

**DETECCION DE FALLAS TEMPRANAS EN RODAMIENTOS
CONICOS USANDO ACOUSTIC EMISSIONS (AE)**

HECTOR MAURICIO USGAME SANDOVAL

CAMILO ANDRES PEDRAZA RAMIREZ

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

2011

**DETECCION DE FALLAS TEMPRANAS EN RODAMIENTOS
CONICOS USANDO ACOUSTIC EMISSIONS (AE)**

HECTOR MAURICIO USGAME SANDOVAL

CAMILO ANDRES PEDRAZA RAMIREZ

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

ING. JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ

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

2011

Dedicatoria

Este trabajado de grado esta llanamente dedicado a mi madre, María Helena Sandoval, quién siempre ha creído en mí y me ha servido de brújula para orientarme a convertir mis sueños en realidad. Gracias bella madre por tus sabios consejos y por ser asidero en momentos cruciales de mi vida.

Mauricio Usgame Sandoval

DEDICATORIA

A DIOS por darme la oportunidad de vivir y regalarme una familia maravillosa.

A mis padres y mis hermanos por su apoyo, confianza y amor. Gracias por ayudarme a cumplir mis objetivos como persona y estudiante. A mi Madre Dorely por hacer de mi una mejor persona a través de sus consejos, enseñanzas y amor. A mi padre Filemón por brindarme los recursos necesarios y estar a mi lado apoyándome y aconsejándome siempre. A mis hermanos Antonio, Miguel y Jairo porque crecieron con migo y estuvieron a mi lado compartiendo alegrías y tristezas, además son mi ejemplo a seguir.

A mi mejor amigo y hermano Jairo por que siempre ha creído en mi y me ha apoyado en todas mis desiciones.

A carito por su amistad incondicional y sincera, y quien fue muy importante durante la realización de este proyecto.

Y a mis amigos que dejaron huella en este proceso formativo.

CAMILO ANDRES PEDRAZA RAMIREZ

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICION (CBM)	22
1.1 MANTENIMIENTO PREDICTIVO	23
1.2 BENEFICIOS DEL MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN	24
1.3 SISTEMAS DE MONITOREO	25
1.4 DIFERENTES MÉTODOS DE MONITOREO DE CONDICION EN RODAMIENTOS	26
1.4.1 MONITOREO DE CONDICIÓN EN RODAMIENTOS A TRAVÉS DE EMISIONES ACÚSTICAS	28
2. FALLAS EN RODAMIENTOS Y FACTORES QUE INFLUYEN EN SU VIDA ÚTIL	29
2.1 CAUSAS DE FALLAS EN LOS RODAMIENTOS	29
2.2 FALLAS EN RODAMIENTOS	29
2.3 ETAPAS DE FALLA EN RODAMIENTOS	30
2.3.1 Etapa 1	30
2.3.2 Etapa 2	30
2.3.3 Etapa 3	31
2.3.4 Etapa 4	31
2.4 ASPECTOS QUE INFLUYEN DE MANERA MUY NOTORIA EN LA VIDA ÚTIL DEL RODAMIENTO	31
2.5 DEFECTOS LOCALIZADOS	32
2.6 DEFECTOS DISTRIBUIDOS	33

3. ANÁLISIS DE EMISIONES ACÚSTICA PARA DETECCIÓN DE FALLAS	34
EN RODAMIENTOS	34
3.1 ACÚSTICA	34
3.2 RANGOS DEL SONIDO	35
3.2.1 SONIDOS AUDIBLES	35
3.2.2 SONIDOS NO AUDIBLES: EL ULTRASONIDO Y EL INFRASONIDO	36
3.3 DESCRIPCIÓN DE LAS EMISIONES ACÚSTICAS	36
3.3.1 EFECTO KAISER	40
3.3.2 EFECTO FELICITY	40
3.4 EMISIÓN ACÚSTICA EN EL MONITOREO DE FALLOS DE RODAMIENTOS	41
3.5 COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO DE EMISIÓN ACÚSTICA Y OTROS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS	43
3.6 RANGOS DE FRECUENCIA DE EMISIÓN ACÚSTICA Y TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS.	44
3.7 SEÑAL DE EMISIÓN ACÚSTICA CALCULADA POR MÉTODO ESTADÍSTICO.	45
3.8 TÉCNICA DE MEDICIÓN DE EMISIÓN ACÚSTICA	46
3.9 RESPUESTA DE LA EMISIÓN ACÚSTICA DE RODAMIENTOS DEFECTUOSOS	49
3.10 IDENTIFICACIÓN DE SEÑALES DE RODAMIENTOS DEFECTUOSOS	52
4. ENSAYOS EXPERIMENTALES	54
4.1 DESCRIPCIÓN DEL BANCO	54
4.2 EQUIPO DE MEDICIÓN	55
4.2.1 SENSOR MODELO WDIU-AST	56
4.2.2 TRANSFERENCIA DE LAS EMISIONES ACÚSTICAS	56

4.2.2.1	Acoplador	56
4.2.3	PREAMPLIFICADOR INTEGRAL DEL SENSOR	57
4.2.3.1	CARACTERÍSTICAS DEL PREAMPLIFICADOR	58
4.2.3.2	DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO	58
4.2.3.1	Especificaciones eléctricas	59
4.2.3.1	Especificaciones físicas	59
4.2.4	ALIMENTACIÓN DEL SENSOR Y DESACOPLE DE LA SEÑAL	60
4.2.5	OSCILOSCOPIO RIGOL DS1102E SERIES	60
4.2.6	FORMATO CSV	61
4.3	INDUCCIÓN DE LA FALLA EN LAS PISTAS EXTERNA E INTERNA	62
4.4	CARACTERIZACIÓN DE FALLA	63
4.5	PUNTO DE INSPECCIÓN EN EL SOPORTE DEL RODAMIENTO	67
4.6	PROCEDIMIENTO	68
5.	DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN	69
5.1	METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN	69
5.2	DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN	70
5.2.1	DEFINICION DEL UMBRAL DE DETECCION DE RINGDOWN COUNTS	71
5.2.2	ANÁLISIS A RODAMIENTO EN CONDICION NORMAL	73
5.2.3	RODAMIENTO CON NIVEL DE SEVERIDAD 1 EN LA PISTA EXTERNA	74
5.2.4	RODAMIENTO CON NIVEL DE SEVERIDAD 2 EN LA PISTA EXTERNA	75
5.2.5	RODAMIENTO CON NIVEL DE SEVERIDAD 3 EN LA PISTA EXTERNA	76
5.2.6	RODAMIENTO CON NIVEL DE SEVERIDAD 1 EN LA PISTA INTERNA	77

5.2.7	RODAMIENTO CON NIVEL DE SEVERIDAD 2 EN LA PISTA INTERNA	78
5.2.8	RODAMIENTO CON NIVEL DE SEVERIDAD 3 EN LA PISTA INTERNA	79
5.3	ESPECTROS OBTENIDOS CON EL ANALIZADOR CSI	81
6.	ANALISIS DE RESULTADOS	87
	CONCLUSIONES	97
	BIBLIOGRAFIA	99
	ANEXOS	102

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. CBM esencial para la Confiabilidad de los Activos.	22
Figura2. Implantación del mantenimiento preventivo/predictivo	23
Figura 3. Ciclo del mantenimiento predictivo	24
Figura 4. Monitoreo en condición en rodamientos	26
Figura 5. Aplicación típica del método de emisión acústica	28
Figura 6. Fallas en diferentes componentes del rodamiento	30
Figura 7. Etapas de falla en rodamientos	31
Figura 8. Desgaste por fatiga en un rodamiento	32
Figura 9. Ondulaciones por Rodamiento mal instalado	33
Figura 10. Aplicaciones de la Acústica	35
Figura 11. Rango de Frecuencias del Sonido	36
Figura 12. Proceso de Emisión Acústica	36
Figura 13. Instrumentación para la aplicación de la técnica de Emisión Acústica	38
Figura 14. Señal y parámetros acústicos	39
Figura 15. Representación grafica de los efectos kaiser y felicity	41
Figura 16. Rangos de frecuencia	44
Figura 17. Sensibilidad del sensor de Emisión Acústica con respecto a la frecuencia [Billington, 1997]	48
Figura 18. Curva típica de falla de rodamientos	48
Figura 19. Esquema del sistema de monitoreo de emisiones acústicas	49
Figura 20. Señal acústica de un rodamiento en condición normal	52
Figura 21. Señal acústica de un rodamiento con defecto en pista externa	52
Figura 22. Defecto de rodamiento Amplitud Vs velocidad	53
Figura 23. Banco de pruebas de rodamientos cónicos	54

Figura 24. Rodamiento cónico de pruebas NTN 30203	55
Figura 25. Instrumentación utilizada en la técnica de EA (Conexión sistema de adquisición)	55
Figura 26. Diagrama de bloques del sensor	59
Figura 27. Circuito alimentador del desacoplador de señal.	60
Figura 28. Esquema para la captura de la señal.	61
Figura 29. Sistema para la captura de la señal.	61
Figura 30. Defectos presentes a) Pista externa, b) Pista interna.	62
Figura 31. Ensamble de la jaula en buen estado con los elementos rodantes y la pista interna con falla inducida.	63
Figura 32. Características del nivel de severidad 1 (N1) en Pista Externa	64
Figura 33. Características del nivel de severidad 2 (N2) en Pista Externa	64
Figura 34. Características del nivel de severidad 3 (N3) en Pista externa	65
Figura 35. Características del nivel de severidad 1 (N1) en Pista interna	65
Figura 36. Características del nivel de severidad 2 (N2) en Pista interna	66
Figura 37. Características del nivel de severidad 3 (N3) en Pista interna	66
Figura 38. Puntos de inspección	67
Figura 39. Orientaciones del sensor para los puntos de inspección	68
Figura 40. Evolución Ringdown counts para el caso de pista externa	72
Figura 41. Evolución Ringdown counts para el caso de pista externa (Combinación Umbral 0,06 y 0,5 Amplitud de EA)	72
Figura 42. Señal de EA de rodamiento en condición normal	73
Figura 43. Señal de EA de rodamiento con N1 de falla en pista externa	74
Figura 44. Señal de EA de rodamiento con N2 de falla en pista externa	75
Figura 45. Señal de EA de rodamiento con N3 de falla en pista externa	76
Figura 46. Señal de EA de rodamiento con N1 de falla en pista interna	77
Figura 47. Señal de EA de rodamiento con N2 de falla en pista interna	78
Figura 48. Señal de EA de rodamiento con N3 de falla en pista interna	79
Figura 49. Espectro de la vibración para rodamiento en condición normal	82

Figura 50. Espectro de la vibración para rodamiento con nivel de severidad 1 (N1) de severidad de falla en pista externa.	83
Figura 51. Espectro de la vibración para rodamiento con nivel de severidad 2 (N2) de falla en pista externa	83
Figura 52. Espectro de la vibración para rodamiento con nivel de severidad 3 (N3) de falla en pista externa	84
Figura 53. Espectro de la vibración para rodamiento con nivel de severidad 1 (N1) de falla en pista interna.	84
Figura 54. Espectro de la vibración para rodamiento con nivel de severidad 2 (N2) de severidad de falla en pista interna.	85
Figura 55. Espectro de la vibración para rodamiento con nivel de severidad 3 (N3) de falla en pista interna.	85
Figura 56. Comparativo entre las formas de ondas de las señales de EA para pista externa e interna.	88
Figura 57. Comparación parámetro Valor Pico para varias condiciones en pista externa e interna	89
Figura 58. Comparación parámetro Kurtosis para varias condiciones en pista externa e interna.	90
Figura 59. Comparación parámetro Ringdown counts para varias condiciones en pista externa e interna	91
Figura 60. Comparación parámetro RMS para varias condiciones en pista externa e interna	92
Figura 61. Comportamiento Valor Pico	93
Figura 62 Comportamiento RMS	94
Figura 63. Comportamiento Kurtosis	95
Figura 64. Comportamiento Ringdown counts	95

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Métodos de monitoreo de condición en rodamientos	27
Tabla 2. Factores representativos en la respuesta de emisión acústica	39
Tabla 3. Comparación entre el método de EA y los MND.	44
Tabla 4. Características generales de Emisiones Acústicas y análisis de vibraciones	50
Tabla 5. Datos básicos del rodamiento NTN 30203	55
Tabla 6. Tipos de acopladores	57
Tabla 7. Dimensiones de la falla	67
Tabla 8. Parámetros de emisiones acústicas rodamiento en condición normal	74
Tabla 9. Parámetros de emisiones acústicas rodamiento con N1 de falla en pista externa	75
Tabla 10. Parámetros de emisiones acústicas rodamiento con N2 de falla en pista externa	76
Tabla 11. Parámetros de emisiones acústicas rodamiento con N3 de falla en pista externa	77
Tabla 12. Parámetros de emisiones acústicas rodamiento con N1 de falla en pista interna	78
Tabla 13. Parámetros de emisiones acústicas rodamiento con N2 de falla en pista interna	79
Tabla 14. Parámetros de emisiones acústicas rodamiento con N3 de falla en pista interna	80
Tabla 15. Valor de los parámetros propuestos en cada caso estudiado.	93

LISTA DE ANEXOS

	Pag.
ANEXO A: CARACTERISTICAS DEL OSCILOSCOPIO	103
ANEXO B: CARACTERISTICAS DEL SENSOR	104
ANEXO C: CARACTERISTICAS DEL RODAMIENTO 30203	105
ANEXO D: CODIGO DE MATLAB APLICADO PARA LA DETERMINACION DE RINGDOWN COUNTS	106

RESUMEN

TITULO: DETECCION DE FALLAS TEMPRANAS EN RODAMIENTOS CONICOS USANDO ACOUSTIC EMISSIONS (EA) ¹

**AUTORES: CAMILO ANDRES PADREZ PEDRAZA RAMIREZ
HECTOR MAURICIO USGAME SANDOVAL ^{**}**

PALABRAS CLAVES: Emisiones Acústicas, monitoreo, falla, rodamientos cónicos.

DESCRIPCION

Este proyecto se desarrollo con el objeto de fomentar la aplicación y divulgación de procesos investigativos en el campo de las vibraciones mecánicas logrando contribuir con la misión de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER de promover procesos de apropiación tecnológica.

Un problema particular asociado a maquinaria de rotación en los sistemas de producción es el de los rodamientos. Las fallas en esos componentes se generan por crecimiento de grietas, impactos, fricción, desgaste. Estos mecanismos generan señales elásticas de alta frecuencia y baja energía. Estas ondas se propagan a través del alojamiento del rodamiento. Las ondas de esfuerzo detectadas en la zona de altas frecuencias, se conocen como emisiones acústicas. La emisión acústica es usada para detectar fallas en etapas tempranas en rodamientos mucho antes de que el rodamiento falle catastróficamente

En el presente estudio se plantea el uso de las Emisiones Acústicas para el monitoreo y detección de fallas en rodamientos cónicos. Este monitoreo se ejecuta a través del seguimiento a unos indicadores de falla Ringdown count, Kurtosis y Amplitud obtenidos de la señal de emisiones acústicas en dominio tiempo usando como entorno para su análisis MATLAB. La experimentación se realiza en un banco dedicado para este tipo de pruebas, en el cual se implementaran, en pista externa como interna, distintos niveles de severidad de falla. Resultados experimentales mostraron que los indicadores propuestos permiten detectar y evaluar cualitativamente los niveles de severidad de falla. Por otra parte, la magnitud de los indicadores medidos de la emisión acústica producida por la condición con falla son mayores que sin falla. El incremento en sus valores es una clara indicación de que existe una falla

¹ Proyecto de grado

^{**} Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Ing. Jabid Quiroga.

ABSTRACT

TITLE: EARLY DETECTION OF FAULTS IN USING CONICAL BEARINGS ACOUSTIC EMISSIONS **ACOUSTIC EMISSIONS (EA)** ²

AUTHORS: CAMILO ANDRES PADREZ PEDRAZA RAMIREZ
HECTOR MAURICIO USGAME SANDOVAL**

KEY WORDS: Emisiones Acústicas, monitoreo, falla, rodamientos cónicos.

DESCRIPTION

This project was developed with the aim of promoting the sharing and process research in the field of mechanical vibrations contribute to achieving the mission of the Industrial University of Santander promoting processes of technological appropriation.

A particular problem associated with rotating machinery production systems in the bearings. Failures in these components are generated by crack growth, impact, friction and wear. These mechanisms generate signals of high frequency elastic and low energy. These waves propagate through the bearing housing. The stress waves detected in the high frequencies are known as acoustic emissions. The acoustic emission is used to detect faults in bearings in the early stages long before the bearing fails catastrophically

In this study an acoustic emission based fault detection system is proposed to monitoring to conical bearings. This monitoring is executed by following fault indicators Ringdown counts, RMS, Kurtosis and Peakvue obtained from acoustic emission signal in time domain. The experiment is performed on a test rig designed for this type of study, which will be implemented in external and internal race, different levels of severity of failure. Experimental results showed that the proposed indicators to detect and qualitatively assess the levels of severity of failure in conical bearings. Moreover, the magnitude of the indicators measured the acoustic emission produced by the faulted condition are higher than without fail. The increase in values is a clear indication that there is a failure

² Degree Work

** Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering, Directress: Eng.Jabid Quiroga.

INTRODUCCIÓN

Las empresas generadoras de bienes y/o servicios que utilizan máquinas, equipos, herramientas, dispositivos rotativos. Para lograr su objeto social necesitan que esos activos se mantengan en un estado de funcionamiento, confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad adecuados a sus necesidades, al procurar que su vida útil sea la máxima posible al mínimo costo; lo que se logra a través del mantenimiento, el cual actúa como una entidad de servicio a la producción.

Las fallas imprevistas, en máquinas rotativas, se convierten en el mayor problema del área de producción, pues impiden el desarrollo normal de su actividad, como consecuencia de esto sucede la aparición de la gestión de mantenimiento, donde el objetivo principal es solucionar las paradas repentinas de los equipos, por lo cual el mantenimiento empieza a desarrollar acciones de prevención o predicción de fallas, en esta fase empiezan a utilizarse técnicas y métodos propios de las acciones de mantenimiento.

El método de análisis de vibraciones, ruidos y ondas ha sido el más ampliamente utilizado en máquinas rotativas para la detección y diagnóstico de defectos en los rodamientos, haciendo uso de diferentes técnicas como son: el análisis de vibración en tiempo y frecuencia, análisis de ondas de choque, análisis de ruido y análisis de emisión acústica.

En el caso del presente estudio, análisis de emisiones acústicas, permite determinar las causas posibles de fallas anticipándose a la avería en maquinaria rotativa, siendo los rodamientos, elementos de alta complejidad para detectar sus fallas debido a que cuando éstas comienzan a manifestarse son imperceptibles, aumentando progresivamente su magnitud hasta que el daño es percibido, momento en el cual el rodamiento falla catastróficamente.

Por ello nace la necesidad de implementar una técnica por la cual se logre detectar la etapa más incipiente de falla del rodamiento, en la que se pueda detectar las fallas potenciales del rodamiento mucho antes que los métodos tradicionales de calor y vibración, en nuestro caso se detectarán fallas incipientes de un rodamiento de elementos cónicos causados por defectos ubicados en la pista externa e interna, por medio de la técnica de *Emisiones Acústicas*.

1. MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICION (CBM)

El mantenimiento basado en la condición (CBM), o monitorización del estado, es una estrategia de mantenimiento consistente en medir una variedad de parámetros de las máquinas con carácter periódico, tales como vibración, temperatura, presión, caudal, etc, para determinar su condición. El objetivo es realizar un análisis de tendencia de los datos con el fin de identificar a tiempo las condiciones problemáticas y tomar las acciones necesarias para evitar averías que puedan provocar un tiempo de parada imprevisto y las correspondientes consecuencias.

CBM garantiza que las inversiones realizadas en controlar las condiciones de la maquinaria tengan un retorno efectivo y un valor añadido, abordando al mismo tiempo problemas fundamentales de las fábricas y de sus procesos, que afecta incluso al personal y a las medidas relativas al rendimiento empresarial.

Dentro de las nuevas técnicas de gestión de Mantenimiento, el CBM es esencial soporte para la Confiabilidad de los Activos (ver Figura 1)

Figura 1. CBM esencial para la Confiabilidad de los Activos.

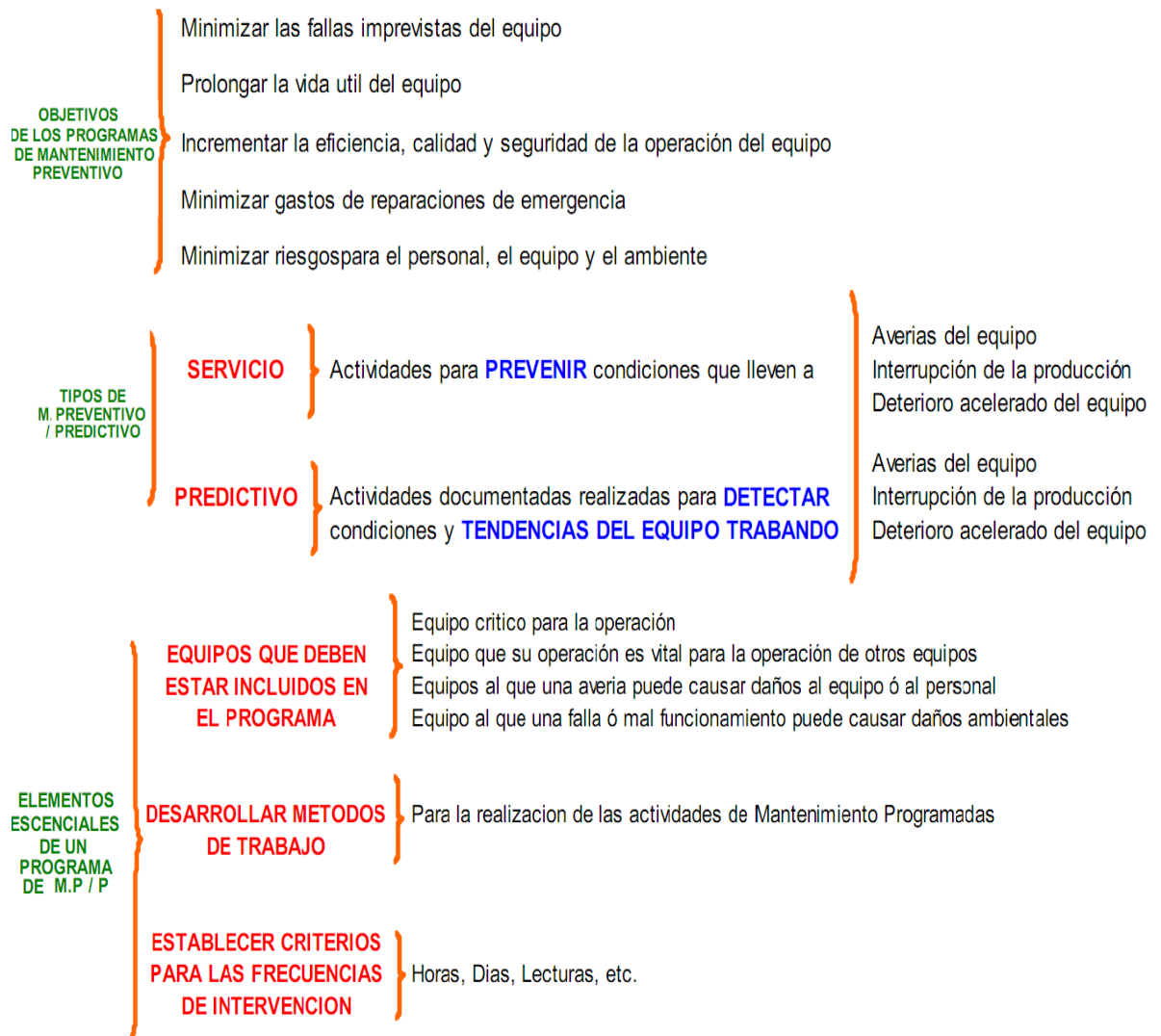


Fuente: OLIVERIO GARCÍA PALENCIA. "Gestión Integral de Mantenimiento Basada en Confiabilidad".

1.1 MANTENIMIENTO PREDICTIVO

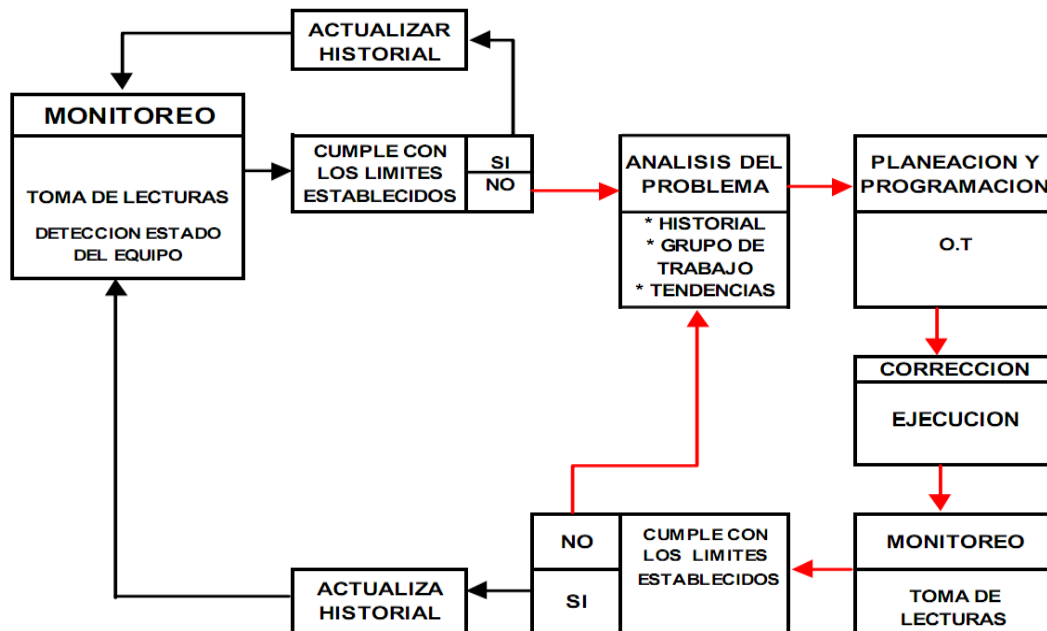
La base del mantenimiento predictivo es la monitorización de los equipos, es una técnica para pronosticar el punto futuro de falla de un componente de una maquina, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan, justo antes de que falle. Así, el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza.

