

**SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLA EN PISTA EXTERNA DE RODAMIENTOS
CÓNICOS TIPO 30203 USANDO SEÑALES ACÚSTICAS.**

**WILMERT GUILLERMO PAREDES DIAZ
JAVIER ALEXANDER QUINTERO MONSALVE**

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

2010

**SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLA EN PISTA EXTERNA DE RODAMIENTOS
CÓNICOS TIPO 30203 USANDO SEÑALES ACÚSTICAS.**

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

**WILMERT GUILLERMO PAREDES DIAZ
JAVIER ALEXANDER QUINTERO MONSALVE**

**Director
JABID EDUARDO QUIROGA MENDEZ. INGENIERO MECÁNICO.**

**Co-Director
ALFONSO GARCÍA CASTRO. INGENIERO MECÁNICO.**

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

2010

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE RODAMIENTOS	15
1.1. TIPOS DE RODAMIENTOS	16
1.1.1. RODAMIENTOS DE RODILLOS CONICOS	16
1.2. VIDA DE UN RODAMIENTO	18
1.2.1. SELECCIÓN DEL TAMAÑO DEL RODAMIENTO UTILIZANDO LA FORMULA DE VIDA	18
1.3. FALLAS EN RODAMIENTOS	19
1.3.1. DEFECTOS LOCALIZADOS	19
1.3.2. DEFECTOS DISTRIBUIDOS	20
1.4. COMPONENTES Y FRECUENCIAS DE DETERIORO DE UN RODAMIENTO	20
1.4.1. FRECUENCIA DE PASO DE LOS ELEMENTOS RODANTES POR LA PISTA EXTERIOR (BPFO)	21
2. ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA DIAGNÓSTICOS DE FALLAS EN RODAMIENTOS	22
2.1. ANALISIS DE ESPECTRO (FRECUENCIA)	22
2.2. ACUSTICA	23
2.2.1. EL SONIDO	24
2.2.2. PRODUCCIÓN DEL SONIDO	24
2.2.3. RANGOS DEL SONIDO	25
2.2.4. VIBRACIONES Y SONIDO	26
2.2.5. LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER	28
2.2.6. SENSOR	28

2.2.7. ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL	34
2.2.8. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL	39
3. ENSAYOS EXPERIMENTALES	40
3.1. DESCRIPCIÓN DEL BANCO	40
3.2. INSTRUMENTACIÓN	42
3.3. METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN	42
3.4. INDUCCIÓN DE FALLAS	44
3.5. CALCULO DE LAS FRECUENCIA DE FALLA TEÓRICAS	45
3.5.1. FRECUENCIA DE FALLA CARACTERÍSTICA CALCULADA POR MEDIO DEL MÉTODO ANALÍTICO	46
4. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN	48
4.1. ANÁLISIS A RODAMIENTO EN PERFECTO ESTADO	48
4.2. ESPECTROS CARACTERISTICOS DEL RODAMIENTO CONICO 30203	49
5. ESPECTROS OBTENIDOS CON EL ANALIZADOR CSI	52
6. ANALISIS DE RESULTADOS	54
7. CONCLUSIONES	56
8. BIBLIOGRAFIA	58

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Partes comunes de un rodamiento.....	15
Figura 2 Principales tipos de rodamientos.....	16
Figura 3 rodamiento cónico	17
Figura 4 Dominio del tiempo y de la frecuencia	23
Figura 5 Amplitud de la onda debido a intensidad	27
Figura 6 Micrófono de presión.....	29
Figura 7 Partes de un micrófono dinámico.....	30
Figura 8 Diagramas polares de micrófonos	31
Figura 9 Esquema de adquisición de señal en la Técnica de Señales Acústicas	33
Figura 10 Toma de datos barra en voladizo 1.....	35
Figura 11 Toma de datos barra en voladizo 2.....	35
Figura 12 Toma de datos barra en voladizo 3.....	36
Figura 13 Toma de datos barra en voladizo 4.....	36
Figura 14 Toma de datos barra en voladizo 5.....	37
Figura 15 Toma de datos barra en voladizo 6.....	37
Figura 16 Espectro CSI.....	38
Figura 17 Espectro Matlab adquirido con micrófono	38
Figura 18 Banco de pruebas.....	41
Figura 19 Fallas inducidas en la pista externa del rodamiento.....	45
Figura 20 Base de datos de frecuencias de fallas del CSI.....	47
Figura 21 Espectro de rodamiento 30203 en buen estado	49
Figura 22 Espectro de rodamiento 30203 con falla incipiente	49
Figura 23 Espectro de rodamiento 30203 con falla intermedia	50
Figura 24 Espectro de rodamiento 30203 con falla catastrófica	50
Figura 25 Espectro del rodamiento en buen estado obtenido con el CSI	52
Figura 26 Espectro del rodamiento con falla incipiente obtenido con el CSI.....	52
Figura 27 Espectro del rodamiento con falla intermedia obtenido con el CSI	53
Figura 28 Espectro del rodamiento con falla catastrófica obtenido con el CSI	53

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Especificaciones del micrófono	42
Tabla 2 Estimación de ganancia a partir de amplitudes de los espectros	54
Tabla 3 Comparación de frecuencias entre la técnica de señales acústicas y el CSI	55

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. CÓDIGO DE MATLAB APLICADO A UNA SEÑAL SIMULADA	55
ANEXO B. ESPECIFICACIONES RODAMIENTO 30203	56
ANEXO C. ESPECIFICACIONES RODAMIENTO 30203	57

RESUMEN

TITULO: SISTEMA DE DETECCIÓN DE FALLA EN PISTA EXTERNA DE RODAMIENTOS CONICOS TIPO 30203 USANDO SEÑALES ACÚSTICAS.*

**AUTORES: WILMERT GUILLERMO PAREDES DIAZ
JAVIER ALEXANDER QUINTERO MONSALVE****

PALABRAS CLAVES: sonido en rodamientos, fallas en rodamientos, micrófono.

DESCRIPCION:

Este proyecto se desarrolló con el objeto de contribuir al proceso investigativo en el campo de las vibraciones mecánicas contribuyendo así con la misión de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER, aportando bases teóricas y medios didácticos para permitir a los futuros ingenieros mecánicos desarrollar prácticas de laboratorio que los preparen para enfrentar problemas reales en maquinaria.

Para el desarrollo del proyecto se construyó un banco experimental que permitió adquirir señales de vibración de un rodamiento cónico 30203, procesar su señal y obtener un espectro significativo como punto de comparación entre la técnica de VIBRACIONES y la de SEÑALES ACUSTICAS, determinar si se podía detectar fallas en rodamiento con la técnica y estimar un porcentaje de diferencia entre las dos técnicas.

Se encontró gran concordancia entre lo expresado en la teoría y lo obtenido en la práctica, siendo el fundamento de la técnica de SEÑALES ACUSTICAS el poder detectar los defectos en los rodamientos sin necesidad de tener un contacto directo con el soporte del rodamiento, gracias a la recepción de ondas de presión en la membrana del micrófono, que son las mismas generadas en el medio sólido, además de reducir considerablemente el precio del sensor a utilizar, no obstante presenta desventajas en el uso industrial por su alta sensibilidad, ya que deja pasar señales indeseadas y se hace necesario un filtro.

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánica . Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Ing. JABID EDUARDO QUIROGA. Co-Director Ing. ALFONSO GARCIA CASTRO.

SUMMARY

TITULO: DETECCION'S SYSTEM OF FAULT IN EXTERNAL CLUE OF CONICAL BEARINGS GUY 303030 USING ACOUSTIC SIGNS.*

**AUTHORS: WILMERT GUILLERMO PAREDES DIAZ
JAVIER ALEXANDER QUINTERO MONSALVE****

KEY WORDS: Sound in bearings, faults in bearings, microphone.

DESCRIPTION:

This project was developed with the aim of contributing to the investigation in the field of mechanical vibrations thus contributing to the mission of the Industrial University of Santander, providing theoretical bases and teaching aids to enable future engineers to develop mechanical laboratory practices that prepared to face real problems in machinery.

For the development of the project was built a bank to acquire experimental vibration signals of a conical bearing 30203, process the signal and obtain a meaningful spectrum as a comparison between the technique of vibration and sound signals, to determine whether they could detect bearing failures with the technique and estimate a percentage difference between the two techniques.

There was strong agreement between what is expressed in the theory and those obtained in practice, be the basis for the technique of acoustic signals to detect the defects in the bearings without having direct contact with the bearing support, thanks to receiving pressure waves in the membrane of the microphone, which are the same as generated in the solid medium, as well as reduce the cost of the sensor to use, However it has disadvantages in industrial use because of its high sensitivity, as unwanted signals will pass and we need a filter.

* Degree Work.

** Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering School, Director Eng. JABID EDUARDO QUIROGA. Co-Director Eng. ALFONSO GARCIA CASTRO.

INTRODUCCIÓN

Actualmente los rodamientos son muy usados en la industria, principalmente como elementos capaces de soportar carga entre componentes rotatorios de elementos mecánicos en sistemas de desplazamiento relativo. La tecnología ha influido en alargar la vida útil de estos elementos; aun así, muchos de estos suelen fallar y a su vez provocar paros indeseados en la industria, que se traducen en gastos no operacionales.

Se ha determinado que debido al desalineamiento y desbalance en maquinas rotativas más o menos el 80% de los rodamientos se reemplazan antes de cumplir su vida útil.

Esto implica, en primera instancia, un daño no solo en el rodamiento mismo, sino en las piezas de su entorno.

Una de las técnicas del mantenimiento predictivo que permite determinar las causas posibles de fallas anticipándose a la avería en maquinaria rotativa es el análisis de vibraciones, siendo los rodamientos, los elementos de mayor 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.

Pensando en esto nace la necesidad de presentar una alternativa diferente para adquirir señales generadas por el rodamiento, en nuestro caso se detectarán fallas de un rodamiento de elementos cónicos causados por defectos ubicados en la pista externa, presentando así una técnica poco conocida en el medio: SEÑALES ACUSTICAS.

