] = 1 - \frac{|n|}{M+1}; \quad -M \leq n \leq M$$

$$\text{Ventana de Hann: } \omega[n] = \frac{1}{2} \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi n}{2M+1}\right) \right]; \quad -M \leq n \leq M$$

$$\text{Ventana de Hamming: } \omega[n] = 0,54 + 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{2M+1}\right); \quad -M \leq n \leq M$$

$$\text{Ventana de Blackman: } \omega[n] = 0,42 + 0,5 \cos\left(\frac{2\pi n}{2M+1}\right) + 0,08 \cos\left(\frac{4\pi n}{2M+1}\right); \quad -M \leq n \leq M$$

6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

6.1 DESVIACIÓN ESTÁNDAR

En estadística, La desviación estándar es una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Dicho de otra manera, la desviación estándar es simplemente el "promedio" o variación esperada con respecto a la media aritmética. La desviación estándar puede ser interpretada como una medida de incertidumbre. La desviación estándar de un grupo repetido de medidas nos da la precisión de éstas. Cuando se va a determinar si un grupo de medidas está de acuerdo con el modelo teórico, la desviación estándar de esas medidas es de vital importancia: si la media de las medidas está demasiado alejada de la predicción (con la distancia medida en desviaciones estándar), entonces consideramos que las medidas contradicen la teoría. Esto es coherente, ya que las mediciones caen fuera del rango de valores en el cual sería razonable esperar que ocurrieran si el modelo teórico fuera correcto. La desviación estándar se define como la raíz cuadrada de la varianza, a su vez, la varianza σ^2 se define como sigue:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2$$

De manera que la desviación estándar está dada por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \langle x \rangle)^2}$$

6.2 CURTOSIS

La curtosis o *kurtosis* es una medida de la forma que se aplica en teoría de la probabilidad y estadística. La curtosis trata de estudiar la proporción de la varianza que se explica por la combinación de datos extremos respecto a la media en contraposición con datos poco alejados de la misma. Una mayor curtosis implica una mayor concentración de datos muy cerca de la media de la distribución coexistiendo al mismo tiempo con una frecuencia relativamente elevada de datos muy alejados de la misma. Esto explica una forma de la distribución de frecuencias con colas muy elevadas y un con un centro muy apuntado.

La curtosis se define como sigue:

$$Curt = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \langle x \rangle}{\sigma} \right)^4 - 3$$

En el campo del mantenimiento predictivo, la curtosis ha demostrado ser una técnica versátil. Un mayor valor del número resultante del cálculo de la curtosis, es un indicativo de la presencia de picos en un determinado vector de datos, en este caso de la señal en el dominio de la frecuencia, con lo cual se espera que en el rango de frecuencias que se presente un alto valor de curtosis, exista también una alta probabilidad de encontrar un defecto o una falla. Recientemente se llevaron a cabo varias investigaciones que demostraron la efectividad del análisis estadístico y particularmente de la curtosis, para aislar un rango de frecuencias en donde es muy probable que se encuentre la falla, para después aplicar un análisis convencional como Enveloping.

Spectral kurtosis (SK) is a statistical parameter indicating how the impulsiveness of a signal varies with frequency. Since faults in rolling element bearings give rise to a series of short impulse responses as the rolling elements strike faults on the races, the SK is potentially useful for determining the frequency bands dominated by the bearing fault signals, usually containing resonance frequencies excited by the faults⁹.

La Curtosis espectral (SK) es un parámetro estadístico que indica cómo varía la impulsividad de una señal con la frecuencia. Puesto que las fallas en los rodamientos da lugar a una serie de respuestas a impulsos cortos como los producidos cuando un elemento rodante pasa por una falla, la SK es potencialmente útil para determinar las bandas de frecuencia dominadas por la resonancia que lleva señales de fallo, que por lo general contiene frecuencias excitadas por las fallas.

6.3 ASIMETRÍA

El objetivo de la medida de la asimetría es, sin necesidad de dibujar la distribución de frecuencias, estudiar la deformación horizontal de los valores de la variable respecto al valor central de la media. Las medidas de forma pretenden estudiar la concentración de la variable hacia uno de sus extremos.

Una distribución es simétrica cuando a la derecha y a la izquierda de la media existe el mismo número de valores, equidistantes dos a dos de la media, y además con la misma frecuencia.

⁹ RANDAL, Robert y SAWALHI, Nader. The application of Spectral Kurtosis to bearing diagnostics. School of Mechanical and Manufacturing Engineering. The University of New South Wales. Sidney 2004.

Una distribución es simétrica si $\bar{x} = Me = Mo$. En caso contrario, decimos que la distribución es asimétrica y entonces puede ser de dos tipos:

6.3.1 *Asimétrica a la izquierda*: Es el caso en que $Mo \geq Me \geq \bar{x}$

6.3.2 *Asimétrica a la derecha*: Es el caso en que $Mo \leq Me \leq \bar{x}$.

El coeficiente de asimetría o sesgo (*Skew*), se calcula de la siguiente manera:

$$Skew = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \langle x \rangle}{\sigma} \right)^3$$

6.4 VALOR RMS DE UN VECTOR

El valor cuadrático medio o *RMS* (*Root Mean Square*) es una medida estadística de la magnitud de una cantidad variable. Puede calcularse para una serie de valores discretos o para una función de variable continua. El nombre deriva del hecho de que es la raíz cuadrada de la media aritmética de los cuadrados de los valores. RMS quiere decir raíz de promedio de cuadrados, y es una medida del nivel de una señal. Se calcula elevando al cuadrado el valor instantáneo de la señal, promediando los cuadrados de los valores en el tiempo y sacando la raíz cuadrada de promedio. El valor RMS es el valor que se usa para calcular la energía de la señal.

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{N}}$$

7. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

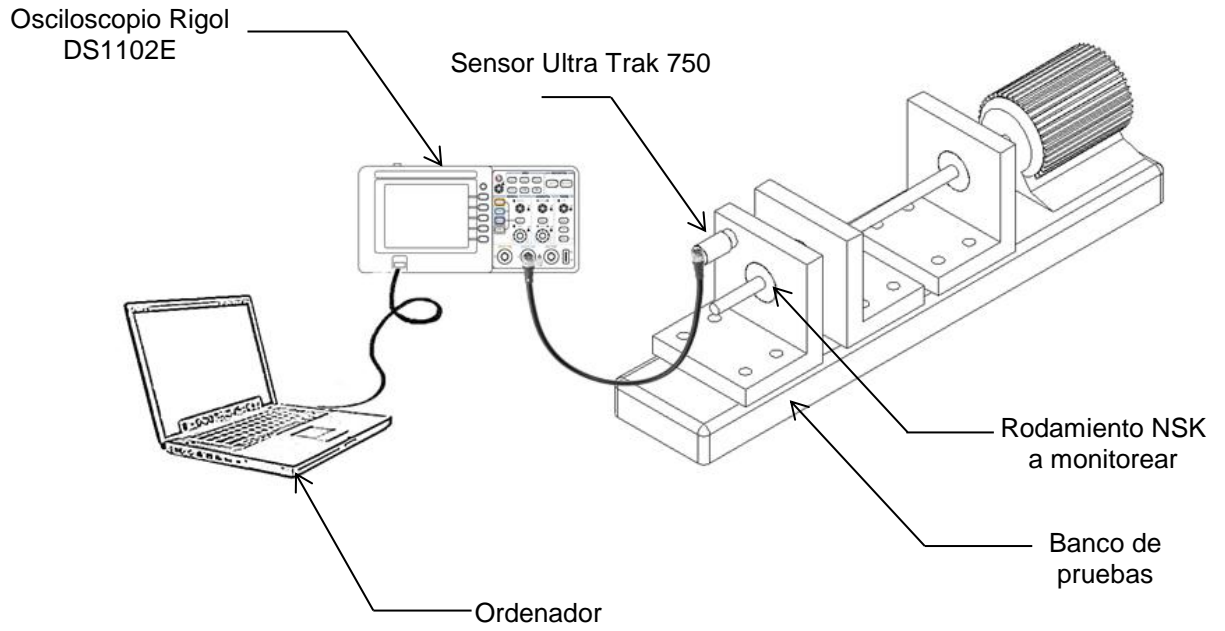
El banco de pruebas para este proyecto corresponde al banco utilizado en los proyectos de grado “*Sistema de detección de falla en pista externa de rodamientos cónicos tipo 30203 usando señales acústicas*¹⁰” y “*Detección de fallas en rodamientos cónicos por medio de la aplicación de la técnica Enveloping*”¹¹, construido especialmente para el análisis de falla en rodamientos cónicos. El banco consta básicamente de tres apoyos en forma de L, dos de los cuales tienen rodamientos de bolas y el otro tiene un rodamiento cónico, al cual se le ha inducido una falla previamente. Los apoyos donde se encuentran los rodamientos de bolas sostienen el eje y realizan la función de minimizar el movimiento relativo de éste cuando se quiten los rodamientos cónicos. El eje está acoplado a un motor de baja potencia.

Para poder realizar las pruebas de condición utilizando ultrasonido, se instaló un nuevo sistema de adquisición de datos adaptado a las características del transductor ultrasónico. Este sistema consta de una fuente de alimentación para el sensor, un osciloscopio y un procesador, en este caso un computador portátil. El análisis en el dominio de la frecuencia se llevó a cabo en ambiente MatLab

¹⁰ PAREDES DIAS, Wilmert y QUINTERO MONSALVE, Javier. Sistema de detección de falla en pista externa de rodamientos cónicos tipo 30203 usando señales acústicas. Trabajo de grado para optar el título de ingeniero mecánico. Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica, Bucaramanga, 2010. p 40 - 41.

¹¹ QUINTERO CARVALLIDO, Sergio Alfonso y TRUJILLO NAVARRO, Gerson. Detección de fallas en rodamientos cónicos por medio de la aplicación de la técnica de Enveloping. Trabajo de grado para optar el título de ingeniero mecánico. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica. Bucaramanga, 2010. p 56 - 57.

Figura 3. Esquema del sistema de adquisición de datos.



7.1 SENSOR ULTRASÓNICO.

ULTRA-TRAK 750TM es un transductor que tiene la capacidad de detectar señales de alta frecuencia gracias a sus propiedades piezoeléctricas. Puede ser utilizado para captar los cambios de la amplitud ultrasónica emitida por un sistema mecánico en operación, en este caso un rodamiento de rodillos cónicos NSK 30203. Este sensor es especialmente útil para detectar cambios de frecuencia en el rango de ultrasonido.

Figura 4. Sensor ULTRA-TRAK 750TM.



Fuente: Catálogo en línea: http://www.uesystems.com/media/4289/ultra-trak_sp.pdf

7.1.1 Características:

- Fuente de energía: 18-30 VDC (30 mA máx).
- Corriente: 4-20 mA (25 mA máx).
- Salida: demodulada¹² y heterodina¹³ (opcional), 4 – 20 mA, es proporcional a la señal ultrasónica detectada.
- Rango de temperatura ambiente: 0 – 50 °C.
- Frecuencia de detección: hasta 40 kHz (± 2 kHz).
- Ajuste de sensibilidad: presionar el interruptor o el control de señal TTL¹⁴.
- Cable: 3 metros con protección RF¹⁵.
- Transductor piezoeléctrico.
- Montaje: Sujeción por tornillo.
- Material del cuerpo del sensor: Acero inoxidable resistente al agua y al polvo. Fabricado bajo requerimientos de NEMA 4X¹⁶. Excede los requerimientos del IP 54.

¹² El proceso de demodulación consiste en obtener, a partir de la onda original, una nueva señal que contenga únicamente la señal modulada.

¹³ Es la frecuencia producida por la mezcla de dos o más señales en un dispositivo no lineal.

¹⁴ TTL es la sigla en inglés de *Transistor-Transistor Logic*, es decir lógica transistor a transistor. Es una tecnología de construcción de circuitos electrónicos digitales. Para más detalles, ver el documento en línea: <http://ocw.um.es/ingenierias/tecnologia-y-sistemas-electronicos/material-de-clase-1/tema-7.-introduccion-a-la-electronica-digital-familias-logicas.pdf>.

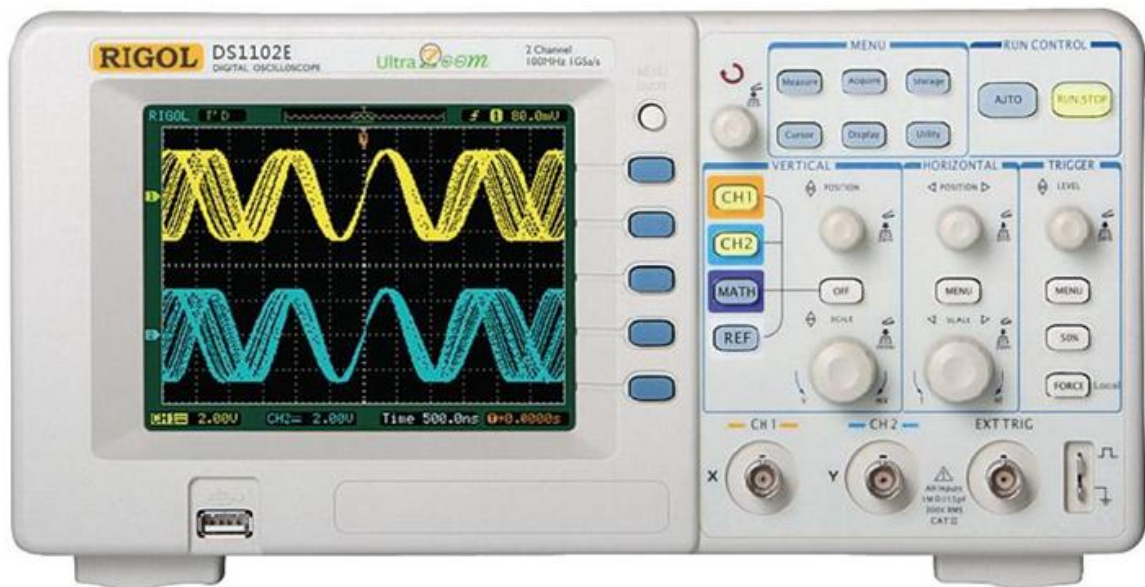
¹⁵ RF hace referencia al cable coaxial, que es utilizado para transportar [señales eléctricas](#) de alta [frecuencia](#). Posee dos conductores concéntricos, uno central, llamado vivo, encargado de llevar la información, y uno exterior, de aspecto tubular, llamado malla o blindaje, que sirve como referencia de [tierra](#) y retorno de las [corrientes](#).