Figura2. Implantación del mantenimiento preventivo/predictivo



Fuente: HECTOR GUACUS A, "Determinación de la frecuencia optima de mantenimiento preventivo"

Figura 3. Ciclo del mantenimiento predictivo



Fuente: HECTOR GUACUS A, "Determinación de la frecuencia óptima de mantenimiento preventivo"

1.2 BENEFICIOS DEL MANTENIMIENTO BASADO EN LA CONDICIÓN

Una forma en la que se podría intentar evaluar los ahorros que se obtendrían al implementar una estrategia de mantenimiento de monitoreo por condición es confeccionando una lista de las detenciones producidas en los últimos años en conjunto con sus causas, con esto se podría determinar:

- Cuáles intervenciones podrían haber resultado más económicas si se hubiera detectado, el fallo en una etapa más incipiente, evitando que la máquina funcionara hasta la rotura.
- Qué averías podrían haber sido reparadas más rápidamente si se hubiese conocido bien, antes de abrir la máquina, cuál era el elemento defectuoso.
- Cuáles serían los ahorros si después de efectuado un mantenimiento se controla la calidad del mantenimiento realizado.

Para esto se evalúa la condición mecánica en que quedó la máquina a través del análisis de las mediciones realizadas inmediatamente después de la reparación. Las técnicas actuales del mantenimiento permiten verificar si un elemento reemplazado quedó disminuido debido a un procedimiento de montaje inadecuado. Evalúe así las economías que se obtendrían por ese concepto si los elementos reemplazables de las máquinas de su planta duraran lo especificado en las normas bajo las cuáles fueron compradas las máquinas.

1.3 SISTEMAS DE MONITOREO

Una vez determinada la factibilidad y conveniencia de realizar un mantenimiento predictivo a una máquina o unidad, el paso siguiente es determinar la o las variables físicas a controlar que sean indicativas de la condición de la máquina.

El objetivo de esta parte es revisar en forma detallada las técnicas comúnmente usadas en el monitoreo según condición, de manera que sirvan de guía para su selección general. La finalidad del monitoreo es obtener una indicación de la condición (mecánica) o estado de salud de la máquina, de manera que pueda ser operada y mantenida con seguridad y economía.

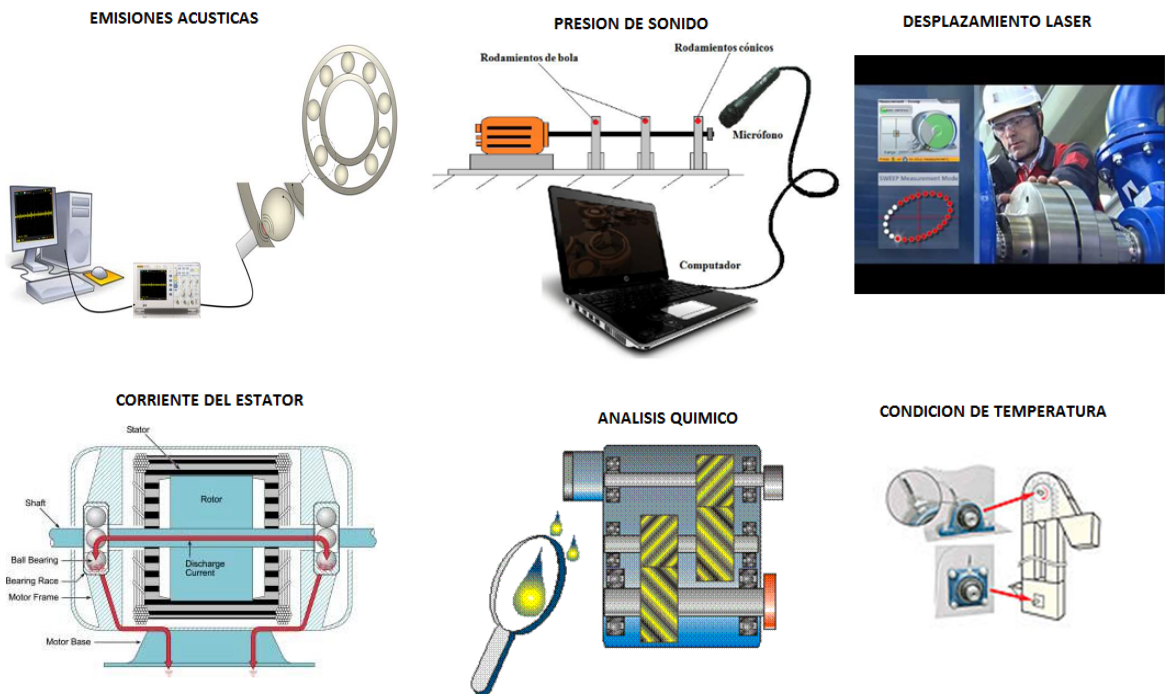
Por monitoreo, se entendió en sus inicios, como la medición de una variable física que se considera representativa de la condición de la máquina y su comparación con valores que indican si la máquina está en buen estado o deteriorada. Con la actual automatización de estas técnicas, se ha extendido la acepción de la palabra monitoreo también a la adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos.

1.4 DIFERENTES MÉTODOS DE MONITOREO DE CONDICION EN RODAMIENTOS

Según los datos disponibles del sensor y tipos de mediciones tomadas, la mayoría de los métodos para monitorear la condición de rodamientos en máquinas rotativas pueden ser categorizadas en los siguientes grupos: monitoreo de vibración, monitoreo de temperatura, análisis químico, monitoreo de emisión acústica, monitoreo de presión de sonido, monitoreo laser y monitoreo de corriente (ver figura 4).

Estos métodos de monitoreo de condición en rodamientos son revisados, con énfasis en sus problemas de aplicación incluidos los requisitos del sensor, los requisitos de conocimientos relacionados con los sensores, la relación señal/ruido en las mediciones.

Figura 4. Monitoreo en condición en rodamientos



Fuente: Autores

Tabla 1. Métodos de monitoreo de condición en rodamientos

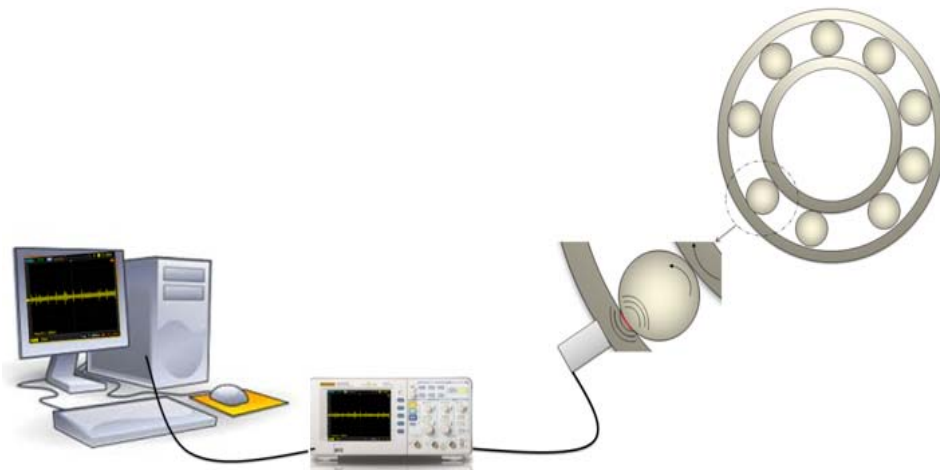
	MECANISMOS DE MONITOREO	PRINCIPALES VENTAJAS	PRINCIPALES DESVENTAJAS
Sensor Extra Requerido	Monitoreo de vibracion	Confiable Estandarizada; (Estandar relacionado:ISO 10816)	Costoso; Intrusivo; Sujeto a falla de los sensores
	Analisis Quimico	Directamente monitorea el rodamiento y su lubricante	Limitada a los rodamientos con sistema de suministro de bucle cerrado de aceite; Conocimientos especializados necesarios
	Medicion de Temperatura	Estandar disponible en algunas industrias (Estandar relacionado IEEE 841)	Requerido detector incorporado de temperatura Otros factores puen causar aumento de temperatura
	Emisiones Acusticas	Alta relacion señal ruido	Sensor requerido de EA
	Medicion de Sonido (Frecuencia auditiva)	Facil de Medir	Ruido de fondo deberia ser filtrado
	Medicion Desplazamiento laser	Forma alternativa para med	Requerido sensor laser;dificil de implementar
No Requiere Sensor Extra	Monitoreo de Corrientes	De bajo costo, No intrusiva Facil de implementar	A veces baja relación señal-ruido; Todavia en etapa de desarrollo

Fuente. Autores

1.4.1 MONITOREO DE CONDICIÓN EN RODAMIENTOS A TRAVÉS DE EMISIONES ACÚSTICAS

En ambientes de alto ruido, el monitoreo de vibración estándar puede encontrar algunas dificultades. Esto se debe a las vibraciones de baja frecuencias asociadas con pequeños defectos del rodamiento aportan energía insignificante al sistema en comparación con el ruido ambiental. Por ejemplo, el éxito del monitoreo de vibración como un sistema de diagnóstico de rodamientos para turbinas de gas, transmisiones de aviones y motores de cohete ha sido decepcionante^[3]. Sin embargo, en tales ambientes, las emisiones de las ondas de esfuerzos en regiones de alta frecuencia (por encima de 100 KHz) pueden todavía proporcionar indicaciones claras de los defectos y en consecuencia suministra una indicación más fiable y temprana de la degradación del rodamiento. Las ondas de alta frecuencia, pueden ser obtenidas usando transductores de emisiones acústicas. La figura 5 muestra un sistema de monitoreo en rodamientos através de Emisiones Acústicas.

Figura 5. Aplicación típica del método de emisión acústica



Fuente: Autores

^[3] M. W. HAWMAN, AND W. S. GALINAITIS, "Acoustic emission monitoring of rolling element bearings"

2. FALLAS EN RODAMIENTOS Y FACTORES QUE INFLUYEN EN SU VIDA ÚTIL

2.1 CAUSAS DE FALLAS EN LOS RODAMIENTOS

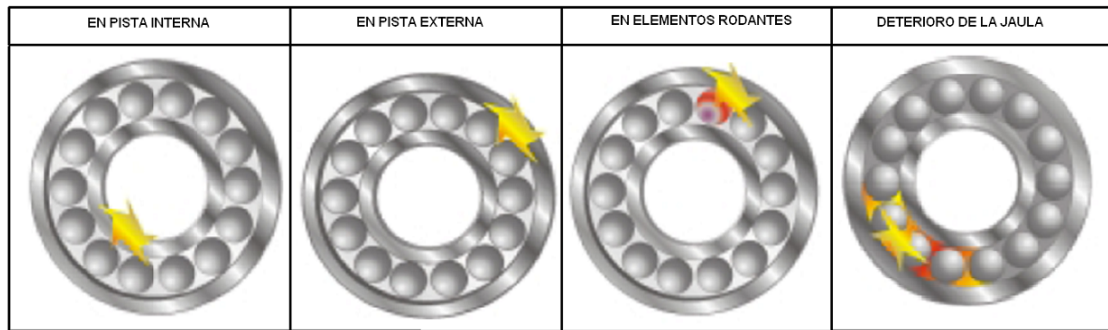
Los principales fabricantes de rodamientos cuentan con estadísticas donde indican que cerca del 16% de las fallas que se dan en los rodamientos son el resultado del mal manejo de estos. Esto es causado por el almacenamiento, transportación e instalación inadecuada del rodamiento. El 84% restante son instalados libres de defectos. En este momento no hay indicadores de fallas en rodamientos. Si un indicador está presente durante la operación inicial del rodamiento, por lo general se trata de un ajuste en el rodamiento o problema de ensamblado.

El 36% de las fallas en rodamientos son el resultado de una lubricación deficiente, es decir, sobre lubricación o sub lubricación, en términos coloquiales lubricación inadecuada, mezcla de lubricantes ó generación de una película limite de lubricante delgada, a menudo generada por una excesiva vibración en el eje. El 34% son el resultado de la operación inadecuada de los rodamientos como pudiera ser el desbalance, excentricidad entre eje, desalineamiento de poleas ó remplazo indicado por los programas de mantenimiento preventivo. Por último, el 14% falla debido a la contaminación.

2.2 FALLAS EN RODAMIENTOS

La mayoría de los rodamientos se pueden utilizar correctamente y mantenerlos cuidados por un largo periodo, en general hasta la vida de fatiga, pero hay sucesos prematuros denominados de quiebre o accidentes que en su gran mayoría tienen como causas, falta de cuidado en la instalación, utilización y lubricación, penetración de partículas externas y no considerar la influencia del calor en el eje y alojamiento.

Figura 6. Fallas en diferentes componentes del rodamiento



Fuente. Autores

2.3 ETAPAS DE FALLA EN RODAMIENTOS

Con la finalidad de tener un mejor conocimiento de lo que representa una falla en los rodamientos, los fabricantes realizaron una investigación para determinar cómo fallan estos. Dentro de la investigación se determinó que los rodamientos operan aproximadamente el 80% de su vida útil libres de defectos y cuando la falla ocurre, éstos generalmente se encuentran en alguna de las cuatro diferentes etapas de falla, las cuales describiremos a continuación:

2.3.1 Etapa 1

Las fallas de los elementos rodantes normalmente se producen por debajo de la superficie de las pistas de rodadura. En este momento, se estima que tienen de un 10 a 20% de vida útil restante.

2.3.2 Etapa 2

Conforme la falla progresa, huellas microscópicas se producen en la superficie del componente averiado. Esto es considerado como Etapa 2 y se estima que tienen entre el 5 y 10% de vida útil restante.

2.3.3 Etapa 3

El desarrollo de las fallas va más allá de las causas iniciales, como son el agrietamiento y/o desprendimiento de metal, que normalmente están asociadas a las fallas de los rodamientos. La vida útil en este momento del rodamiento se ve limitada del 1 al 5%.

2.3.4 Etapa 4

Cuando se presenta desgaste, grietas múltiples, desprendimiento excesivo podemos decir que estamos en la etapa 4 y etapa final en la falla del rodamiento. Muchas veces los rodamientos comienzan a deformarse y la jaula puede desintegrarse ó romperse. Sólo queda el 1% de la vida útil o tal vez una revolución.

Figura 7. Etapas de falla en rodamientos



Fuente: Autores

2.4 ASPECTOS QUE INFLUYEN DE MANERA MUY NOTORIA EN LA VIDA ÚTIL DEL RODAMIENTO

Elevadas fuerzas de operación pueden causar la deformación plástica del rodamiento, conduciendo a una pérdida de dimensionamiento del rodamiento.

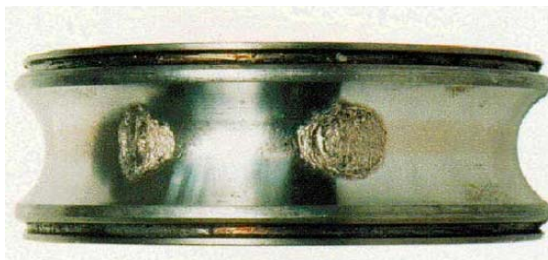
Una escasa lubricación permite mayor contacto entre las partes (fricción, debido al contacto metal con metal), a su vez incrementa la temperatura de éstos, acelerando los procesos de deterioración del rodamiento y como consecuencia final de éste proceso se genera un deterioro gradual de los componentes.

Rodamientos que funcionan en un ambiente de humedad alta, se exponen a la oxidación produciendo en su superficie muescas y partículas de óxido. Estas partículas pueden producir desgaste rápido por abrasión. Las muescas funcionan como concentradores de esfuerzo, proporcionando sitios para la iniciación de la grieta. El desgaste abrasivo ocurre cuando las partículas duras se arrastran entre las superficies de contacto de los elementos rodantes.

2.5 DEFECTOS LOCALIZADOS

Son en general producidos por grietas, hendiduras, rebordes resaltes, picaduras y descascaramiento. El más común de todos es la picadura en las pistas 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.

Figura 8. Desgaste por fatiga en un rodamiento



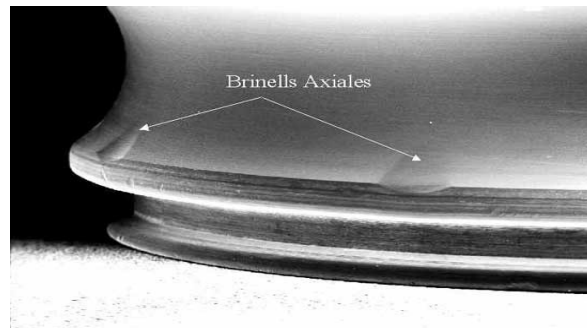
Fuente: http://www.mx.nsk.com/6_1_2_601_PrincVanta.asp

2.6 DEFECTOS DISTRIBUIDOS

Dentro de estos 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 debido al desgaste. La variación de las fuerzas de contacto entre las fuerzas de contacto entre los elementos rodantes y las pistas causan un incremento del 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 vibración.

Figura 9. Ondulaciones por Rodamiento mal instalado



Fuente: http://www.mx.nsk.com/6_1_2_601_PrincVanta.asp

3. ANÁLISIS DE EMISIONES ACÚSTICA PARA DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS

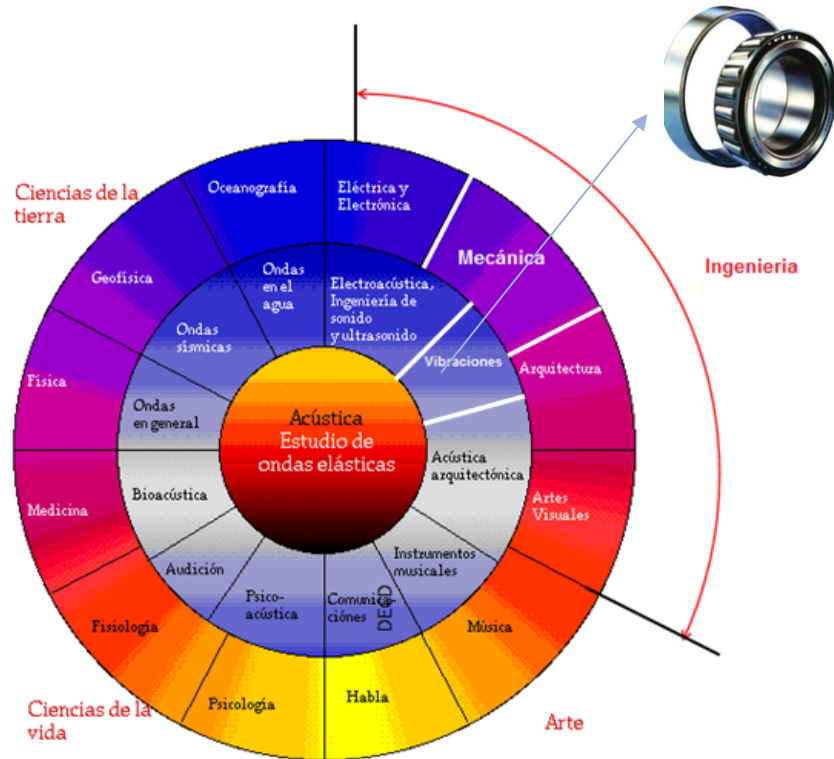
Probablemente la técnica más común y universalmente acogida para el monitoreo de condiciones en maquinaria rotativa es el análisis de vibraciones. Diferentes métodos son usados para la detección y diagnóstico de defectos en rodamientos; los cuales pueden clasificarse como mediciones de vibración y acústica, mediciones de temperatura y el análisis de partículas de desgaste. Varias técnicas se han aplicado para medir la vibración y la respuesta acústica de los rodamientos defectuosos; por ejemplo, la medición de vibración en el dominio de tiempo y frecuencia, el método de impulsos de choque, la presión de sonido y las técnicas de la intensidad del sonido y el método de emisión acústica. Para nuestro caso, la técnica de Emisión Acústica (EA) está recibiendo cada vez más atención como un método complementario para el monitoreo de condición de rodamientos ya que la EA es muy sensible a defectos incipientes.^[4]

3.1 ACÚSTICA

La Acústica es la ciencia que estudia la producción, transmisión y percepción del sonido tanto en el intervalo de la audición humana como en las frecuencias ultrasónicas e infrasónicas. Dada la variedad de situaciones donde el sonido es de gran importancia, son muchas las áreas de interés para su estudio: voz, música, grabación y reproducción de sonido, telefonía, refuerzo acústico, audiología, acústica arquitectónica, control de ruido, acústica submarina, aplicaciones médicas, etc. Por su naturaleza constituye una ciencia multidisciplinaria ya que sus aplicaciones abarcan un amplio espectro de posibilidades, tal como se observa en la Figura 10.

^[4] ALFONSO GARCÍA CASTRO, "Vibraciones mecánicas"

Figura 10. Aplicaciones de la Acústica



Fuentes: R.B. Lindsay "Journal of Acoustical Society of America",

3.2 RANGOS DEL SONIDO

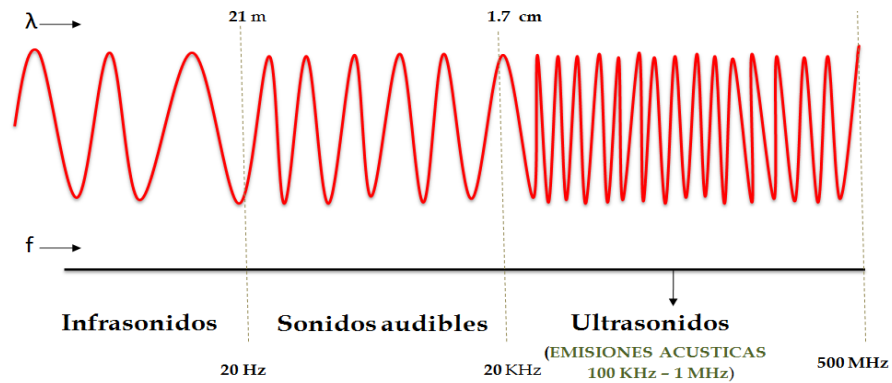
3.2.1 SONIDOS AUDIBLES

El espectro audible lo conforman las audiofrecuencias, es decir, toda la gama de frecuencias que pueden ser percibidas por el oído humano. Un oído sano y joven es sensible a las frecuencias comprendidas entre los 20 Hz y los 20 KHz No obstante, este margen varía según cada persona y se altera con la edad (llamamos presbiacusia a la pérdida de audición con la edad).

3.2.2 SONIDOS NO AUDIBLES: EL ULTRASONIDO Y EL INFRASONIDO

Las ondas acústicas debajo de la frecuencia de audición humana (20Hz) son llamadas: El infrasonido, mientras el sonido que ondea con una frecuencia superior al alcance de audición humana (20 KHz) es llamado ultrasonido.

Figura 11. Rango de Frecuencias del Sonido

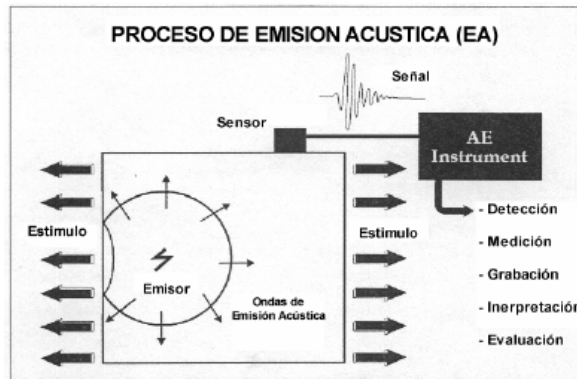


Fuente: Autores

3.3 DESCRIPCIÓN DE LAS EMISIONES ACÚSTICAS

La técnica de emisión acústica (EA) está basada en la generación de ondas acústicas (esfuerzo elástico o de presión) por el proceso de la rápida propagación de una microfalla u otro tipo de fuentes de energía mecánica (ver Figura 12).

Figura 12. Proceso de Emisión Acústica



Fuente: Quality Services Laboratories, Inc

Sensores piezoeléctricos altamente sensibles detectan la señal emitida desde el punto inicial por movimiento superficial dinámico y la convierten en una señal eléctrica. La frecuencia general utilizada es entre 100 KHz – 1MHz. Frecuencias más bajas están relacionadas con ruido externo.

La técnica de Emisión Acústica es una medida del tiempo real y de evaluación en línea. Básicamente proporciona información tal como: “cuándo” (tiempo, parámetro de carga externa), “cuánto” (proporción), “intensidad” (amplitud, energía) y “dónde” (localización de las fuentes de EA), ocurren las ondas de energía mecánica que producen los procesos de daño en diversos tipos de materiales estructurales. Si existe un desarrollo del defecto en el cuerpo, la emisión acústica revelará su existencia durante su crecimiento. Esta es una de las principales ventajas de la emisión acústica “Monitoreo en Tiempo Real”. Si alguna falla sucede o se propaga, la tecnología de EA evalúa la posibilidad del desarrollo de grietas al detectar las ondas elásticas que son generadas en el material, daños que no son audibles ni visibles al ser humano^[5].

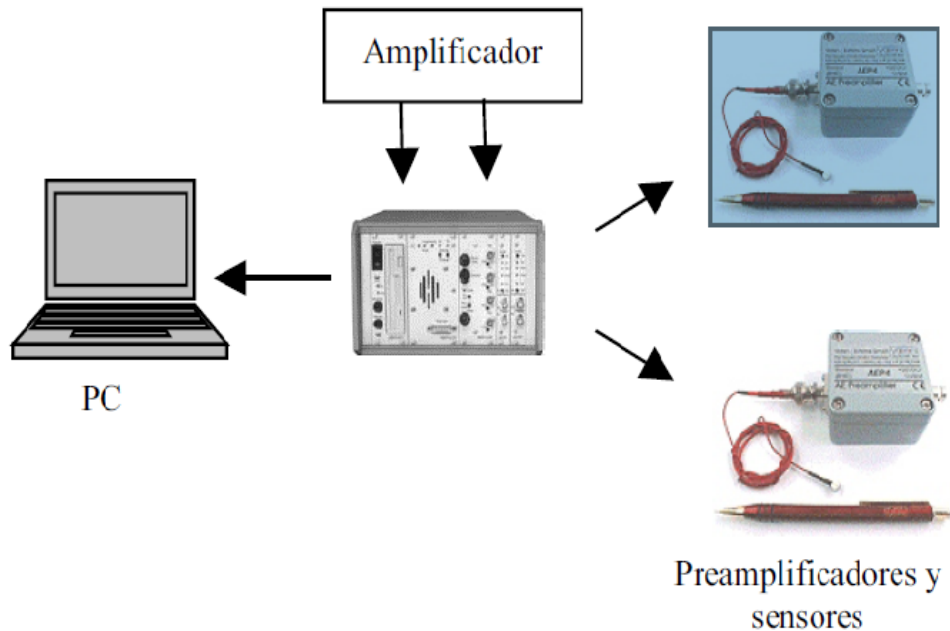
La Figura 13 muestra un típico equipo de emisión acústica en el cual la señal es captada y registrada en el ordenador donde es posible realizar las combinaciones pertinentes de la información obtenida. Parte importante de la función del equipo de EA son los sensores, de los cuales, el elemento activo de la mayoría de éstos es un cerámico piezoeléctrico que convierte la energía acústica a eléctrica.