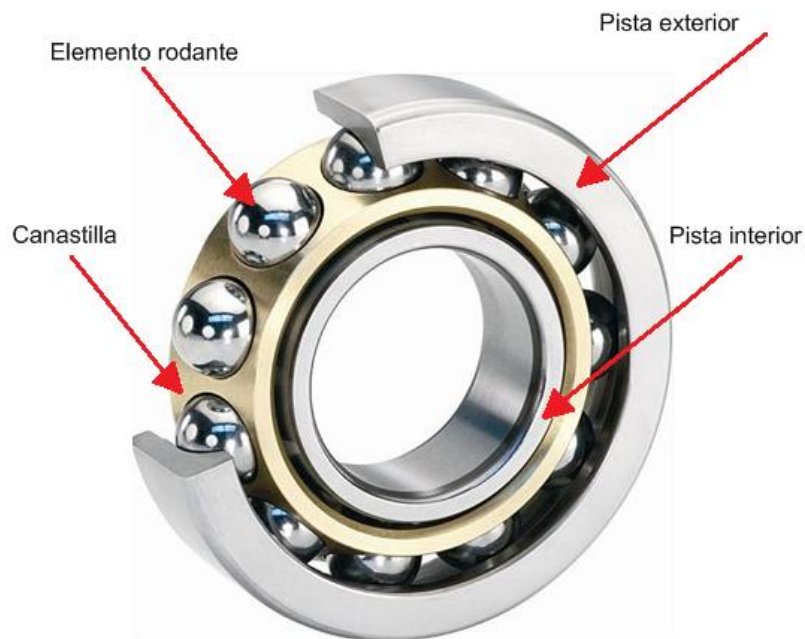
Esta alternativa presenta una ventaja económica en términos del sensor adquisitivo de la señal, ya que sería mucho más económico comprar un micrófono dentro del rango de frecuencias específicas para este caso que cualquier otro sensor disponible en el mercado.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE RODAMIENTOS

Los rodamientos son elementos de máquina empleados como soporte de flechas rotativas, presentan una alta precisión, bastante simpleza y gran utilidad. Tienen como principio fundamental de funcionamiento la no concordancia de sus superficies, y el movimiento de rodadura que minimiza la pérdida de energía por fricción. El propósito fundamental de un rodamiento es soportar una carga y al mismo tiempo permitir el contacto relativo entre dos elementos de una máquina

Los componentes de un rodamiento son: pista interior, pista exterior, jaula y los elementos rodantes (ver figura 1).

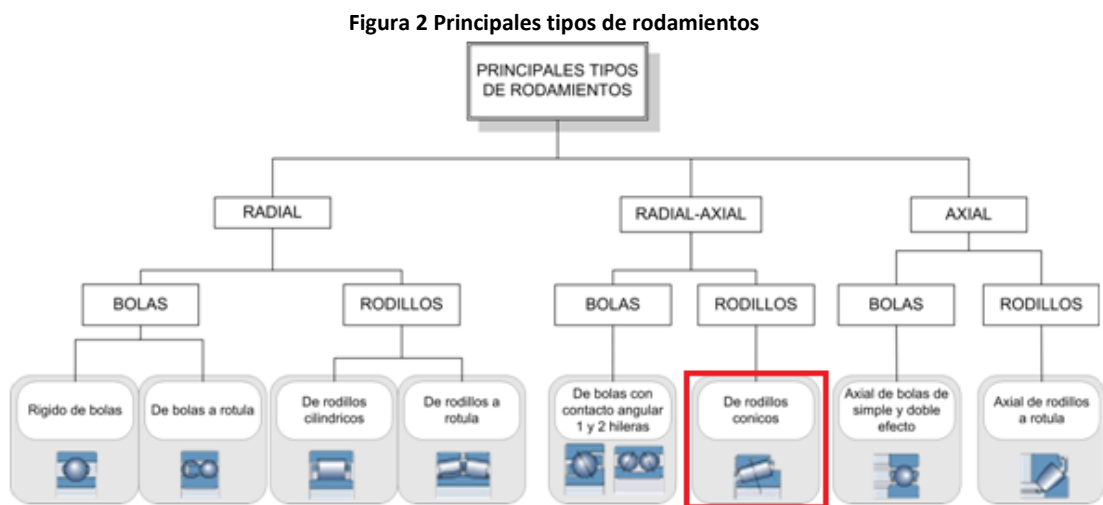
Figura 1 Partes comunes de un rodamiento



1.1. TIPOS DE RODAMIENTOS.

El proceso de selección para una determinada aplicación en donde se requiera la utilización de rodamientos es muy importante saber qué tipos existen, identificar la forma y disposición de cada uno y sobre todo el tipo de carga puede soportar y en qué dirección.

La figura 2 Muestra la clasificación, de los principales tipos de rodamientos, dependiendo del tipo de carga que soportan, en nuestro caso trabajaremos con rodamientos de rodillos cónicos para la realización de fallas.



1.1.1. RODAMIENTOS DE RODILLOS CÓNICOS

El rodamiento de rodillos cónicos, debido a la posición oblicua de los rodillos y caminos de rodadura, es especialmente adecuado para resistir cargas radiales y axiales simultáneas. Para casos en que la carga axial es muy importante hay una serie de rodamientos cuyo ángulo es muy abierto. Este rodamiento debe montarse en oposición con otro rodamiento capaz de soportar los esfuerzos axiales en sentido contrario.

El rodamiento es desmontable; el aro interior con sus rodillos y el aro exterior se montan cada uno separadamente.

Figura 3 rodamiento cónico



Fuente: www.schaeffler.com/.../212020_aaa_rgb_COL_2.jpg

En este tipo de rodamientos, los rodillos y las pistas de rodadura tienen forma cónica. La configuración de su diseño hace que los vértices de los conos de rodillos y pistas de rodadura se encuentren en un punto común sobre el eje del rodamiento.

Los rodillos son guiados por el contacto entre el extremo mayor del rodillo y el reborde mayor del anillo interior. El contacto lineal entre los rodillos y las pistas de rodadura, hace que estos rodamientos tengan una elevada capacidad de carga; a su vez, resisten velocidades relativamente elevadas.

1.2. VIDA DE UN RODAMIENTO

La vida de un rodamiento se define como el número de revoluciones (o de horas a una velocidad constante determinada) que el rodamiento puede dar ántes de que se manifieste el primer signo de fatiga (desconchado) en uno de sus aros o en uno de sus elementos rodantes .

Otro de los conceptos el de vida especificada que es la determinada por una autoridad en la materia en base de datos hipotéticos de carga y velocidad suministrados por la misma autoridad : Esta vida especificada generalmente es una vida L10 (vida nominal) requerida.

1.2.1. SELECCIÓN DEL TAMAÑO DEL RODAMIENTO UTILIZANDO LA FORMULA DE VIDA

La duración de un rodamiento se puede calcular con diferentes niveles de sofisticación, que dependen de la precisión que se puede alcanzar en la definición de las condiciones de funcionamiento.

RELACIÓN ENTRE LA CARGA Y LA DURACIÓN NOMINAL DEL RODAMIENTO

El método más simple para calcular la duración de un rodamiento consiste en la aplicación de la formula ISO de la vida nominal, es decir:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{1}{60N} \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^k \quad (1)$$

Donde k=3 para rodamientos de bolas
 k= 3.33 para rodamientos de rodillos

P_1 = Capacidad de carga dinámica básica en Newton

P_2 = Carga de diseño o trabajo en Newton

N = Velocidad de giro en rev/min

L_1 = Duración $L_{10} = 10^6$ rev para trabajo con carga dinámica

L_2 = Vida nominal del rodamiento en horas de servicio

1.3. 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 sin embargo, existen casos inesperadamente rápidos que no permiten la utilización continua. Estos sucesos prematuros con relación a la vida de fatiga, son los límites de uso, naturalmente denominados de quiebres o accidentes que en su gran mayoría tienen como causas: falta de cuidado en la instalación, utilización y lubricación; penetración de partículas ajenas del exterior y no considerar la influencia del calor en el eje y alojamiento.

1.3.1. DEFECTOS LOCALIZADOS

Son defectos que se producen en su mayoría por grietas, hendiduras, rebordes, resaltes, picaduras y descascamiento. El más común de todos es la picadura de las pistas o de los elementos rodantes, causado cuando una grieta por fatiga, originada subsuperficialmente, se propaga hacia la superficie hasta que una pieza de metal se desprende superficialmente produciendo un pequeño defecto.

La falla por fatiga superficial es acelerada cuando el rodamiento está sobrecargado o sometido a cargas de choque o impacto durante su funcionamiento o instalación y también con el incremento de velocidad.

1.3.2. DEFECTOS DISTRIBUIDOS

Son defectos que pueden ser causados por errores en la manufactura, inadecuada instalación o debidos al desgaste. Dentro de éstos se encuentran: las rugosidades superficiales, ondulaciones sobre las pistas, desalineamiento de las pistas y elementos rodantes desiguales. Las vibraciones debidas a defectos de manufactura han resultado ser más bajas en la mayoría de los casos, que las debidas a defectos producidos por desgaste o fatiga. La variación de las fuerzas de contacto entre los elementos rodantes y las pistas causan un incremento en el nivel de vibración. Puesto que resulta difícil discernir cuando la vibración es causada por defectos localizados o distribuidos, es recomendable analizar tanto la frecuencia como la amplitud de las componentes espectrales relacionadas con la vibración emitida.

1.4. COMPONENTES Y FRECUENCIAS DE DETERIORO DE UN RODAMIENTO

Independiente del tipo de rodamiento, cada uno de ellos está formado por varios componentes: pista interior, pista exterior, elementos rodantes y jaula. El deterioro de cada uno de estos elementos generará una o varias frecuencias características en los espectros de frecuencia que nos permitirán una rápida y fácil identificación.

Estas frecuencias son de gran utilidad al realizar una análisis de vibraciones ya que nos ubican en un rango específico dentro del espectro. Las cuatro posibles frecuencias de deterioro de un rodamiento son:

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

- **BPFI** o frecuencia de deterioro de la pista interior. Físicamente es el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista interior cada vez que el eje realiza un giro completo.
- **BSF** o frecuencia de deterioro de los elementos rodantes. Físicamente es el número de giros que realiza una bola del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo.
- **FTF** o frecuencia fundamental de tren o de deterioro de la jaula. Físicamente es el número de giros que realiza la jaula del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo.

1.4.1. FRECUENCIA DE PASO DE LOS ELEMENTOS RODANTES POR LA PISTA EXTERIOR (BPFO)

FALLA EN PISTA EXTERNA:

Agrietamiento o desastillamiento del material en la pista externa, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente.

Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS la frecuencia de falla de la pista externa, en dirección radial. Además el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1-10 KHz.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose.

Nota: Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga.

La fórmula para calcular la frecuencia de falla en pista externa es:

$$BPFO = \left| \frac{N_b}{2} (W_i - W_o) \left(1 - \frac{B_d \cos \phi}{P_d} \right) \right| \text{ [Hz]}$$

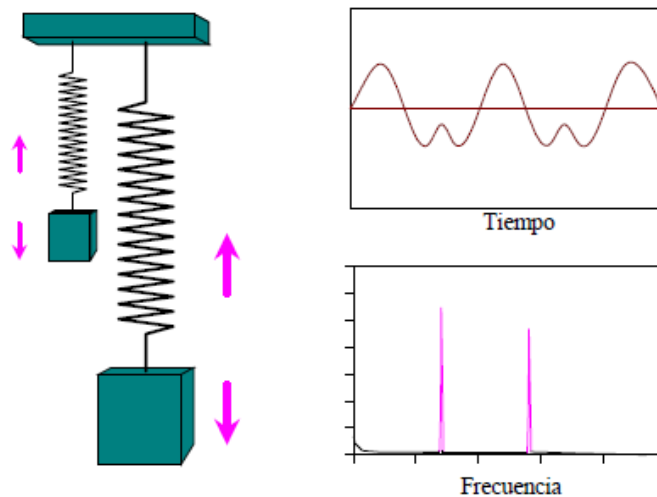
2. ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA DIAGNÓSTICOS DE FALLAS EN RODAMIENTOS

El análisis de vibraciones, cuando está aplicado correctamente, permite al técnico detectar pequeños defectos mecánicos incipientes mucho antes que representen una amenaza a la integridad de la máquina. De esa manera, nos dá el tiempo suficiente para programar el mantenimiento y para acomodar las necesidades de la gerencia de planta. De esa manera es la gerencia de planta la que controla las máquinas en lugar que sea viceversa.