¹⁶ NEMA 4X es un estándar de protección. Hace referencia a las siguientes situaciones: equipos para uso interior o al aire libre, proporcionar un grado de protección al personal contra el contacto incidental con el equipo, proporcionar un grado de protección contra suciedad, lluvia, aguanieve, nieve, vientos de polvo, salpicaduras de agua, chorros dirigidos de agua y corrosión, además permanecerá ileso a pesar de la formación externa de hielo.

7.2 OSCILOSCOPIO

El osciloscopio Rigol DS1102E es un instrumento de medición electrónico para la representación gráfica de señales eléctricas que varían en el tiempo. El DS1102E es un equipo económico de alto rendimiento, con 2 canales de Entrada y 100 MHz de ancho de banda. Es utilizado ampliamente en las áreas de Educación, capacitación, líneas de producción, desarrollo e investigación. Tiene la ventaja de ser capaz de captar extensas formas de onda gracias a su profundidad de memoria de 1 Megapunto.

Figura 5. Osciloscopio RIGOL DS1102E



Fuente: Catálogo en línea: http://www.elexp.com/a_data/DS1000D-DS1000E_Manual.pdf

7.2.1 Características principales:

- Ancho de banda de 100MHz
- Canales Análogos más un canal de Trigger externo.
- Profundidad de memoria de 1Megapunto.
- 1 GSa/s de muestreo en tiempo real
- Pantalla de 5,6" LCD TFT QVGA, con resolución de 320x240 y 64 mil colores.
- Amplio set de modos Trigger: Flanco, Ancho de Pulso, Pendiente, Video y Alternado.
- Funciones matemáticas: Suma, Resta, Multiplicación y FFT en pantalla dividida o pantalla completa.
- Mediciones Automáticas: 23 mediciones automáticas más función contador.
- Función Pasa/Falla con mascara ajustable y salida BNC dedicada.
- Grabación y repetición de video de hasta 1000 frames con ajuste de tiempo y almacenamiento.
- Conectividad USB Host, USB Device, RS232 y certificado para Impresoras PictBridge.
- Menú Multilenguaje, incluyendo español.

Figura 6. Sistema de adquisición de datos.



8. METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN

A continuación se hace una breve descripción del procedimiento general que se utilizó para el análisis de la señal.

- Se realizó el montaje del sistema de adquisición de datos formado por el conjunto Banco de pruebas-sensor-osciloscopio-PC para realizar las pruebas correspondientes y se procedió a capturar la señal.
- El sensor captó la señal de vibración de alta frecuencia (ultrasonido) y ésta fue visualizada en el osciloscopio. A su vez el osciloscopio permitió “grabar” la señal en el dominio tiempo y entregó al ordenador un archivo de extensión .CSV (*Comma-Separated Values*) que fué procesado en MatLab.
- Se desarrolló un código¹⁷ de extensión .mat que permitió administrar el archivo .CSV, y pasar del dominio tiempo al dominio frecuencia.
- Se analizó el espectro de la señal en entorno MatLab mediante la técnica PSD (Power Spectral Density ó Densidad Espectral de Potencia) de Welch, utilizando una ventana Hanning¹⁸.
- Se procedió a analizar la señal utilizando los siguientes parámetros: Kurtosis, RMS y desviación estándar¹⁹.

¹⁷ Ver anexo A

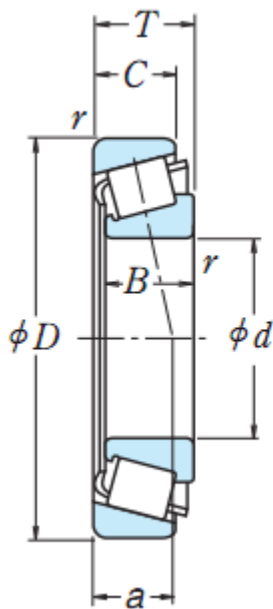
¹⁸ Ver Marco teórico.

¹⁹ Ver análisis estadístico

8.1 INDUCCIÓN DE FALLAS

Para simular las fallas en las partes principales de un rodamiento se seleccionó el modelo NSK 30203, debido a su facilidad para separar su pista externa. Tanto en la pista externa, la canastilla, los elementos rodantes y la pista interna, fueron inducidos tres niveles de falla: incipiente, intermedia y desarrollada. Las fallas fueron hechas de manera convencional en todas las partes del rodamiento, excepto en la pista interna, la cual requiere de un procedimiento especial²⁰ para crear la falla, dada la dificultad para acceder a la parte interna del rodamiento.

Figura 7. Dimensiones del rodamiento NSK 30203.



Dimensiones (mm)						
d	D	T	B	C	Cono	Copa r mín.
15	35	11.75	11	10	0.6	0.6
	42	14.25	13	11	1	1
17	40	13.25	12	11	1	1
	40	17.25	16	14	1	1
	47	15.25	14	12	1	1
	47	15.25	14	10.5	1	1
	47	20.25	19	16	1	1

Fuente: Catálogo interactivo NSK. Disponible en:

http://www.nskamericas.com/cps/rde/xbcr/na_es/Rodamientos.LR.pdf

²⁰ Ver anexo B

Tabla 1. Información técnica del rodamiento NSK 30203

DIMENSIONES PRINCIPALES			CAPACIDADES DE CARGA		CARGA LÍMITE DE FATIGA	VELOCIDADES		MASA
d [mm]	D [mm]	B [mm]	DINÁMICA C [kN]	ESTÁTICA C_0 [kN]	P_u [kN]	VELOCIDAD DE REFERENCIA [rpm]	VELOCIDAD LIMITE [rpm]	[kg]
17	40	13,25	20,1	19,9	1,83	13000	18000	0,075

Fuente: Catálogo interactivo NSK.

http://www.nskamericas.com/cps/rde/xbcr/na_es/Rodamientos.LR.pdf

El rodamiento NSK 30203 tienen los rodillos dispuestos entre unos caminos de rodadura cónicos en los aros interior y exterior. Al prolongar las superficies cónicas de ambos caminos de rodadura, convergen sobre un mismo punto en el eje del rodamiento. Su diseño hace que sean especialmente adecuados para soportar cargas combinadas (radiales y axiales). Los rodamientos de rodillos cónicos NSK tienen un perfil de contacto logarítmico que permite una distribución óptima de la tensión en los contactos del rodillo/camino de rodadura. El diseño especial de las superficies de deslizamiento de la pestaña guía y el extremo grande de los rodillos, favorecen considerablemente la formación de una película de lubricante en los contactos del extremo del rodillo/pestaña. Las ventajas obtenidas incluyen una mayor fiabilidad de funcionamiento y una menor sensibilidad a la desalineación. Los rodamientos de rodillos cónicos suelen ser de diseño desarmable, es decir, el cono que consta de aro interior, rodillos y jaula, forman una unidad que puede montarse por separado del aro exterior.

8.1.1 FALLAS EN PISTA EXTERNA

Figura 8: Falla en pista externa nivel incipiente.



Figura 9: Falla en pista externa nivel intermedio.



Figura 10: Falla en pista externa nivel desarrollado.



8.1.2 FALLAS EN CANASTILLA

Figura 11: Falla en canastilla nivel incipiente.



Figura 12: Falla en canastilla nivel intermedio.



Figura 13: Falla en canastilla nivel desarrollado.



8.1.3 FALLAS EN LOS ELEMENTOS RODANTES

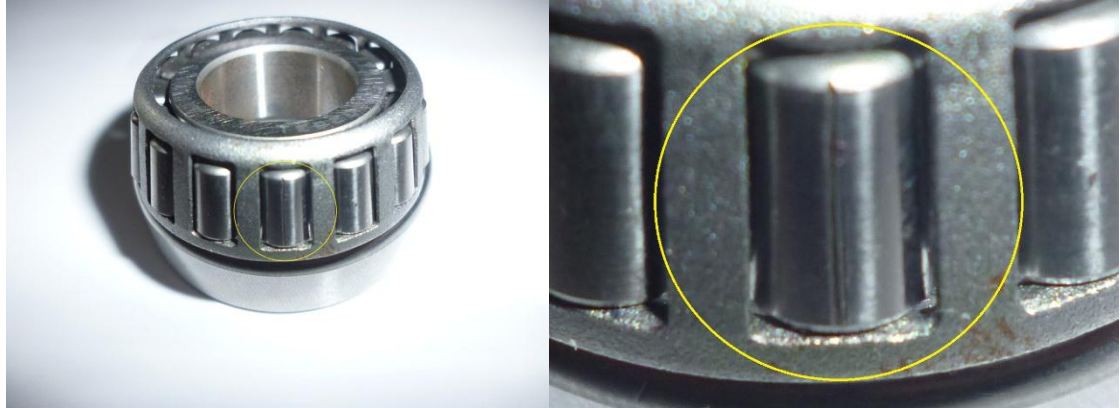
Figura 14: Falla en elementos rodantes nivel incipiente.



Figura 15: Falla en elementos rodantes nivel intermedio.



Figura 16: Falla en elementos rodantes nivel desarrollado.



8.1.4 FALLAS EN PISTA INTERNA

Figura 17: Falla en pista interna nivel incipiente.

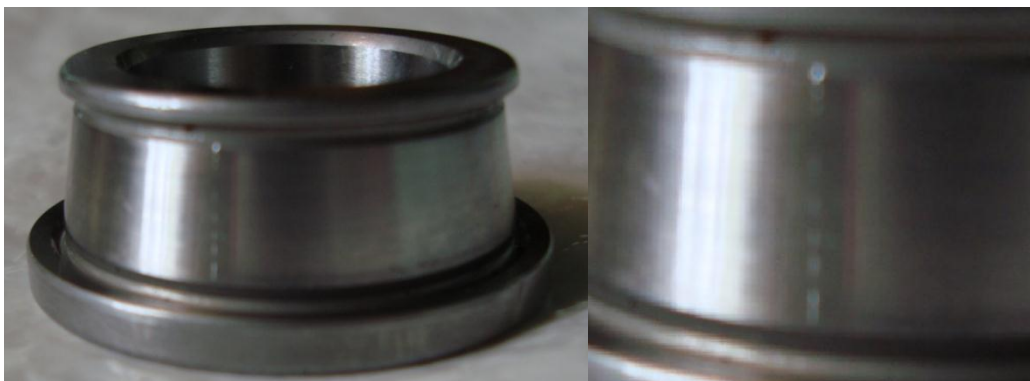


Figura 18: Falla en pista interna nivel intermedio.



Figura 19: Falla en pista interna nivel desarrollado.



9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El primer paso fue capturar toda la información necesaria del rodamiento NSK 30203 en perfectas condiciones bajo los parámetros de operación del banco de pruebas. El osciloscopio realizó la grabación de la señal y entregó un archivo .CSV que representa la variación del voltaje que entrega el sensor (proporcional a la amplitud de la onda ultrasónica) con el tiempo. Utilizando MatLab y el código .mat mencionado anteriormente, estos datos fueron llevados al dominio de la frecuencia. Al ejecutar el código se obtuvo un vector con la magnitud de la señal. Se calculó el valor RMS de este vector para tener una primera idea del nivel de energía de la señal:

Se realizó el mismo procedimiento para cada uno de los vectores correspondientes a los rodamientos con sus respectivas fallas. La información obtenida se resume en la tabla 2.

Tabla 2: Resultados de algunos parámetros estadísticos de los diferentes vectores.

TIPO DE FALLA	MEDIA [dB]	RMS [dB]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR σ	ASIMETRIA
Rodamiento sin falla	22,1278	22,3278	5,8170	-0,7405
Pista externa incipiente	22,6558	23,3876	5,8247	-0,7079
Pista externa intermedia	22,6632	23,4074	5,8553	-0,6399
Pista externa desarrollada	23,1448	23,8695	5,8372	-0,6745
Rodillos incipiente	22,6446	23,3938	5,8729	-0,6531
Rodillos intermedia	22,7153	23,4691	5,9004	-0,6104
Rodillos desarrollada	22,9862	23,7198	5,8538	-0,6492
Canastilla incipiente	22,6105	23,3546	5,8484	-0,7036
Canastilla intermedia	22,8105	23,5811	5,9792	-0,4826
Canastilla desarrollada	22,5412	23,2772	5,8271	-0,7190
Pista interna incipiente	22,2149	23,5970	6,0247	-0,4365
Pista interna intermedia	22,5780	23,3254	5,8574	-0,6786
Pista interna desarrollada	22,6563	23,3946	5,8307	-0,6819

Esta inspección permitió establecer una primera observación: el valor RMS, y por lo tanto el nivel de energía media, de todos los vectores de datos con una falla, es superior al valor RMS del vector correspondiente al rodamiento en perfectas condiciones. Sin embargo, no se puede identificar, aún, ninguna tendencia para poder discriminar el tipo de falla y el lugar en que se produce. La asimetría no aporta ningún tipo de información, aparte de indicar que existe una mayor cantidad de datos que se aglomeran como valores menores que la media (asimetría negativa), lo cual es común para todos los vectores, incluyendo el rodamiento de referencia (sin falla). La desviación estandar muestra, a su vez, que el vector del rodamiento sin falla presenta la menor variabilidad en sus datos, lo cual era predecible, ya que se esperaba que el nivel de vibración no presentase cambios significativos.