Muchos factores incluyendo el material, su diseño mecánico y eléctrico, así como las condiciones de carga externa mecánica y eléctrica, influyen en su resultado. Durante la adhesión del sensor en la superficie del material a ensayar y con el objeto de evitar pérdidas de las señales elásticas durante la transmisión de un medio a otro, un agente de acoplamiento debe depositarse como interfase entre la

^[5]J. Cauich-Cupul, J.A. Rodríguez-Laviada y C.R. Ríos-Soberanis, Detección del daño generado en materiales compuestos dematriz polimérica empleando la técnica de emisión acústica

superficie del sensor y la muestra. Éste puede ser desde agua hasta algún tipo de grasa; sin embargo, se recomienda un medio denso y viscoso.

Figura 13 . Instrumentación para la aplicación de la técnica de Emisión Acústica



Fuente: J. CAUICH-CUPUL, J.A. RODRÍGUEZ-LAVIADA Y C.R. RÍOS-SOBERANIS, "Detección del daño generado en materiales compuestos de matriz polimérica empleando la técnica de emisión acústica"

La respuesta de la señal acústica es sin duda de las más versátiles debido a la amplia variedad de parámetros que puede registrar. La Figura 14 presenta una gráfica señalando los parámetros obtenidos a través de la técnica de emisión acústica, donde:

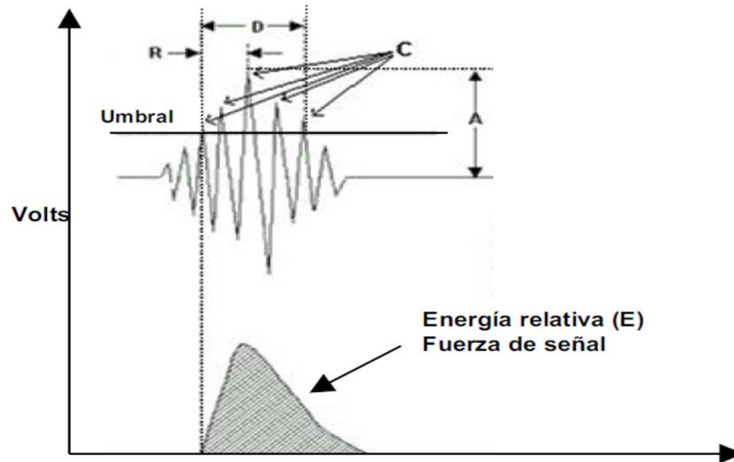
A = Amplitud máxima de la señal de EA.

C = Ringdown counts (numero de veces que la señal de EA excede el umbral de detección).

D = Tiempo entre la primera y ultima vez que la señal cruza el umbral de detecccion

R = Tiempo entre el comienzo de la señal de EA y la amplitud máxima de esa señal.

Figura 14. Señal y parámetros acústicos



Fuente: JUAN. A. LARA MAGALLANES., MARTÍN. SÁNCHEZ MTZ. "Método de Inspección No Destructivo Para La Evaluación De Componentes Soldados"

La intensidad de la vibración de emisión acústica, algunas veces llamada actividad EA, depende del tipo del material y de las propiedades del material. En la Tabla 2, algunos de los factores que afectan a la amplitud relativa de la respuesta de emisión acústica.

Tabla 2. Factores representativos en la respuesta de emisión acústica

Factores que tienden a aumentar la amplitud de emisión de la respuesta acústica		Factores que tienden a disminuir la amplitud de la respuesta acústica de emisión	
<ul style="list-style-type: none"> · Alta resistencia · Alta velocidad de deformación · Baja temperatura · Secciones gruesas · Fallas frágiles (Hendedura) 	<ul style="list-style-type: none"> · Material que contiene discontinuidades · Transformaciones de fase Martensita · Propagación de la grieta · Materiales de fundición · Tamaño de grano grande 	<ul style="list-style-type: none"> · Baja resistencia · Baja velocidad de deformación · Alta temperatura · Isotropía · Homogeneidad · Secciones delgadas · Fallas dúctiles 	<ul style="list-style-type: none"> · Material sin discontinuidades · Difusión controlada-transformaciones de fase · Deformaciones plásticas · Forjado materiales · El tamaño de grano pequeño

Fuente: MILLER RONNIE Y MCINTIRE PAUL. "Nondestructive Testing Handbook", 2a ed., Vol. 5 Acoustic Emission

3.3.1 EFECTO KAISER

Una característica importante en las aplicaciones de emisión acústica es la respuesta, generalmente irreversible, de la mayoría de los metales. En la práctica, a menudo se encuentra que, una vez que la carga ha sido aplicada y que la emisión acústica, relacionada a esta carga, ha ocurrido, no habrá señales de emisión acústica adicionales, sino hasta que se aplique una carga mayor a la previamente aplicada (ver Figura 15). A este comportamiento a menudo útil (y algunas veces problemático) se le ha llamado el efecto Kaiser, en honor del investigador, quien fue el primero en reportarlo.^[6]

El fenómeno Kaiser tiene un efecto especial sobre la nucleación y el crecimiento de grietas. También puede afectar a la actividad EA causado por una falla en un rodamiento cuando un elemento rodante está pasando sobre la falla y causa el esfuerzo en el material

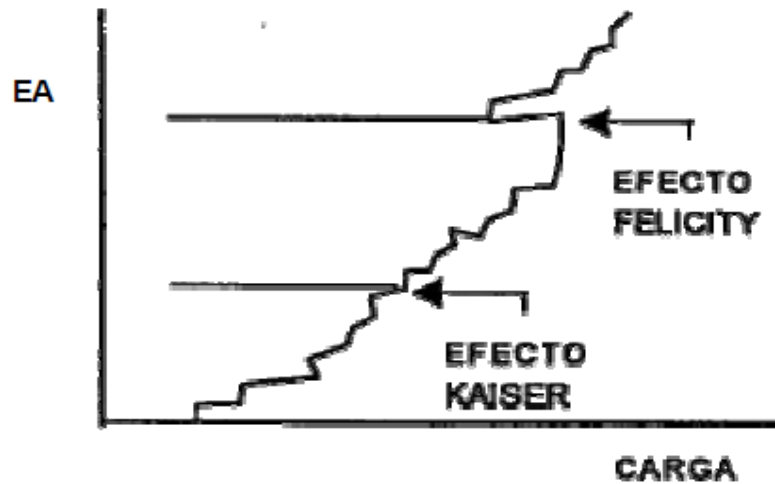
3.3.2 EFECTO FELICITY

Otra aplicación del efecto Kaiser se derivó del estudio de casos en los cuales éste efecto no se presentaba. En general, se encontró que el material generaba ondas de emisión acústica, aún y cuando no se hubiese aplicado una carga mayor a la previamente aplicada, esto a menudo se presenta en materiales en condiciones pobres y/o cercanos a fallar y se le denomina el efecto Felicity^[7] (ver Figura 15).

^[6] HEIPLE C. R. Y CARPENTER S. H, "Acoustic Emission Produced by Deformation of Metals and Alloys

^[7] JUAN. A. LARA MAGALLANES., MARTÍN. SÁNCHEZ MTZ, Método de Inspección No Destructivo Para La Evaluación De Componentes Soldados

Figura 15. Representación grafica de los efectos kaiser y felicity



Fuente: JUAN. A. LARA MAGALLANES., MARTÍN. SÁNCHEZ MTZ, "Método de Inspección No Destructivo Para La Evaluación De Componentes Soldados"

3.4 EMISIÓN ACÚSTICA EN EL MONITOREO DE FALLOS DE RODAMIENTOS

La formación de grietas subsuperficiales debidas al esfuerzo inducido por el contacto de rodadura entre los elementos rodante y las pistas del rodamiento, y las partículas desprendidas a partir del desgaste del rodamiento, o aquellas que ingresan al rodamiento debido a fallas en el sistema de sellado, generaran actividad de emisión acústica.

Se ha establecido que las señales detectadas en el rango de medición de la técnica de emisión acústica, representan en su mayoría defectos en rodamientos sobre otros tipos de fallas como desbalanceo, desalineamiento, o cualquier otra resonancia estructural. Además las señales de emisión acústica se atenúan rápidamente al ser de alta frecuencia.

Por esta razón se puede asegurar que si la señal se capta lo más cerca posible del rodamiento esta contendrá en su mayoría la información de alta frecuencia proveniente del rodamiento, y no de ningún otro componente de la máquina^[8].

Cuando un elemento rodante pasa por la falla en un rodamiento, este excita la vibración, la cual puede ser medida por un sensor de medición de vibraciones. La práctica común es medir el desplazamiento de la vibración, velocidad o aceleración. La amplitud de la velocidad es casi independiente de la frecuencia de las vibraciones en el rango de 10 Hz -2 KHz. La velocidad de vibración describe muy bien la condición general de la máquina rotativa.

Por esa razón, la medición de la velocidad de vibración es parámetro más común de medición en el monitoreo de condición de maquinaria rotativa. A frecuencias más altas, la amplitud de desplazamiento de vibración es muy baja, pero la aceleración de la vibración se eleva a un nivel alto. Para las máquinas que giran a alta velocidad con un fallo de rodamientos en una fase muy temprana, la medida de la aceleración de la vibración suele ser un indicador más fiable (Berry, 1991).

El tipo de espectro, que el rodamiento defectuoso genera, depende de la gravedad de la falla. Podemos encontrar básicamente cuatro tipos de espectros. Estos espectros pueden contener frecuencias ultrasónicas aleatorias, las frecuencias naturales de los elementos de apoyo, frecuencias de defectos de rotación de rodamientos y las frecuencias suma y diferencia que nacen cuando frecuencias diferentes se modulan entre sí (Berry, 1991). Frecuencias ultrasónicas aleatorias aparecen generalmente en una etapa temprana de la falla, y puede aumentar drásticamente justo antes de la falla catastrófica. Las frecuencias naturales del rodamiento montado se utilizan cuando la aceleración de la vibración se mide mediante técnicas de envolvente.

^[8] CATLIN JR., J.B. The Use of ultrasonic diagnostic technique to detect rolling element bearing defects. Proceeding of Machinery and Vibration Monitoring and Analysis Meeting, Vibration Institute, USA, Abril 1983,123-130

La principal diferencia entre la emisión acústica y la vibración de baja frecuencia es que para la vibración de baja frecuencia se necesita un defecto en el rodamiento el cual excita la vibración cuando un elemento rodante está pasando, pero la emisión acústica es excitada solo cuando la grieta se forma. Por lo tanto, en principio, la emisión acústica debe indicar el daño en el rodamiento en una etapa muy temprana.

3.5 COMPARACIÓN ENTRE EL MÉTODO DE EMISIÓN ACÚSTICA Y OTROS MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS

La Emisión Acústica (EA) difiere de otros métodos no destructivos en dos principales aspectos. Primero, la energía que se detecta, se libera del interior del material que se está inspeccionando, a diferencia de otros métodos como el ultrasonido o el radiográfico en los cuales de cierta forma se induce una energía en los materiales. Segundo, la técnica de Emisión Acústica es capaz de detectar procesos dinámicos asociados con la integridad estructural (crecimiento de grietas, deformación plástica).

En otras palabras, la técnica de Emisión Acústica detecta movimientos, mientras que los métodos convencionales de pruebas No Destructivas (MND) detectan discontinuidades geométricas. En la Tabla 3 se da una comparación entre el método de Emisión Acústica y los métodos tradicionales de pruebas no destructivas.

Tabla 3. Comparación entre el método de EA y los MND.

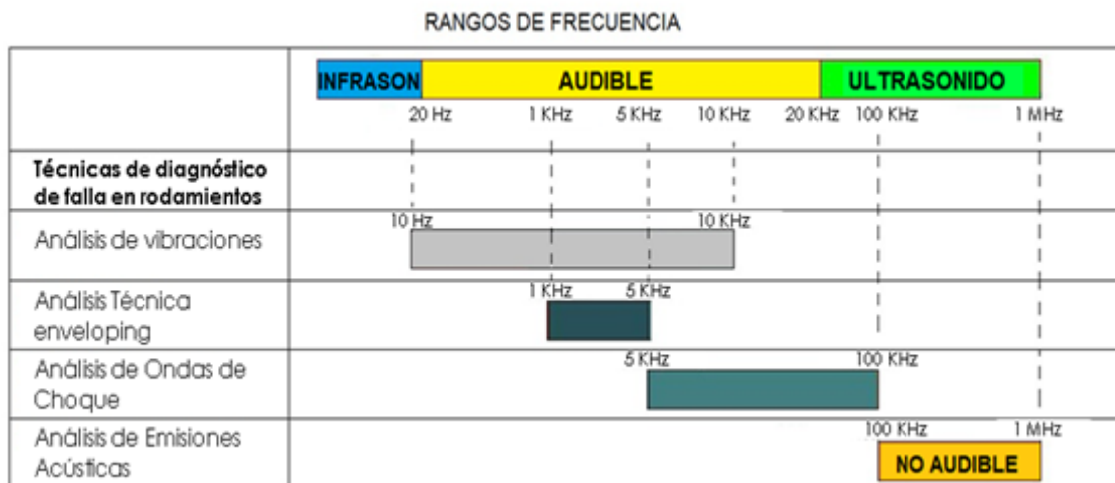
Emisión Acústica	MND
Defecto: Crecimiento/Movimiento	Presencia de Defecto
En relación a la carga aplicada	En relación a la forma
Más sensitivo al material	Menos sensitivo al material
Evaluación global	Evaluación local
Principal Problema:	Principal Problema:
Ruido y Evaluación de Datos	Acceso, Geometría y Evaluación de datos

Fuente: Autores

3.6 RANGOS DE FRECUENCIA DE EMISIÓN ACÚSTICA Y TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS.

La Figura 16 muestra el rango de frecuencias de distintas mediciones para el diagnostico de la maquinaria.

Figura 16. Rangos de frecuencia



Fuente: Autores

3.7 SEÑAL DE EMISIÓN ACÚSTICA CALCULADA POR MÉTODO ESTADÍSTICO.

Las señales en tiempo pueden ser usadas para realizar diagnósticos de falla mediante el análisis de las señales de Emisiones Acústicas obtenidas del equipo. Los métodos estadísticos son ampliamente usados para investigar las características aleatorias de un sistema físico.

Si la señal de emisión acústica examinada es larga y contiene bastantes picos, una forma de caracterizar la señal es calcular valores estadísticos de esta. Estos valores expresan si la señal presenta muchos picos o no. Los valores estadísticos típicos son la desviación estándar de la señal, el valor Kurtosis, la varianza, el valor pico, y el valor RMS.

El parámetro Kurtosis (K) como se muestra en la ecuación 1, es el cuarto momento estadístico, analiza el grado de concentración que presentan los valores alrededor de la zona central de la distribución.

$$K = \frac{E[V(t)-\mu]^4}{\sigma^4} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\left[\frac{V_i - \mu}{\sigma} \right]^4 \right] \quad (1)$$

Donde μ es la media, y σ es la varianza de la señal, E es la expectativa, $V(t)$ es una señal de Emisión Acústica y N es el numero de muestras de la señal.

La amplitud de la emisión acústica es el valor pico (ver ecuación 2) de la señal de emisión acústica. Esté es relativo al mecanismo de deformación de la fuente de EA en el material.

$$\text{Valor Pico} = \max(V(t)) \quad (2)$$

Donde $V(t)$ es una señal de emisión acústica.

El parámetro RMS es el valor energético que describe la señal de EA. La energía de EA está directamente relacionada con la energía mecánica, relación de tensión, y mecanismos de deformación cuando la energía de esfuerzo es liberada en el material.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N V_i^2}{N}} \quad (3)$$

Donde N es la cantidad de los valores considerados de la señal.

Otra manera de caracterizar la señal es el conteo de pulsos por unidad de tiempo; por ejemplo pulsos por segundo. El conteo de pulsos es mucho más adecuado para ambientes industriales.

3.8 TÉCNICA DE MEDICIÓN DE EMISIÓN ACÚSTICA

La diferencia substancial en la técnica de medición acústica, comparada con las técnicas de medición a baja frecuencia, está en el montaje del sensor de medición. El monitoreo de emisión acústica es no direccional, la mayoría de las fuentes de EA parecen actuar como fuentes puntuales. Las fuentes de punto irradian energía en frentes de onda esféricos, y por lo tanto el sensor puede ser ubicado en cualquier lugar en las proximidades de la fuente de EA y que puede detectar la señal de emisión acústica. Esto es en contraste con otros métodos de medición de vibración mecánica. Los sensores de medición de vibración en el que la dirección del sensor tiene una fuerte influencia.

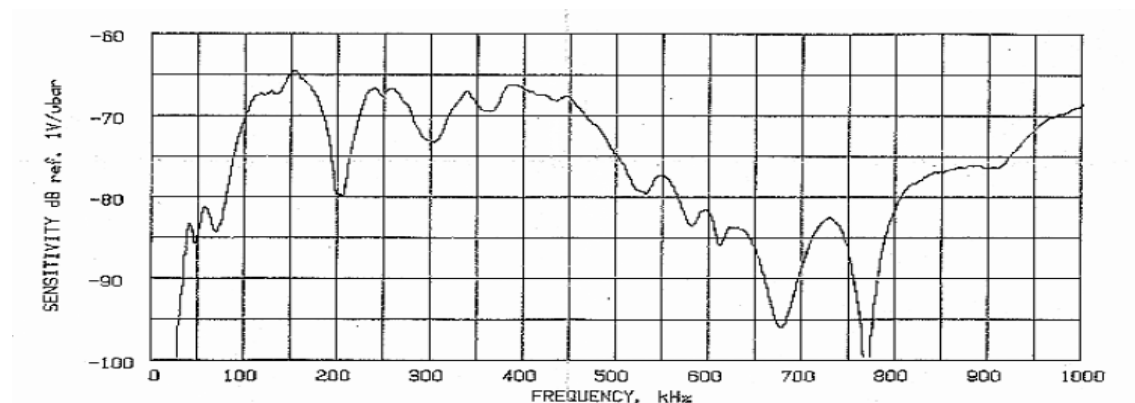
Aunque la medición de EA es no direccional, hay que tener en cuenta que todas las superficies límite afectan a la amortiguación de la señal de alta frecuencia. Por lo tanto, el sensor debe estar ubicado lo más cerca posible de la fuente, normalmente en el lado de carga del rodamiento. Además, es muy importante utilizar una grasa de contacto entre el sensor y la superficie de montaje.

Debido a que los niveles de voltaje en las mediciones de emisiones acústicas son muy bajos, gran cuidado se debe tomar para minimizar el efecto de las perturbaciones del medio ambiente en la medición. Fuertes perturbaciones eléctricas pueden causar, por ejemplo, los campos magnéticos, campos de corriente de Foucault, los inversores de los motores eléctricos y lámparas fluorescentes. También existe el ruido de fondo el cual no es más que emisiones acústica provenientes de por ejemplo de los recipientes a presión, soldadura, el ruido hidráulico y mecánico, pueden perturbar las mediciones de emisión acústica, especialmente en ambientes de campo.

Las perturbaciones pueden afectar a los resultados de medición, que no siempre se puede explicar fácilmente. Las perturbaciones son especialmente dañinas, cuando la velocidad de rotación del rodamiento es baja y cuando el nivel de emisión de la es bajo (McFadden, 1984). El ruido de fondo puede afectar la medición de EA de esa manera, que incluso si la señal es muy clara cuando la velocidad de rotación es baja la señal puede ser ambigua cuando la velocidad de rotación y el ruido de fondo son más altos (Smith, 1982).

El ancho de banda de frecuencia en la medición de emisión acústica esta típicamente en el rango de 100 KHz a 1 MHz. Los sensores son generalmente de tipo piezoeléctrico. La diferencia entre el acelerómetro normal y el sensor EA es que el sensor EA no tiene masa unida en el cristal piezoeléctrico. La respuesta de frecuencia del sensor EA es fuertemente no lineal y por lo tanto la medición del espectro en el caso de la emisión acústica no es muy conveniente. En la Figura 17 se ilustra la respuesta de frecuencia de un sensor de emisión acústica.

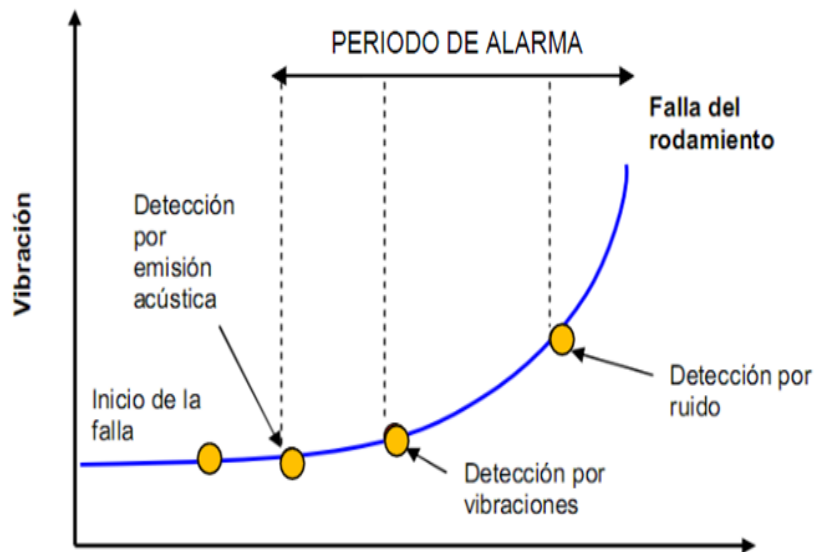
Figura 17. Sensibilidad del sensor de Emisión Acústica con respecto a la frecuencia [Billington, 1997]



Fuente: TARA REEVES LINDSAY, "applying adaptive prognostics to rolling element bearings"

Así los métodos basados en EA son superiores en algunas zonas a los métodos de vibraciones basadas en la detección de defectos, especialmente para la detección incipiente defecto en los rodamientos de elementos (ver Figura 18).

Figura 18. Curva típica de falla de rodamientos



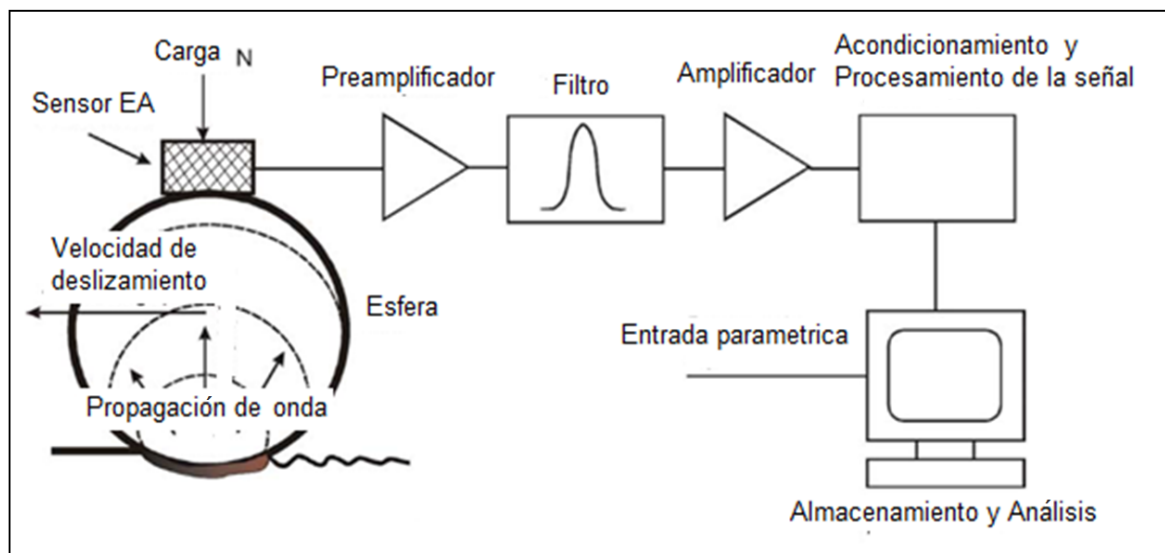
Fuente: SKF monitoring, curso de entrenamiento en el análisis de vibraciones

3.9 RESPUESTA DE LA EMISIÓN ACÚSTICA DE RODAMIENTOS DEFECTUOSOS

La Emisión Acústica es el fenómeno de generación de ondas elásticas transientes debido a la rápida liberación de energía de esfuerzo debido a una alteración estructural en un material sólido bajo esfuerzos mecánicos o térmicos. La generación y propagación de grietas, etc, asociadas con la deformación plástica son las principales fuentes de emisión acústica. Por lo tanto es una importante herramienta para el monitoreo de condición a través de pruebas no destructivas.

La instrumentación de la emisión acústica consiste de un traductor, la mayoría de tipo piezoeléctrico, un preamplificador y una unidad para el procesamiento de la señal (ver figura 19). Los transductores, los cuales tienen una muy alta frecuencia natural, tienen una respuesta tipo resonante. El ancho de banda de la señal de emisión acústica también puede ser controlado usando un filtro indicado en el preamplificador.

Figura 19. Esquema del sistema de monitoreo de emisiones acústicas



Fuente: JUN SUNA, R.J.K. WOOD A, L. WANGA, I. CARE B, H.E.G. POWRIE C, "Wear monitoring of bearing steel using electrostatic and acoustic emission techniques"

La ventaja del monitoreo de Emisión Acústica sobre el monitoreo de vibración (ver Tabla 4), es que el primero puede detectar el crecimiento de grietas de la subsuperficie, mientras que el último puede detectar defectos solo cuando ellos aparecen en la superficie, también importante para notar que la energía liberada por componentes vecinos en el rango de la frecuencia vibración va hasta 50 KHz. Los cuales a menudo enmascaran la energía de vibración liberada de un defecto de rodamiento, no afectan a la señal de emisión acústica en el rango de alta frecuencia.

Tabla 4. Características generales de Emisiones Acústicas y análisis de vibraciones

Emisiones Acústicas	Análisis de vibraciones
<ul style="list-style-type: none"> ● Detecta el crecimiento de grietas subsuperficiales ● Facilidad de medición ● Cubren un espectro de frecuencias amplio Indica el daño en el rodamiento en etapas muy tempranas ● Detecta fallas tanto en pista interior como exterior de los rodamientos ● Sus sensores son económicos ● Son propensas a la contaminación ● Son mucho más sensibles al ruido de fondo del entorno de la maquinaria ● La detección temprana de cambios permite tomar acciones correctivas incrementando la longevidad del equipo. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Detecta las grietas cuando ya están localizadas en la superficie ● Requiere de un defecto en el rodamiento sobre el cual pasa el elemento rodante y excite la vibración ● Se hallan muy extendidas desde el punto de vista comercial e industrial ● Requiere menos capacitación por parte del personal. ● Rango de frecuencias bajo(0-10 KHz) con respecto a las Emisiones Acústicas(100KHz-1MHz) ● Menos tiempo para programar un mantenimiento porque el rodamiento ya está en un estado avanzado de falla.

Fuente: Autores

Varios estudios han sido llevados a cabo para investigar la respuesta de la emisión acústica de los defectos en los rodamientos. En el caso del monitoreo de la emisión acústica de defectos locales también, dos aproximaciones de pruebas de duración y defectos simulados han sido adoptados por investigadores.