2.1. ANÁLISIS DE ESPECTRO (FRECUENCIA)

El análisis de espectros se define como la transformación de una señal de la representación en el dominio del tiempo hacia la representación en el dominio de la frecuencia.

Figura 4 Dominio del tiempo y de la frecuencia



Dominio de Tiempo vs. Dominio de Frecuencia

Fuente: Catálogo de la empresa AZIMA

Al realizar un diagnóstico de la condición de un rodamiento, se busca determinar si la evolución de los parámetros en la onda de vibración es representativo de un estado normal de funcionamiento o si se presenta alguna de las fallas con sus características fundamentales.

2.2. ACUSTICA

La acústica es la ciencia del sonido. Está asociada con la producción y propagación del sonido desde la fuente hasta el aparato receptor.

La acústica se ha convertido en un campo interdisciplinario muy amplio, abarcando las disciplinas académicas de física, la ingeniería, psicología, audiolología, música, arquitectura, filosofía, neurociencia y otras.

2.2.1. EL SONIDO

El sonido es un fenómeno vibratorio transmitido en forma de ondas, que se propaga en un medio elástico (sólido, líquido o gaseoso) que puede ser audible o no, cuando nos referimos al sonido audible por el oído humano, lo definimos como una sensación percibida en el órgano del oído, producida por la vibración que se propaga en un medio elástico en forma de ondas.

Para que se produzca un sonido es necesaria la existencia de: un emisor o cuerpo vibrante, un medio elástico transmisor de esas vibraciones y un receptor que capte dichas vibraciones.

El sonido involucra transporte de energía aún sin transporte de masa.

2.2.2. PRODUCCIÓN DEL SONIDO

El sonido puede producirse por diferentes procesos, los cuales incluyen:

VIBRACION DE CUERPOS

Cuando un conjunto de piezas de una maquina, se encuentra vibrando desplaza una cantidad de aire y ejerce una presión fluctuante sobre el aire del lugar.

CAMBIO EN LA CORRIENTE DE AIRE

Cuando se habla o se canta, en las cuerdas vocales, los pliegues se abren y cierran y viajan a través de bocanadas de aire. En una sirena los huecos en un plato que rota rápidamente pasan alternativamente y bloquea el aire, resultando en un sonido fuerte.

LAS FUENTES DEPENDIENTES DEL CALOR EN EL TIEMPO

Una chispa eléctrica produce un estallido, una explosión produce un ruido de un golpe debido a la expansión de aire causado por la calefacción rápida.

El trueno resulta de la rápida calefacción originada por el relámpago.

FLUJO SUPERSONICO

Las ondas de choque resultan cuando un avión supersónico o una bala con exceso de velocidad hacen fluir con fuerza el aire más rápido que la velocidad del sonido.

2.2.3. RANGOS DEL SONIDO

SONIDOS AUDIBLES

El rango de intensidad de sonido y el rango de frecuencia a la cual el sistema auditivo humano puede responder es muy notable.

El rango de intensidad entre el sonido que trae dolor a nuestros oídos y lo más débil que alcanzan a percibir es de tan solo 10^{12} .

PROPORCIONES DE FRECUENCIA

La proporción entre las frecuencias más altas y mínimas que el ser humano puede escuchar es casi 103, no más que nueve octavas.

El mecanismo de audición humano es sensible a proporciones de frecuencias más que a frecuencias.

Si por ejemplo un sonido se sube de 100 Hz a 200 Hz su altura se subirá una octava, y si un sonido sube de 1000 Hz a 2000 Hz también subirá una octava.

SONIDOS NO AUDIBLES: EL ULTRASONIDO Y EL INFRASONIDO

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

2.2.4. VIBRACIONES Y SONIDO

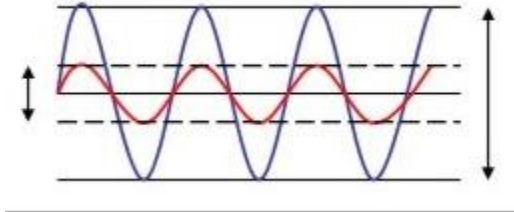
Al escuchar un sonido se piensa que debe haber algo que lo produce. Al oír el sonido de una campana, se sabe que viene de un golpe que se le ha dado. Al acercarse la mano y tocar la campana con suavidad, se puede sentir cómo la masa metálica está vibrando, pero al apoyar con fuerza la mano e impedir que vibre, el sonido se apaga. Si se toca la garganta al hablar con fuerza, se percibe que esta vibra, o para hacer sonar la cuerda de una guitarra, se debe hacer vibrar. Con esto se concluye que: ***El sonido es producido por un movimiento vibratorio.***

La velocidad del sonido en el aire a 15° C es de 340 m/seg, en el agua dulce se propaga a una velocidad de 1.435 m/seg, y en los sólidos, como el hierro, con una velocidad 15 veces mayor que en el aire.

INTENSIDAD

La intensidad de un sonido depende de la magnitud de las vibraciones del cuerpo que las produce, y cuando se habla de magnitud de la vibración, se hace referencia a su amplitud.

Figura 5 Amplitud de la onda debido a intensidad



La intensidad está relacionada con la distancia que separa el emisor del receptor y se ve fuertemente influenciada por esta como se ve en la siguiente fórmula:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Siendo P la fuente de poder y r el radio esférico que separa al emisor del receptor.

Si se habla del cambio de la frecuencia de una onda producido por el movimiento de la fuente respecto a su observador que, se habla del Efecto Doppler, el cual se debe tener en cuenta a la hora de tomar los datos, porque aunque no se vea el movimiento producido por la mano en todo momento esta vibra con una frecuencia característica, y al realizar las mediciones puede alterar la señal adquirida por el micrófono, por esta razón se usa un trípode independiente del banco para evitar vibraciones indeseadas.

ALTURA

La altura de un sonido es la cualidad que nos permite clasificarlo como grave o agudo, se relaciona con la frecuencia f de la onda sonora, de modo que cuanto más agudo sea el sonido, tanto mayor será la frecuencia.

La altura de un sonido es diferente a la altura de la onda, que se refiere a amplitud.

2.2.5. LA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

La TRF es un algoritmo para calcular la TDF de manera rápida y eficaz. El algoritmo pone algunas limitaciones en la señal y en el espectro resultante. Por ejemplo: la señal de la que se tomaron muestras y que se va a transformar debe consistir de un número de muestras igual a una potencia de dos, según el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon el cual indica que para poder replicar con exactitud la forma de una onda es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear para evitar obtener señales diferentes. La mayoría de los analizadores TRF permiten la transformación de 512, 1024, 2048 o 4096 muestras. El rango de frecuencias cubierto por el análisis TRF depende de la cantidad de muestras recogidas y de la proporción de muestreo.

2.2.6. SENSOR

MICRÓFONO

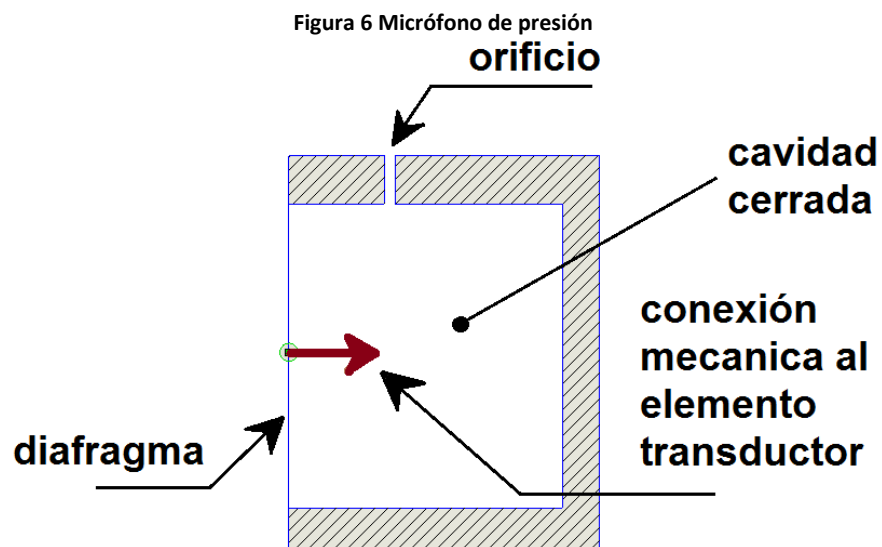
El micrófono es un transductor que nos permite realizar una conversión entre las variaciones de presión y variaciones de nivel en una corriente eléctrica.

Para captar el sonido, el micrófono transforma las variaciones de presión en el aire (ondas sonoras), en impulsos eléctricos de corriente eléctrica alterna, de manera que las podamos manipular y almacenar sobre algún soporte bien sea en formato analógico o digital. Esto se hace a través de un proceso denominado modulación. Posteriormente, se volverán a transformar esos impulsos eléctricos en ondas de presión mediante los altavoces. Por ello se dice que el micrófono es un transductor.

A la hora de estudiar los diferentes tipos de micrófonos, se puede hacer, bien sea por su tipo de funcionamiento, o bien por la forma en que recoge el sonido, dado que no presentan la misma sensibilidad en todos los ángulos con respecto a la fuente sonora, forma que se representa por medio de un diagrama polar.

MICRÓFONO DE PRESIÓN

Transduce a señal eléctrica la presión instantánea de las ondas sonoras que golpean el diafragma.



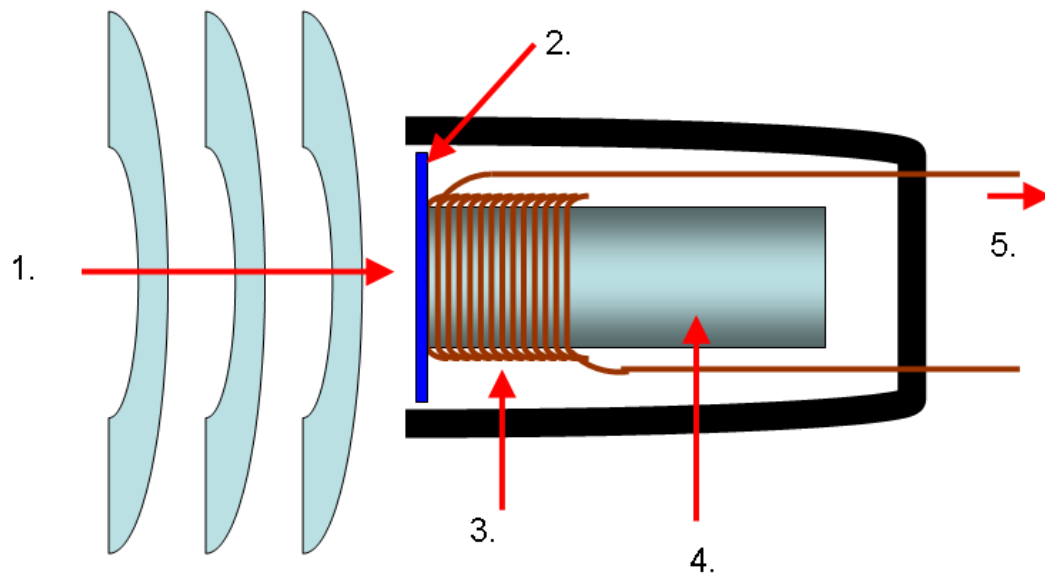
El diafragma es sensible a las variaciones de presión sobre la superficie, sin importar la ubicación de la fuente dando como resultado un diagrama polar omnidireccional.