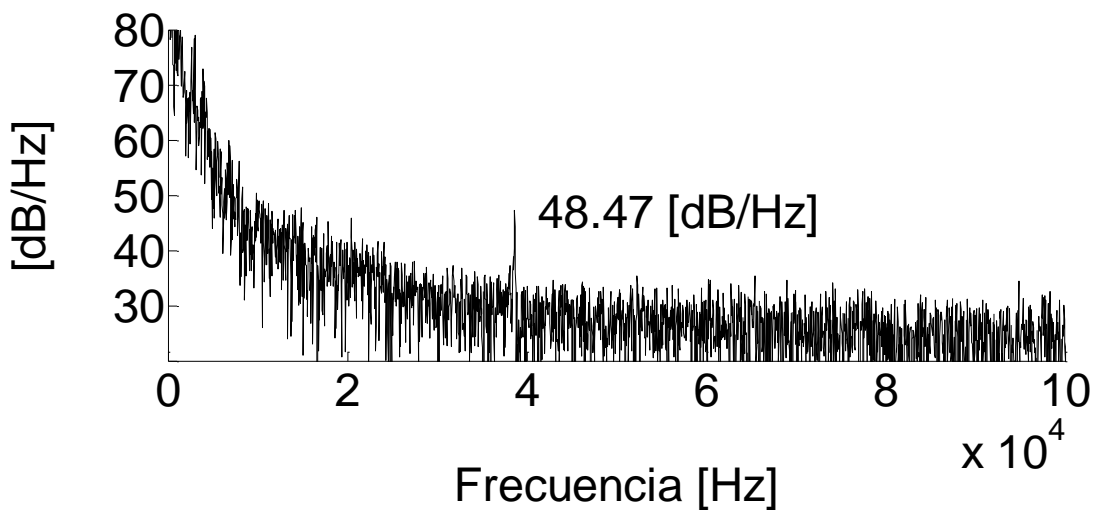
9.1 MÉTODO DE DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA

La técnica más importante para el diagnóstico de procesos y de la condición de las máquinas es la espectral. La idea consiste en detectar una cantidad de componentes espectrales asociados de manera determinada con armónicos de frecuencias específicas. Esta técnica tiene las ventajas de estar asociada de manera natural con la característica rotatoria de la maquinaria, ofrecer robustez frente al ruido y otras fuentes de distorsión, y además, se puede implementar a través de un procedimiento muy sencillo y rápido. La densidad espectral de potencia (PSD por sus siglas en Inglés) se relaciona con la potencia normalizada de una señal y su descripción en el dominio de la frecuencia²¹.

²¹ F. E. Hernández Montero y V. Atxa Uribe. Aplicación de técnicas clásicas y avanzadas de procesamiento de vibraciones al diagnóstico de cojinetes. Análisis experimental. Universidad de Pinar del Río, Cuba 2007 y Universidad de Mondragón, España 2007.

Con ayuda de MatLab, se hizo el respectivo análisis para cada uno de los vectores de datos obtenidos del código de extensión .mat. Se utilizó el método de Welch con un tipo de ventana Hanning, un número de transformadas $N_{fft} = 2^{21}$ y un número de ventanas $N_{Wind} = 2^{19}$ ya que estos parámetros aportaban la mejor resolución posible (prueba y error). Los resultados se pueden ver a continuación.

Figura 20: Densidad espectral de potencia de la señal del rodamiento sin falla en un rango de [0-100] kHz.



ESPECTROS DE FALLAS EN PISTA EXTERNA.

Figura 21: Pista externa nivel incipiente para un rango de [0-100] kHz.

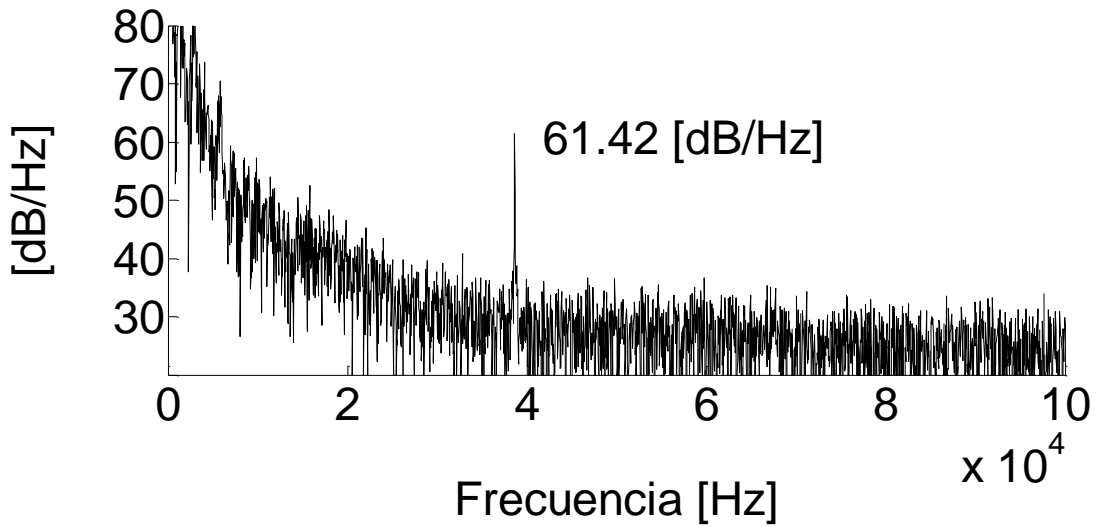


Figura 22: Pista externa nivel intermedio para un rango de [0-100] kHz.

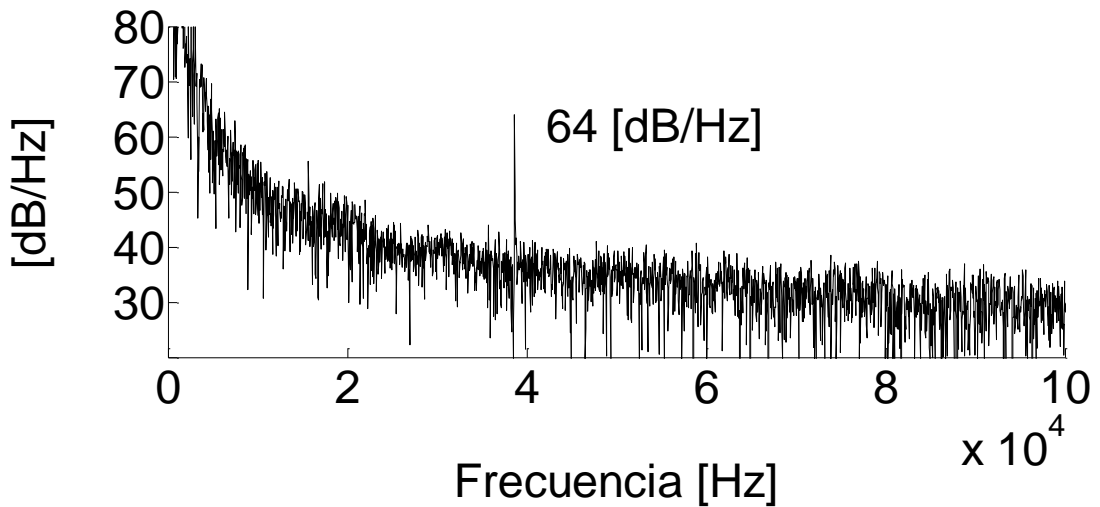


Figura 23: Pista externa nivel desarrollado para un rango de [0-100] kHz.

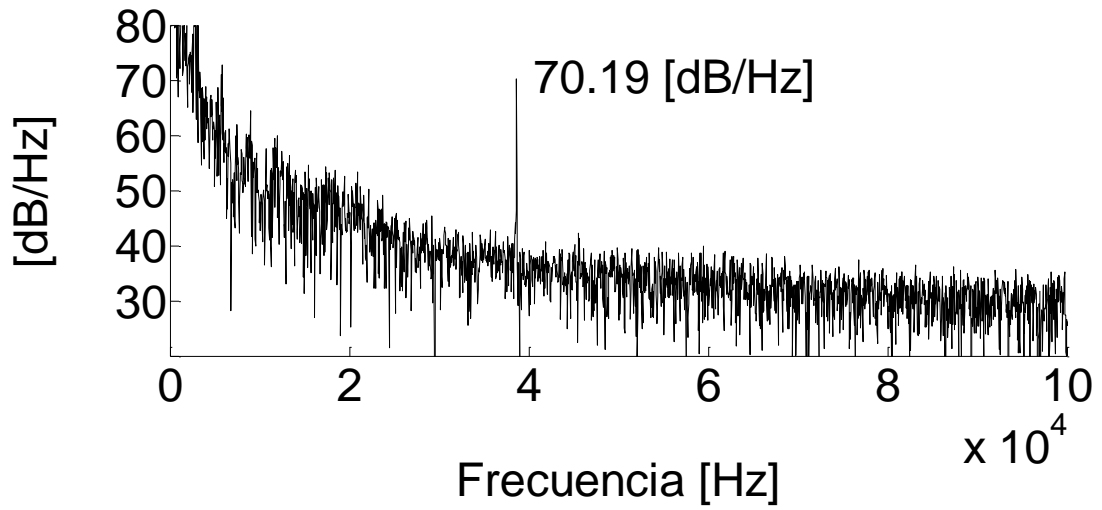
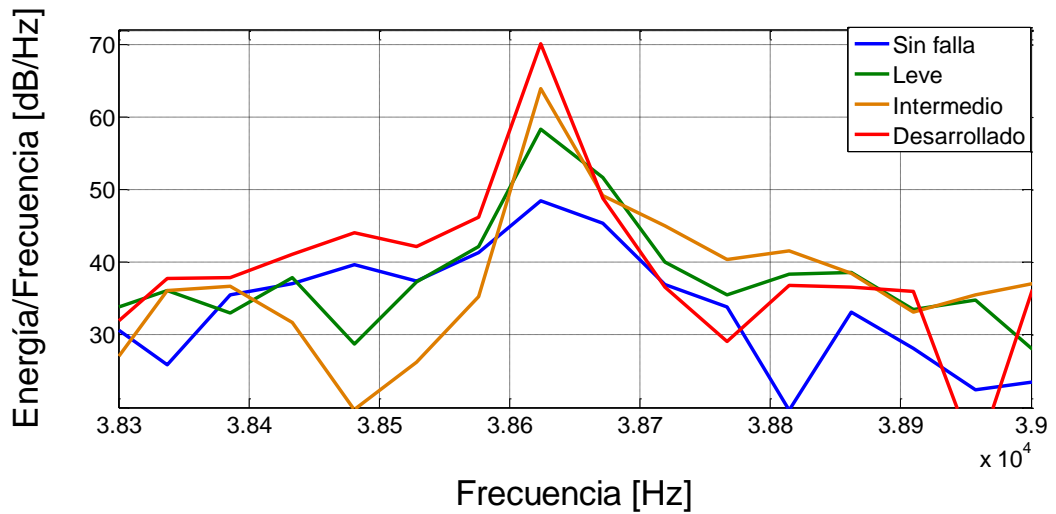


Figura 24: Tres niveles de falla para pista externa en el rango de máxima sensibilidad del sensor.



ESPECTROS DE FALLA EN PISTA INTERNA.

Figura 25: Pista interna nivel incipiente para un rango de [0-100] kHz.

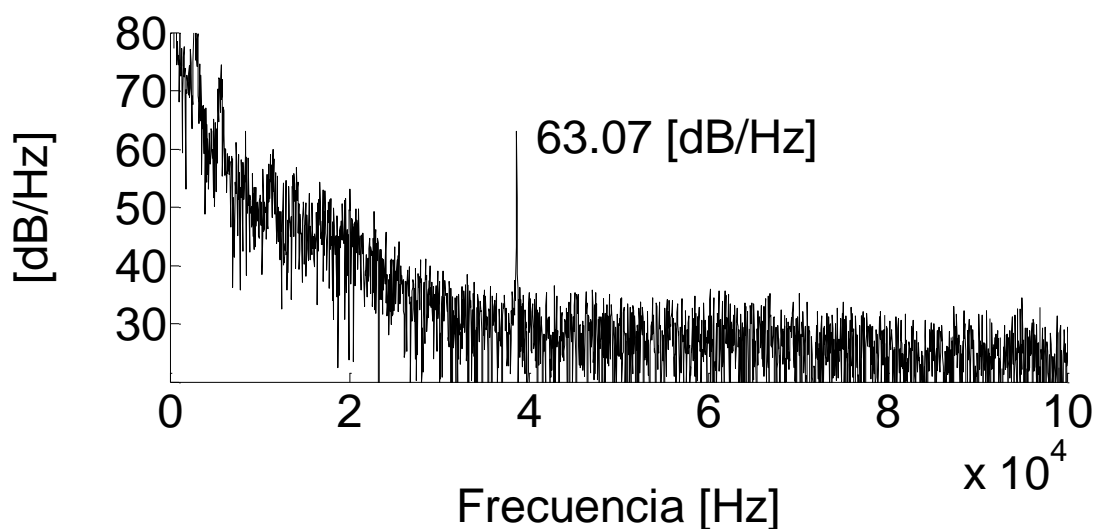


Figura 26: Pista interna nivel intermedio para un rango de [0-100] kHz.