En 1979, Rogers sugirió la aplicación de la emisión acústica como una medida de las condiciones de rodamientos antifricción de grúas de plataformas en alta mar de producción de gas. Yoshioka and Fujiwara han mostrado que los parámetros de las emisiones acústicas pueden detectar los defectos antes que ellos aparezcan en el rango de la aceleración de vibración y pueden también detectar las posibles fuentes de emisiones acústicas durante la duración de una prueba de fatiga de rodamientos de bolas de empuje.

Las señales de Emisiones Acústicas han sido mostradas para detectar defectos en la forma de una ralladura fina en la pista externa de un rodamiento angular de carga axial pero a bajas velocidades. Tandon y Nakra^[9] han demostrado la utilidad de algunos parámetros de emisión acústica, tales como la amplitud de pico y Ringdown count, para la detección de defectos en rodamientos de bolas de carga radial a bajas y normales velocidades. La distribución de eventos por Ringdown counts y amplitud pico ha sido usada para la inspección de la calidad de los rodamientos para evaluar si el rodamiento es nuevo o regenerado.

Tan^[10] ha sugerido que la medición de bajo del área de la curva amplitud-tiempo es un método preferido para la detección de rodamientos. Él también aplicó la técnica de cancelación de ruido adaptativo para filtrar el ruido de fondo, EA emitidas por otros componentes de la máquina. La utilidad de señales moduladas en la detección de defectos en los rodamientos de elementos rodantes se ha demostrado por algunos investigadores^[11].

^[9] SMITH, R. L. AND WALTER, T., "Machinery Fault Identification Using Microphones", Vibration Institute 18th Annual Mtg"

^[10] Tan CC. "Application of acoustic emission to the detection of bearing failures". In: Proceedings of Tribology Conference. Brisbane: IE Australia, 1990:110-4.

^[11] Bagnoli S, Capitani R, Citti P. Comparison of accelerometer and acoustic emission signals as diagnostic tools in assessing bearing damage. In: Proceedings of 2nd International Conference on Condition Monitoring, London, 24-25 May, 1988. p.117-25.

3.10 IDENTIFICACIÓN DE SEÑALES DE RODAMIENTOS DEFECTUOSOS

Rodamientos que contienen defectos internos exhiben distintas señales de vibración y acústica de los rodamientos que no tienen defecto, es decir, de los que se encuentran en condición normal. Considere las señales en el dominio de tiempo que se muestran en las Figuras 20 y 21. Las señales de EA son tomadas de un rodamiento en condición normal y un rodamiento con una sola ralladura en la pista externa. Cada señal es graficada a la misma escala.

Los altos pulsos de la parte superior de la señal es un directo resultado de los daños internos en los componentes del rodamiento. Esto puede determinarse con precisión mediante la determinación de la tasa de repetición de impulsos de la señal.

Figura 20. Señal acústica de un rodamiento en condición normal

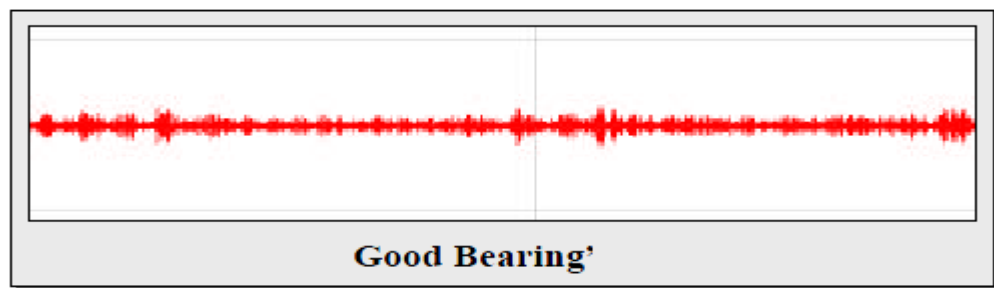
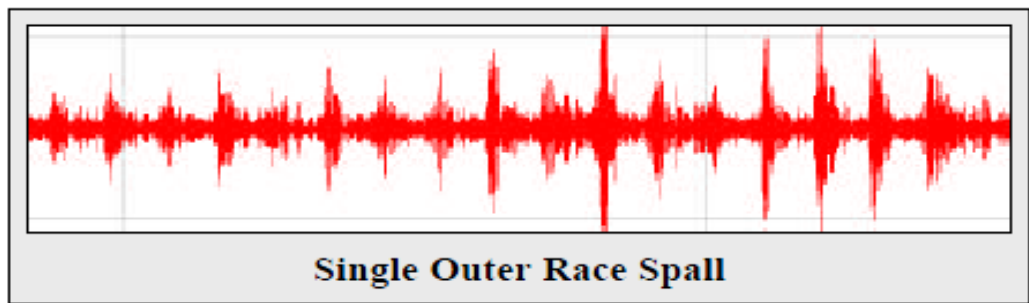


Figura 21. Señal acústica de un rodamiento con defecto en pista externa

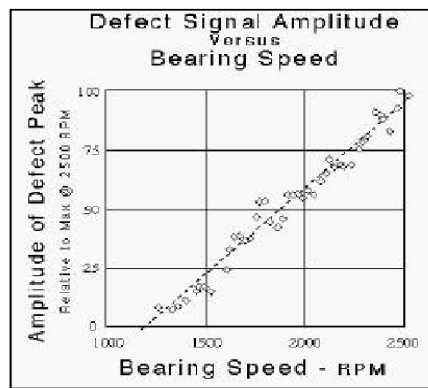


Fuente: Acoustic Signatures of Birds, Bats, Bells, and Bearings by RICHARD L. SMITH

Cada emisión del rodamiento se representa frente a la misma variación en velocidad, pero en este caso, los datos se han agrupado por tipo de defecto de rodamiento para ver sus tendencias individuales.

La Figura 22 muestra una de las razones porque cada uno de los tipos de defectos mantiene la tendencia con la velocidad que lo hace. La figura muestra una emisión acústica de un rodamiento. La amplitud pico de este defecto de la pista fue localizada ya que el rodamiento desacelero. Aunque algunas de las amplitudes son un poco dispersas que definen una curva casi lineal en el rango de velocidades observadas. Dado que la amplitud pico de una onda periódica es generalmente proporcional a su "desviación estándar" las tendencias nominal de casi todos los defectos internos siguen tendencias similares como se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Defecto de rodamiento Amplitud Vs velocidad



Fuente: RICHARD L. SMITH Acoustic Signatures of Birds, Bats, Bells, and Bearings

Así mismo, en el ejemplo que se muestra aquí la señal de EA emitida por el rodamiento defectuoso se acerca a un nivel muy bajo, incluso cuando el rodamiento está girando. Esto implica que un umbral de velocidad, primero se debe alcanzar antes de que una señal de EA detectable sea emitida por el rodamiento.^[12]

[12] SMITH, R. L. AND WALTER, T., "Machinery Fault Identification Using Microphones", Vibration Institute 18th Annual Mtg"

4. ENSAYOS EXPERIMENTALES

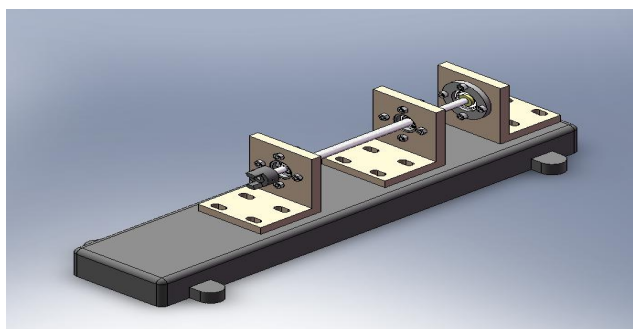
4.1 DESCRIPCIÓN DEL BANCO

Esta técnica se implementará a un modelo construido exclusivamente para el análisis de fallas en rodamientos cónicos. El modelo es un banco de construcción sencilla, con tres apoyos sobre los cuales estarán los rodamientos sosteniendo al eje acoplado con un motor de baja potencia, y en uno de ellos estará ubicado en el rodamiento de pruebas.

Banco de pruebas para detección de fallas con los siguientes componentes:

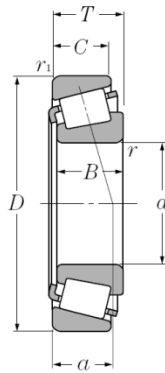
- ✓ Estructura metálica de acero
- ✓ Soportes en forma de L que contendrá los rodamientos de bolas y el cónico
- ✓ Motor de inducción
 - Velocidad Nominal= 1800 RPM
 - Potencia= 1/8 (hp)
- ✓ Eje Diámetro = 1/2", Mecanizado
- ✓ 3 rodamientos :
 - 2 rodamientos fijos de una hilera de bolas rígido NSK referencia 6000
 - 1 rodamiento de prueba NTN referencia 30203

Figura 23. Banco de pruebas de rodamientos cónicos



Fuente: Autores.

Figura 24. Rodamiento cónico de pruebas NTN 30203



Fuente: NTN Corporation. *Ball and Roller Bearings*. Estados Unidos de América. 2002. Catalogo de la empresa NTN Corporation. 399 p.

Tabla 5. Datos básicos del rodamiento NTN 30203

Dimensiones (mm)						Rango de carga básica (KN)		Velocidades límite (RPM)		Número del rodamiento
D	d	B	T	C	R	Estática	Dinámica	Grasa	Aceite	
40	17	12	13.25	11	1	20.3	20.5	9900	13000	30203

Fuente: NTN Corporation. *Ball and Roller Bearings*. Estados Unidos de América. 2002. Catalogo de la empresa NTN Corporation. 399 p

4.2 EQUIPO DE MEDICIÓN

Figura 25. Instrumentación utilizada en la técnica de EA (Conexión sistema de adquisición)



Fuente: Autores

4.2.1 SENSOR MODELO WDIU-AST

Un sensor de emisión acústica convierte la energía mecánica transportada por la onda elástica en una señal eléctrica. El sensor más utilizado en EA es piezoeléctrico. Esta elección ha sido hecha debido a la facilidad de fabricación, su alta sensibilidad, y una robustez que permite su utilización en aplicaciones industriales.

El elemento activo de un sensor es un disco delgado de material piezoeléctrico (un material que puede convertir la deformación mecánica en voltaje eléctrico). Este disco es metalizado por ambas caras para los contactos eléctricos y montado en un cilindro de metal para proporcionar protección a la interferencia electromagnética. Los piezoeléctricos de cerámica más comunes en los sensores de EA están hechos de pequeños cristales de titanatos y zirconatos.

Para aprovechar la alta sensibilidad del sensor se usan capas finas de grasa, aceite o el adhesivo epoxi garantizando que la energía acústica pase al sensor con una pérdida mínima entre el objeto en observación y este^[13].

4.2.2 TRANSFERENCIA DE LAS EMISIONES ACÚSTICAS

Cuando un sensor simplemente se ha colocado en la superficie del objeto de estudio, se encuentra que produce una señal muy débil. Si una capa delgada de un líquido se coloca entre el sensor y la superficie del objeto, se obtiene una señal mucho más fuerte. El uso de algún tipo de acoplador es casi imprescindible para la detección de señales de bajo nivel acústico. Físicamente, esto se explica al observar la onda acústica como onda de presión transmitida a través de dos superficies en contacto. En una escala microscópica de las superficies del sensor y el objeto son muy ásperas, sólo algunos puntos se tocan cuando están en

[13] AE Sensors & Preamplifiers Users Manual.

contacto. Si los espacios microscópicos están llenos de un fluido, la presión será transmitida de manera uniforme entre las superficies^[14].

4.2.2.1 Acoplador. Un acoplador es cualquier material que facilita la transmisión de las ondas acústicas entre dos superficies. El modo más práctico para usar el acoplador es utilizar una capa delgada de cualquier fluido viscoso que se adiciona en ambas superficies. El sensor debe tener un poco de presión contra la superficie. En la Tabla 6 se muestran acopladores de uso general junto con el rango de temperatura donde pueden ser utilizados.

Tabla 6. Tipos de acopladores

Some Common Acoustic Emission Couplants and the Approximate Temperature Range Where They Can Be Used	
Dow Corning V-9 resin	-40° to 100° C
High vacuum stop cock grease	-40° to 200° C
Ultrasonic couplants	room temperature
Petroleum grease	room temperature
Water	1° to 99° C
Dow Corning 200 fluid	-273°C to -70°C and -30°C to 200°C
Salol	-40°C to 40°C
Nonaq stop cock grease	-273°C to 100°C
Dental cement	0° to 50°C
50% Indium - 50% Galium mixture	20° to 700°C

Fuente: EA Sensors & Preamplifiers Users Manual

4.2.3 PREAMPLIFICADOR INTEGRAL DEL SENSOR

El sensor contiene un preamplificador integrado el cual representan un avance significativo para el ámbito de la emisión acústica (EA), conectado a una entrada FET de bajo nivel de ruido y un preamplificador de 40 dB.

[14] AE Sensors & Preamplifiers Users Manual.

Este sensor con preamplificador integrado elimina la necesidad de usar preamplificadores externos, el cual incorpora dos funciones en una sola, lo que reduce los costos del equipo y disminuye el tiempo de instalación para aplicaciones de campo.

Estos sensores con preamplificador integral se desarrollaron con el fin de lograr una alta sensibilidad y la capacidad de conducir la señal por cables largos sin la necesidad de un pre-amplificador por separado.

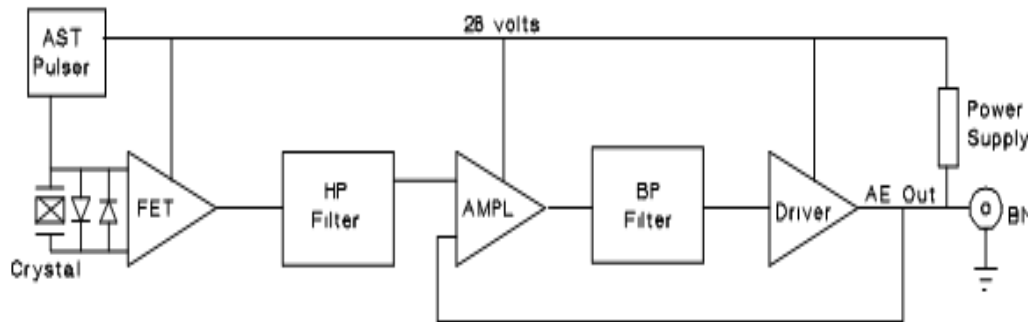
4.2.3.1 Características del preamplificador

- Pequeño tamaño, construcción del acero inoxidable.
- Rango de funcionamiento – 45°C y 80°C (-25°C-80°C para las versiones AST).
- Buena inmunidad RFI / EMI.
- Amplio rango dinámico (> 80 dB).
- Bajo nivel de ruido pre-amplificador (~ 2 mV).
- La entrada individual BNC.
- Ideal para el campo / pruebas de laboratorio.
- Auto sensor opción de prueba permite la pulsación del sensor o auto prueba.

4.2.3.2 Descripción de funcionamiento. Los sensores integrales están completamente encerrados en una caja de acero inoxidable y recubiertos para reducir las interferencias RFI/EMI al mínimo. Además, se ha aislado térmicamente la etapa de entrada crítica del pre-amplificador, con el fin de proporcionar excelente estabilidad a temperaturas en el rango de -45 °C a +80 °C. Para facilitar el uso, los sensores integrales utilizan un cable coaxial con conector BNC para alimentar el pre-amplificador y llevar a la salida de la señal^[15]. El diagrama de bloques del sensor integral se muestra en la Figura 26.

¹⁵ AE Sensors & Preamplifiers Users Manual.

Figura 26. Diagrama de bloques del sensor



Fuente: AE Sensors & Preamplifiers Users Manual

4.2.3.3 Especificaciones eléctricas

- Ganancia: 40 ± 1 dB
- Pico Sensibilidad: 30 dB ref. 1 V / mbar
- Ruido (RMS RTI): ~ 2 mV
- Rango dinámico: > 80 dB
- Tensión de salida: > 15 BP en 50 ohmios
- Energía requerida: 28 V a 100 mi
- AST pulso: -24 voltios, 0,4 microsegundos en el cristal
- AST Tiger: < 2 voltios a la salida del preamplificador (alimentación)
- Cristal completamente encapsulado para Inmunidad de RFI

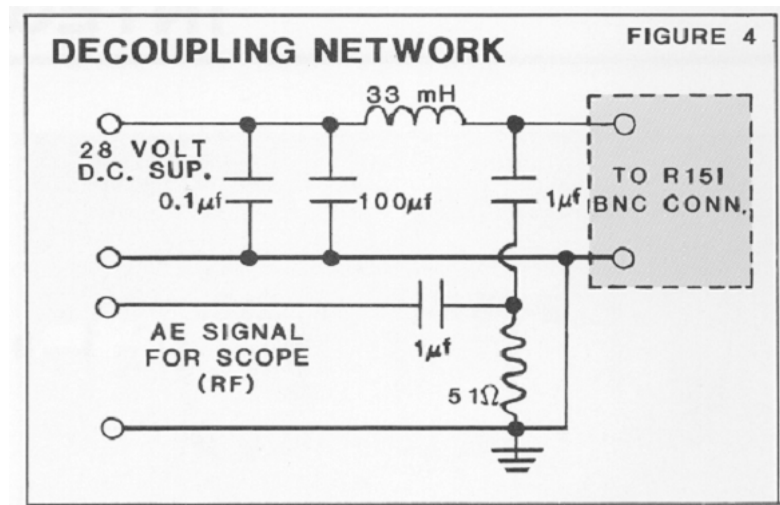
4.2.3.4 Especificaciones físicas

- Temperatura ($^{\circ}$ C): -45 al 80 (de -25 a 80 AST).
- Limite el choque (g): 500.
- Material de la caja: acero inoxidable (304).
- Material de la cara: de cerámica.
- Conexión a tierra: cuerpo a tierra y aislada de la superficie de montaje.
- Tipo de conector: BNC.
- Ubicación del conector: lateral.
- Direccionalidad (dB): $\pm 1,5$.
- Presión: < 400 psi de presión hidrostática.

4.2.4 ALIMENTACIÓN DEL SENSOR Y DESACOPLE DE LA SEÑAL

Como el sensor necesita ser alimentado con + 28 V D.C a través de un cable coaxial, es necesario desacoplar la señal de la emisión acústica de la fuente de alimentación, esto con el fin de poder conectarse a un osciloscopio y analizar la señal. Para esto se usó una tarjeta alimentadora del sensor y desacopladora de la señal, para las pruebas en el laboratorio, como se muestra en la Figura 27^[16].

Figura 27. Circuito alimentador del desacoplador de señal.



Fuente: AE Sensors & Preamplifiers Users Manual.

Tiene un diseño de circuito electrónico en donde se encuentran el circuito alimentador del sensor y el circuito desacoplador de la señal en una tarjeta

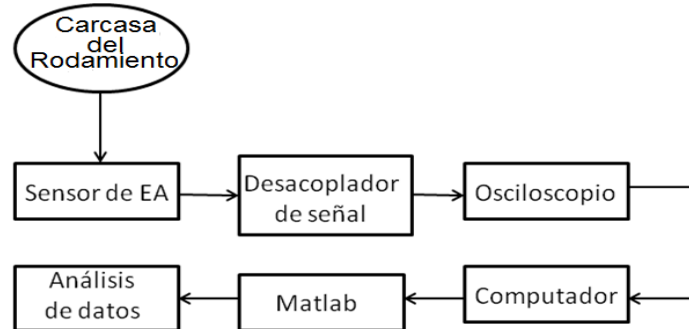
4.2.5 OSCILOSCOPIO RIGOL DS1102E SERIES

Para el procesamiento de la señal se utiliza un osciloscopio con puerto USB el cual permite capturar la señal del sensor proveniente del desacoplador y llevarla a un computador para su análisis en Matlab, mostradas en las figuras 28 y 29.

[16] R151 with Circuit Drawing.pdf

El osciloscopio permite guardar datos de la señal, imágenes de la onda. Para el análisis con Matlab sólo se requerirá de los datos de la señal, los cuales se encuentra en un formato CSV, estos datos se pueden leer por medio de Excel, el cual permite exportarlos a Matlab.

Figura 28. Esquema para la captura de la señal.

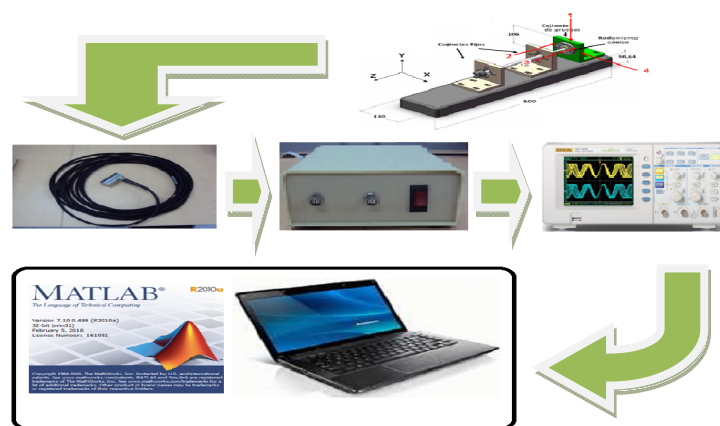


Fuente: Autores

4.2.6 FORMATO CSV

El formato CSV (del inglés *comma-separated values*), es un tipo de documento sencillo para representar datos en forma de tabla, en las que las columnas (campos) se separan por comas (o punto y coma en donde la coma es el separador decimal) y las filas por saltos de línea.

Figura 29. Sistema para la captura de la señal.



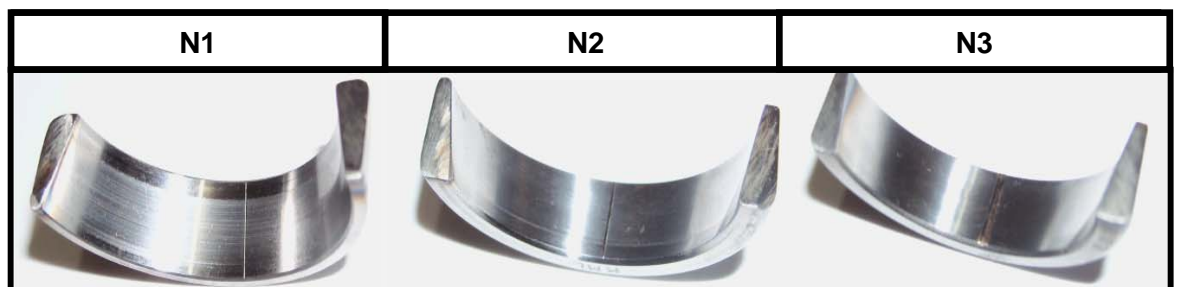
Fuente: Autores

4.3 INDUCCIÓN DE LA FALLA EN LAS PISTAS EXTERNA E INTERNA

Se seleccionó el rodamiento cónico NTN de referencia 30203 como rodamiento de pruebas ubicado en el apoyo del extremo del banco, el rodamiento cónico se utilizó por su facilidad de montaje y desmontaje en el banco de pruebas, además al inducir la falla tanto en la pista externa como interna no sufre el rodamiento otro tipo de falla.

La forma del defecto es una ralladura que fue realizada en un torno, utilizando una pastilla de tungsteno para inducir el defecto deseado en cualquiera de los niveles descritos en la Tabla 7, como se observa en la Figura 30 a) y b), para medir su tamaño (ancho y profundidad) mediante el video-microscopio.

Figura 30. Defectos presentes a) Pista externa, b) Pista interna.



a)

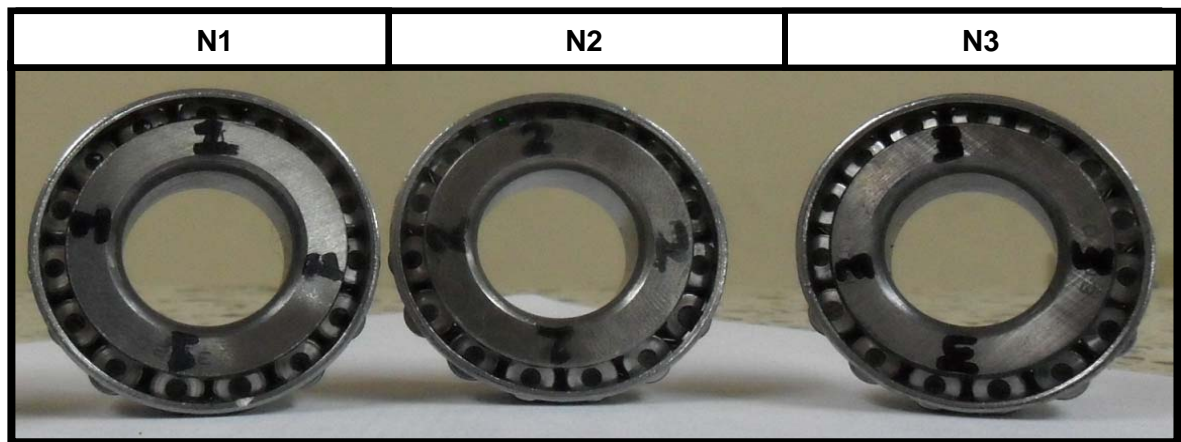


b)

Fuente: Autores

Para la pista interna fue necesario destrozarse las jaulas de los rodamientos, mientras que en otro rodamiento se extrajo la jaula en buen estado para utilizarla en la pista con falla inducida, utilizando para ello un disco de esmeril montado a un moto-tool. Una vez inducidas las fallas se ensambló el rodamiento (jaula en buen estado con los elementos rodantes y la pista interna con falla inducida), como se observa en la Figura 31.

Figura 31. Ensamble de la jaula en buen estado con los elementos rodantes y la pista interna con falla inducida.



Fuente: Autores

Este proceso se realizó con el fin de obtener las señales de las fallas en pistas externas e internas y compararlas con un rodamiento en condición normal para las diferentes etapas de progresión de la falla.

4.4 Caracterización de falla

Las fallas inducidas fueron medidas utilizando un video-microscopio HIROX KH-7700, Estas dimensiones se encuentran en la Tabla 7. Las figuras 32 a 37 fueron tomadas del video-microscopio.