MICRÓFONOS DINÁMICOS

Funcionan bajo el principio de generar una tensión de salida mediante inducción electromagnética sobre un conductor circulante dentro de un campo electromagnético que corta líneas de fuerza.

Figura 7 Partes de un micrófono dinámico

Dynamic Microphone



Donde:

1= onda de presión.

2= membrana sensible a la onda de presión.

3= bobina.

4= imán.

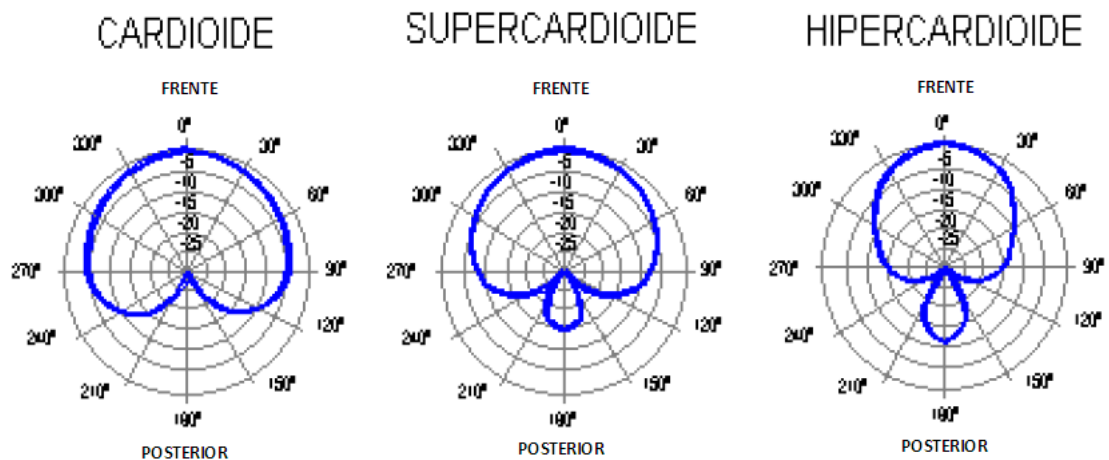
5= tensión de salida.

MICROFONO DINÁMICO UNIDIRECCIONAL

El micrófono unidireccional es aquel que tiene una mayor sensibilidad a los sonidos que le vienen de frente a la cápsula con un ángulo relativamente amplio. El diagrama polar de un micrófono refleja la sensibilidad con que es capaz de captar un sonido según el ángulo con que le incida. Este tipo de diagrama polar, se puede subdividir en tres que son, el cardiode, el supercardioide y el hipercardiode.

Cada uno de ellos va presentando un diagrama polar cada vez más estrecho y por tanto se van haciendo más insensibles a los sonidos que les llegan desde la parte posterior así como del lateral.

Figura 8 Diagramas polares de micrófonos



Los micrófonos direccionales (cardioides, superCardioides e hipercardioides) se usan cuando se desea:

- Rechazar al máximo la acústica que tenga el recinto donde se realiza la toma.
- Rechazar el ruido de fondo.
- Utilizar técnicas especiales de grabación con parejas de micrófonos (estéreo coincidente).

- Captación de sonidos lejanos.

La respuesta en frecuencia de un micrófono indica la sensibilidad del mismo a cada frecuencia.

Como se ve al hablar de los diagramas polares, los micrófonos no tienen la misma sensibilidad para cada ángulo de incidencia ni para cada frecuencia, por tanto es difícil conseguir una respuesta uniforme en todo el espectro.

Como es lógico hay que observar que la longitud de onda de un sonido influye o tiene una relación en el comportamiento del diafragma según la relación de tamaño que haya entre ambos

TÉCNICA DE SEÑALES ACUSTICAS PARA DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS

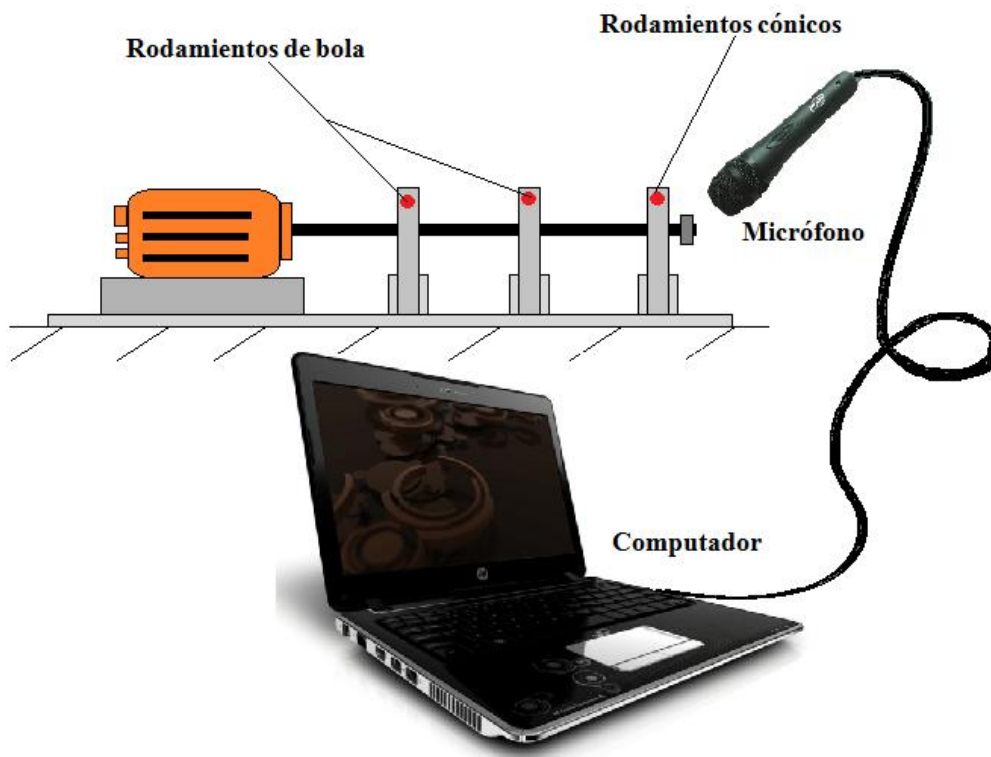
La supervisión y detección de fallas en rodamientos o en cualquier parte de una maquina puede llegar a resultar considerablemente costosa desde un punto de vista de utilización del sensor y del personal capacitado para la interpretación de resultados del sensor, de lo cual surge una propuesta de adquisición de la señal, en la cual no se utilizara un acelerómetro y en cambio se adquirirá la señal mediante un micrófono con ciertas características y accequible económicamente.

Debido a que la técnica es relativamente novedosa la información que se encuentra disponible es escasa, y se debieron realizar pruebas de laboratorio para comprobar si la señal de adquisición del micrófono fuese por lo menos parecida en cierta parte a la señal entregada por el acelerómetro.

La técnica de SEÑALES ACUSTICAS busca principalmente detectar las fallas en rodamientos en nuestro caso específicamente en la pista externa del rodamiento cónico, y entregar un espectro similar al entregado por cualquier analizador de vibraciones pero con una ventaja económica considerable en la compra del sensor.

Para facilitar el diagnostico se deben eliminar las frecuencias cuyo ancho de banda opaque la amplitud de la falla cuando es incipiente, ya que se esconde entre otras frecuencias que no tienen nada que ver con la falla, y se utilizara un filtro pasa banda en la frecuencia de falla de la pista externa y sus armónicos.

Figura 9 Esquema de adquisición de señal en la Técnica de Señales Acústicas



2.2.7. ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL

El sensor a utilizar será un micrófono un micrófono dinámico unidireccional TECH TDM 207 ya que este micrófono tiene una mayor sensibilidad a los sonidos incidentes en el frente de la cápsula y nos evita adquirir algunos sonidos externos indeseables en el momento de analizar las frecuencias adquiridas.

Debido a que existe poca información acerca de esta técnica de detección de fallas realizamos una primera toma de datos para saber si el micrófono adquiriría la señal de vibración de una barra en voladizo que se utiliza en laboratorio de vibraciones para determinar la frecuencia de vibración, y más específicamente saber si la frecuencia que arroja el micrófono cuando se excita la barra coincidía o estaba cercana a la frecuencia entregada por el analizador de vibraciones (CSI).

A continuación se describe el procedimiento:

1. Se realizó el montaje de la barra en voladizo para determinar la frecuencia de vibración y se ubicaron los sensores en los puntos indicados.