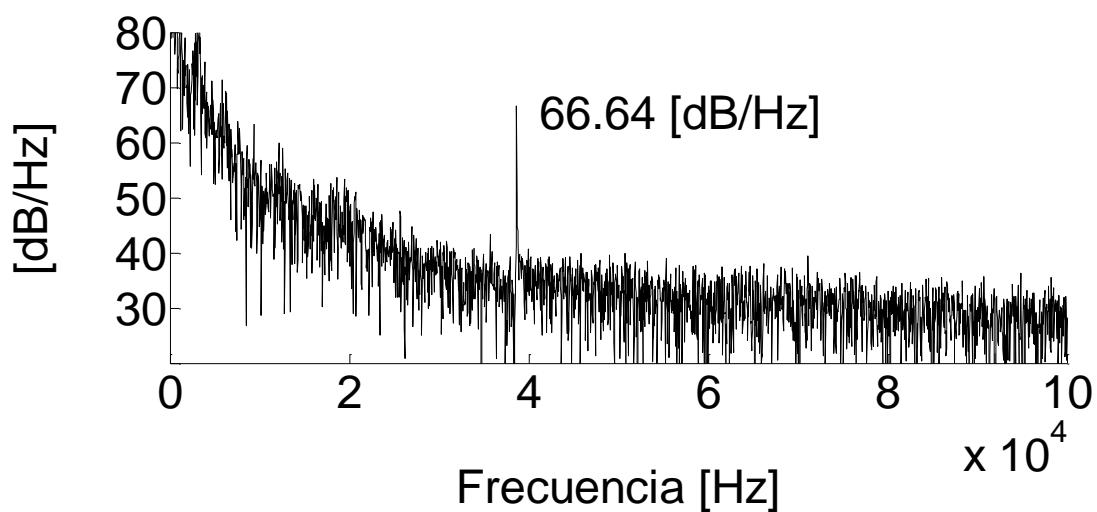


Figura 27: Pista interna nivel desarrollado para un rango de [0-100] kHz.

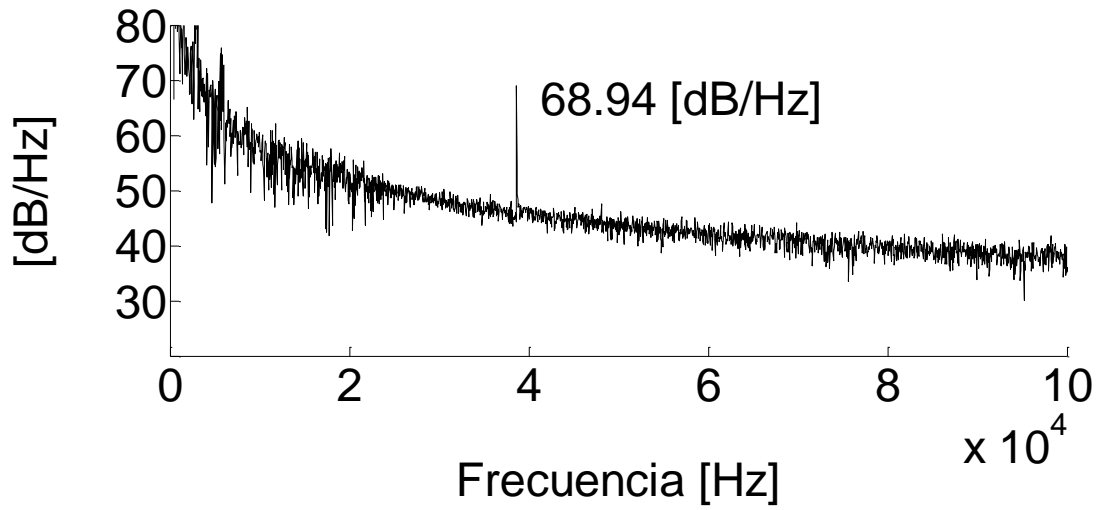
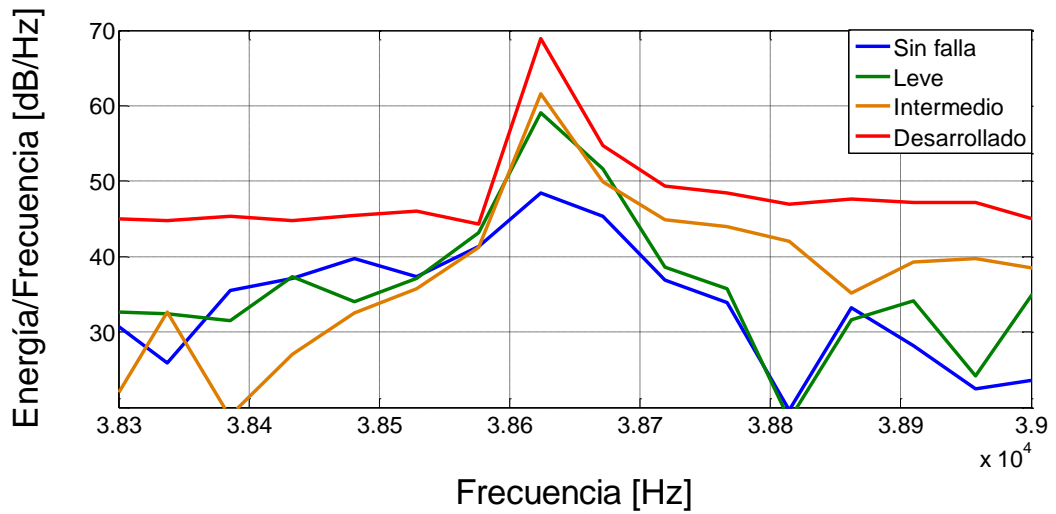


Figura 28: Tres niveles de falla para pista interna en el rango de máxima sensibilidad del sensor.



ESPECTROS DE FALLA EN ELEMENTOS RODANTES.

Figura 29: Elementos rodantes nivel incipiente para un rango de [0-100] kHz.

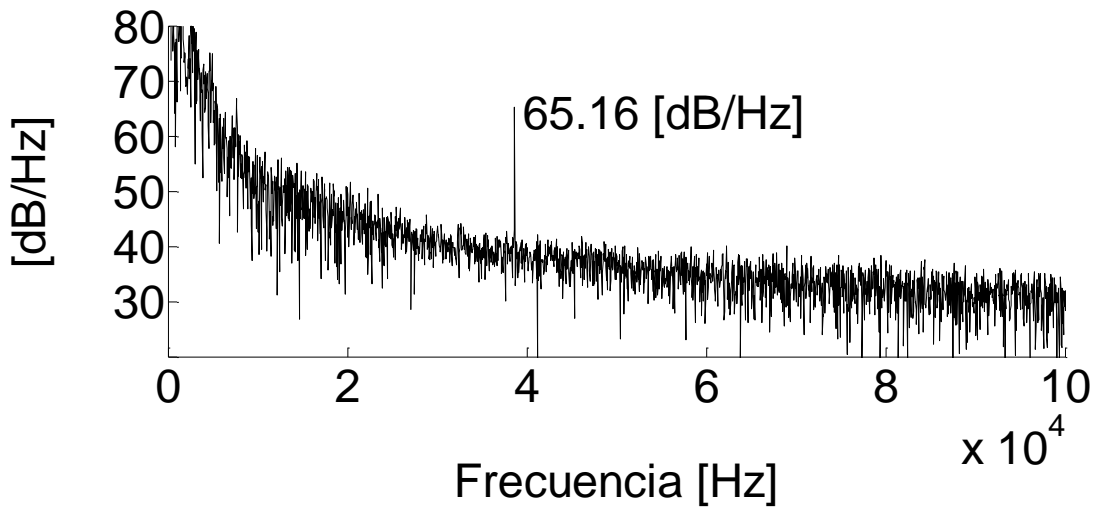


Figura 30: Elementos rodantes nivel intermedio para un rango de [0-100] kHz.

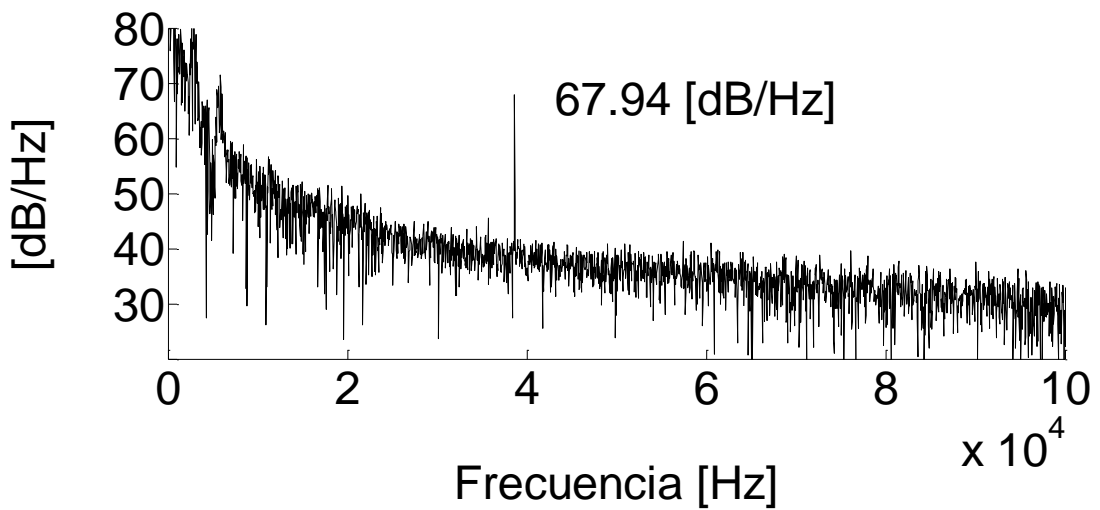


Figura 31: Elementos rodantes nivel desarrollado para un rango de [0-100] kHz.

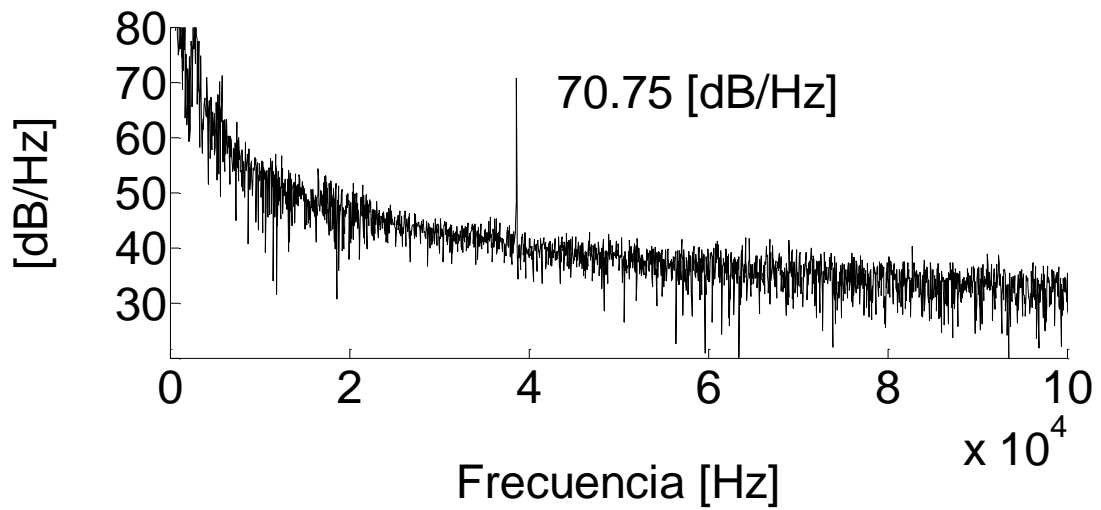
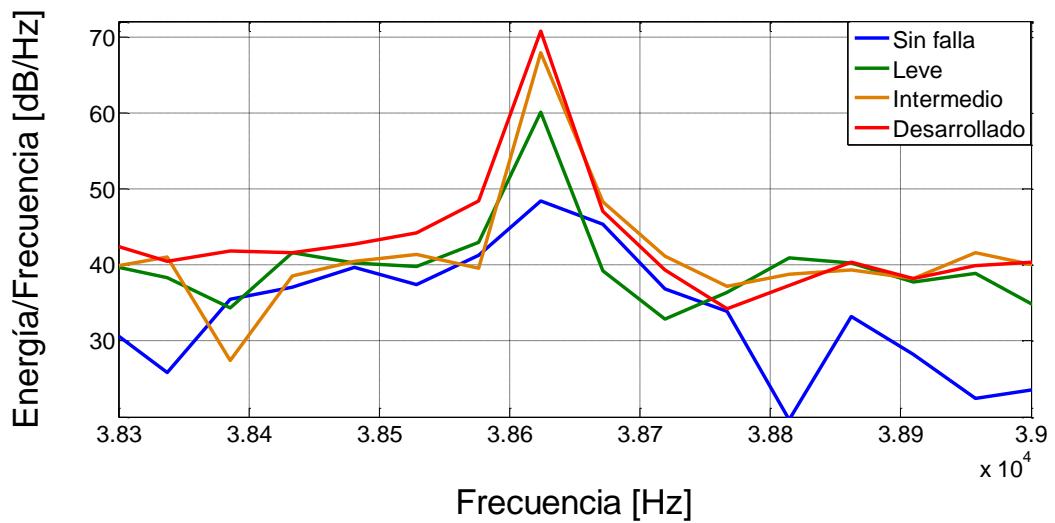


Figura 32: Tres niveles de falla para elementos rodantes en el rango de máxima sensibilidad del sensor.