Figura 32. Características del nivel de severidad 1 (N1) en Pista Externa

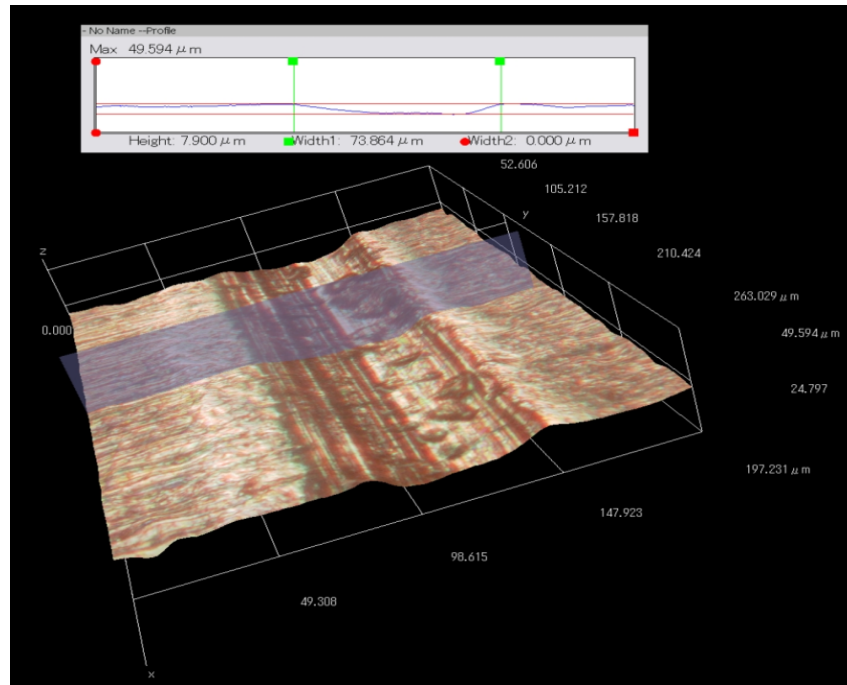
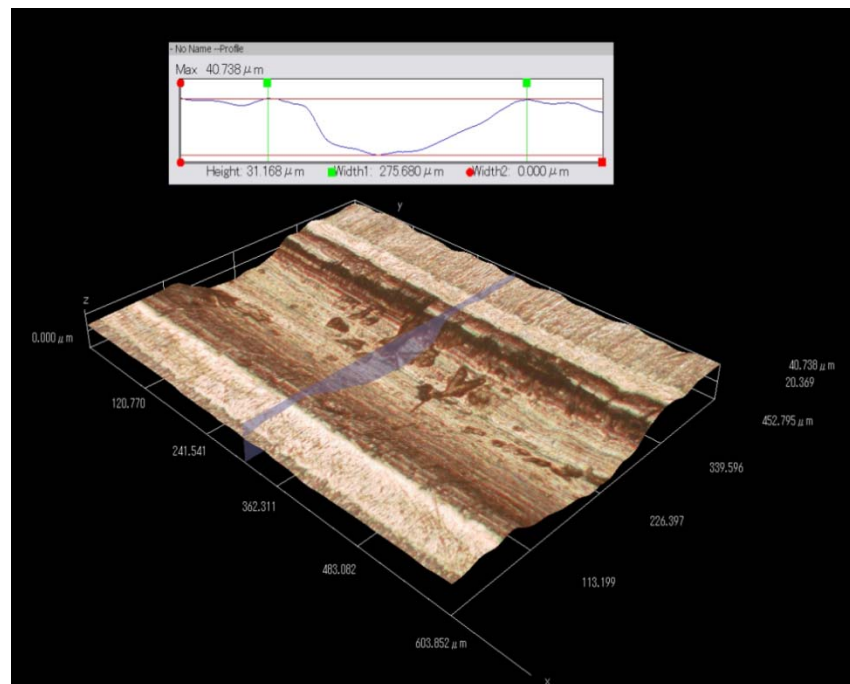


Figura 33. Características del nivel de severidad 2 (N2) en Pista Externa



Fuente: Autores.

Figura 34. Características del nivel de severidad 3 (N3) en Pista externa

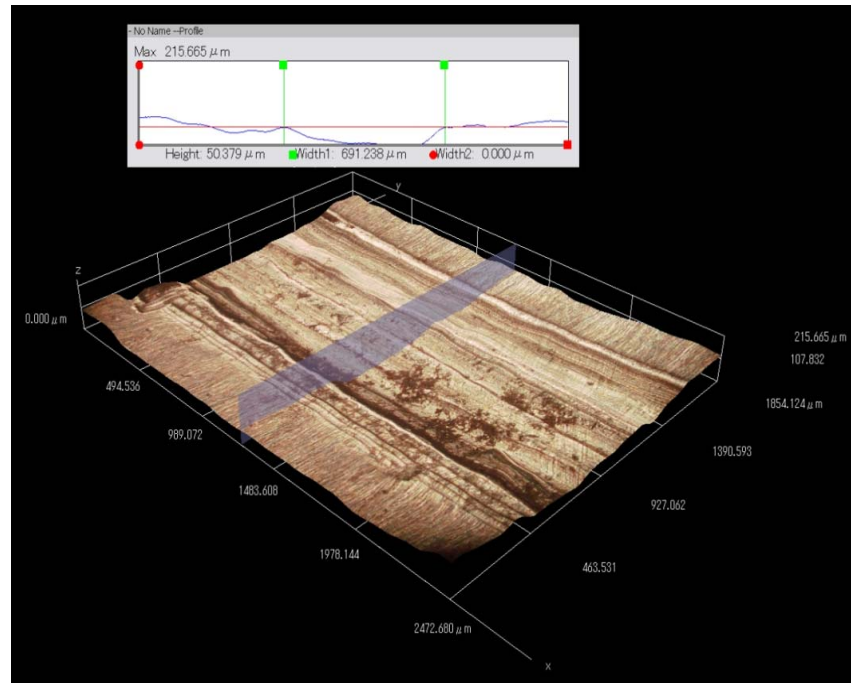
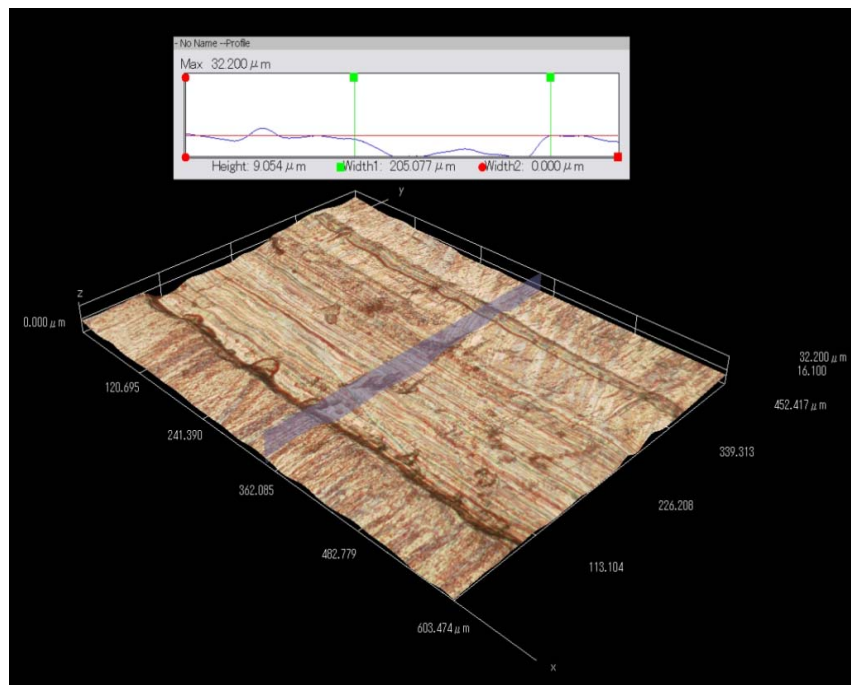


Figura 35. Características del nivel de severidad 1 (N1) en Pista interna



Fuente: Autores

Figura 36. Características del nivel de severidad 2 (N2) en Pista interna

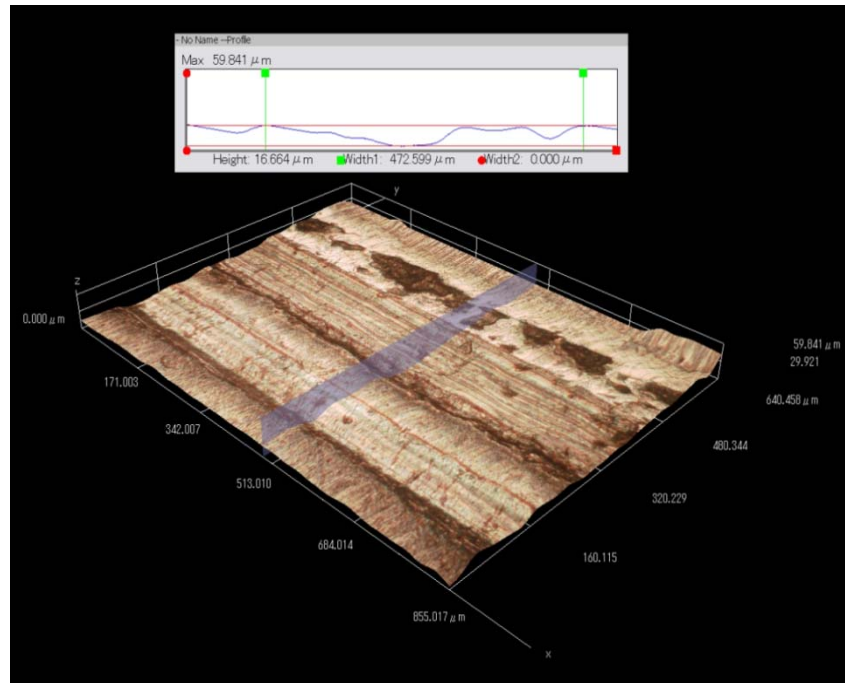
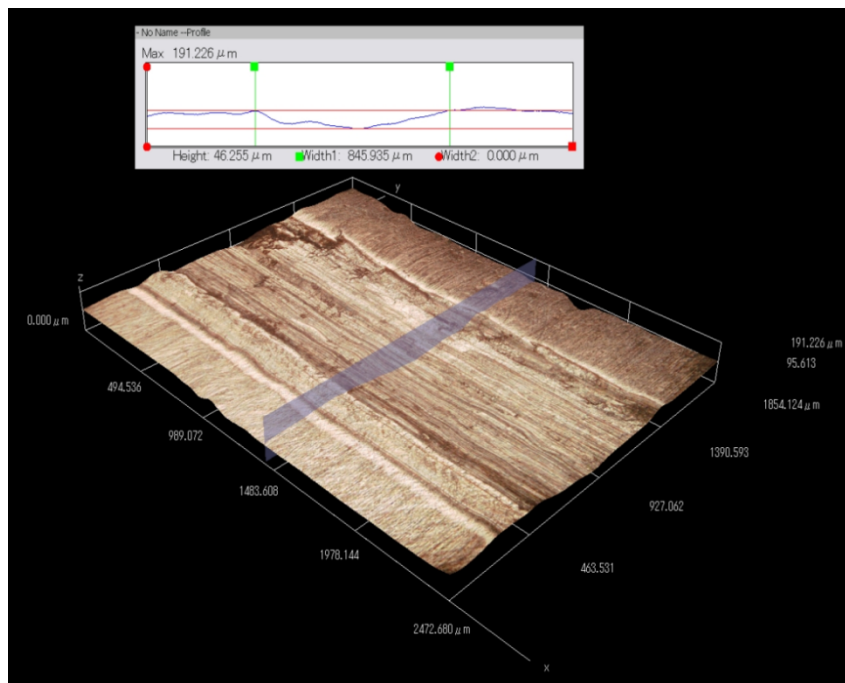


Figura 37. Características del nivel de severidad 3 (N3) en Pista interna



Fuente: Autores

Tabla 7. Dimensiones de la falla

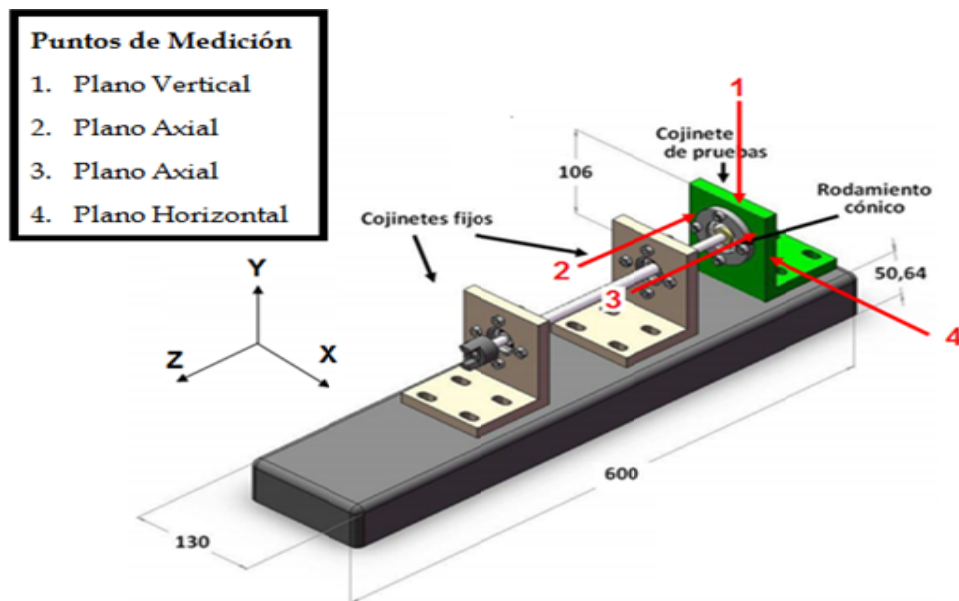
Pista	Niveles de severidad	Ancho	Profundidad
Externa	N1	73,864 μm	7,900 μm
	N2	275,680 μm	31,168 μm
	N3	691,238 μm	50,379 μm
Interna	N1	205,077 μm	9,054 μm
	N2	472,599 μm	16,664 μm
	N3	845,935 μm	46,255 μm

Fuente: Autores

4.5 PUNTO DE INSPECCIÓN EN EL SOPORTE DEL RODAMIENTO

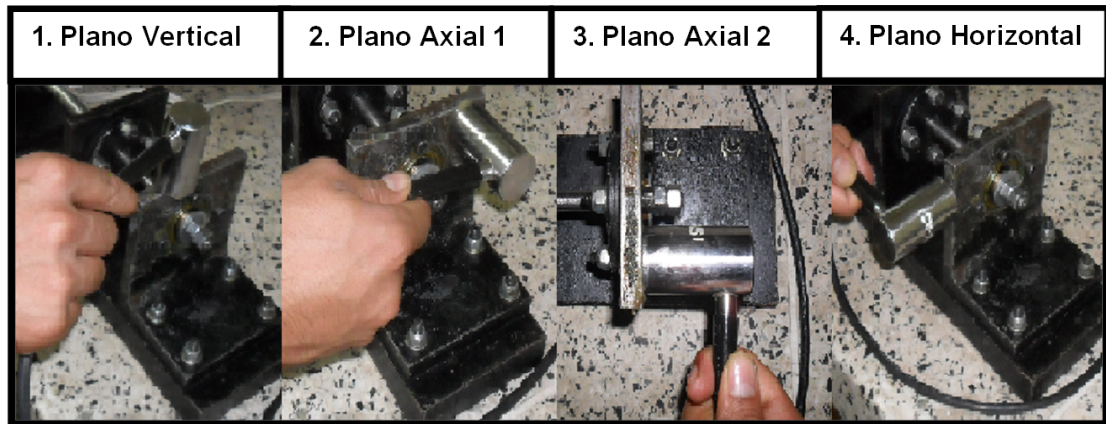
Con el fin de garantizar una buena toma de datos de las emisiones acústicas se realizó la búsqueda del mejor punto de inspección en el soporte del rodamiento de prueba, en donde el sensor realizó la captura de las emisiones acústicas; para ello se efectuaron varias tomas de datos en diferentes puntos en el soporte como se muestra en las Figura 38 y Figura 39.

Figura 38. Puntos de inspección



Fuente: autores

Figura 39. Orientaciones del sensor para los puntos de inspección



Fuente: Autores

De esta forma se llegó a que los puntos Axiales son los mejores para realizar la inspección del rodamiento, ya que permite al sensor realizar una buena captura de las emisiones acústicas generadas por el paso del elemento rodante sobre el defecto siendo este el fenómeno de análisis.

4.6 PROCEDIMIENTO

La prueba se realizó en el laboratorio de vibraciones donde se encuentra ubicado el banco de prueba de rodamientos. El procedimiento en cada prueba es el siguiente.

1. Alinear y balancear el banco para toma de datos.
2. Instalar en el banco el rodamiento de prueba.
3. Verificar las RPM del motor
4. Conectar el sensor y osciloscopio al desacoplador de la señal
5. El sensor deberá estar situado en los puntos de inspección mencionados.
6. Encender el banco y realizar las tomas correspondientes con el sensor.
7. Guardar en una USB los datos registrados por el osciloscopio.
8. Recopilar la información y procesarla mediante la ayuda del software MATLAB.
9. Realizar un análisis en dominio del tiempo con los parámetros de EA.

5. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN

En el presente capítulo se describe la metodología empleada en la medición de Emisiones Acústicas (EA), las cuales fueron tomadas para cuatro casos específicos: rodamiento en condición normal (N0), nivel de severidad 1 (N1), nivel de severidad 2 (N2), y por último con nivel de severidad 3 (N3). Para ello se utiliza un banco de ensayos del Laboratorio de Vibraciones de la Universidad Industrial de Santander.

5.1 METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN

Se desea capturar las señales de emisiones acústicas de un rodamiento cónico 30203 con y sin defectos inducidos para diferentes escenarios de falla mediante un sensor tipo piezoeléctrico WDIU-AST, posteriormente analizar la señal en el dominio del tiempo empleando la técnica de EMISIONES ACÚSTICAS.

La eficacia de la técnica se evaluará exclusivamente a fallas inducidas ubicadas en la pista externa e interna del rodamiento cónico, debido a que este punto por su ubicación presenta mayor facilidad y flexibilidad para realizar el defecto.

En este trabajo de grado se analizarán básicamente cuatro estados de la pista externa e interna del rodamiento cónico. En condición normal (N0) se tendrá las pistas sin defecto inducido. El primer nivel de falla (N1) será una línea (ralladura) en la pista, esto con el fin de que la falla sea apenas notoria o incipiente. El segundo nivel (N2) será una falla más pronunciada. El tercer nivel (N3) será una falla más marcada con respecto a las anteriores.

Una vez preparados los rodamientos se procede a tomar las lecturas de las señales de Emisiones Acústicas con el sensor piezoeléctrico, para el rodamiento en condición normal y sus tres escenarios de falla, pero se debe tomar en cuenta

que al tener que estar montando y desmontando continuamente las pistas externas para cada escenario de falla y al estar a su vez soltando y ajustando nuevamente las tuercas que presionan la canastilla contra el resto del conjunto del rodamiento, se hace necesario estar verificando constantemente durante todo el desarrollo de las mediciones ésta velocidad de giro del eje por medio de la lámpara estroboscópica (ya que el principal factor para esta fluctuación constante es el torque aplicado a las tuercas de sujeción entre pistas externa y canastilla un mínimo cambio en la velocidad de giro del eje, repercute directamente en la forma de onda de la señal de Emisión Acústica).

El procesamiento de la señal se implementa en dos etapas. En la primera, se utiliza un osciloscopio que captura la señal de las emisiones acústicas que proviene del sensor piezoeléctrico a una frecuencia de muestreo de 2,5 MHz en una ventana de tiempo de 0,4 segundos. A través del puerto USB del osciloscopio se guardan los valores de la señal en formato .CSV, los cuales pueden ser leídos y reconocidos por MATLAB. Posteriormente, los datos son exportados desde el osciloscopio para procesarlos en ambiente Matlab.

Para los distintos escenarios de falla, se tomaron de 10 y 15 muestras y se obtuvo el promedio aritmético de las mediciones como tratamiento estadístico de la señal.

5.2 DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN

Se mostrará a continuación las señales correspondientes a las tomas realizadas por el sensor piezoeléctrico para cada escenario de falla. En cada escenario de falla se indujeron 3 niveles. Las señales de Emisiones Acústicas procedentes de los rodamientos cónicos de prueba para este estudio, se procesaron en MATLAB para llevar a cabo la técnica Emisiones Acústicas y demostrar su efectividad en detección de fallas en rodamientos cónicos. Así mismo, mediante el ambiente MATLAB, se calcularon los parámetros de las Emisiones Acústicas.

5.2.1 DEFINICION DEL UMBRAL DE DETECCION DE RINGDOWN COUNTS

De acuerdo con la información recopilada, se encontró que el valor del umbral es subjetivo y queda determinado por la persona que haga el análisis y por el grado de conocimiento que esta tenga sobre el equipo.^[17]

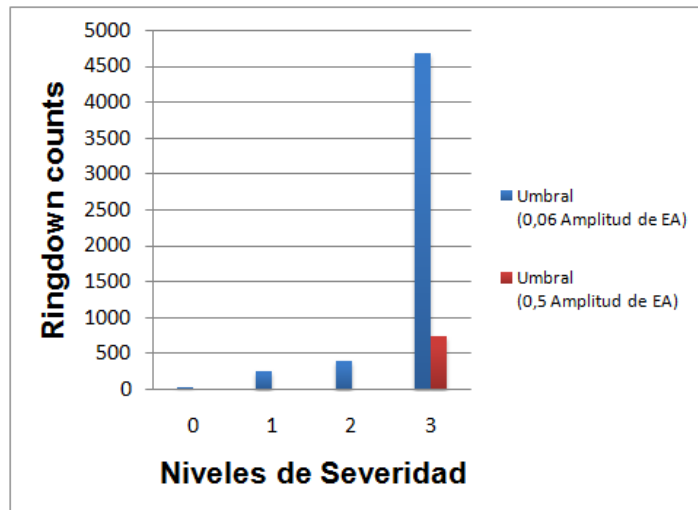
En nuestro caso, el criterio utilizado para establecer el nivel del umbral de detección de Ringdown counts en cada escenario de experimentación, en principio, se determinó con base al valor RMS de la señal de Emisiones acústicas. No obstante, los resultados obtenidos no fueron satisfactorios. Por tal razón, se optó por otra pauta. Esta consiste en fijar el umbral basado en el comportamiento en amplitud de señal contaminada con ruido. De tal forma que el umbral establecido permita cuantificar un número significativo de picos.

Análisis preliminares fueron realizados para establecer y evaluar el valor más apropiado del umbral para la los distintos escenarios de experimentación. Para las condiciones de: Rodamiento en condición normal (N0), Nivel de severidad 1 (N1) y 2 (N2) de falla se determino el valor del umbral en 0.06 y en 0.5 Amplitud de EA para el nivel de severidad 3 (N3) de falla.

Para propósitos de ilustración se agregan ambos casos (Figura 40) y la combinación de ellos (Figura 41), es decir, se trabaja con un umbral de 0,06 Amplitud de EA para las condiciones N0, N1 y N2, y por último para la condición N3 se emplea un umbral de 0,05 Amplitud de EA.

^[17] rolling element bearing fault diagnostics using the blind deconvolution technique Mahdi karimi

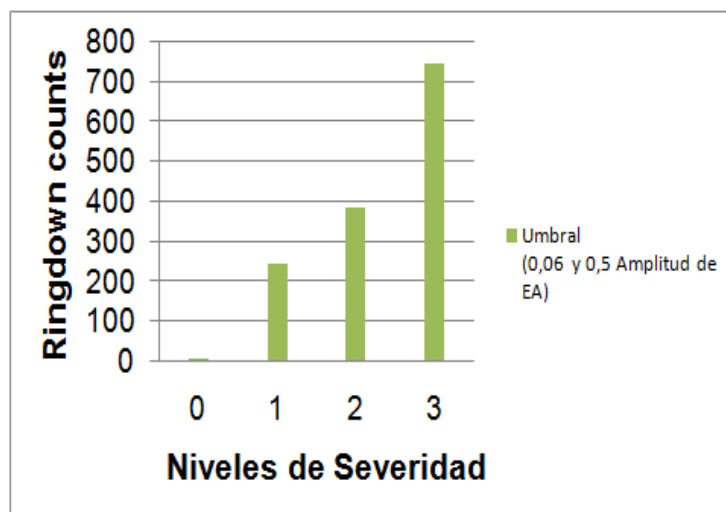
Figura 40. Evolución Ringdown counts para el caso de pista externa



Fuente: Autores

En la Figura 40 , se evidencia que con el valor de umbral de 0,06 Amplitud de EA el cambio de la magnitud del parámetro Ringdown counts, se dispara una vez supera el nivel 2 de severidad de falla. Por otro lado, se observa que con el valor de umbral de 0.5 no va a marcar nada en los niveles de severidad 1 y 2 de falla.

Figura 41. Evolución Ringdown counts para el caso de pista externa (Combinación Umbral 0,06 y 0,5 Amplitud de EA)



Fuente: Autores

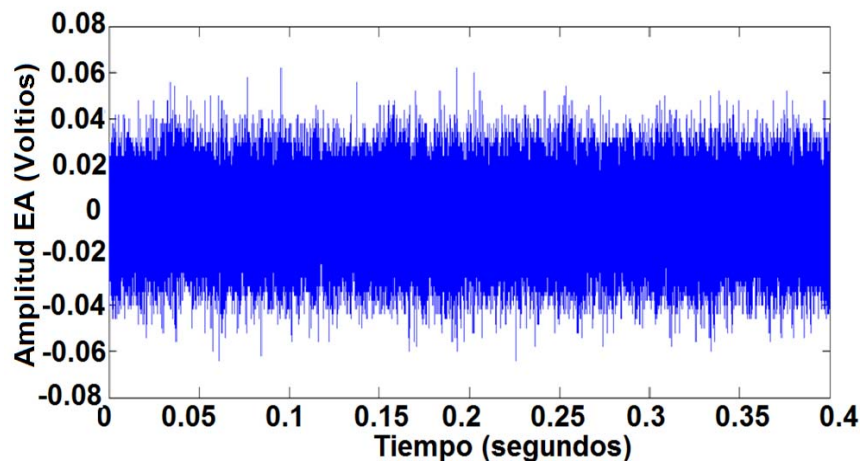
En la Figura 41, se observa una relación satisfactoria en cuanto su cambio de magnitud del parámetro ante el cambio de su nivel de severidad, usando la combinación de los dos umbrales.