Figura 10 Toma de datos barra en voladizo 1



2. Se excito el sistema para adquirir su frecuencia de vibración.

Figura 11 Toma de datos barra en voladizo 2



3. Se adquirieron las señales con los dos sensores:

CSI

Figura 12 Toma de datos barra en voladizo 3



MICROFONO

Figura 13 Toma de datos barra en voladizo 4



Figura 14 Toma de datos barra en voladizo 5



Figura 15 Toma de datos barra en voladizo 6



4. Se procesó la información para obtener los espectros correspondientes.

Figura 16 Espectro CSI

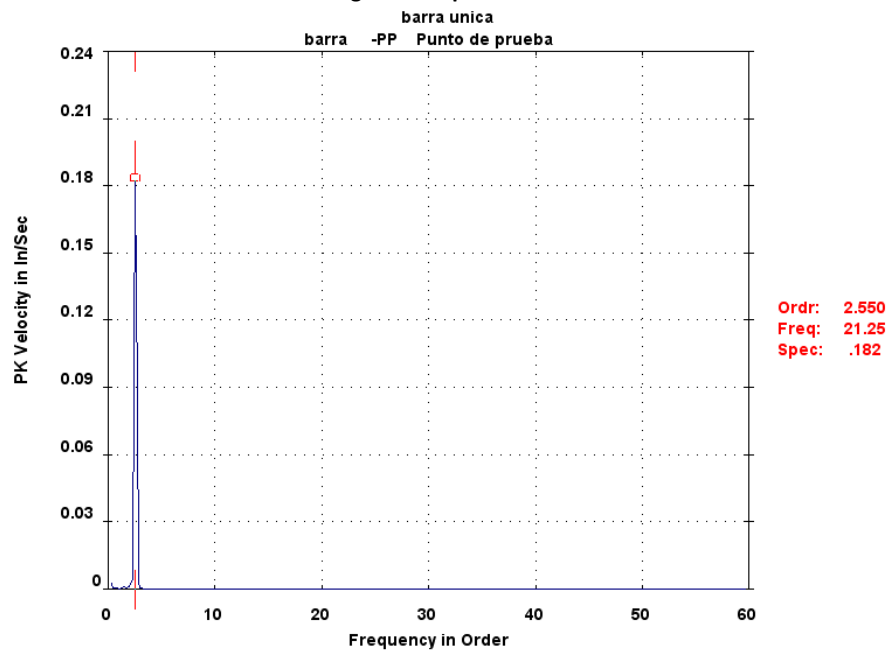
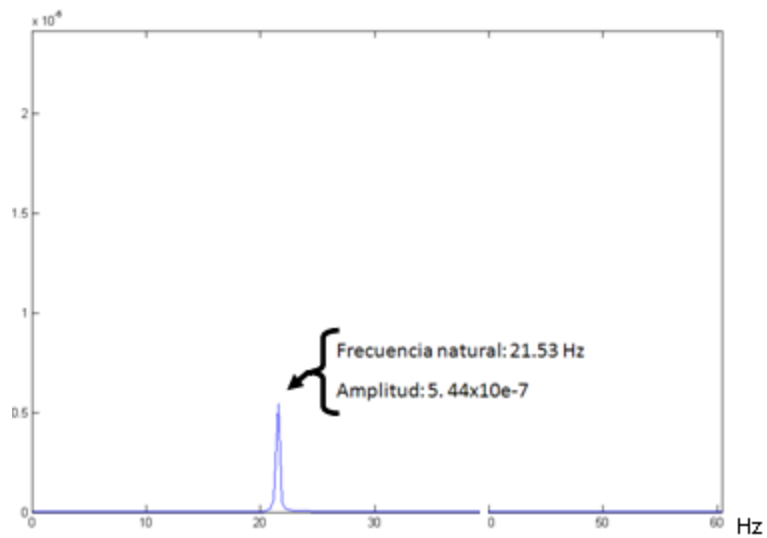


Figura 17 Espectro Matlab adquirido con micrófono



5. Se compararon los espectros adquiridos y se determino un porcentaje de error.

Obtuvimos un porcentaje de error del 1.32%.

2.2.8. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL

PROCEDIMIENTO DE LA TÉCNICA DE “SEÑALES ACUSTICAS”

- 1.1. Alinear y balancear el banco para toma de datos.
- 1.2. Instalar en el banco los rodamientos en buen estado.
- 1.3. Conectamos el micrófono al puerto HD.
- 1.4. Ubicar el micrófono en una zona no perteneciente al conjunto a analizar para evitar perturbaciones por vibraciones.
- 1.5. El micrófono deberá estar situado $0,05 \text{ m} \pm 0,001 \text{ m}$, y un ángulo de 45 grados ± 10 grados respecto al eje.
- 1.6. Abrir Matlab y con el comando waverecord se grabara la señal en formato .wav desde el software, ya que es capaz de grabar, reproducir, y procesar la señal de entrada.
- 1.7. Encender el banco y realizar las tomas correspondientes con el micrófono, y el piezómetro del CSI.
- 1.8. Instalar en el banco los rodamientos con un grado proporcional de daño.
- 1.9. Realizar diferentes escenarios de falla en pista externa.
- 1.10. Recopilar la información y procesarla mediante la ayuda del software MATLAB.
- 1.11. Realizar un análisis de espectros mediante el micrófono y comparar los resultados con los entregados por el CSI.

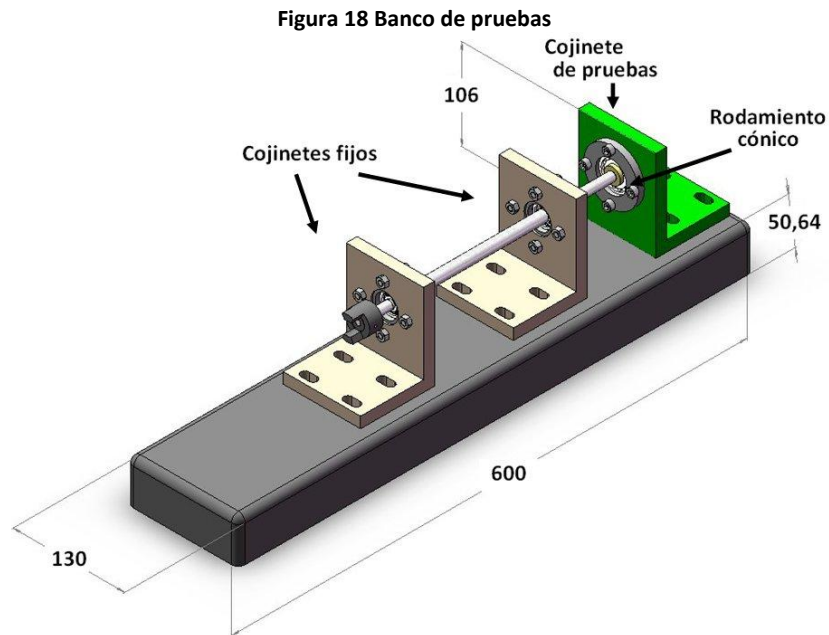
3. ENSAYOS EXPERIMENTALES

A continuación se describe la metodología empleada en la medición de las señales acústicas y a su vez con el analizador de vibraciones (CSI) de los rodamientos cónicos , las cuales fueron tomadas para cuatro casos específicos : rodamientos en perfecto estado , con falla incipiente , con falla intermedia y con falla catastrófica.

Para tal fin se construyó un banco que permitiera el análisis de la falla en rodamientos cónicos.

3.1. DESCRIPCIÓN DEL BANCO

El banco está construido con tres apoyos en forma de L, dos de los cuales tienen rodamientos de bolas y uno en el cual irán los rodamientos cónicos a los cuales se les inducirá la falla, los apoyos donde se encuentran los rodamientos de bolas sostendrán el eje y realizarán la función de minimizar el movimiento relativo de este cuando se quiten los rodamientos cónicos. El eje está acoplado a un motor de baja potencia.



Las partes del banco son:

1. Un motor de inducción de una potencia igual a 1/8 Hp con velocidad nominal de 1800 RPM.
2. Soportes en forma de L que contendrán los rodamientos de bolas y el rodamiento cónico.
3. Eje mecanizado.
4. Dos rodamientos de una hilera de bolas rígido NSK referencia 6000 (ver figura 40).
5. Cuatro rodamientos cónicos de pruebas (uno de ellos en perfecto estado y tres con diferentes niveles de severidad de falla, incipiente, intermedia y avanzada) NSK de referencia 30203 (ver figura 41).
6. Estructura metálica de acero para soporte de motor y rodamientos.

3.2. INSTRUMENTACIÓN

Se utilizarán los siguientes instrumentos:

- ▶ Un micrófono dinámico unidireccional TECH TDM-207 con las siguientes especificaciones:

Tabla 1 Especificaciones del micrófono

Impedancia	600 Ohmios
Sensibilidad	-73 ± 3 dB
Respuesta de frecuencia	80 Hz~ 12 KHz

- ▶ Un computador HP Pavilion dv6620la Notebook con sistema operativo Windows XP SP3
- ▶ Software MATLAB 7.4.0 (R2007) para el procesamiento y análisis de señal adquirida.
- ▶ Analizador de vibraciones CSI.
- ▶ Lámpara Estroboscópica marca Lutron modelo DT-2249

3.3. METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN

Se desea capturar las señales acústicas emitidas por la falla de la pista externa de un rodamiento cónico 30203 mediante un micrófono Un micrófono dinámico unidireccional TECH TDM-207, posteriormente analizar la señal empleando la técnica de SEÑALES ACÚSTICAS comparando el resultado obtenido con la información que provee la Transformada de Fourier y con la información entregada por el CSI en los diferentes escenarios de falla.

La eficacia de la técnica se validará exclusivamente a fallas inducidas ubicadas en la pista externa del rodamiento cónico, debido a que éste 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 del rodamiento cónico. En el primer nivel tendremos la pista externa en condición normal. El segundo nivel de falla será una picadura en la pista, esto con el fin de que la falla sea apenas notoria o incipiente. El tercer nivel será una falla avanzada y por último una falla catastrófica, que representa cuando el rodamiento está por deteriorarse y colapsar.

Una vez preparados los rodamientos se procede a tomar las lecturas de las señales con el micrófono y simultáneamente con el analizador de vibraciones CSI , para el rodamiento en perfecto estado y sus tres escenarios de falla, pero debemos 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 frecuencia de falla característica del rodamiento (BPFO)).

Luego de efectuar las medidas simultáneas entre el micrófono y el analizador se almacenan los datos y se procede a realizar el análisis respectivo en el dominio de la frecuencia.

Los datos guardados por el micrófono quedaran guardados en una extensión .wav que puede ser reconocida por MATLAB ya que la grabación se realiza desde el software y a su vez estos datos pueden ser reproducidos como cualquier archivo sonoro.

Una vez se carga la información en MATLAB se procederá a realizar el tratamiento de la señal. Primero se realiza la FFT (Transformada rápida de Fourier) con la cual se obtiene el espectro de frecuencia, luego se realiza un filtrado para eliminar frecuencias no deseadas y por último se aplica el filtro a la señal obteniendo un espectro para determinar la ganancia de cada estado de falla con relación a la señal en buen estado.

3.4. INDUCCIÓN DE FALLAS

Seleccionamos el rodamiento cónico SKF de referencia 30203 como rodamiento de pruebas por su facilidad para desmontar su pista externa, ubicado en el apoyo del extremo del banco. Los ensayos serán realizados bajo cuatro condiciones diferentes y sus fallas se ubicarán en la pista externa del rodamiento.

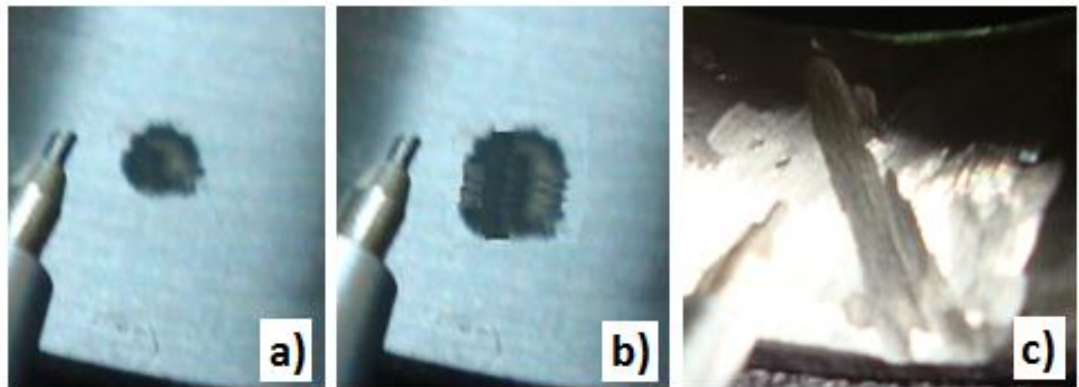
Primera condición: Prueba en la pista externa del rodamiento en perfecto estado.