ESPECTROS DE FALLA EN CANASTILLA.

Figura 33: Canastilla nivel incipiente para un rango de [0-100] kHz.

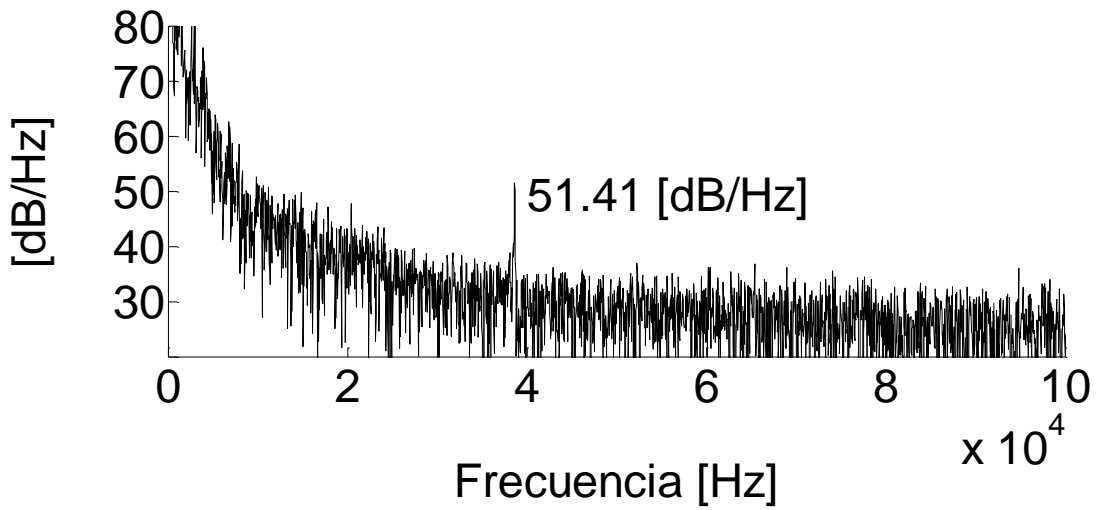


Figura 34: Canastilla nivel intermedio para un rango de [0-100] kHz.

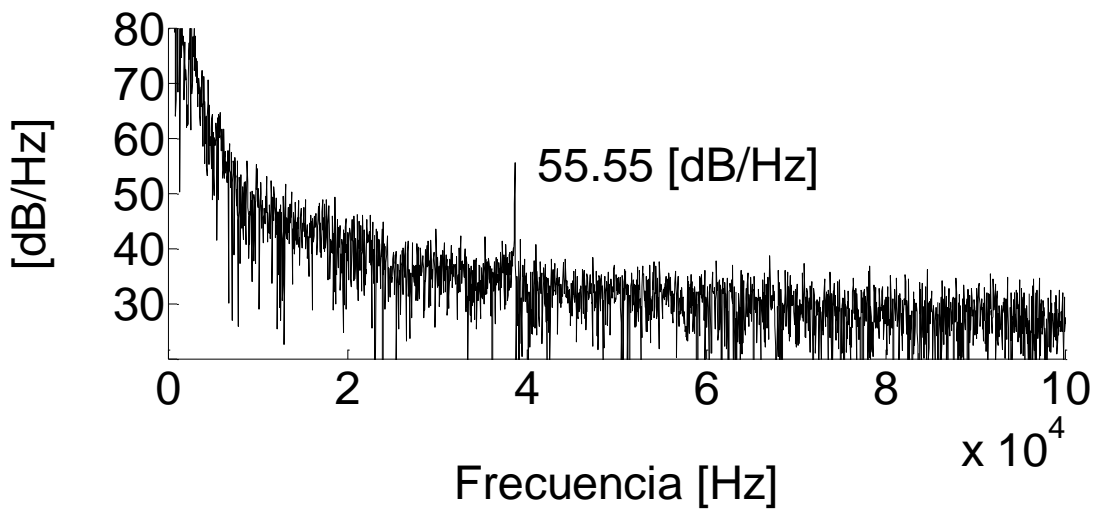


Figura 35: Canastilla nivel desarrollado para un rango de [0-100] kHz.

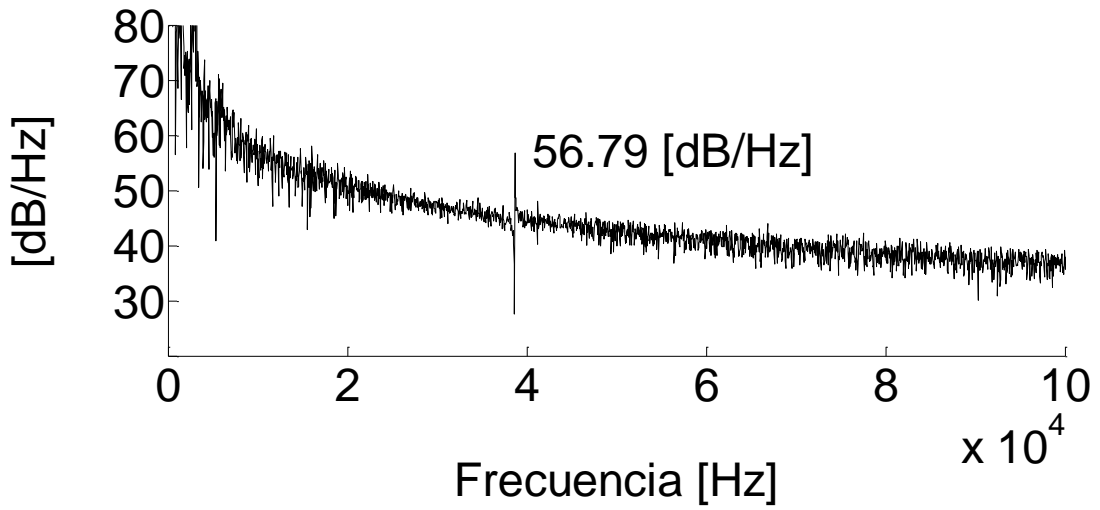
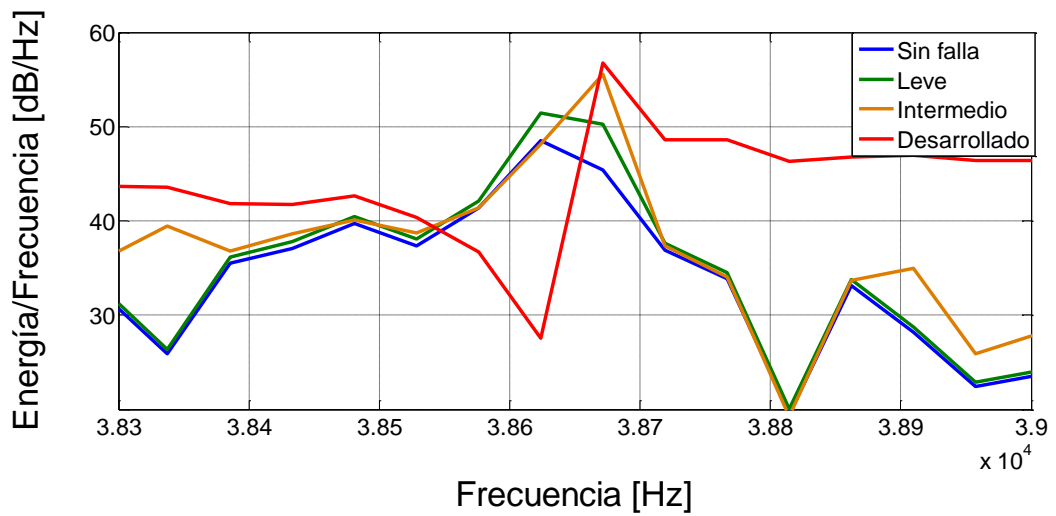


Figura 36: Tres niveles de falla para pista canastilla en el rango de máxima sensibilidad del sensor.



Las gráficas muestran un incremento de la densidad espectral de potencia, cerca de los 38.7 kHz. Al superponer los espectros de 3 rodamientos con un nivel de severidad de falla diferente pero en la misma ubicación (Rodillos nivel desarrollado, Rodillos nivel intermedio y Rodillos nivel leve, por ejemplo), se observa un incremento progresivo de la PSD con el nivel de severidad de la falla.

Existe una tendencia que permite identificar el nivel de severidad de la falla en cada elemento si se cuenta con una línea base²² previamente establecida.

Sin embargo, no se observó una tendencia clara para identificar la ubicación de la falla (En pista externa, canastilla, Elementos rodantes o Pista interna). De manera que se hizo necesario utilizar otro parámetro estadístico para estudiar cada vector con un mayor grado de profundidad.

9.2 MÉTODO SK (SPECTRAL KURTOSIS)

Tabla 3. Convenciones para las gráficas.

ABREVIATURA	NIVEL DE SEVERIDAD CORRESPONDIENTE
SF	Sin falla
IN	Incipiente
I	Intermedio
D	Desarrollado

²² Una línea base para un rodamiento refleja en decibeles el nivel al que está operando bajo condiciones normales sin defectos observables y una lubricación adecuada.

En este caso se utilizó la *Spectral Kurtosis* (SK) o Kurtosis espectral. Como ya se mencionó anteriormente²³, la SK es un parámetro estadístico que permite identificar la presencia de picos (o valores atípicos) en una señal. Una mayor kurtosis implica una mayor concentración de datos muy cerca de la media de la distribución, coexistiendo al mismo tiempo con una frecuencia relativamente elevada de datos muy alejados de la misma. Al aplicar el análisis de SK, se aisló el rango de frecuencias de máxima sensibilidad del sensor, es decir de los 38 kHz a los 42 kHz, y se calculó el valor de la kurtosis, en dicho rango, para cada tipo de falla. Los resultados del cálculo de la kurtosis para los tres niveles de falla en pista externa, pista interna, elementos rodantes y canastilla, se pueden ver a continuación.

²³ Ver Marco teórico.

Figura 37: Valor de kurtosis para cinco pruebas en los tres niveles de severidad en pista externa.

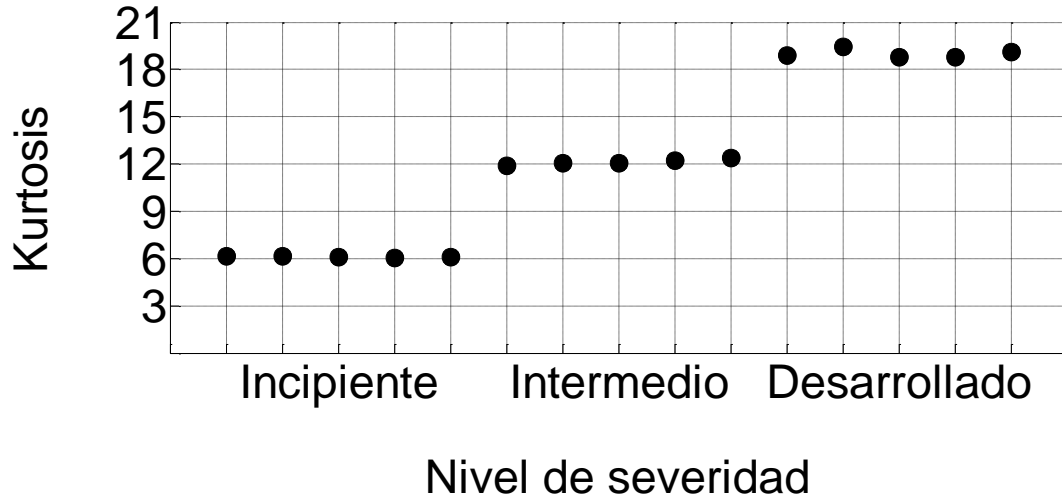
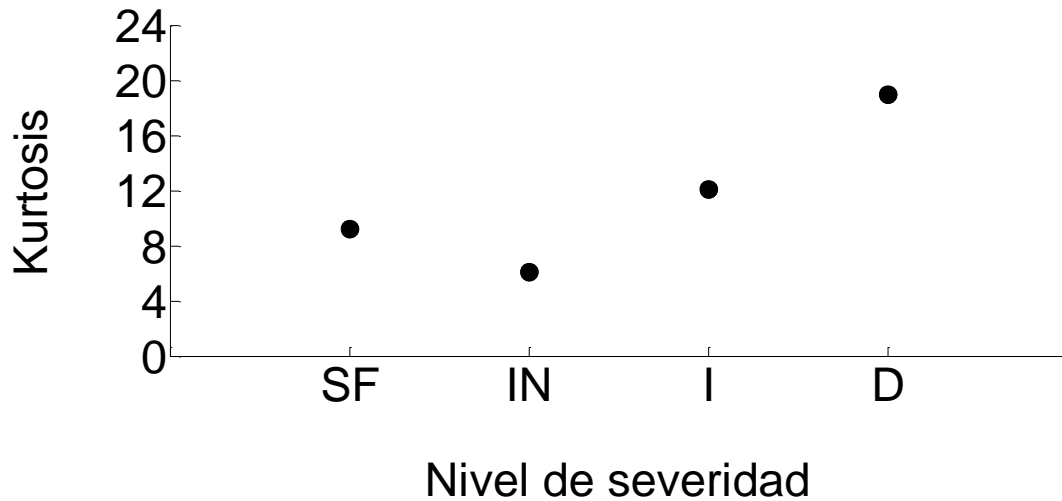


Tabla 4: Media y desviación estandar para kurtosis de las cinco pruebas para los tres niveles de severidad en pista externa.