Del anterior análisis, se puede derivar que para un mejor establecimiento de la falla es necesario establecer dos umbrales; uno para la falla incipiente y el otro para cuando la falla ha avanzado

5.2.2 ANÁLISIS A RODAMIENTO EN CONDICION NORMAL

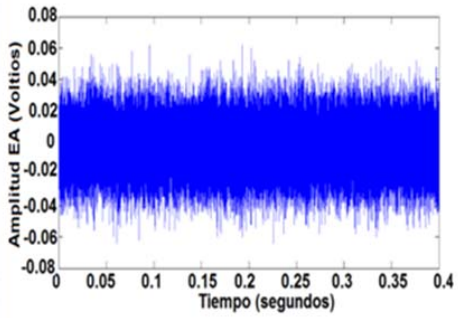
Se analizó un rodamiento cónico en condición normal con el fin de establecer el estado inicial y como punto de comparación, en lo que se refiere a cambios de las características de onda de la señal EA a medida que se aumentaba el tamaño del defecto, para cada escenario de prueba

Figura 42. Señal de EA de rodamiento en condición normal



Fuente: Autores

Tabla 8. Parámetros de emisiones acústicas rodamiento en condición normal

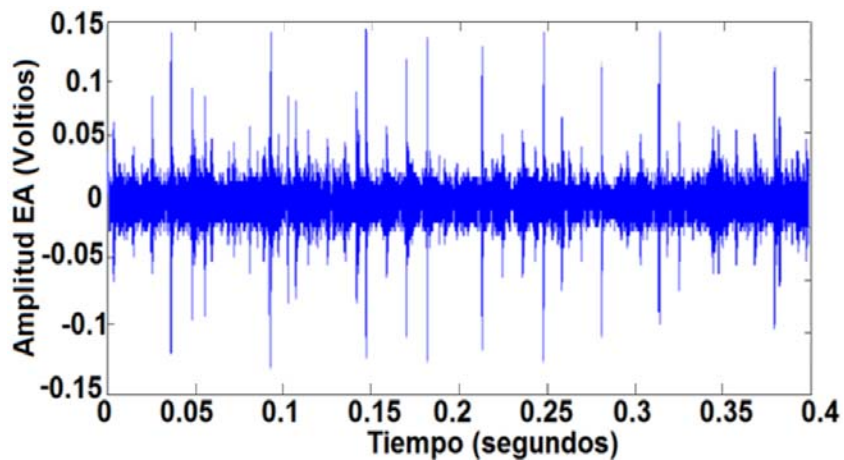
# Pruebas	Valor pico	RMS	Kurtosis	Ringdown counts		FORMA DE ONDA SEÑAL EA
				Umbral (Amplitud de EA) 0,06	0,5	
1	0,0600	0,0033	3,0981	0	0	
2	0,0500	0,0031	3,1595	0	0	
3	0,0860	0,0038	3,1880	1	0	
4	0,0600	0,0039	3,7164	0	0	
5	0,0620	0,0036	3,2103	0	0	
6	0,0680	0,0036	3,2456	4	0	
7	0,0560	0,0033	2,7683	0	0	
8	0,0700	0,0039	2,9335	8	0	
9	0,0680	0,0038	2,8483	3	0	
10	0,0680	0,0037	3,2209	3	0	
11	0,0620	0,0038	2,8483	3	0	
12	0,0620	0,0035	3,0190	1	0	
13	0,0520	0,0036	2,8307	0	0	
14	0,0520	0,0034	3,0306	0	0	
15	0,0560	0,0035	2,8907	0	0	
Promedio	0,0621	0,0036	3,0672	1,5333	0	

Fuente: Autores

5.2.3 RODAMIENTO CON NIVEL DE SEVERIDAD 1 EN LA PISTA EXTERNA

Primer nivel de severidad de la falla que presenta un defecto apenas visible en la pista externa del rodamiento.

Figura 43. Señal de EA de rodamiento con N1 de falla en pista externa



Fuente: Autores

Tabla 9. Parámetros de emisiones acústicas rodamiento con N1 de falla en pista externa

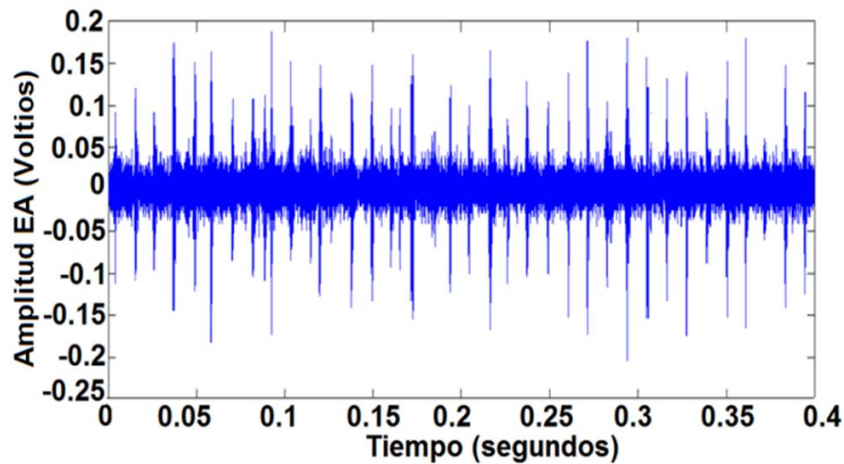
# Pruebas	Valor pico	RMS	Kurtosis	Ringdown counts		FORMA DE ONDA SEÑAL EA
				Umbral (Amplitud de EA) 0,06	0,5	
1	0,1720	0,004200	6,1780	165	0	
2	0,1440	0,004100	9,1589	178	0	
3	0,1580	0,004500	5,1608	218	0	
4	0,1760	0,005700	7,1617	175	0	
5	0,1680	0,003800	7,5143	80	0	
6	0,1760	0,004000	7,2284	291	0	
7	0,1400	0,004600	5,3503	393	0	
8	0,1840	0,004500	6,7352	278	0	
9	0,1740	0,004000	6,1228	161	0	
10	0,1680	0,004100	5,4961	388	0	
11	0,1840	0,004500	6,2662	186	0	
Promedio	0,1676	0,0044	6,5793	228,4545	0	

Fuente: Autores

5.2.4 RODAMIENTO CON NIVEL DE SEVERIDAD 2 EN LA PISTA EXTERNA

Segundo nivel de severidad en la pista, es decir el defecto es más pronunciado con el fin de que la amplitud de la señal gane más energía y sea aun más notoria.

Figura 44. Señal de EA de rodamiento con N2 de falla en pista externa



Fuente: Autores

Tabla 10. Parámetros de emisiones acústicas rodamiento con N2 de falla en pista externa

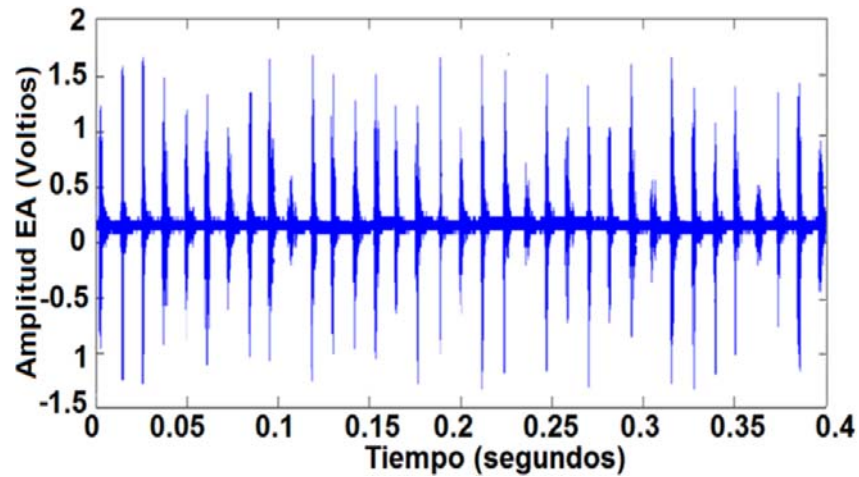
# Pruebas	Valor pico	RMS	Kurtosis	Ringdown counts		FORMA DE ONDA SEÑAL EA
				Umbral (Amplitud de EA)		
				0,06	0,5	
1	0,1880	0,0049	12,2725	315	0	
2	0,2120	0,0043	14,4454	310	0	
3	0,2520	0,0043	19,3412	250	0	
4	0,2480	0,0047	12,8478	271	0	
6	0,2080	0,0046	14,5630	334	0	
7	0,1640	0,0045	10,5541	347	0	
8	0,256	0,0043	10,4197	687	0	
9	0,2640	0,0044	13,3700	330	0	
10	0,2480	0,0048	10,3428	535	0	
11	0,1760	0,0045	12,6188	481	0	
Promedio	0,2216	0,0046	13,0775	386,0000	0,0000	

Fuente: Autores

5.2.5 RODAMIENTO CON NIVEL DE SEVERIDAD 3 EN LA PISTA EXTERNA

Tercer nivel de severidad de falla, se tiene una falla más marcada con respecto a los niveles anteriores.

Figura 45. Señal de EA de rodamiento con N3 de falla en pista externa



Fuente: Autores

Tabla 11. Parámetros de emisiones acústicas rodamiento con N3 de falla en pista externa

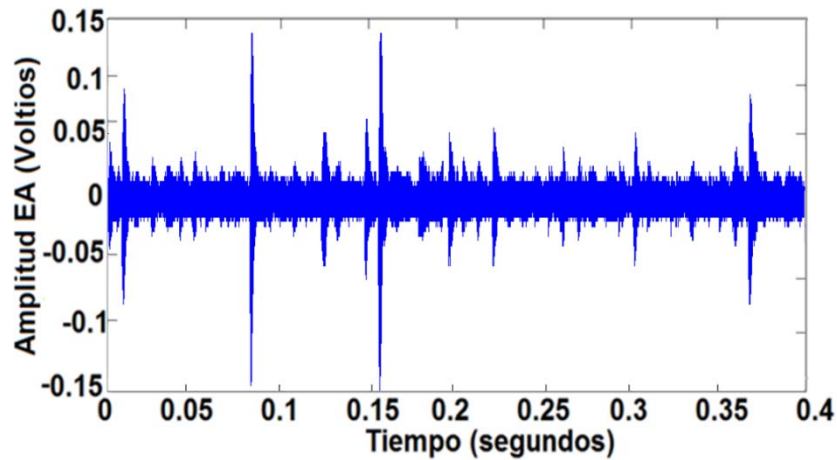
# Pruebas	Valor pico	RMS	Kurtosis	Ringdown counts		FORMA DE ONDA SEÑAL EA
				Umbral (Amplitud de EA)		
				0.06	0.5	
1	1,84	0,0146	28,0109	3005	792	
2	1,56	0,0141	20,4945	3407	572	
3	2,00	0,0135	20,0590	5572	770	
4	2,16	0,0142	29,6209	4168	951	
5	1,8	0,0127	30,7710	7702	625	
6	2,04	0,0137	28,4592	4452	666	
7	1,36	0,0105	27,3729	5006	778	
8	1,64	0,0133	25,7191	5211	701	
9	1,68	0,0131	31,9334	4768	598	
10	1,84	0,0139	25,0668	4819	915	
11	1,64	0,0145	23,8802	3361	843	
Promedio	1,78	0,013464	26,48981	4679,18182	746	

Fuente: Autores

5.2.6 RODAMIENTO CON NIVEL DE SEVERIDAD 1 EN LA PISTA INTERNA

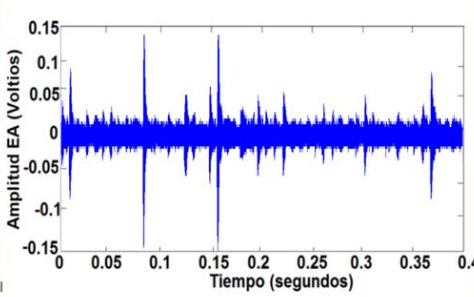
Se intento realizar el defecto lo más similarmente posible al de la condición para pista externa. Sin embargo, por factores de espacio para inducir la falla se nota una diferencia relativamente superior en cuanto a tamaño se refiere.

Figura 46. Señal de EA de rodamiento con N1 de falla en pista interna



Fuente: Autores

Tabla 12. Parámetros de emisiones acústicas rodamiento con N1 de falla en pista interna

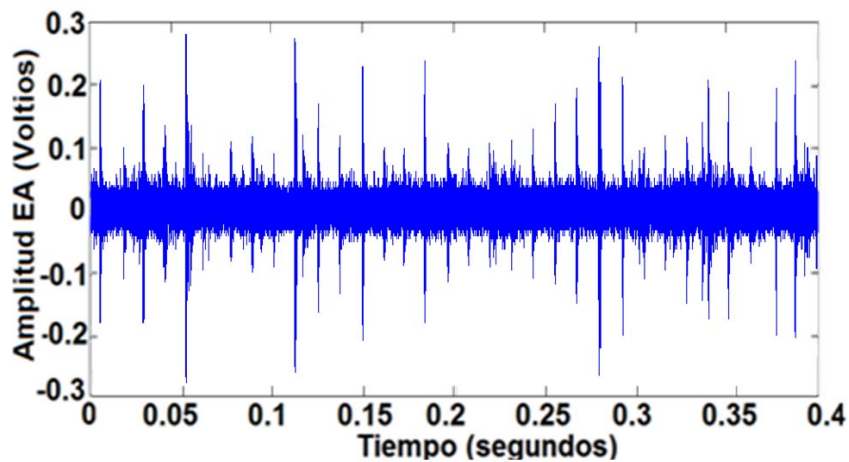
# Pruebas	Valor pico	RMS	Kurtosis	Ringdown counts Umbral (Amplitud de EA)		FORMA DE ONDA SEÑAL EA
				0,6	0,5	
1	0,1760	0,0037	21,3167	90	0	
2	0,1320	0,0038	17,9118	81	0	
3	0,1360	0,0036	23,0942	82	0	
4	0,1640	0,0037	18,7765	149	0	
5	0,1880	0,0037	19,0647	155	0	
6	0,1480	0,0038	12,1740	129	0	
7	0,1560	0,0039	14,6003	136	0	
8	0,1520	0,0037	12,0053	63	0	
9	0,1480	0,0037	12,1740	115	0	
10	0,1640	0,0039	15,5098	125	0	
11	0,1600	0,0038	12,8602	108	0	
13	0,1440	0,0039	11,5648	135	0	
12	0,1600	0,0038	12,9227	97	0	
Promedio	0,1553	0,0038	15,6904	112,6923	0	

Fuente: Autores

5.2.7 RODAMIENTO CON NIVEL DE SEVERIDAD 2 EN LA PISTA INTERNA

Segundo nivel de severidad en la pista, lo cual quiere decir que el defecto es más pronunciado.

Figura 47. Señal de EA de rodamiento con N2 de falla en pista interna



Fuente: Autores

Tabla 13. Parámetros de emisiones acústicas rodamiento con N2 de falla en pista interna

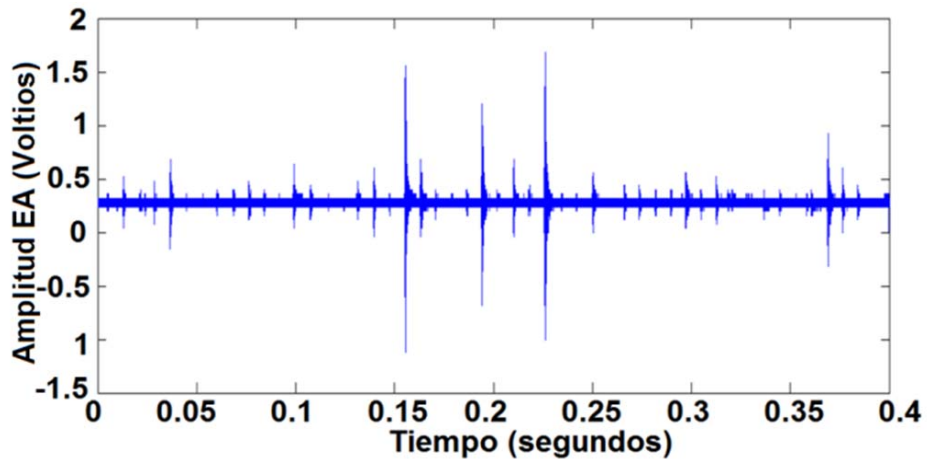
# Pruebas	Valor pico	RMS	Kurtosis	Ringdown counts Umbral (Amplitud de EA)		FORMA DE ONDA SEÑAL EA
				0,6	0,5	
1	0,2400	0,0051	33,4223	226	0	
2	0,2720	0,0053	33,7168	310	0	
3	0,2640	0,0037	37,7795	288	0	
4	0,2160	0,0046	35,0388	261	0	
5	0,2240	0,0050	35,8875	187	0	
6	0,2880	0,0040	33,8775	526	0	
7	0,2720	0,0042	30,4461	362	0	
8	0,2240	0,0051	28,9722	213	0	
9	0,2320	0,0049	28,9675	237	0	
10	0,2560	0,0050	34,6268	203	0	
11	0,2160	0,0036	37,3576	305	0	
12	0,2240	0,0049	36,9441	155	0	
13	0,2480	0,0052	26,6241	284	0	
14	0,256	0,0052	30,3262	254	0	
Promedio	0,2451	0,0047	33,1419	272,2143	0	

Fuente: Autores

5.2.8 RODAMIENTO CON NIVEL DE SEVERIDAD 3 EN LA PISTA INTERNA

Tercer nivel de severidad de falla, para esta condición de operación la falla es muy parecida al defecto en pista externa.

Figura 48. Señal de EA de rodamiento con N3 de falla en pista interna



Fuente: Autores

Tabla 14. Parámetros de emisiones acústicas rodamiento con N3 de falla en pista interna

# Pruebas	Valor pico	RMS	Kurtosis	Ringdown counts Umbral (Amplitud de EA)		FORMA DE ONDA EA
				0,6	0,5	
1	1,4400	0,0184	66,2991	125	576	
2	1,6000	0,0172	87,1848	196	344	
3	1,3600	0,0168	40,0004	205	280	
4	1,5600	0,0166	46,5393	380	386	
5	1,8000	0,0171	50,8840	441	604	
6	1,3600	0,0169	81,5169	232	338	
7	1,5200	0,0167	58,3744	339	402	
8	1,5600	0,0165	58,7622	406	428	
9	1,6800	0,0166	88,4312	216	216	
10	1,2800	0,0164	35,2074	498	471	
11	1,5200	0,0167	58,3744	339	402	
Promedio	1,5164	0,0168	61,0522	307,0000	404,2727	

Fuente: Autores

De los resultados obtenidos (ver Tabla 8), se observa que para la condición normal del rodamiento el valor pico de la señal de EA, una vez promediados los valores de las pruebas, es de 0.0621 Amplitud de EA.

Cuando el rodamiento está en buen estado y funciona bien, la señal de Emisión Acústica está sujeta a una distribución normal y la Kurtosis es cercana a 3. La tabla 8, indica los parámetros de las emisiones acústicas analizadas para el rodamiento en buen estado. Es claro que el valor de Kurtosis de la señal EA está alrededor de 3, lo cual significa que la condición del rodamiento es buena.

Notablemente, bajo el escenario en pista externa con nivel 1, 2 y 3 de falla, el valor del parámetro pico de la señal de Emisiones Acústicas (0.1671, 0.2260, 1.72 Amplitud de EA respectivamente) es bastante distinto en comparación con el rodamiento en buen estado (0,0621 Amplitud de EA)

Para el caso de pista externa con nivel 2 de falla, se observa que la presencia de Emisiones Acústicas es más evidente, es decir, la señal registra una mayor cantidad de picos generalmente de la misma magnitud de amplitud, mientras que con el nivel 1 de falla la aparición de EA es poca, probablemente por el tamaño de defecto.

En el caso de pista externa con nivel 3 de falla, se observan que las Emisiones Acústicas (Tabla 11) están mejor definidas y distribuidas una en relación a la otra; pues resulta fácil identificar cuando es el inicio de un evento así como su final con respecto a las que se encuentran en su vecindad. Por otra parte, la forma de onda de la señal de Emisión Acústica dista bastante de la señal de EA del rodamiento en condición normal, rodamiento con nivel 1 de falla y rodamiento con nivel 2 de falla, observándose así picos más pronunciados y densos.

Para la condición con nivel 1, 2 y 3 de falla en pista interna, se observa un aumento en el Valor Pico (0.1564, 0.2451, 1.51 Amplitud de EA respectivamente) con respecto al rodamiento en condición normal (0.0621 Amplitud de EA), resaltando el valor de 1.51 Amplitud de EA que sobresale en grandes proporciones de los anteriores (0.1564, 0.2451 y 0.0621); posiblemente a causa del tamaño del defecto que es demasiado mayor a las demás fallas inducidas.

5.3 ESPECTROS OBTENIDOS CON EL ANALIZADOR CSI

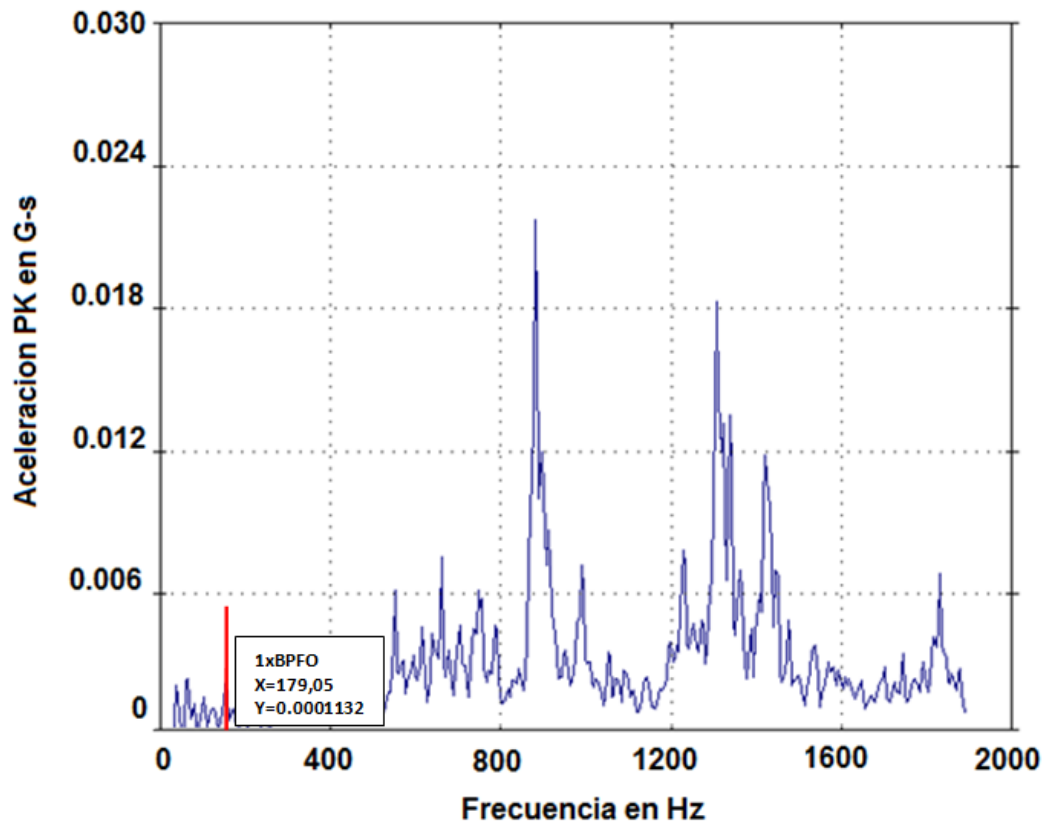
A continuación se mostraran los espectros correspondientes a los análisis de vibraciones para cada escenario de falla en los rodamientos obtenidos de la experiencia.

Al reemplazar los datos técnicos suministrados por el fabricante, se puede determinar la Frecuencia de paso de los elementos rodantes por la Pista Exterior (BPFO) y Pista interior (BPFI)

$$BPFO = \left| \frac{15}{2} (1620 - 0) \left(1 - \frac{2.02 * \cos 13}{17} \right) \right| \Rightarrow \mathbf{BPFO = 179.05 \text{ Hz}}$$

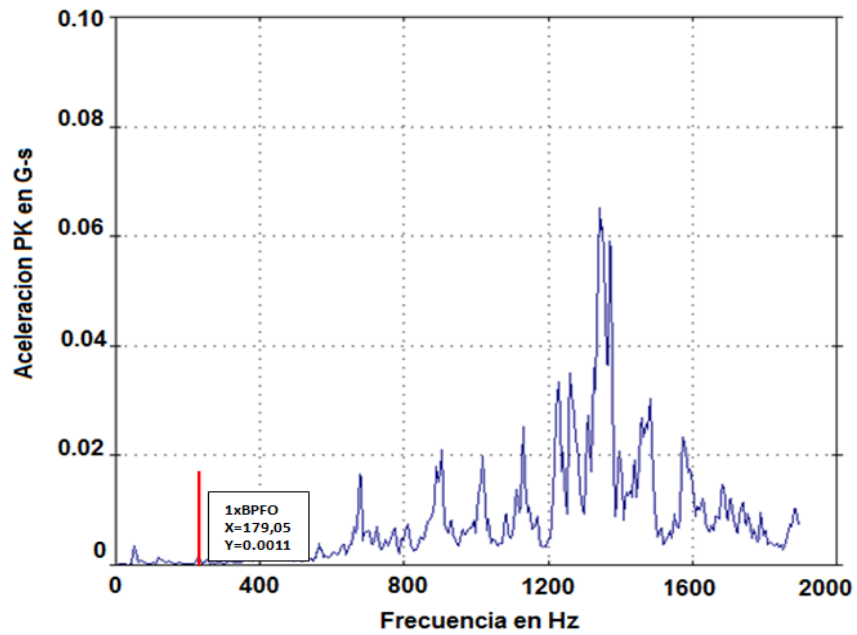
$$BPFI = \left| \frac{15}{2} (1620 - 0) \left(1 + \frac{2.02 * \cos 13}{17} \right) \right| \Rightarrow \mathbf{BPFI = 225.94 \text{ Hz}}$$

Figura 49. Espectro de la vibración para rodamiento en condición normal



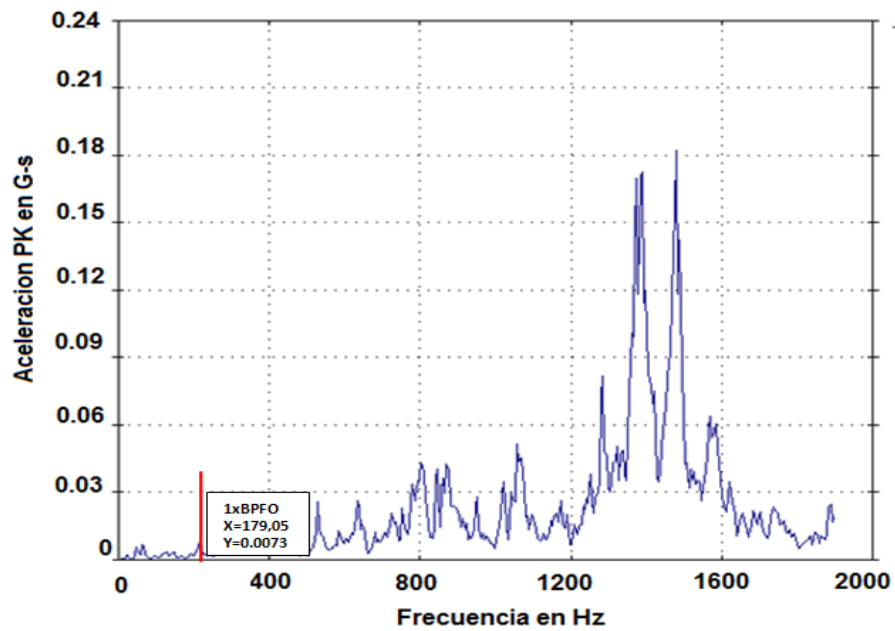
Fuente: Autores

Figura 50. Espectro de la vibración para rodamiento con nivel de severidad 1 (N1) de severidad de falla en pista externa.