Segunda condición: Rodamiento con falla incipiente (ver figura 42-a).

Tercera condición: Rodamiento con falla intermedia (ver figura 42-b).

Cuarta condición: Rodamiento con falla desarrollada (ver figura 42-c).

Figura 19 Fallas inducidas en la pista externa del rodamiento



Los defectos incipiente e intermedia en la pista externa de los rodamientos fueron realizadas mediante el choque eléctrico de un electrodo con la pista externa, provocando el descascaramiento de una parte de la pista externa y con ello inducir el defecto deseado (ya sea incipiente o intermedio, ver figura 37-1 y 37-2), mientras que para realizar el defecto avanzado se empleó un disco de esmeril montado a un moto-tool y así perforar y marcar severamente la pista externa (ver figura 37-3). Estas fallas corresponden a la progresión del descascarado en los rodamientos, una de las fallas más comunes. Este proceso se realiza con el fin de comparar las señales para las diferentes etapas de progresión de la falla y compararlas con un rodamiento en perfecto estado.

3.5. CALCULO DE LAS FRECUENCIAS DE FALLA TEÓRICAS

Al realizar el análisis de vibraciones debemos centrarnos en una zona específica del espectro y necesitamos una frecuencia que nos sirva de referencia, y ya que sabemos las características de falla de nuestro rodamiento y en que parte del mismo se presentará la falla tenemos un punto de partida para el diagnóstico el cual nos lo proporcionan las formulas de frecuencias de falla características en las partes del rodamiento.

Estas frecuencias se hallan partiendo de las características físicas del rodamiento que nos brinda el fabricante y sirven como datos para corroborar con la frecuencia de falla obtenida de la experiencia y realizar un respectivo porcentaje de error.

3.5.1. FRECUENCIA DE FALLA CARACTERÍSTICA CALCULADA POR MEDIO DEL MÉTODO ANALÍTICO

Al reemplazar los datos técnicos suministrados por el fabricante (ver tabla 4) en la ecuación (3), se puede determinar la *Frecuencia de Paso de los elementos rodantes por la Pista Exterior (BPFO)*, así:

$$W_i = 1650 \text{ RPM} , W_o = 0 \text{ RPM} , B_d = 2.02 \text{ mm} , N_b = 15 , P_d = 17 \text{ mm} , \phi = 13^\circ$$

Que al reemplazar en la fórmula se tiene:

$$BPFO = \left| \frac{15}{2} (1650 - 0) \left(1 - \frac{2.02 * \cos 13}{17} \right) \right| \Rightarrow BPFO = 182.37 \text{ Hz}$$

SEGÚN BASE DE DATOS DEL CSI

El CSI trae una base de datos de acuerdo al rodamiento que se desee analizar y al introducir los datos del fabricante en la base obtuvimos:

Figura 20 Base de datos de frecuencias de fallas del CSI

BEARING FREQUENCIES FOR SKF 30203

PHYSICAL DATA

Number of Balls/Rollers: 15
Ball/Roller Diameter: .2020
Pitch Diameter of Races: 1.037
Contact Angle (Degrees): 13.0
Inner Race Rotating: Yes

HARMONICS	SHAFT SPEED	TRAIN (FTF)	SPIN (BSF)	OUTER (BPFO)	INNER (BPFI)
1	29.32	11.88	72.57	178.16	261.59
2	58.63	23.75	145.14	356.31	523.19
3	87.95	35.63	217.70	534.47	784.78
4	117.27	47.51	290.27	712.63	1046.37

HARMONICS	OUTER RACE PASS (BPFO) PLUS SIDEBANDS		INNER RACE PASS (BPFI) PLUS SIDEBANDS	
1	148.84	178.16	207.47	261.59
	119.52		236.79	290.91
2	327.00	356.31	385.63	523.19
	297.68		414.95	552.50
3	505.16	534.47	563.79	784.78
	475.84		593.11	814.09
4	683.31	712.63	741.95	1046.37
	654.00		771.26	1075.69
				1105.00

4. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN

Se mostrará a continuación los espectros correspondientes a los análisis de vibraciones mediante la técnica de señales acústicas para cada escenario de falla en los rodamientos obtenidos en la experiencia, en primer lugar se mostraran sin el filtro aplicado, luego aplicando el filtro a cada uno y luego los espectros obtenidos con el CSI.

4.1. ANÁLISIS A RODAMIENTO EN PERFECTO ESTADO

Se analizó un rodamiento cónico en perfecto estado tal como se estableció anteriormente con señales capturadas por el micrófono y el analizador simultáneamente, con el fin de establecer la condición inicial y como punto de comparación, en lo que se refiere a frecuencias presentes en él.