NIVEL DE SEVERIDAD	MEDIA	DESVIACIÓN ESTANDAR
Sin falla	9.19	0.02
Incipiente	6.11	0.03
Intermedio	12.12	0.18
Desarrollado	18.99	0.28

Figura 38: Tendencia de la kurtosis promedio para los tres niveles de severidad en pista externa.



Para las pruebas de falla en pista externa, la máxima desviación estandar fue de 0.28, la cual corresponde a las cinco pruebas de nivel desarrollado. Se pudo observar una tendencia creciente del valor de la kurtosis con el nivel de severidad de la falla, pero dichos resultados, no fueron consistentes con el valor promedio de la kurtosis del rodamiento sin falla el cual esta por encima del valor promedio de kurtosis para la falla en el nivel incipiente.

Figura 39: Valor de kurtosis para cinco pruebas en los tres niveles de severidad en pista interna.

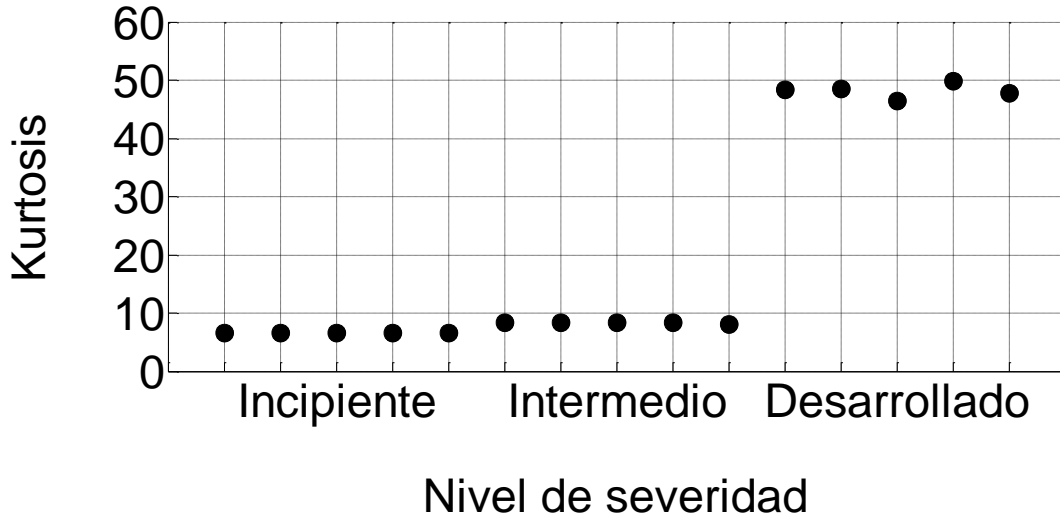
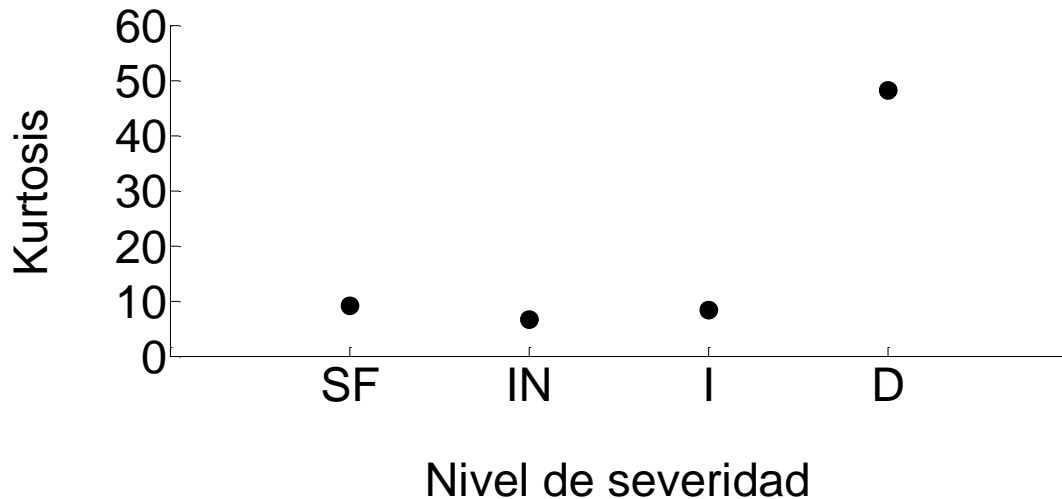


Tabla 5: Media y desviación estandar para kurtosis de las cinco pruebas para los tres niveles de severidad en pista interna.

NIVEL DE SEVERIDAD	MEDIA	DESVIACIÓN ESTANDAR
Sin falla	9.19	0.02
Incipiente	6.57	0.06
Intermedio	8.30	0.09
Desarrollado	48.21	1.22

Figura 40: Tendencia de la kurtosis promedio para los tres niveles de severidad en pista interna.



Para las pruebas de falla en pista interna, la máxima desviación estandar fue de 01.22 , la cual corresponde a las cinco pruebas de nivel desarrollado. Se pudo observar una tendencia creciente del valor de la kurtosis con el nivel de severidad de la falla, pero, al igual que los resultados para pista externa, no fueron consistentes con el valor promedio de la kurtosis del rodamiento sin falla el cual esta por encima del valor promedio de kurtosis para la falla en el nivel incipiente.

Figura 41: Valor de kurtosis para cinco pruebas en los tres niveles de severidad en elementos rodantes.

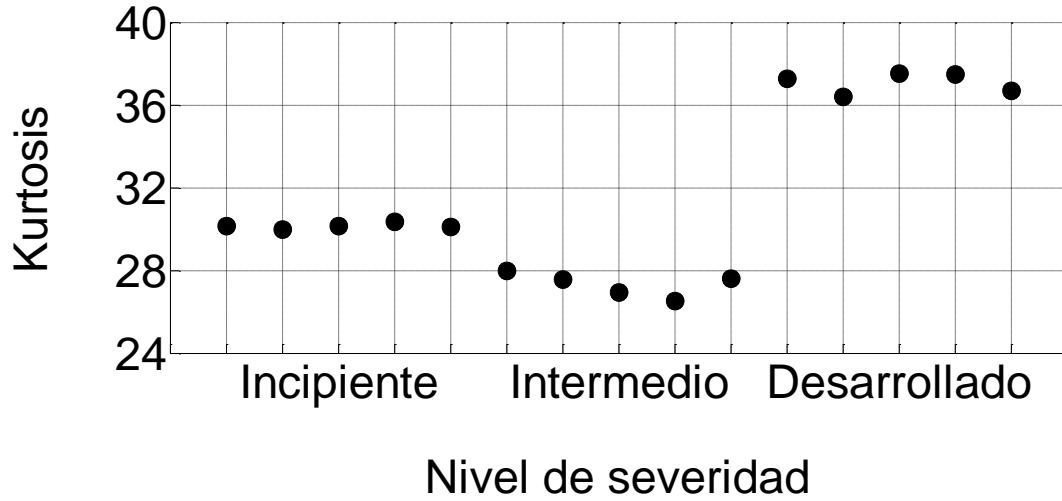
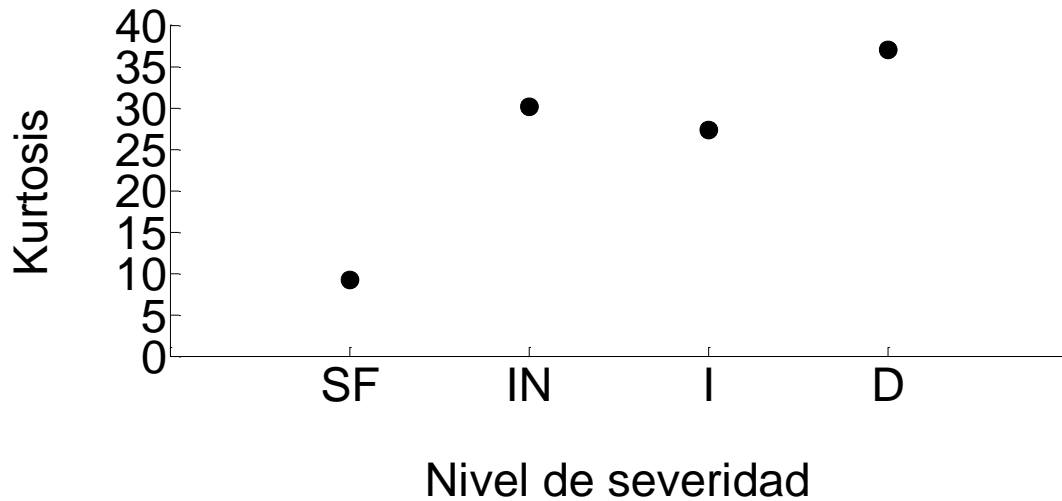


Tabla 6: Media y desviación estandar para kurtosis de las cinco pruebas para los tres niveles de severidad en elementos rodantes.

NIVEL DE SEVERIDAD	MEDIA	DESVIACIÓN ESTANDAR
Sin falla	9.19	0.02
Incipiente	30.15	0.13
Intermedio	27.32	0.58
Desarrollado	37.07	0.5

Figura 42: Tendencia de la kurtosis promedio para los tres niveles de severidad en elementos rodantes.



Para las pruebas de falla en elementos rodantes, la máxima desviación estandar fue de 0.58 , la cual corresponde a las cinco pruebas de nivel intermedio. Esta vez, se observó que no hay consistencia entre el incremento de la kurtosis y el incremento de severidad de la falla.

Figura 43: Valor de kurtosis para 5 pruebas en los tres niveles de severidad en canastilla.

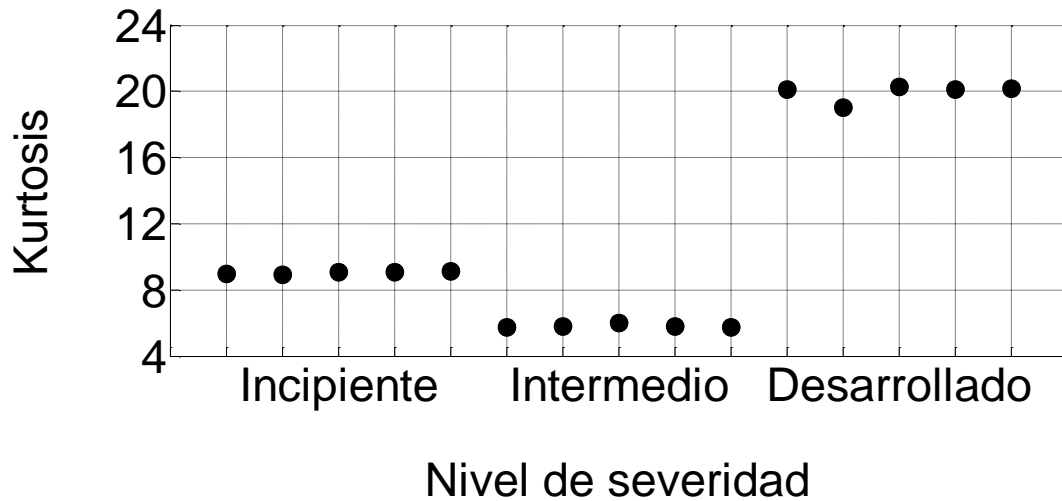
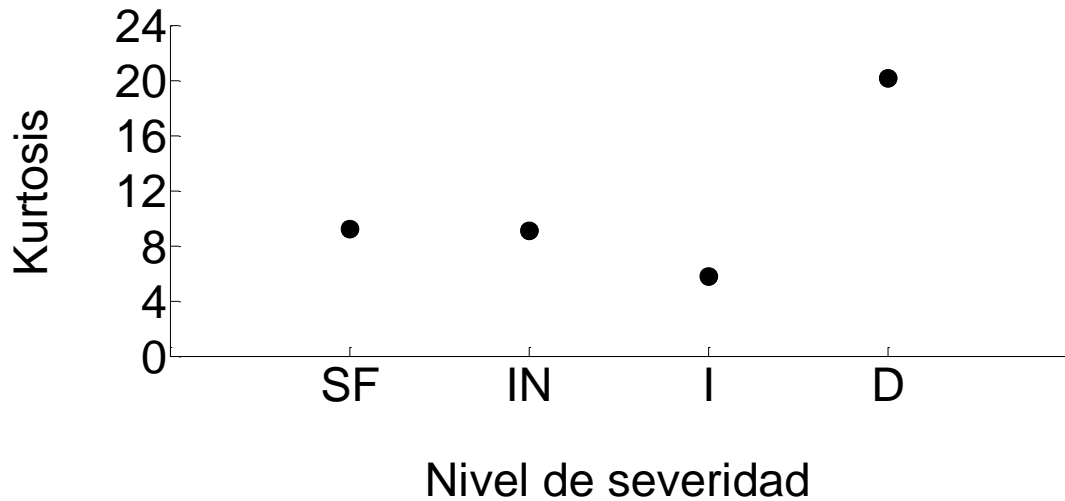


Tabla 7: Media y desviación estandar para kurtosis de las cinco pruebas para los tres niveles de severidad en canastilla.