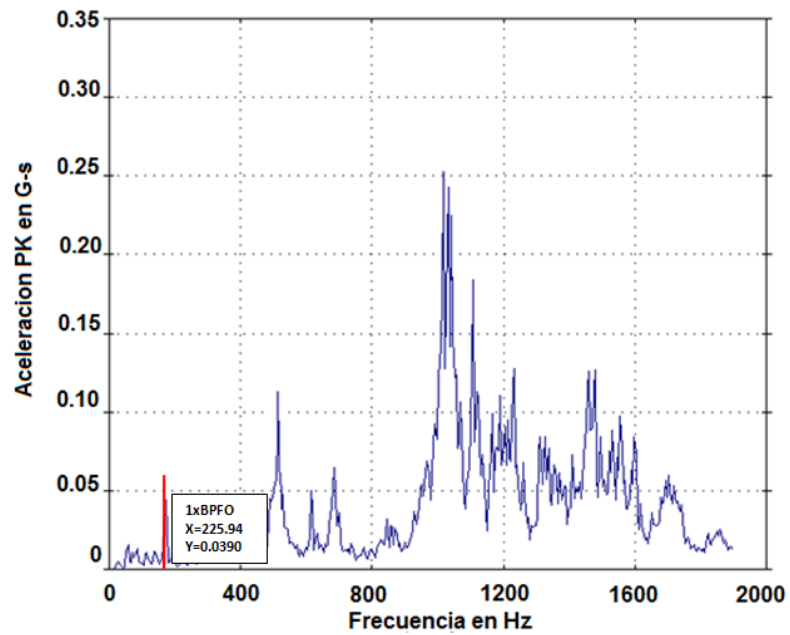
Fuente: Autores

Figura 51. Espectro de la vibración para rodamiento con nivel de severidad 2 (N2) de falla en pista externa



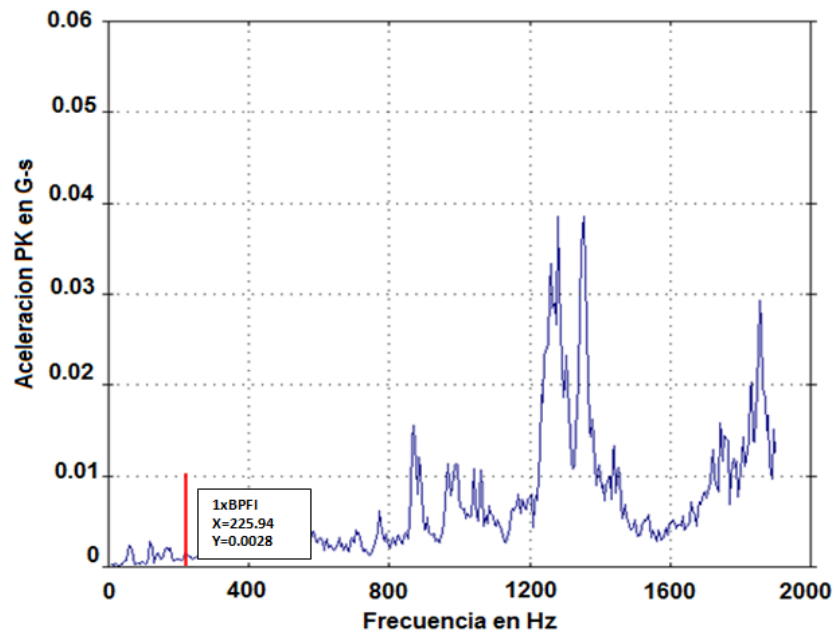
Fuente: Autores

Figura 52. Espectro de la vibración para rodamiento con nivel de severidad 3 (N3) de falla en pista externa



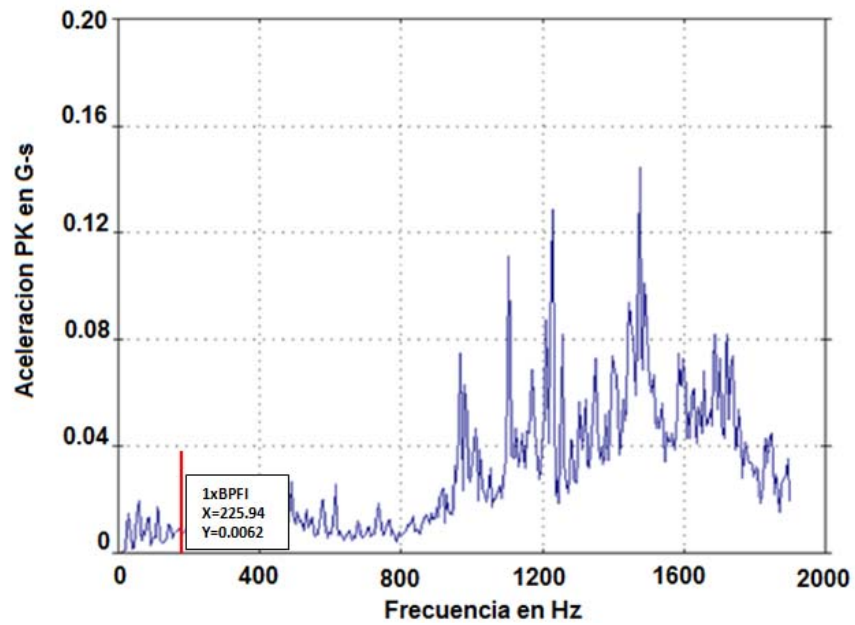
Fuente: Autores

Figura 53. Espectro de la vibración para rodamiento con nivel de severidad 1 (N1) de falla en pista interna.



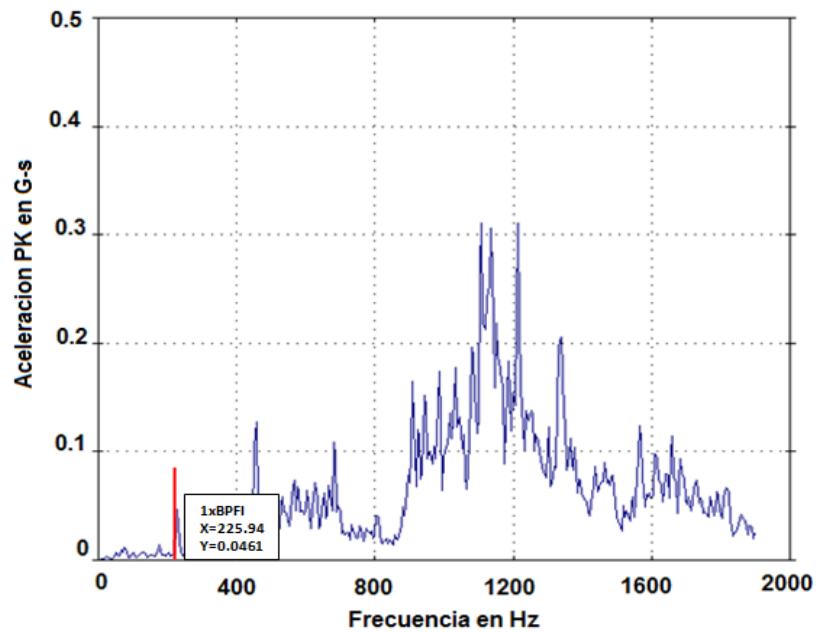
Fuente: Autores

Figura 54. Espectro de la vibración para rodamiento con nivel de severidad 2 (N2) de severidad de falla en pista interna.



Fuente: Autores

Figura 55. Espectro de la vibración para rodamiento con nivel de severidad 3 (N3) de falla en pista interna.



Fuente: Autores

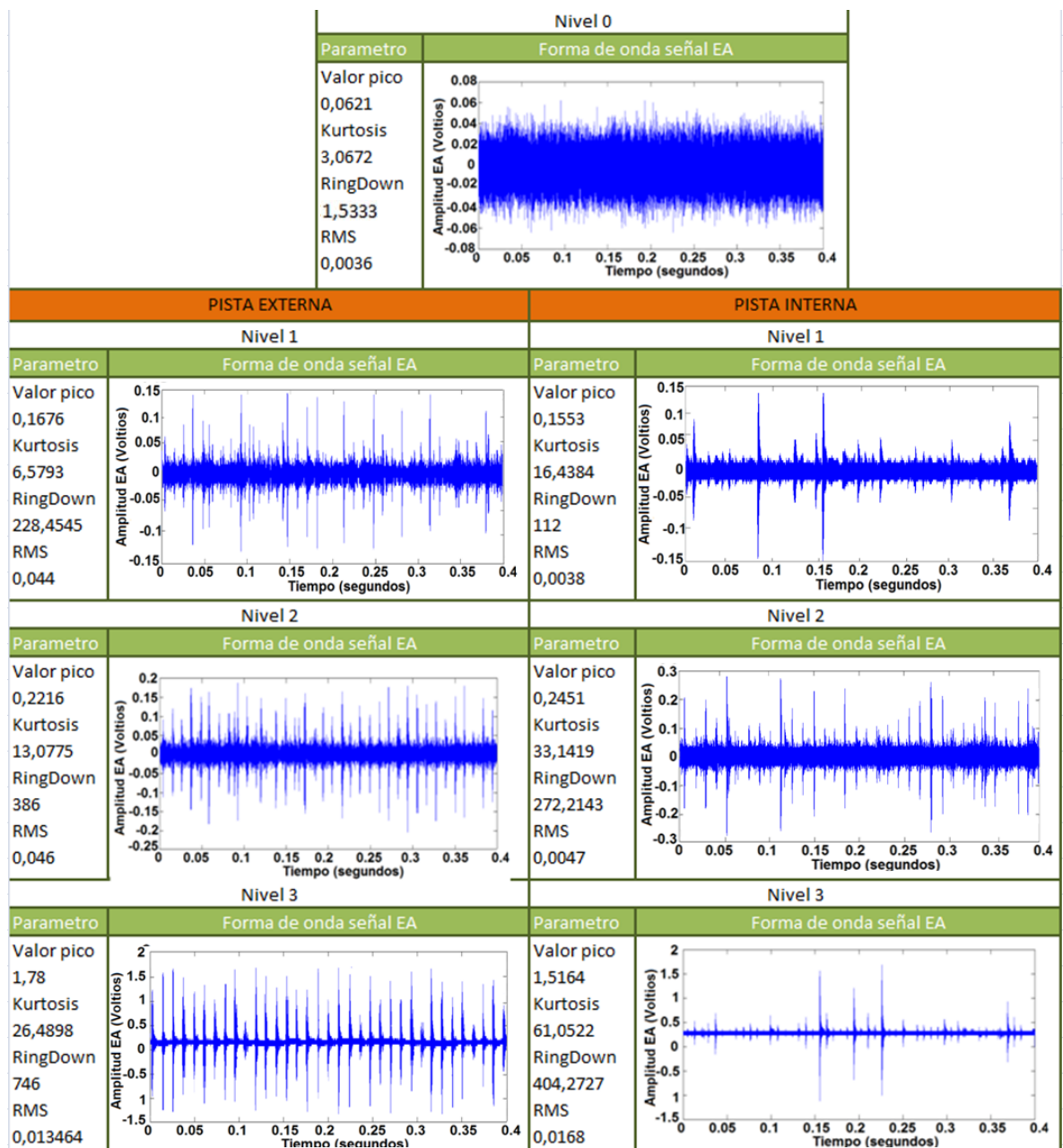
En las figuras 49 a 55, se muestran los espectros en unidades de aceleración obtenidos bajo distintos escenarios de experimentación en pista externa y pista interna. Se puede observar que en la frecuencia de falla asociada para pista externa (BPFO) como en interna (BPF1) a medida que aumentamos el tamaño del defecto, solo se hace evidenciable un cambio relativamente significativo en el valor de la amplitud en los casos de nivel 3 de severidad de falla; para pista externa (aumenta de 0.0011320 en el nivel 1 a 0.0390 en el nivel 3), de la misma forma, para el caso de pista interna (aumenta de 0.0028 en el nivel 1 a 0.0461 en el nivel 3); de tal manera que podemos evidenciar que por medio del análisis de vibraciones tradicional en función de la frecuencia no se puede detectar en su etapa incipiente la aparición del defecto en el rodamiento en la pista interna y/o externa del rodamiento. Por lo mencionado anteriormente podemos concluir que con el espectro de la vibración para análisis de rodamientos, solo se podrán observar valores de alta energía si el defecto del rodamiento es de tamaño apreciable, situación en la cual el tiempo de vida útil del rodamiento se reduce. Por esta razón, vemos la necesidad de aplicar un método alternativo de análisis de vibraciones para fallas de rodamientos el cual nos permita detectar la aparición de la falla y poder solucionar el problema de fallas en rodamientos.

6. ANALISIS DE RESULTADOS

En la siguiente ilustración Figura 56, podemos apreciar un cuadro comparativo cuyo contenido revela las señales de las emisiones acústicas representadas en el dominio del tiempo para diferentes escenarios, especificando los resultados de los parámetros analizados para cada escenario en el presente estudio. En la parte superior observamos la señal de emisión acústica para el rodamiento cónico en condición normal; en la parte lateral izquierda observamos las señales de emisiones para los casos de defecto inducido sobre la pista externa y en la parte lateral derecha observamos las señales de emisiones acústicas para el caso de defectos realizados en la pista interna del rodamiento. Desde arriba hacia abajo, en ese orden, el nivel de severidad de falla se va aumentando, esta disposición se elige con el propósito de que se pueda observar los cambios en las características de la señal así como de los valores de sus parámetros a medida que aumenta el tamaño del defecto para cada escenario de falla planteado.

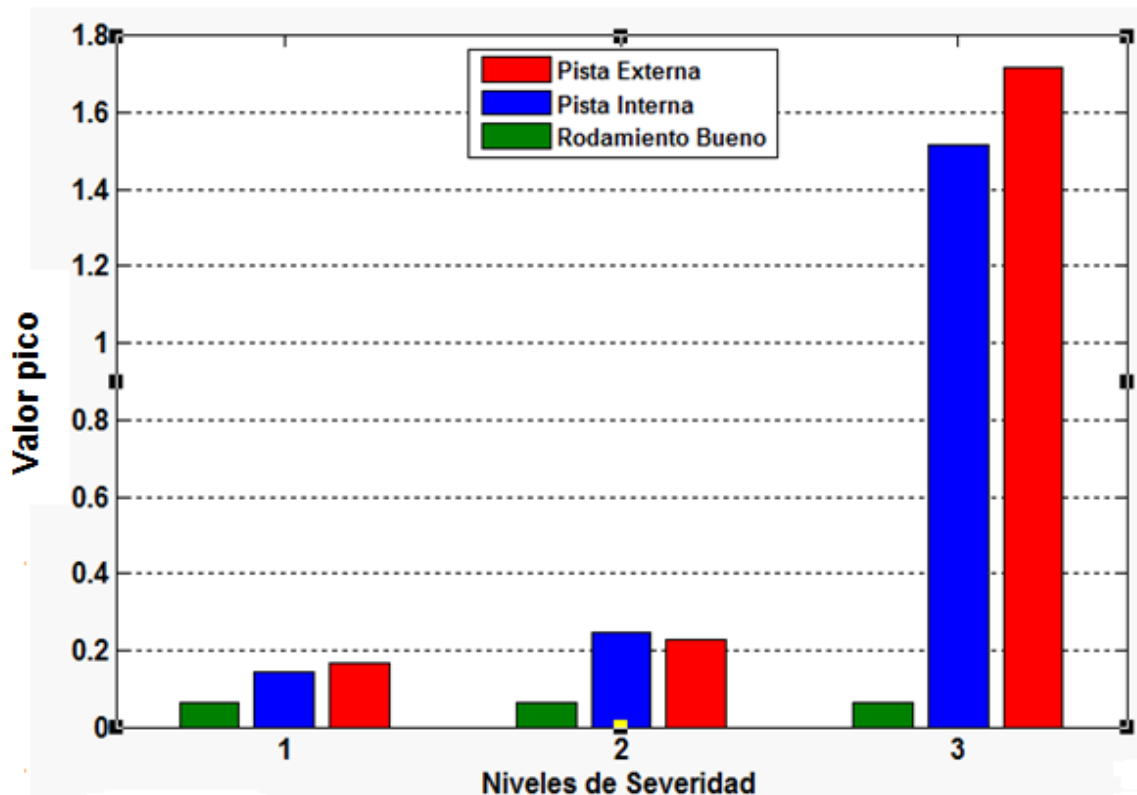
Observándose así en estas señales el aumento de las Emisiones Acústicas (EA) a medida que aumenta el nivel de severidad de falla para el caso de pista externa y pista interna, lo cual representa mayor cantidad de Ringdown counts, esto cuantitativamente se puede comprobar observando el valor de Ringdown counts para cada condición de prueba. Por otro lado, para el caso de pista interna, se puede apreciar que la aparición de Emisiones Acústicas son muy pocas comparadas con el escenario de pista externa. Además, aunque hay presencia de ellas, la mayoría en amplitud son muy bajas con respecto a las más altas.

Figura 56. Comparativo entre las formas de ondas de las señales de EA para pista externa e interna.



Fuente: Autores

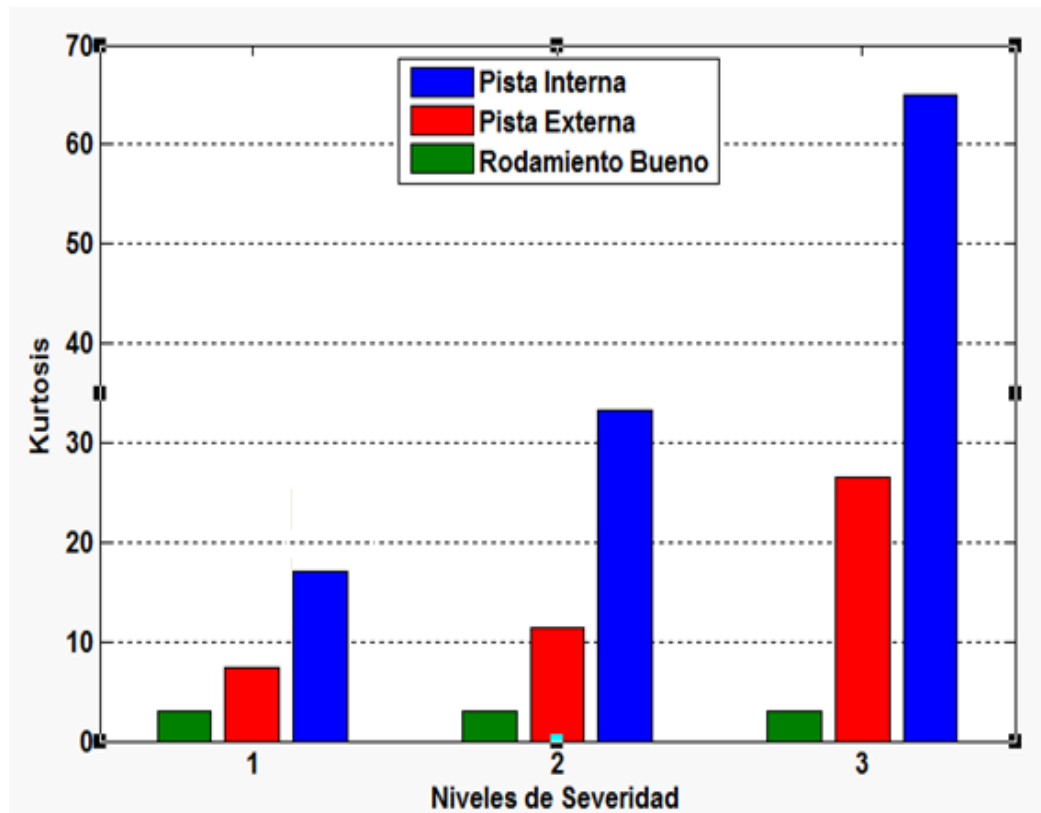
Figura 57. Comparación parámetro Valor Pico para varias condiciones en pista externa e interna



Fuente: Autores

En la Figura 57, se puede observar que el Valor Pico de la señal de EA aumenta al variar el tamaño del defecto, para el caso de pista externa y pista interna en cada nivel de severidad. Aunque, este aumento no es muy significativo en el nivel 1 y 2. Pasando a un segundo plano, centrándose en el rango del nivel 1 a 2 de severidad de falla, podemos inferir que durante estas condiciones de prueba el Valor Pico asociado al caso de pista interna y externa se incrementa relativamente con respecto al rodamiento bueno. En contraste con el nivel 3 de severidad, donde se nota un salto considerablemente en amplitud comparado, a su vez, con el nivel 1, 2 y el rodamiento en condición normal, lo cual puede relacionarse con la falla; toda vez que esta es mucho mayor con respecto al nivel 1 y 2 de severidad.

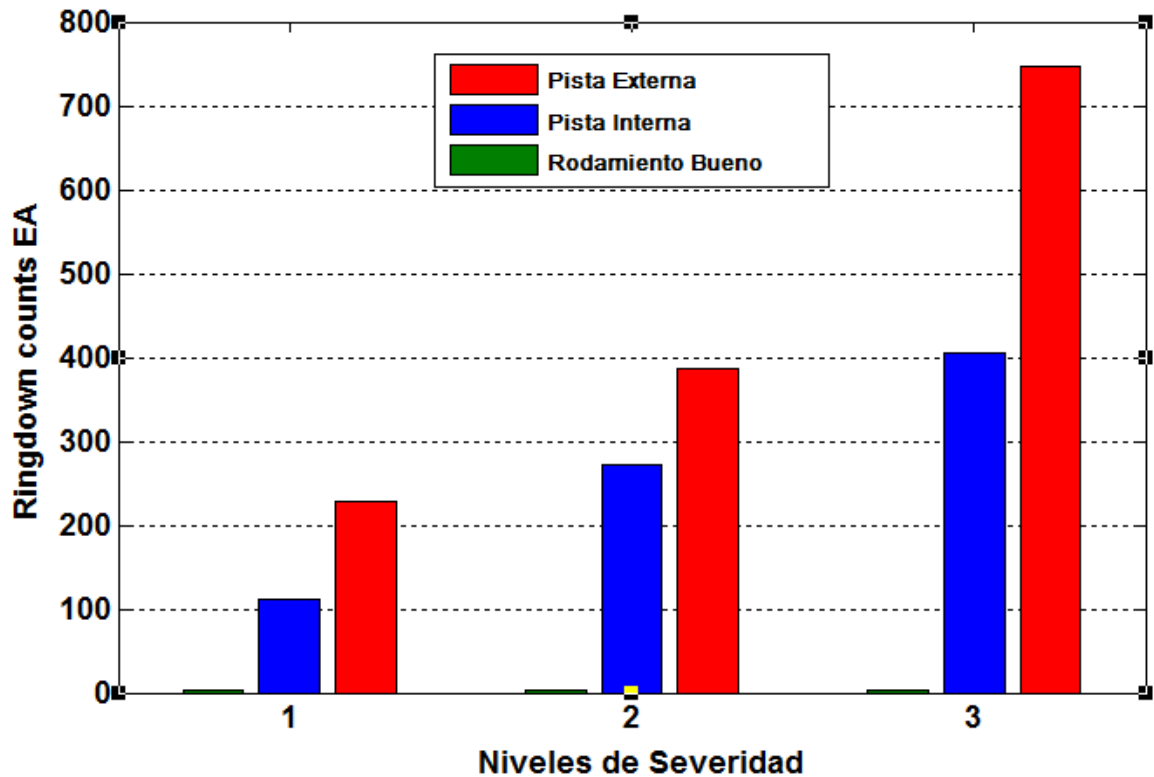
Figura 58. Comparación parámetro Kurtosis para varias condiciones en pista externa e interna.



Fuente: Autores

En este caso, el análisis de Kurtosis es llevado a cabo para revelar la característica del rodamiento. Se presentan los valores respectivos de Kurtosis para cada nivel de severidad en los escenarios de pista externa, interna y rodamiento bueno. En cada nivel de severidad correspondiente, se evidencia el aumento del valor de Kurtosis en pista interna y externa con respecto al rodamiento bueno; de la misma manera, para los 3 casos de niveles de severidad, analizándolos en conjunto, se puede observar que el valor de Kurtosis aumenta con respecto a su anterior nivel de severidad de falla. Se observa que el valor de Kurtosis es muy sensible al variar las condiciones de prueba.

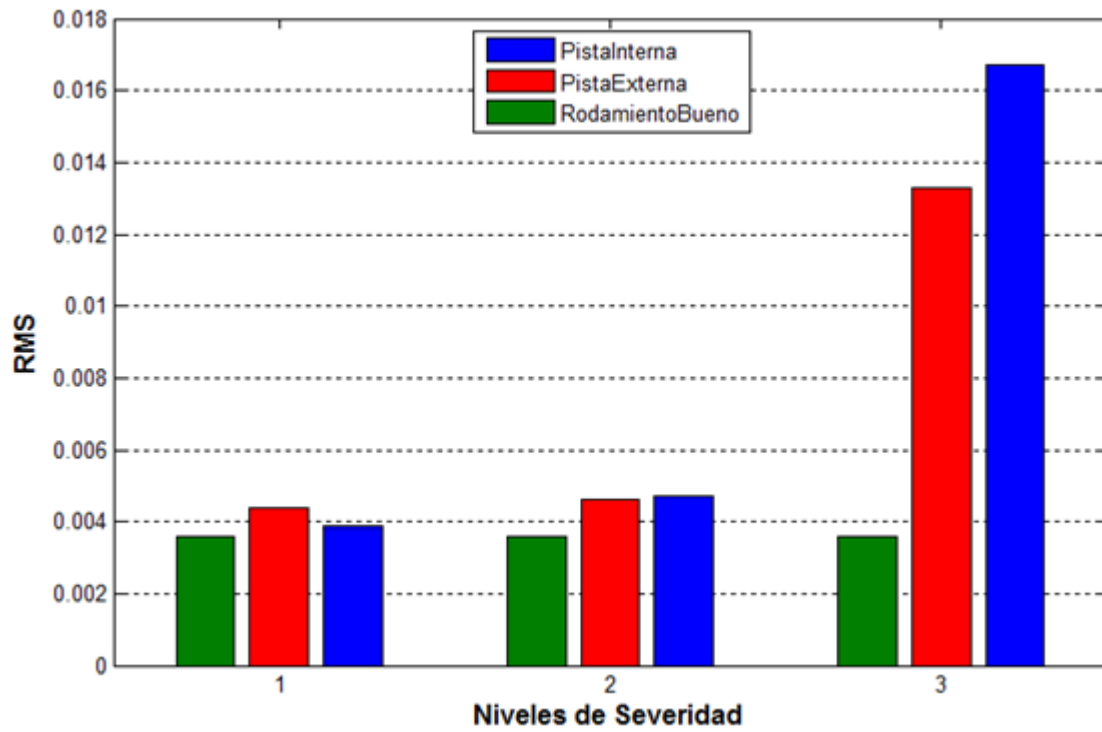
Figura 59. Comparación parámetro Ringdown counts para varias condiciones en pista externa e interna



Fuente: Autores

El indicador de falla propuesto para este caso, refleja el nivel de actividad de emisiones acústicas dentro la señal. La influencia de variar el nivel de severidad de falla, para este parámetro, se refleja en el aumento del valor Ringdown counts. El comportamiento de dicho indicador se incrementa proporcionalmente del nivel 1 al nivel 3 para el caso de pista interna y externa. En el Nivel 1, se observa un gran salto del indicador de la condición rodamiento bueno a los demás casos.