4.2. ESPECTROS CARACTERÍSTICOS DEL RODAMIENTO CÓNICO 30203

Figura 21 Espectro de rodamiento 30203 en buen estado

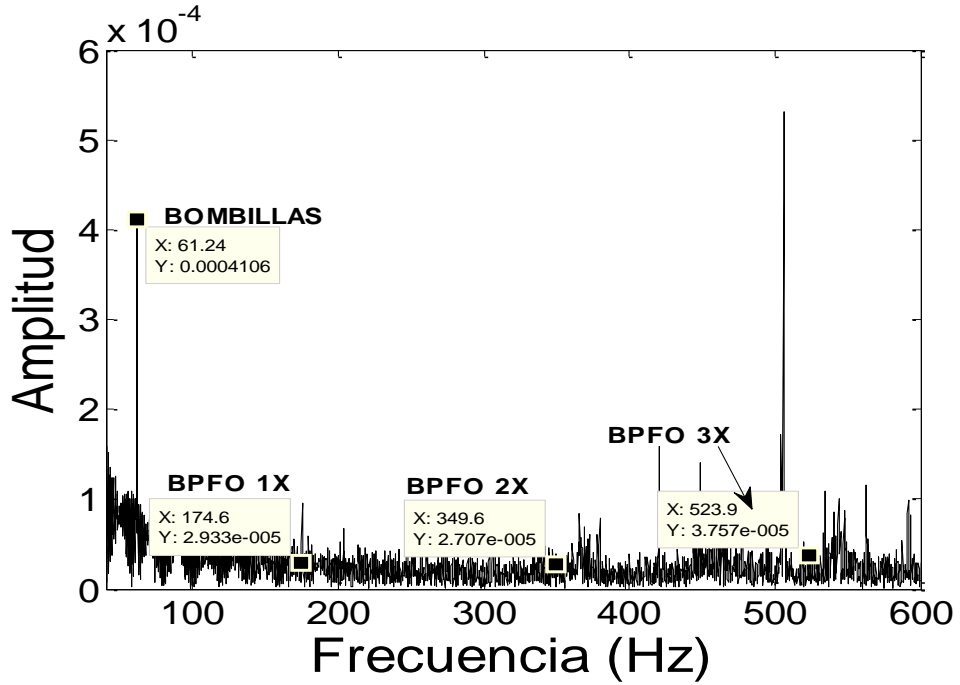


Figura 22 Espectro de rodamiento 30203 con falla incipiente

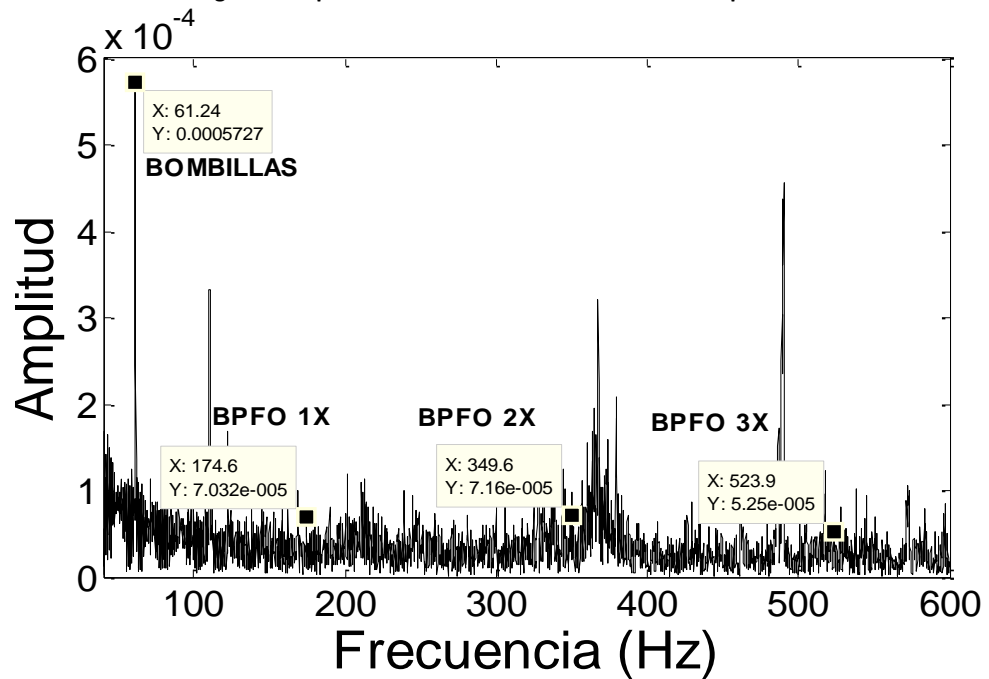


Figura 23 Espectro de rodamiento 30203 con falla intermedia

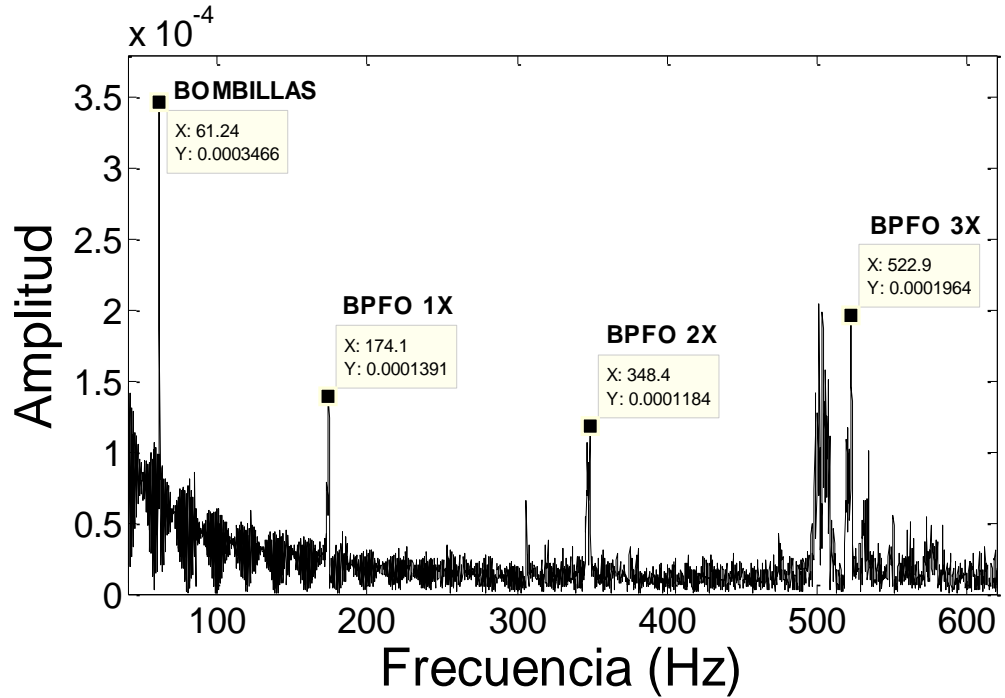
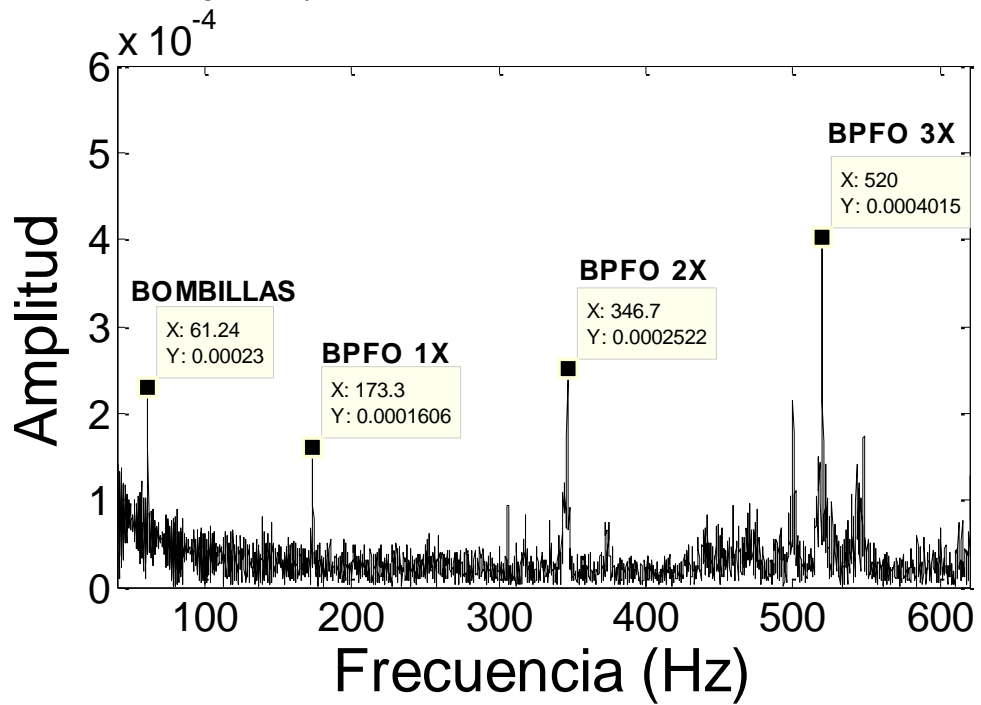


Figura 24 Espectro de rodamiento 30203 con falla catastrófica



Al analizar los espectros obtenidos anteriormente, se observa una frecuencia correspondiente a 60 Hz aproximadamente, en cada uno de los escenarios, esto se debe a la sensibilidad del micrófono el cual percibía la frecuencia de la red eléctrica de las bombillas encendidas en el laboratorio, en donde se realizaron las pruebas, lo cual deja ver la sensibilidad de la membrana de presión del micrófono.

Se observa también claramente los picos de amplitud en las frecuencias esperadas de falla (la BPFO) principalmente en la cual se enfoca el trabajo de grado, y junto a esta frecuencia se observan su segundo y tercer armónico, ya que después de este la energía se disipaba y la frecuencia se aleja un poco de la teórica.

En el espectro correspondiente a la falla incipiente se observa el aumento de energía respecto de la amplitud del rodamiento en buen estado, aunque los picos no sobresalen se puede ver claramente que la energía aumento y por lo tanto se puede realizar una técnica de filtrado a la señal para eliminar la frecuencia que rodea a la de interés y poder observar los picos correspondientes de BPFO y sus armónicos.

Al observar el espectro de falla catastrófica del rodamiento se observan claramente los picos de BPFO y sus armónicos, con mayor energía tal como se espera.

Si se observan los espectros en orden ascendente, se puede ver que la energía con la que comienza el rodamiento en buen estado va aumentando crecientemente y coherentemente con el aumento de energía esperado para una falla catastrófica en relación con la presente en buen estado, para entender mejor el aumento de energía se puede ver la tabla 2.

Se observa que en todos los espectros aparece una frecuencia de 500 Hz, cercana al tercer armónico de BPFO, esta frecuencia permanece constante en amplitud en todos los espectros, lo que significa que no es una falla del rodamiento.