NIVEL DE SEVERIDAD	MEDIA	DESVIACIÓN ESTANDAR
Sin falla	9.19	0.02
Incipiente	9.08	0.05
Intermedio	5.78	0.02
Desarrollado	20.14	0.02

Figura 44: Tendencia de la kurtosis promedio para los tres niveles de severidad en canastilla.



Para las pruebas de falla en canastilla, la máxima desviación estandar fue de 0.05, la cual corresponde a las cinco pruebas del nivel incipiente. se observó, al igual que en falla en elementos rodantes, que no hay consistencia entre el incremento de la kurtosis y el incremento de severidad de la falla.

9.3 MÉTODO RMS.

Los resultados mostraron, para cada tipo de falla, un cambio significativo del valor de la kurtosis en el rango de máxima sensibilidad del sensor (38 kHz – 42kHz). Sin embargo, como se mencionó anteriormente, no se pudo identificar una tendencia consistente entre el aumento de la kurtosis y el aumento del nivel de severidad. Ante esto se procedió a evaluar el valor RMS de dicho rango para cada uno de los vectores, teniendo en cuenta que los altos valores de kurtosis, sirven únicamente, para evidenciar la presencia de algún tipo de fallo. Se realizaron 5 pruebas para cada tipo de rodamiento. Los resultados para cada rodamiento se muestran a continuación:

Figura 45: Valor RMS para 5 pruebas en los tres niveles de severidad en pista externa.

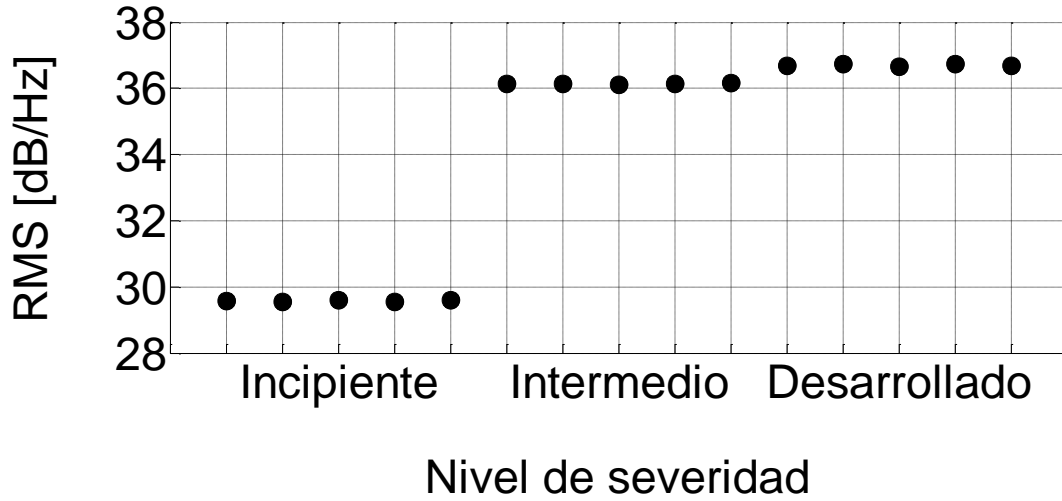
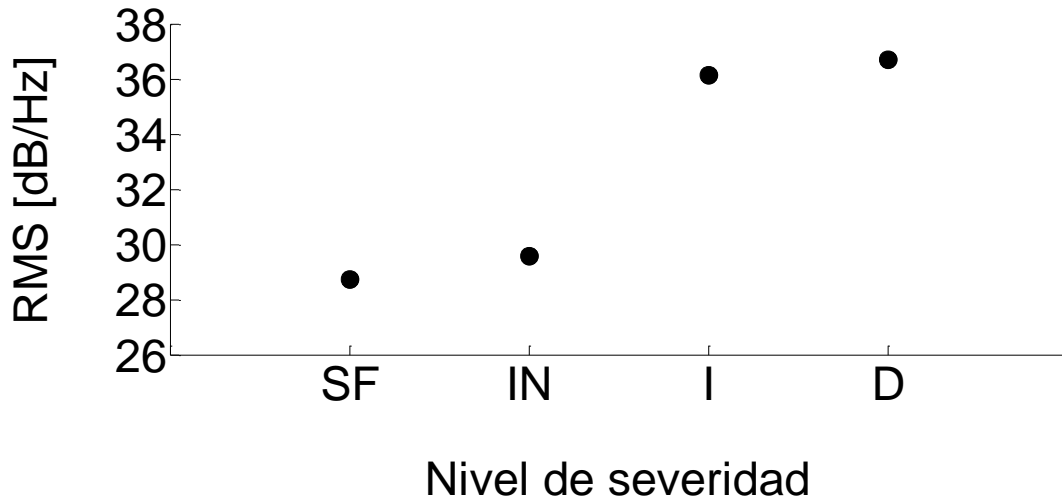


Tabla 8: Media y desviación estandar para RMS de las 5 pruebas para los 3 niveles de severidad en pista externa.

NIVEL DE SEVERIDAD	MEDIA	DESVIACIÓN ESTANDAR
Sin falla	28.75	0.02
Incipiente	29.57	0.02
Intermedio	36.14	0.01
Desarrollado	36.70	0.02

Figura 46: Gráfica de RMS vs nivel de severidad de falla en pista externa.



Para las pruebas de falla en pista externa, la máxima desviación estandar del valor RMS, fue de 0.02, la cual corresponde a las cinco pruebas del nivel desarrollado. Se observó, un incremento del valor RMS consistente con el nivel de severidad. Además el valor RMS de la señal del rodamiento sin falla, está por debajo del valor RMS del nivel incipiente.

Figura 47: Valor RMS para 5 pruebas en los tres niveles de severidad en pista interna.

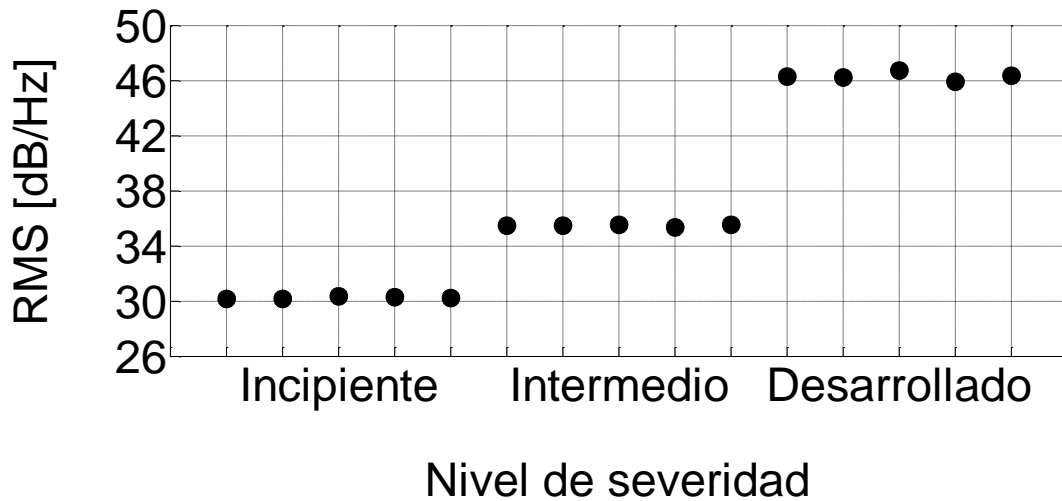
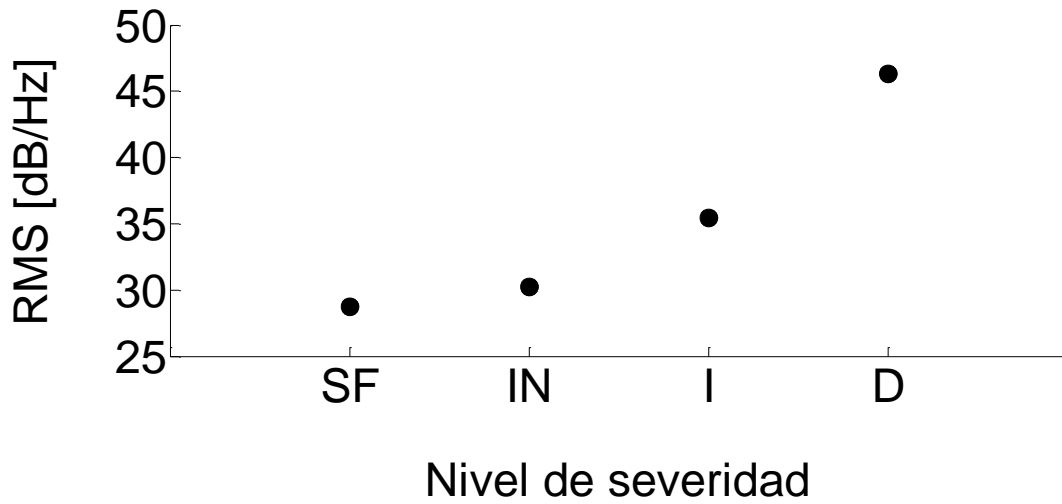


Tabla 9: Media y desviación estandar para RMS de las 5 pruebas para los 3 niveles de severidad en pista interna.

NIVEL DE SEVERIDAD	MEDIA	DESVIACIÓN ESTANDAR
Sin falla	28.75	0.02
Incipiente	30.23	0.07
Intermedio	35.46	0.08
Desarrollado	46.3	0.29

Figura 48: Gráfica de RMS vs Nivel de severidad de falla en pista interna.



Para las pruebas de falla en pista interna, la máxima desviación estandar del valor RMS, fue de 0.29, la cual corresponde a las cinco pruebas del nivel desarrollado. Igual que para las pruebas en pista externa, se observó, un incremento del valor RMS consistente con el nivel de severidad. El valor RMS de la señal del rodamiento sin falla, está por debajo del valor RMS del nivel incipiente.

Figura 49: Valor RMS para 5 pruebas en los tres niveles de severidad en elementos rodantes.

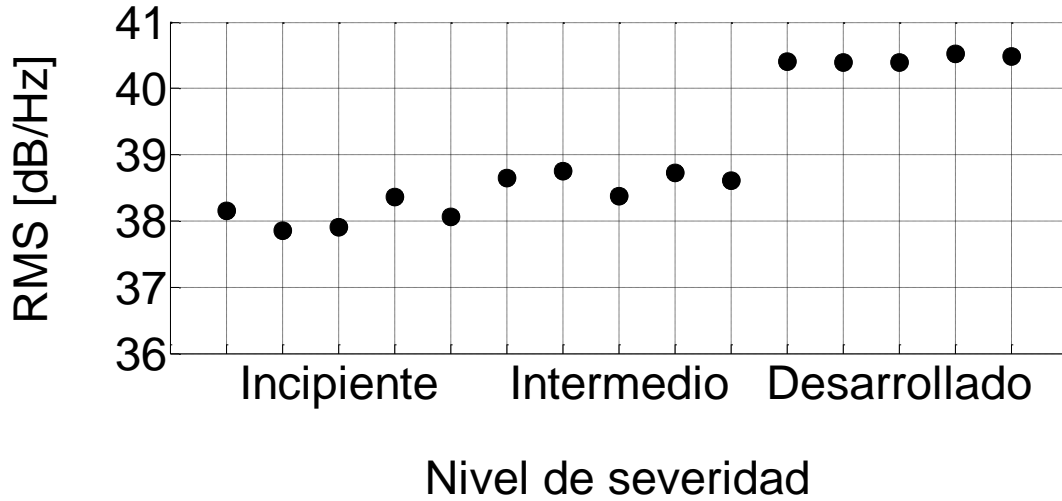
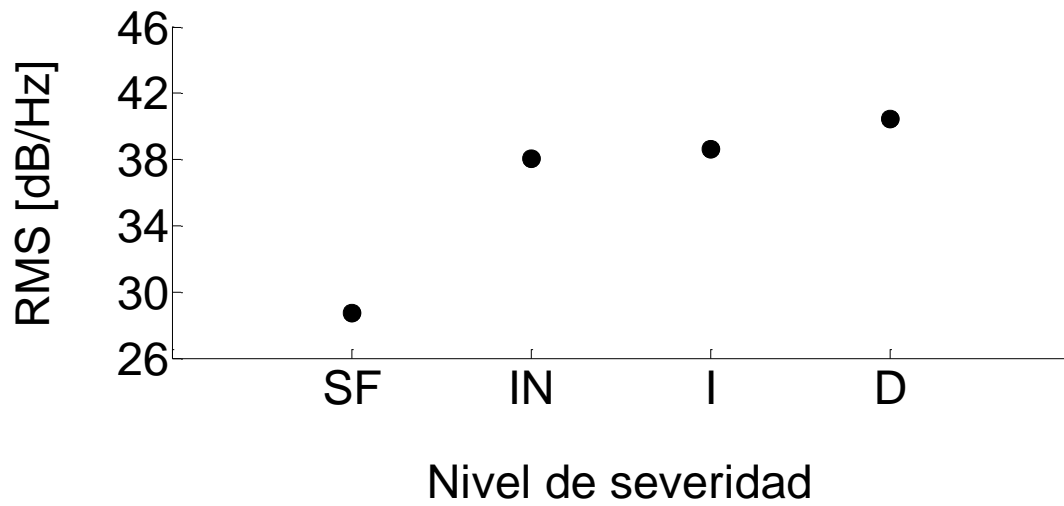


Tabla 10: Media y desviación estandar para RMS de las 5 pruebas para los 3 niveles de severidad en elementos rodantes.