Figura 60. Comparación parámetro RMS para varias condiciones en pista externa e interna



Fuente: Autores

En la Figura 60, se puede observar la influencia del tamaño de defecto sobre el valor RMS. El indicador RMS, para el caso de pista interna como externa, muestra un incremento pequeño en el nivel de severidad 1 y 2 comparado con el rodamiento en condición normal; similarmente, para ambos casos el aumento del valor RMS del nivel 1 a 2 es muy leve. Sin embargo, a grandes rasgos, un claro aumento se puede evidenciar para el nivel de severidad 3, esto en gran parte puede relacionarse con la naturaleza del defecto para esta condición.

En la Tabla 15, se registran los datos obtenidos en la experimentación correspondientes al escenario rodamiento en condición normal, pista externa y pista interna de acuerdo a cada condición de nivel de severidad de falla (N0, N1, N2 y N3).

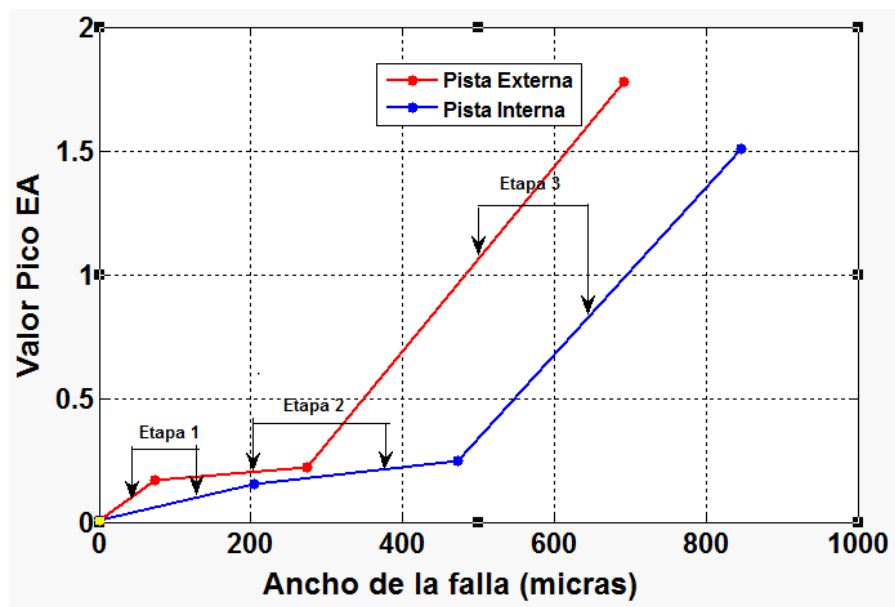
Tabla 15. Valor de los parámetros propuestos en cada caso estudiado

	TAMAÑO DE LA FALLA		ESCENARIO							
	Pista Ext	Pist Int	Pista Ext	Pist Int	Pista Ext	Pist Int	Pista Ext	Pist Int	Pista Ext	Pist Int
NIVEL DE SEVERIDAD	Ancho de la Falla (micras)	Ancho de la Falla (micras)	Valor Pico	Valor Pico	RMS	RMS	Kurtosis	Kurtosis	Ringdown counts	Ringdown counts
N0	0	0	0,0621	0,0621	0,0036	0,0036	3,0672	3,0672	1,5	1,5
N1	73,864	205,077	0,1676	0,1553	0,0044	0,0038	6,5776	15,6904	228,4542	112
N2	275,68	472,599	0,2276	0,2451	0,0046	0,0047	13,0775	33,1419	386	272
N3	691,238	845,935	1,78	1,51	0,0013	0,0168	26,4891	61,0522	746	404,27

Fuente: Autores

Para propósito de ilustración se agrega cada escenario de prueba, en los cuales se puede observar el comportamiento que presenta los parámetros Valor pico, RMS, Kurtosis y Ringdown counts ante el aumento del tamaño del defecto.

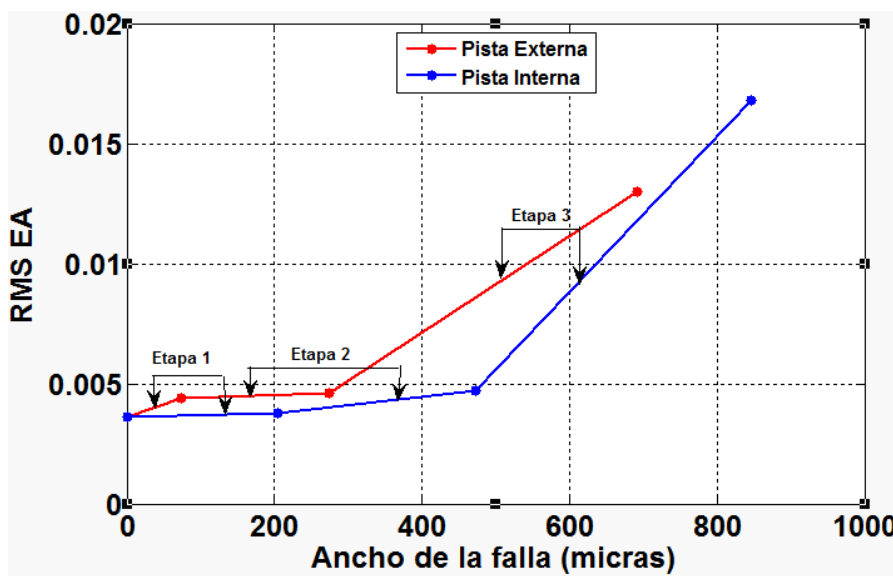
Figura 61. Comportamiento Valor Pico



Fuente: Autores

En la Figura 61, para el caso de pista externa y pista interna, se puede observar que el Valor Pico de la Emisión Acústica que para la primera y segunda etapa de la falla N1 y N2 respectivamente, es decir cuando la falla aún es incipiente, la falla avanza pero el cambio de magnitud del indicador no es sensible ante esta. Sin embargo, la situación cambia en la tercera etapa (N3), condición de falla severa, donde se nota una alta respuesta en aumento de valor del indicador.

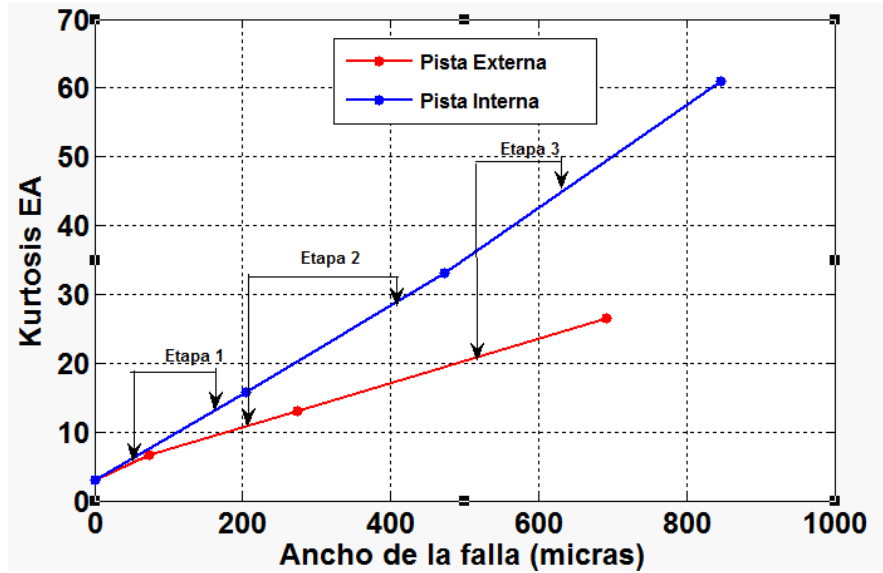
Figura 62 Comportamiento RMS



Fuente: Autores

De la Figura 62, para ambos casos, pista externa como en interna, al igual que con el valor pico: la primera y segunda etapa de falla, el indicador es poco sensible ante el aumento de falla, mientras que en la tercera es donde se dispara el indicador.

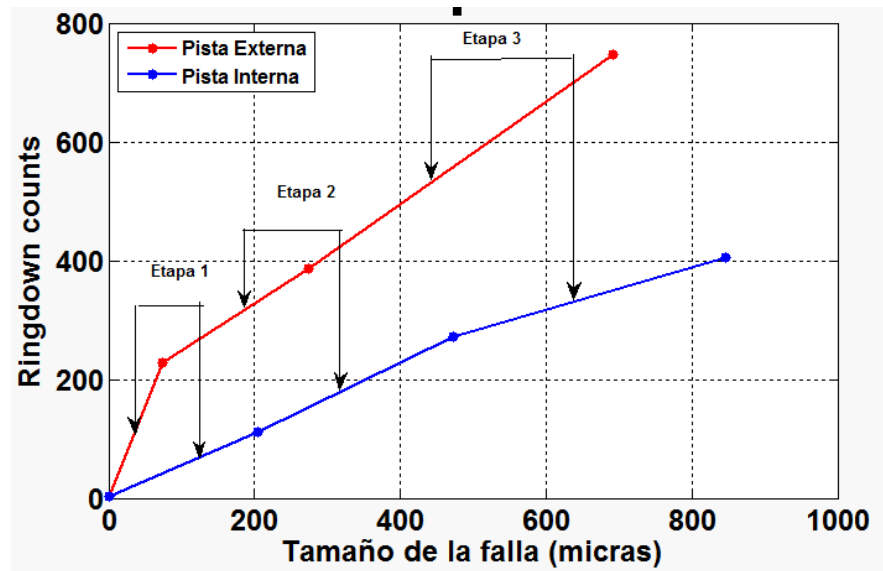
Figura 63. Comportamiento Kurtosis



Fuente: Autores

En la Figura 63, se puede observar que al aumentar la severidad de la falla aumenta en forma proporcional el valor de Kurtosis para el caso de pista externa y pista interna.

Figura 64. Comportamiento Ringdown counts



Fuente: Autores

En la Figura 64, se observa, en las 3 etapas de la falla, que a medida que la falla va progresando el indicador aumenta, en cierta manera, proporcionalmente al tamaño de la falla para los dos casos relacionados en la figura 64.

Se concluye que en los escenarios de fallas estudiados, un incremento en el tamaño del defecto resulta en un incremento en los indicadores de fallas propuestos. Por otra parte, del análisis realizado se desprende que el indicador Valor Pico y RMS no tienen un buen desempeño para el monitoreo de la condición del rodamiento, toda vez que en la primera y segunda etapa de la falla no son muy sensibles en cuanto al cambio de su magnitud, en otras palabras, para que se activen dichos indicadores la falla tiene que ser de un tamaño considerable. Ahora bien, los indicadores Kurtosis y Ringdown counts, ambos indicadores propuestos presentan una relación satisfactoria en cuanto a su cambio de magnitud ante el cambio en el nivel de severidad. Sin embargo, para el caso de Ringdown counts hay que realizar un análisis previo para determinar el umbral. El indicador Kurtosis fue sensible a la falla y tuvo un comportamiento lineal, teniendo en cuenta lo anterior, el indicador Kurtosis es posible candidatizarlo como variable para monitorear la condición de los rodamientos por medio de la Emisiones Acústicas.

CONCLUSIONES

Se realizó el análisis en el dominio del tiempo de las señales de emisiones acústicas procedentes de rodamientos cónicos por medio del entorno MATLAB, realizando la inspección bajo distintos escenarios de falla en tres niveles de severidad en la pista externa y pista interna.

Se demostró la efectividad de la técnica de Emisiones Acústicas en la detección de fallas en rodamientos, capturando las señales por medio del sensor especificado para cada uno los escenarios experimentales propuestos.

El banco utilizado para el desarrollo del presente estudio, permitió efectuar la fase de experimentación y toma de datos, gracias a su prestación y facilidad de desmontaje y montaje de los rodamientos de pruebas para los análisis en los distintos escenarios de prueba

Se realizaron fallas en pista interna y externa, y para su respectiva caracterización se utilizó el video microscopio, el cual permite digitalizar y guardar la imagen, esto con el fin de determinar y diferenciar la severidad de la falla.

Es posible seguir la progresión de un defecto de un rodamiento con el RMS, Kurtosis, Ringdown counts y Amplitud valores de la Emisión Acústica, pero es difícil determinar la localización y el tipo de defecto.

La ubicación del sensor es fundamental para la confiabilidad de los valores de las emisiones acústicas. Por lo tanto, la implementación de este esquema de monitoreo exige un estudio previo de la mejor ubicación del sensor en el soporte de pruebas.

Las pruebas experimentales mostraron que los parámetros propuestos basados en la señal de emisiones acústicas permiten detectar en los rodamientos, la presencia de defectos cuando se encuentran en etapa incipiente y avanzada.

La medición de la vibración en el dominio de la frecuencia tiene la ventaja de que puede detectar la localización del defecto. Sin embargo, la forma del espectro de vibración directa de un rodamiento defectuoso no puede indicar el defecto en la fase inicial.

Se determinó la correlación entre los parámetros medidos de las emisiones acústicas Ringdown counts, Kurtosis, Amplitud y los niveles de severidad de falla en rodamientos usando graficas desarrolladas con el programa Matlab, encontrándose que el tamaño del defecto tiene influencia en los parámetros de la Emisión acústica pero esta no es tan grande para los parámetros Valor Pico y RMS en los niveles de severidad 1 y 2. Sin embargo, se observó que el parámetro Kurtosis y RingDown Count presenta una relación satisfactoria en cuanto a su cambio de magnitud de mencionados casos. Por otro lado, para el caso de nivel de severidad 3, se evidenció un cambio muy significativo de la magnitud en la mayoría de los parámetros propuestos.

Aunque la medición de emisión acústica es no direccional, se debe tener en cuenta que cada superficie en el recorrido de la señal afecta su intensidad, por lo tanto, el sensor debe estar ubicado lo más cerca posible de la fuente, normalmente en el lado de carga del rodamiento. Además, es muy importante utilizar una grasa de contacto entre el sensor y la superficie de montaje.

Este proyecto contribuye a impulsar investigaciones futuras en el campo del estudio de detección de fallas en rodamientos, como técnicas alternativas a las empleadas tradicionalmente.

BIBLIOGRAFIA

Castro Martínez, Y. A, Paéz Paéz E. G. Banco experimental para estudio de fallas en rodamientos mediante análisis de vibraciones. Bucaramanga. 2008. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Industrial de Santander.

Changting Wang, Student Member, IEEE, and Robert X. Gao, Senior Member, IEEE, A Virtual Instrumentation System for Integrated Bearing Condition Monitoring.IEEE.

D. West, G. Venkatesan, A. Tewfik, K Buckley, M. Kaveh, Detection and Modeling of Acoustic Emissions for Fault Diagnostics.IEEE.

Estupiñan, Edgar - Saavedra, Pedro, Técnicas de diagnóstico para el análisis de vibraciones de rodamientos. IEEE

Fabio Immovilli, Student Member, IEEE, Alberto Bellini, Member, IEEE, Riccardo Rubini, and Carla Tassoni, Senior Member, IEEE, Diagnosis of Bearing Faults in Induction Machines by Vibration or Current Signals:A Critical Comparison.IEEE.

García Castro Alfonso. Vibraciones mecánicas modulo 1. Editorial Universidad Industrial de Santander, 2001.

Gopal T. Venkatesan, Dennis West, Kevin M. Buckley, Ahmed H. Tewfik, Mostafa Kaveh, Automatic Fault Monitoring Using Acoustic Emissions.IEEE.

Wei Zhou, Member, IEEE, Thomas G. Habetler, Fellow, IEEE, and Ronald G. Harley, Fellow, IEEE, Bearing Condition Monitoring Methods for Electric Machines: A General Review.IEEE.

Harris, Cyril M., Manual de Medición Acústica y control de Ruido, edit., Mc. Graw Hill, 1995.

J. Cauich-Cupul, J.A. Rodríguez-Laviada y C.R. Ríos-Soberanis, Detección del daño generado en materiales compuestos dematriz polimérica empleando la técnica de emisión acústica

Jose Antonio Pedrouzo Tello, Nelson Federico Quintero Carrero, La Aplicación del Ultrasonido como Tecnología Complementaria en un Plan de Mantenimiento Predictivo”

M. W. Hawiiaii and W. S. Galinaitis, Silver Lane, Acoustic Emission Monitoring Of Rolling Element Bearings. IEEE.

Máster en mantenimiento industrial y técnicas de diagnóstico. Estudio de fallos en un rodamiento de bolas , universidad de Sevilla

MBA, D. AND BANNISTER, R.H. (1999), Condition monitoring of low-speed rotating machinery using stress waves: Part1 and Part 2. *ProInstMechEngrs*.**213**(3), Part E, 153-185

Mohammed A. A. Elmaleeh , N. Saad, Acoustic Emission Techniques for Early Detection of Bearing Faults using LabVIEW. . IEEE.

Mohammed Abdalla Adam Elmaleeh, Nordin Bin Saad, A Study of Acoustic Emission Technique on Incipient Detection of Rotating Machine Faults.IEEE

Morhain, A, Mba, D, Bearing defect diagnosis and acoustic emission Journal of Engineering Tribology, I Mech E, Vol 217, No. 4, Part J, p 257-272, 2003. ISSN 1350-6501Mba, D. (2002).

Pedro Nelson Saavedra, La medición y análisis de las vibraciones como técnica de inspección de equipos y componentes, aplicaciones, normativas y certificación.

R. Dukes, B.Sc, Ph.D., and E.A. Culpan, B.Sc, Ph.D., C.Eng, Acoustic emission: its techniques and applications. IEEE.

Tandon N, Choudhury, A. A review of vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings, Indian Institute of Technology, India , 1999.

Theodore Goodenow, William Hardman, Martin Karchnak, Acoustic Emissions in Broadband Vibration as an Indicator of Bearing Stress. IEEE.

Toutountzakis, T. and Mba, D. (2003).Observation of Acoustic Emission Activity during Gear Defect Diagnosis.NDT and E International. 36(7), 471-477.

White Glen. Introducción al Análisis de vibraciones, Azima DLI,Woburn, 1990-2010.

ANEXOS

ANEXO A: CARACTERISTICAS DEL OSCILOSCOPIO

Specifications

All specifications apply to DS1000E, DS1000D Series Oscilloscopes unless where noted. To come up to these specifications, two conditions must be met firstly:

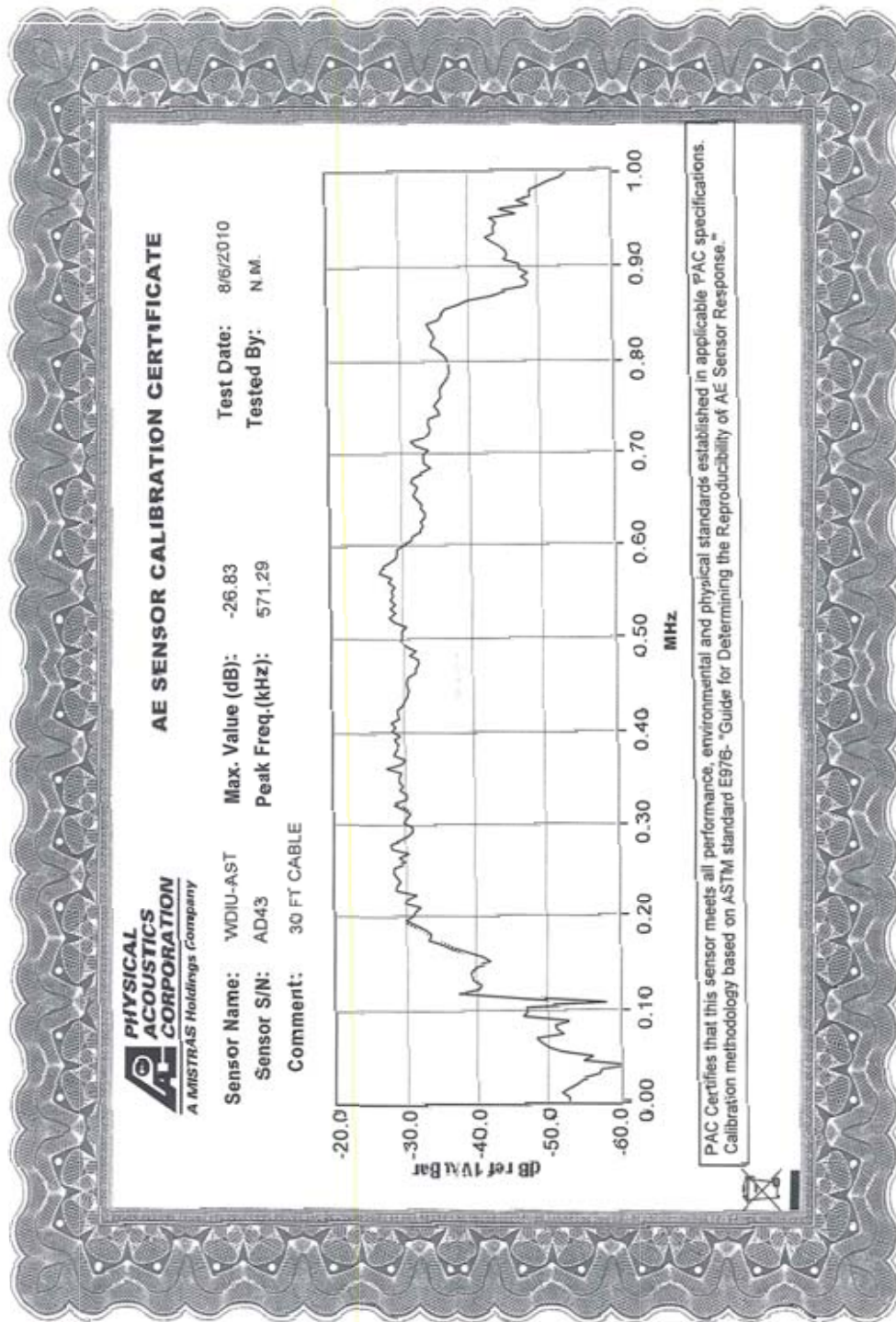
- The instrument must have been operated continuously for 30 minutes under the specified operating temperature.
- Do perform Self-Calibration operation through the Utility menu if the range of operating temperature variations up to or more than 5°C.

NOTE: All specifications are guaranteed unless where marked "typical".

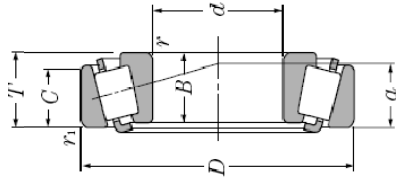
Specifications

Bandwidth				
DS1102E	DS1052E	DS1102D	DS1052D	
100MHz	50MHz	100MHz	50MHz	
Acquisition				
Sample Modes	Real-Time Sample	Equivalent Sample		
Sample Rate	1GSa/s, 200MSa/s ^[1]	DS1102X 25GSa/s	DS1052X 10GSa/s	
Averages	The waveform will be displayed one time while all the channels finish N times Sample, N could be selectable from 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 and 256			
Inputs				
Input Coupling	DC, AC, GND			
Input Impedance	1MΩ±2%, the input capacity is 18pF±3pF			
Probe Attenuation Factors	1X, 5X, 10X, 50X, 100X, 500X,1000X			
Maximum Input Voltage	400V (DC + AC Peak, 1MΩ input impedance) 40V (DC+AC Peak) ^[1]			
Time Delay between Channel (typical)	500ps			
Horizontal				
Sample Rate Range	Real-Time: 13.65Sa/s-1GSa/s Equivalent: 13.65Sa/s-25GSa/s			
Waveform Interpolation	Sin(x)/x			
Record Length	Channel Mode	Sample rate	Memory Depth (normal)	Memory Depth (long memory)
	Single channel	1GSa/s	16kpts	N.A.
	Single channel	500MSa/s or lower	16kpts	1Mpts
	Dual channel	500MSa/s or lower	8kpts	N.A.
Dual channel	250MSa/s or lower	8kpts	512kpts	
Scanning Speed Range (Sec/div)	2ns/div~50s/div, DS1102X 5ns/div~50s/div, DS1052X 1-2-5 Sequence			
Sample Rate and Delay Time Accuracy	±50ppm (any interval ≥1ms)			
Delta Time Measurement Accuracy (Full Bandwidth)	Single: ±(1 Sample interval + 50ppm × reading + 0.6 ns) >16 averages: ±(1Sample interval + 50ppm × reading + 0.4 ns)			
Vertical				

ANEXO B: CARACTERISTICAS DEL SENSOR



ANEXO C: CARACTERISTICAS DEL RODAMIENTO 30203



d 15~30mm

d	Boundary dimensions			Basic load ratings				Limiting speeds		Bearing numbers				
	D	T	B	dynamic	static	dynamic	static	rpm	rpm					
	mm	mm	mm	kN	kgf	kN	kgf	grease	oil					
15	42	14.25	13	11	1	1	1	23.2	20.8	2,370	2,120	9,900	13,000	4T-30302
17	40	13.25	12	11	1	1	1	20.5	20.3	2,090	2,070	9,900	13,000	4T-30203
	40	17.25	16	14	1	1	1	27.3	28.3	2,790	2,880	9,900	13,000	4T-32203
	40	17.25	16	14	1	1	1	26.2	28.2	2,670	2,870	9,900	13,000	4T-32203R [®]
	47	15.25	14	12	1	1	1	28.9	26.3	2,940	2,680	9,000	12,000	4T-30303

ANEXO B: CODIGO DE MATLAB APLICADO PARA LA DETERMINACION DE RINGDOWN COUNT

```
clc
cdA=[];
contador2=[];
s=[0 0 0 0];
umbralA=norm(A)/sqrt(size(A,1));
umbralB=norm(B)/sqrt(size(B,1));
uCOUNTSmbralC=norm(C)/sqrt(size(C,1));
umbralD=norm(D)/sqrt(size(D,1));
umbral=[umbralA umbralB umbralC umbralD];
senales=[A B C D];
for i=1:size(A,1)
    for j=1:4;
        if senales(i,j)>=umbral(1,j)
            s(1,j)=s(1,j)+1;
            contador2(1,j)=s(1,j);
            %cdA(s,j)=senales(i,j);
        end
    end
end
end
```