5. ESPECTROS OBTENIDOS CON EL ANALIZADOR CSI

Figura 25 Espectro del rodamiento en buen estado obtenido con el CSI

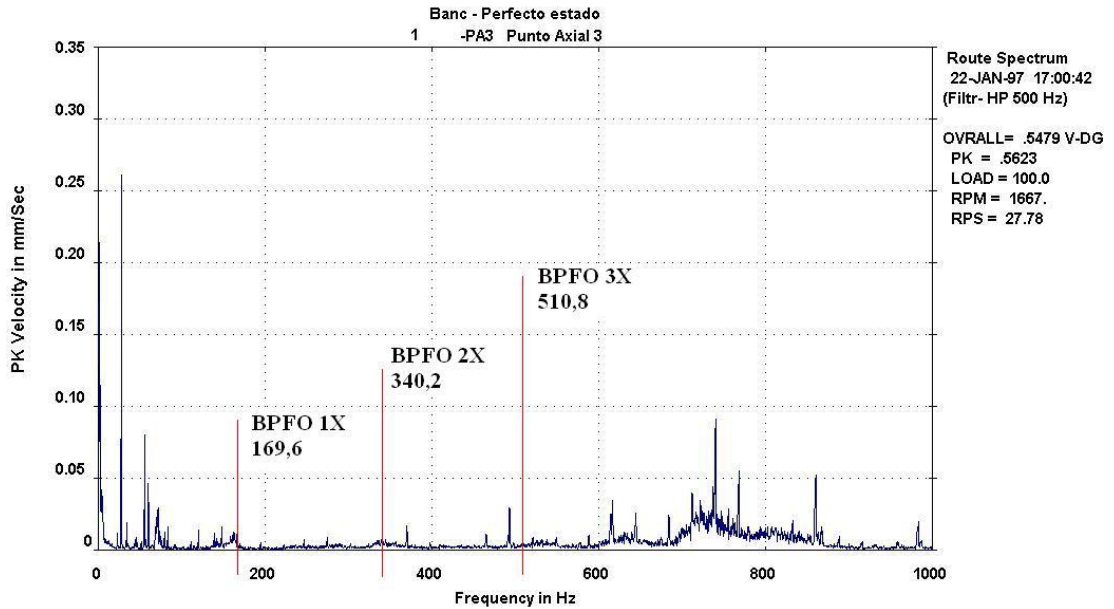


Figura 26 Espectro del rodamiento con falla incipiente obtenido con el CSI

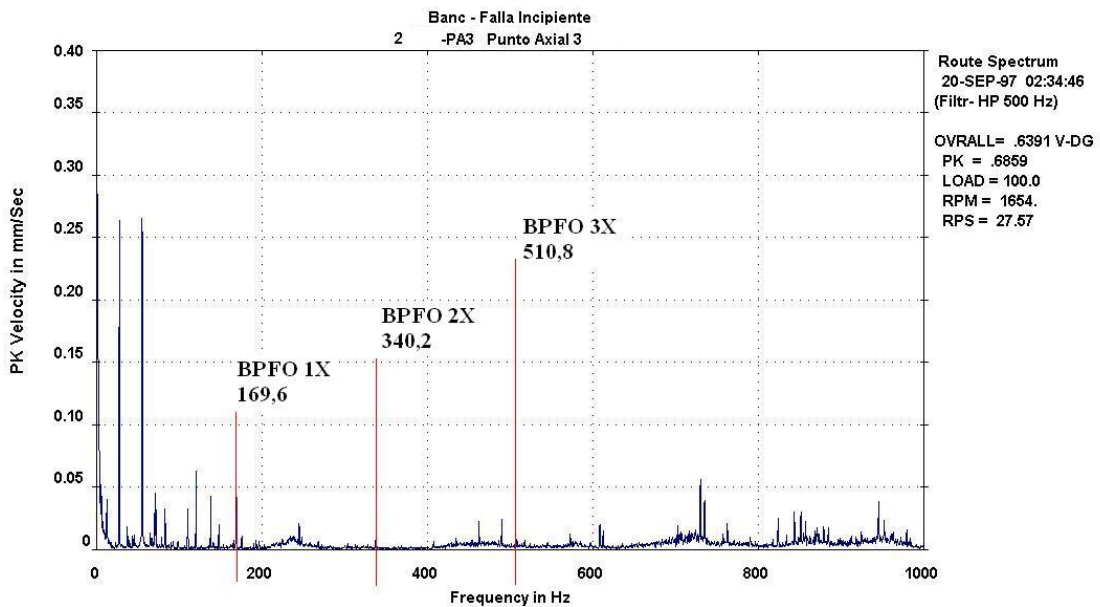


Figura 27 Espectro del rodamiento con falla intermedia obtenido con el CSI

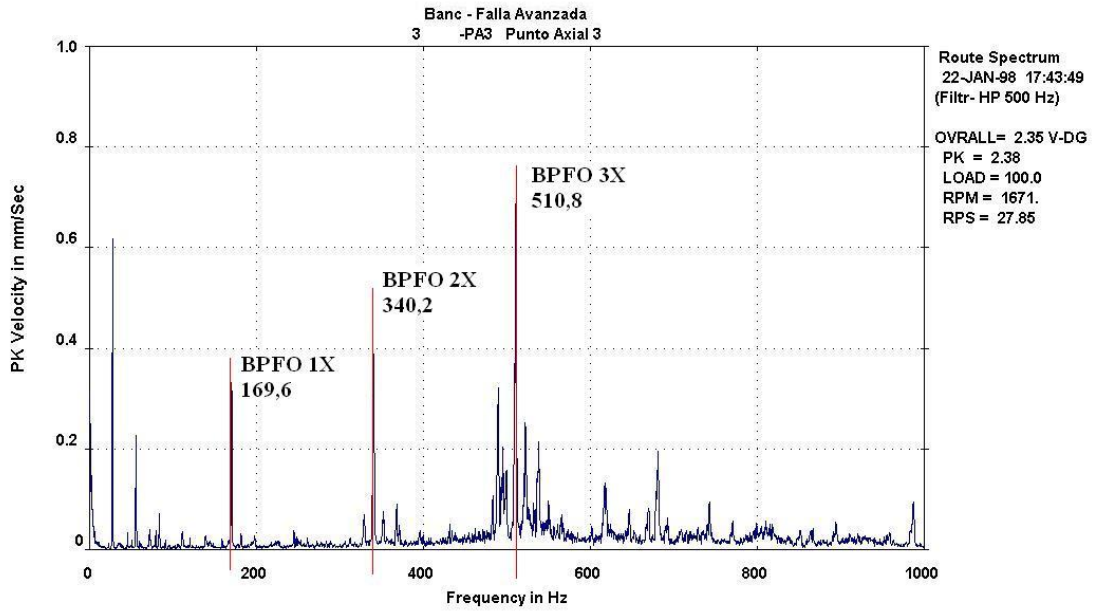
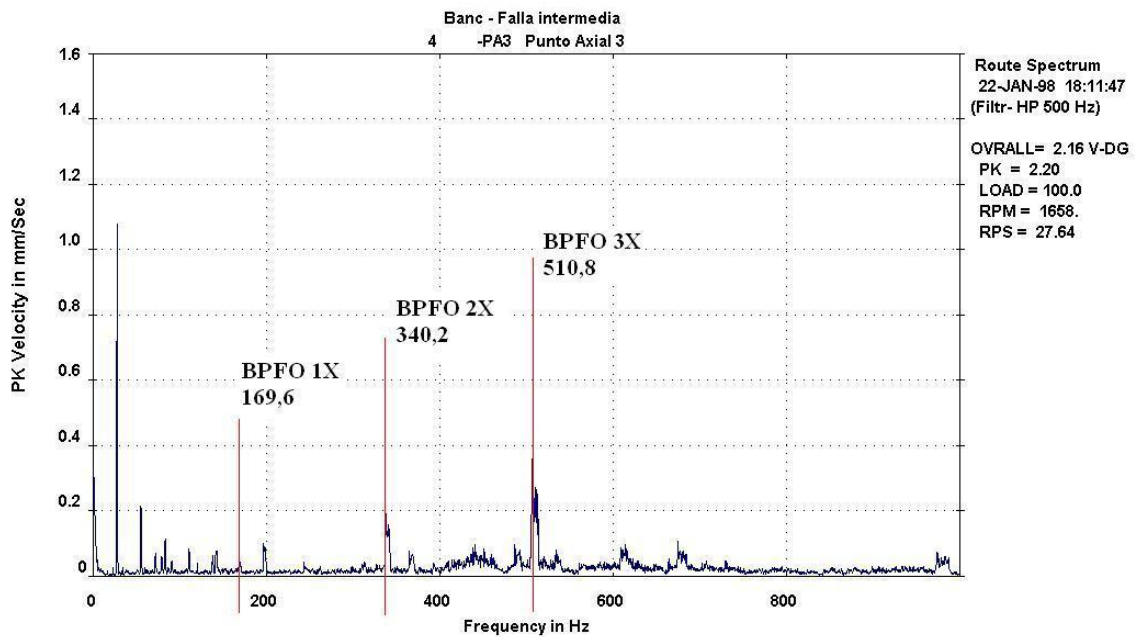


Figura 28 Espectro del rodamiento con falla catastrófica obtenido con el CSI



ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se muestra la tabla de comparaciones entre las diferentes amplitudes para cada estado de falla en el rodamiento y el buen estado del rodamiento. En la tabla 2 se observa la ganancia obtenida para cada caso tomando como punto de comparación el buen estado del rodamiento.

Tabla 2 Estimación de ganancia a partir de amplitudes de los espectros

	CONDICIÓN											
	Buen Estado			Catastrófica			Intermedia			Incipiente		
	1x BPFO	2x BPFO	3x BPFO	1x BPFO	2x BPFO	3x BPFO	1x BPFO	2x BPFO	3x BPFO	1x BPFO	2x BPFO	3x BPFO
Amplitud	2,93E-05	2,71E-05	3,76E-05	1,61E-04	2,52E-04	4,02E-04	1,39E-04	1,18E-04	1,96E-04	7,03E-05	7,16E-05	5,25E-05
Ganancia= Condición / Buen Estado	1	1	1	5,5	9,3	10,7	4,7	4,4	5,2	2,4	2,6	1,4

Se realizó un análisis comparativo de los espectros asociados a la técnica de SEÑALES ACUSTICAS entre el rodamiento en perfecto estado (pista externa sin defectos) con cada nivel de severidad de falla en estudio (defecto incipiente, intermedio y avanzado).

En cada una de los espectros anteriores se observa el aumento de amplitud de la BPFO de acuerdo al grado de severidad de falla, y se observa que la amplitud de la BPFO al 1x presenta un aumento considerable de 10 veces en su etapa incipiente, teniendo en cuenta que el filtro es un filtro pasa banda el cual realizamos de igual manera con el software MATLAB.

Cada vez que se colocaba un rodamiento para realizar la toma de datos, el apriete de los tornillos que mantienen la canastilla del rodamiento cónico ensamblado al sistema cambia, y esto se ve reflejado en las pequeñas discrepancias presentes en la BPFO para

los diferentes escenarios de medición, (se trató de mantenerla lo más constante posible durante el desarrollo de las mediciones y con esto mantener de igual manera la BPFO.

Se presenta esta comparación entre las frecuencias entregadas por la técnica de SEÑALES ACUSTICAS, de la cual se trata este proyecto y las frecuencias ofrecidas por el analizador CSI con el que cuenta la Escuela de Ingeniería Mecánica en el laboratorio de vibraciones y los resultados se presentan en la tabla 3 a continuación.

Tabla 3 Comparación de frecuencias entre la técnica de señales acústicas y el CSI

Estado del Rodamiento	Frecuencias BPFO (Hz)		
	1X	2X	3X
Micrófono	174,96	349,92	524,88
Analizador CSI	169,6	340,2	510,8
% de diferencia	3,2%	2,9%	2,8%

Se observa que el porcentaje de diferencia entre las frecuencias ofrecidas por la técnica de SEÑALES ACUSTICAS y el analizador CSI es inferior al 4% lo cual es un porcentaje aceptable teniendo en cuenta que se trata de dos sensores diferentes, y siempre habrá un mínimo porcentaje aún si se trata de dos sensores iguales.

CONCLUSIONES

- Se demostró la efectividad de la técnica SEÑALES ACUSTICAS en la detección de fallas en rodamientos cónicos, pues se adquirieron las señales a través del micrófono especificado y se realizó el respectivo tratamiento de las señales obteniendo así los espectros en frecuencia correspondientes a cada escenario de falla.
- Se realizó una comparación entre las frecuencias entregadas por la técnica de SEÑALES ACUSTICAS y las entregadas por el analizador CSI y se obtuvo un porcentaje de error mínimo, lo cual quiere decir que se pueden obtener los mismos resultados de análisis con la técnica implementada y con el analizador CSI.
- Se construyó el banco con las especificaciones establecidas, el cual sirvió para realizar la fase de experimentación y de toma de datos, y gracias a su disposición se minimizó el porcentaje de error en cada desmontaje de los rodamientos que fueron analizados en este trabajo de grado.
- El fundamento de la técnica de SEÑALES ACUSTICAS es poder detectar los defectos en los rodamientos sin necesidad de tener un contacto directo con el soporte del rodamiento, gracias a la recepción de ondas de presión en la membrana del micrófono, que son las mismas generadas en el medio sólido, además de reducir considerablemente el precio del sensor a utilizar.

- El software MATLAB, corroboró ser una herramienta muy útil en el procesamiento de señales permitiendo adquirir la señal sin necesidad de una tarjeta, utilizando el comando wavrecord, aplicar la FFT (Fast Fourier Transform o Transformada Rápida de Fourier), a las señales de interés .
- Para un mejor desempeño de la técnica se recomienda trabajar en un filtro activo que permita pasar solo las señales presentes en las bandas de frecuencia de interés y bloquear las señales de otras bandas como ruido externo, sin importar que tipo de ruido sea el que se provoque alrededor del sensor, debido a que el micrófono es muy sensible se pueden filtrar señales externas ajenas a las señales deseadas, como por ejemplo la influencia de las bombillas fluorescentes del laboratorio en la toma de datos ya que se presentaban picos de frecuencias a 60 Hz, que después de cerciorarnos desaparecieron al apagar las bombillas.
- Este proyecto de grado es de utilidad para investigaciones futuras en el campo del estudio de técnicas a desarrollar en la detección de fallas en rodamientos, como medios alternativos y económicamente viables.

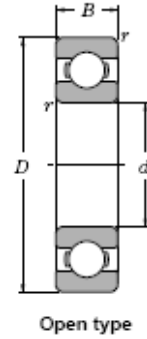
BIBLIOGRAFIA

- **GARCIA** Alfonso. *Vibraciones Mecánicas*. Colombia. (1995). Ediciones UIS. Universidad Industrial de Santander.
- **HERNÁNDEZ MONTERO** Fidel Ernesto. *Diagnóstico de Maquinarias Rotatorias Aplicando Técnicas Clásicas y Avanzadas de Análisis de Vibraciones*, (2009). Bicente Atxa ,Uribe.
- **TANDON, N / CHOUDHURY** A. *A review of vibration and Acoustic Measurement Methods for the Detection of Defects in Rolling Element Bearings*. India. (1999.) Indian Institute of Technology.
- **WHITE** G. *Introducción al análisis de vibraciones*. Estados Unidos de América. (1990-2010). Catálogo de la empresa AZIMA DLI. 148 p. Disponible en el catálogo en línea de la Empresa AZIMA. < <http://www.azimadli.com/>>

ANEXO A
CÓDIGO DE MATLAB

```
L=length(A);  
title('Señal que entra del analizador')  
  
Fs=11025;  
  
figure  
NFFT = 2^nextpow2(L); Y = fft(A,NFFT)/L;  
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);  
q=2*abs(Y(1:NFFT/2+1));  
plot(f(40:32769),q(40:32769))  
title('Espectro de la señal')  
xlabel('Frecuencia (Hz)')  
ylabel('|Y(f)|')
```

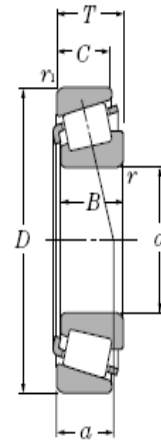
ANEXO B
ESPECIFICACIONES RODAMIENTO 6000



d 10~20mm

d	Boundary dimensions				Basic load ratings				Limiting speeds				Bearing numbers				
	D	B	mm		kN		kgf		rpm				open type	sealed type	non-contact type	low torque type	contact type
			r_{min}	r_{is}	C_r	C_{or}	C_r	C_{or}	grease open type ZZ LLB	oil open type Z LB	LLH	LLU					
10	15	3	0.1	—	0.855	0.435	87	44	10,000	12,000	—	—	6700	—	—	—	—
	19	5	0.3	—	1.83	0.925	187	94	32,000	38,000	—	24,000	6800	ZZ	LLB	—	LLU
	22	6	0.3	0.3	2.7	1.27	275	129	30,000	36,000	—	21,000	6900	ZZ	LLB	—	LLU
	26	8	0.3	—	4.55	1.96	465	200	29,000	34,000	25,000	21,000	6000	ZZ	LLB	LLH	LLU
	30	9	0.6	0.5	5.10	2.39	520	244	25,000	30,000	21,000	18,000	6200	ZZ	LLB	LLH	LLU
	35	11	0.6	0.5	8.20	3.50	835	355	23,000	27,000	20,000	16,000	6300	ZZ	LLB	LLH	LLU

ANEXO C
ESPECIFICACIONES RODAMIENTO 30203



d 15~30mm

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