NIVEL DE SEVERIDAD	MEDIA	DESVIACIÓN ESTANDAR
Sin falla	28.75	0.02
Incipiente	38.06	0.2
Intermedio	38.62	0.15
Desarrollado	40.43	0.08

Figura 50: Gráfica de RMS vs Nivel de severidad de falla en elementos rodantes.



Para las pruebas de falla en pista interna, la máxima desviación estandar del valor RMS, fue de 0.15, la cual corresponde a las cinco pruebas del nivel intermedio. Igual que para las pruebas en pista externa, se observó, un incremento del valor RMS consistente con el nivel de severidad. El valor RMS de la señal del rodamiento sin falla, está por debajo del valor RMS del nivel incipiente.

Figura 51: Valor RMS para 5 pruebas en los tres niveles de severidad en canastilla.

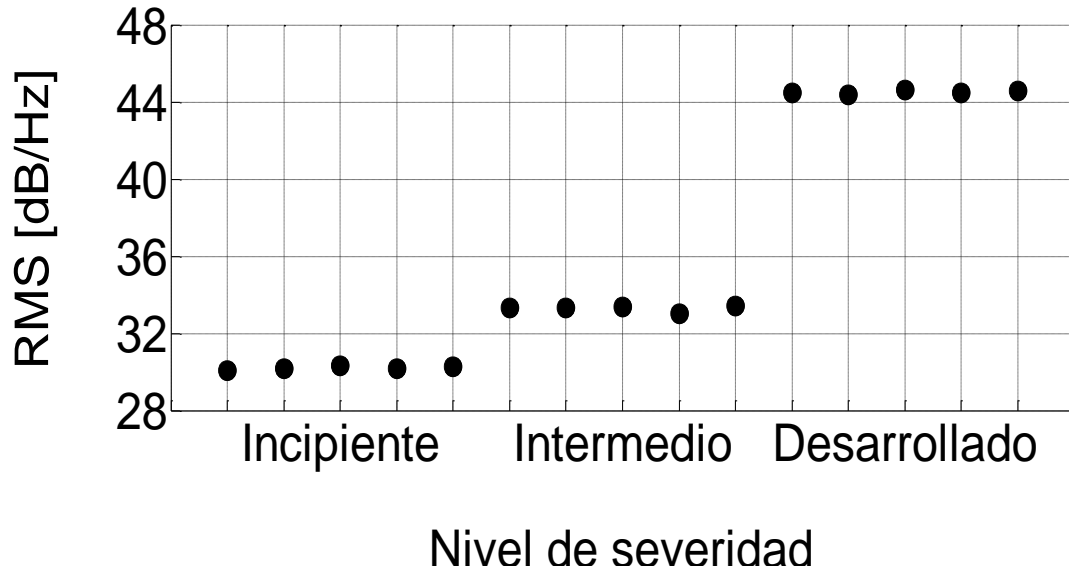
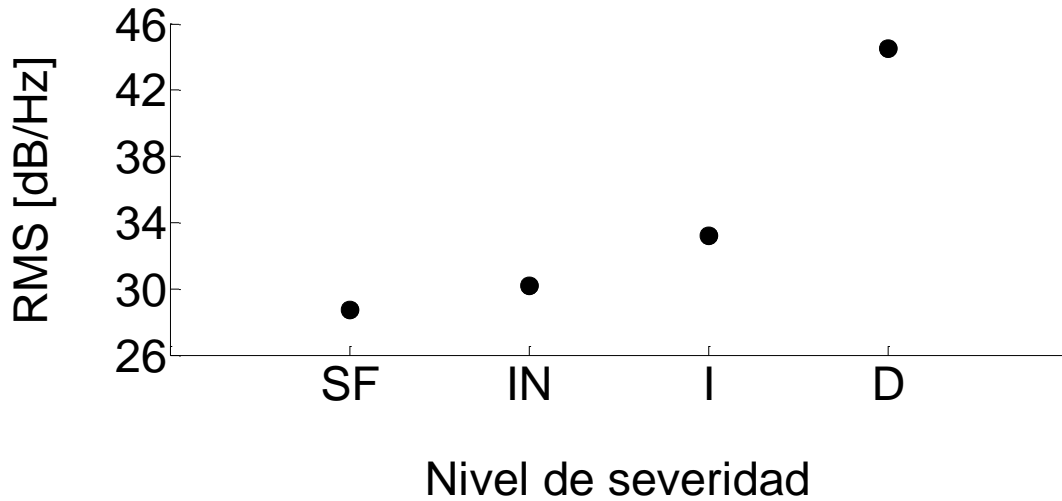


Tabla 11: Media y desviación estandar para RMS de las 5 pruebas para los 3 niveles de severidad en canastilla.

NIVEL DE SEVERIDAD	MEDIA	DESVIACIÓN ESTANDAR
Sin falla	28.75	0.02
Incipiente	30.21	0.09
Intermedio	33.23	0.14
Desarrollado	44.51	0.09

Figura 52: Gráfica de RMS vs Nivel de severidad de falla en canastilla.



Para las pruebas de falla en pista interna, la máxima desviación estandar del valor RMS, fue de 0.14, la cual corresponde a las cinco pruebas del nivel intermedio. Igual que para las pruebas en pista externa, se observó, un incremento del valor RMS consistente con el nivel de severidad. El valor RMS de la señal del rodamiento sin falla, está por debajo del valor RMS del nivel incipiente.

CONCLUSIONES

- ✓ Se implementó satisfactoriamente un estudio de monitoreo de rodamientos NSK 30203 generando, previamente, tres distintos niveles falla en su pista externa, pista interna, elementos rodantes y canastilla usando señales ultrasónicas.
- ✓ Se compararon en el dominio de la frecuencia los datos obtenidos, utilizando diferentes métodos y parámetros estadísticos: Método de Welch para calcular la densidad espectral de potencia, Asimetría, Kurtosis y valor RMS.
- ✓ La densidad espectral de potencia por el método de Welch muestra un aumento en la magnitud con un valor común de frecuencia al superponer los espectros de tres rodamientos con un nivel de severidad de falla diferente pero en la misma ubicación (Rodillos nivel desarrollado, Rodillos nivel intermedio y Rodillos nivel leve, por ejemplo). Sin embargo dicho incremento no permitió identificar la ubicación de la falla (En pista externa, canastilla, Elementos rodantes o Pista interna).
- ✓ Se realizó el análisis de las señales por medio del parámetro estadístico de la Asimetría y se concluyó que esta no aportó ningún tipo de información relevante.
- ✓ Se realizó el análisis de las señales por medio del cuarto momento estadístico o kurtosis y se observaron altos valores en el rango de 38-42 KHz, lo cual se tomó como un indicativo de la presencia de valores atípicos (picos) en dicho rango y dio paso a la necesidad de estudiarlos más detalladamente con un parámetro estadístico más relevante como el valor RMS. Sin embargo, la kurtosis no proporcionó ninguna información

relacionada con el nivel de severidad de la falla, ya que su incremento no es proporcional a dicho nivel.

- ✓ Se calculó el valor RMS de la señal en el rango de máxima sensibilidad del sensor y se observó un incremento progresivo de éste con el nivel de severidad de la falla para cada uno de los rodamientos. Se concluyó, entonces, que este parámetro estadístico resultó ser el más efectivo de los estudiados.
- ✓ Al realizar un monitoreo por ultrasonido se debe tomar una línea base, la cual corresponde al valor RMS de la señal obtenida de un rodamiento en perfectas condiciones, que permita establecer una referencia para identificar posibles defectos.
- ✓ Se observó que la curtosis es más sensible que el RMS, pero no es consistente.
- ✓ Los resultados del proyecto permiten contemplar seriamente la posibilidad de implementar la técnica de monitoreo ultrasónico en un plan de mantenimiento.
- ✓ La técnica de monitoreo ultrasónico podría utilizarse además, para analizar distintos escenarios de falla en equipos, como exceso o falta de lubricación, sobrecarga dinámica del sistema, desbalanceo o velocidad excesiva del eje.

BIBLIOGRAFÍA

- ✓ BECHHOEFER, Erich, KINGSLEY, Michael. MENON, Praneet. Bearing Envelope Analysis Window Selection Using Spectral Kurtosis Techniques.
- ✓ F. E. Hernández Montero y V. Atxa Uribe. Aplicación de técnicas clásicas y avanzadas de procesamiento de vibraciones al diagnóstico de cojinetes. Análisis experimental. Universidad de Pinar del Rio, Cuba 2007 y Universidad de Mondragón, España 2007.
- ✓ HAMROCK, Bernard; JACOBSON, Bo y SCHMID, Steven. Elementos de máquinas. México: McGraw-Hill, 2000. 942 p.
- ✓ PAREDES DIAS, Wilmert y QUINTERO MONSALVE, Javier. Sistema de detección de falla en pista externa de rodamientos cónicos tipo 30203 usando señales acústicas. Trabajo de grado para optar el título de ingeniero mecánico. Universidad industrial de Santander. Facultad de ingenierías fisicomecánicas. Escuela de ingeniería mecánica, Bucaramanga, 2010. 61p.
- ✓ PEDROUZO TELLO, José y QUINTERO CARRERO, Nelson. La Aplicación del Ultrasonido como Tecnología Complementaria en un Plan de Mantenimiento Predictivo. Trabajo de grado para optar el título de Máster en Mantenimiento Industrial y Técnicas de Diagnóstico. Universidad de Sevilla. Escuela universitaria politécnica. Departamento de ingeniería mecánica y de los materiales. Sevilla, 2009. 43p. Disponible en el documento _____ en _____ línea: http://www.aloj.us.es/notas_tecnicas/Mant_Predict_Compl_Ultrasonido.pdf.

- ✓ William Kirchner. Ultrasonic acoustic health monitoring of ball bearings using neural network pattern classification of power spectral density. Thesis submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science IN Mechanical Engineering. November 2009.

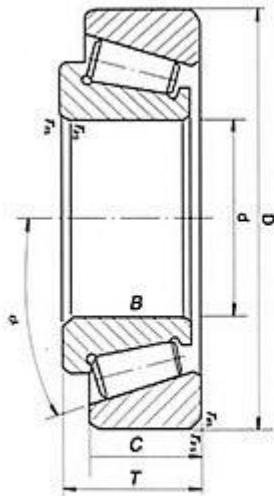
ANEXOS

Anexo A. Código .mat utilizado para analizar la señal en el dominio de la frecuencia.

```
clc
clear all
[filename, pathname, filterindex] = uigetfile({'*.csv'}, 'Pick a
file', 'MultiSelect', 'on'); %lectura de archivo
M=strcat(pathname,filename)%identificacion de ruta
S=importdata(M)%arreglo de datos datos cargados
MAT=S.data;% datos cargados
tim=MAT(:,1);
volt=MAT(:,2);
%tstep=length(v);
t=size(tim);
    blocksize=t(1,1);
    p=(1:1:t(1,1)-1);
    p=p';
    tmuestra=tim(p)-tim(p+1);%se analiza la dif entre muestras temporales
para sacar el periodo de muestreo
    FS=abs(1/mean(tmuestra));%se obtiene la frecuencia de muestreo
    xfft = abs(fft(volt));
%%evitar infinitos.
index = find(xfft == 0);
xfft(index) = 1e-17;
%%magnitud
mag = 20*log10(xfft);
mag = mag(1:floor(blocksize/2));
%frecuencia actual
f = (0:length(mag)-1)*FS/blocksize;
f = f(:);
subplot(2,1,1)
plot(f,mag)
grid on
ylabel('Magnitud(dB)')
xlabel('Frecuencia(Hz)')
title('Espectro')
%PSD
window=2^19;
noverlap=0;
nfft=2^21;
h = spectrum.welch('Hann',window,100*noverlap/window);
hpsd = psd(h,volt,'NFFT',nfft,'FS',FS);
subplot(2,1,2)
plot(hpsd)
%%%%
RMS = sqrt(sum(volt.*conj(volt))/size(volt,1)); %cálculo de RMS
Kurtosis=kurtosis(volt); %cálculo del cuarto momento estadístico
```

Anexo B. Método para producir una falla en la pista interna de un rodamiento NSK 30203.

- 1) Se eligió un rodamiento NSK 30203, por su facilidad para desarmar.



- 2) Se procede a quebrar (con un mototool) la canastilla que contiene los elementos rodantes para poder extraer la pista interna y se hace una falla con el grado de severidad deseado.
- 3) Se toma otro rodamiento de igual referencia y se parte la pista interna con una máquina herramienta.
- 4) De esta manera se tienen, por un lado, la pista interna con una falla determinada y por el otro, el conjunto pista externa, elementos rodantes y canastilla.
- 5) Se lubrican los rodillos sueltos del segundo grupo y con mucho cuidado se van ubicando en la canastilla.

- 6) Una vez armado el conjunto Canastilla-rodillos, este se coloca sobre una superficie plana y se ensambla con la pista interna que tiene la falla. Para esto puede utilizarse una prensa hidráulica.
- 7) Finalmente se coloca el nuevo conjunto en la pista externa.