

**DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS CÓNICOS POR MEDIO DE LA
APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE ENVELOPING**

SERGIO ALFONSO QUINTERO CARVALLIDO

GERSON TRUJILLO NAVARRO

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

BUCARAMANGA

2010

**DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS CÓNICOS POR MEDIO DE LA
APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE ENVELOPING**

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

SERGIO ALFONSO QUINTERO CARVALLIDO

GERSON TRUJILLO NAVARRO

Director

ING. JABID EDUARDO QUIROGA MÉNDEZ

CODIRECTOR

ING. ALFONSO GARCÍA CASTRO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2010

Dedicatoria

A Dios por ser quien ha estado a mi lado en todo momento dándome las fuerzas necesarias para continuar luchando día tras día y seguir adelante rompiendo todas las barreras que se me presenten.

A mis padres Alfonso y Rosario por su amor, cariño, comprensión y apoyo incondicional, ya que gracias a ellos soy quien soy hoy en día.

A mi familia por confiar siempre en mis capacidades y por su inmenso cariño.

También les agradezco a mis amigos más cercanos, a esos amigos que siempre me han acompañado en las buenas y en las malas.

.....y a ti Laura.

Sergio Alfonso Quintero Carvallido

DEDICATORIA

A DIOS por su inconmensurable amor y bondad.

A mi madre Sonia por quien mis sentimientos son tan grandes que las palabras son cortas para expresar lo que significa para mí; sin ella nada de esto hubiera sido posible, además fue ella quien me ha enseñado lo que significa el verdadero amor y por permitirme compartir con ella una sonrisa, un abrazo, un momento....

A mi padre Marbel Antonio por ser un ejemplo de padre y hombre con tesón y valentía que durante todos estos años ha luchado sin decaer contra todo obstáculo, siempre dando pasos hacia delante y que aún continúa con esa lucha. Gracias a mi padre puedo presenciar lo que hoy en día he alcanzado. Gracias PA.

A mi familia quien ha sido un pilar importante debido a que en ella siempre he encontrado comprensión y apoyo moral.

A la familia Medina Carreño por su confianza y tolerancia a través de todos estos tiempos y por el cariño que me han brindando en la distancia.

A mis amigos y amigas (ellos saben a quienes me refiero), porque crecieron conmigo y me conocen; con los cuales disfrute valiosos momentos, y que estuvieron a mi lado compartiendo alegrías y tristezas, además de brindarme apoyo continuo.

Y a todas aquellas personas que me subieron la moral en los momentos cuando más lo necesitaba.

Y a todos les digo que recuerden:

“QUIEN LO VIVE, ES QUIEN LO GOZA”

GERSON TRUJILLO NAVARRO

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE RODAMIENTOS	20
1.1. RODAMIENTOS DE RODILLOS CÓNICOS	21
1.1.1. CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO	22
1.2. RELACIÓN ENTRE CARGA Y DURACIÓN	23
1.3. FALLAS COMUNES EN RODAMIENTOS	24
1.3.1 DEFECTOS LOCALIZADOS	25
1.3.2 DEFECTOS DISTRIBUIDOS	26
1.4. MODOS DE FALLA EN RODAMIENTOS	26
1.4.1. DAÑO EN LAS SUPERFICIES DE RODADURA	26
1.4.2. FACTOR DE RIESGO	33
1.5. FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS DE FALLA EN LOS RODAMIENTOS	34
1.5.1. DETERMINACIÓN DE LAS FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS DE FALLA	35
1.5.1.1. FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL TREN DE ELEMENTOS (FFTE)	35
1.5.1.2. FRECUENCIA DE PASO DE LOS ELEMENTOS RODANTES POR LA PISTA EXTERIOR (BPFO)	36
1.5.1.3. FRECUENCIA DE PASO DE LOS ELEMENTOS RODANTES POR LA PISTA INTERIOR (BPFI)	36
1.5.1.4. FRECUENCIA DE GIRO DE LOS ELEMENTOS RODANTES SOBRE SU EJE (BSF)	37
1.5.2. APLICACIÓN DE LAS FÓRMULAS PARA RODAMIENTOS	37
1.5.3. APROXIMACIONES PARA FRECUENCIAS EN RODAMIENTOS	38

2. ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA DIAGNÓSTICOS DE FALLAS EN RODAMIENTOS	40
2.1. TÉCNICA DE “ENVELOPING” PARA DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS	41
2.2. MODULACIÓN DE LA AMPLITUD	43
2.3. TRANSFORMADA DE HILBERT	45
2.4. PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL	49
2.5. PROCEDIMIENTO DE LA TÉCNICA DE “ENVELOPING”	50
3. ENSAYOS EXPERIMENTALES	56
3.1. DESCRIPCIÓN DEL BANCO	56
3.2. EQUIPOS DE MEDICIÓN	59
3.3. METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN	63
3.4. INDUCCIÓN DE FALLAS	65
3.5. CALCULO DE LAS FRECUENCIA DE FALLA TEÓRICAS	66
3.5.1. FRECUENCIA DE FALLA CARACTERÍSTICA CALCULADA POR MEDIO DEL MÉTODO ANALÍTICO	67
4. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN	68
4.1. DETERMINACIÓN DE LAS FRECUENCIAS NATURALES DEL BANCO	68
4.2. ANÁLISIS A RODAMIENTO EN PERFECTO ESTADO	73
4.3. RODAMIENTO CON DEFECTO INCIPIENTE EN LA PISTA EXTERNA	75
4.4. RODAMIENTO CON DEFECTO INTERMEDIO EN LA PISTA EXTERNA	77
4.5. RODAMIENTO CON DEFECTO AVANZADO EN LA PISTA EXTERNA	78
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	81
6. CONCLUSIONES	86
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	89

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Partes comunes de un rodamiento	20
Figura 2. Rodamiento Cónico	21
Figura 3. Posición de los rodamientos cónicos en el eje	22
Figura 4. Angulo de contacto del rodillo cónico	23
Figura 5. Capacidad de carga axial según el ángulo de contacto	23
Figura 6. Casos de fatiga superficial	26
Figura 7. Casos de descarga eléctrica en rodamientos	27
Figura 8. Desgaste abrasivo en rodamientos	28
Figura 9. Desgaste adhesivo en rodamientos	29
Figura 10. Corrosión en rodamientos	30
Figura 11. Indentación en rodamientos	31
Figura 12. Fractura en rodamientos	32
Figura 13. Ludimientos en rodamientos	33
Figura 14. Rodadura irregular	34
Figura 15. Falla en la canastilla del rodamiento	35
Figura 16. Falla en la pista externa del rodamiento	36
Figura 17. Falla en la pista interna del rodamiento	36
Figura 18. Falla en los elementos rodantes del rodamiento	37
Figura 19. Evaluación del estado de la máquina	40
Figura 20. Medida de vibración por medio del analizador	41
Figura 21. Efecto de la modulación de señales	43
Figura 22. Representación de la señal de falla adquirida en el rodamiento	44

Figura 23. Representación del proceso realizado por la técnica de ENVELOPING	45
Figura 24. A) Respuesta impulso B) Transformada de Hilbert C) Envolvente del sistema rodamiento eje	48
Figura 25. Representación de la técnica de <i>ENVELOPING</i>	49
Figura 26. Defecto localizado en la pista externa del rodamiento	50
Figura 27. Pulsos repetidos producto del campaneado en el rodamiento	51
Figura 28. Espectro de la señal de pulsos	52
Figura 29. Envolvente de la señal	53
Figura 30. Espectro de la señal demodulada	54
Figura 31. Banco de pruebas de rodamientos cónicos	56
Figura 32. Rodamiento de una hilera de bolas	57
Figura 33. Rodamiento cónico de pruebas	58
Figura 34. Tarjeta de adquisición de datos marca NI modelo NI USB-9233	59
Figura 35. Chasis del sistema de adquisición de datos	60
Figura 36. Acelerómetro de marca PCB Piezotronics modelo 325C34	61
Figura 37. Lámpara Estroboscópica marca Lutron	61
Figura 38. Mazo de impulso de marca PCB Piezotronics modelo 086C01	62
Figura 39. Defectos presentes en la pista externa: a) Incipiente, b) Intermedia y c) Avanzada	66
Figura 40. Montaje y ubicación de la excitación para el cálculo de las frecuencias naturales del sistema	68
Figura 41. Señal en el dominio tiempo de la excitación al sistema	69
Figura 42. Determinación de las frecuencias naturales del sistema	69
Figura 43. Modelo exportado a ANSYS para la determinación de los modos de Vibración	70
Figura 44. Primer modo de vibración del banco a frecuencia natural de 738.17 Hz	71
Figura 45. Segundo modo de vibración del banco a frecuencia natural de 847 Hz	71

Figura 46. Tercer modo de vibración del banco a frecuencia natural de 1145 Hz	72
Figura 47. Espectro de la vibración para rodamiento en perfecto estado	73
Figura 48. Espectro de la señal tratada por la técnica de Enveloping para rodamiento en perfecto estado	74
Figura 49. Espectro de la vibración para rodamiento con defecto en la pista externa incipiente	75
Figura 50. Espectro de la señal tratada por la técnica de Enveloping para rodamiento con defecto en la pista externa incipiente	76
Figura 51. Espectro de la vibración para rodamiento con defecto en la pista externa intermedia	77
Figura 52. Espectro de la señal tratada por la técnica de Enveloping para rodamiento con defecto en la pista externa intermedia	78
Figura 53. Espectro de la vibración para rodamiento con defecto en la pista externa avanzada	79
Figura 54. Espectro de la señal tratada por la técnica de Enveloping para rodamiento con defecto en la pista externa avanzada	80
Figura 55. Espectros de rodamiento en perfecto estado (A) y rodamiento con defecto en BPFO incipiente (B)	82
Figura 56. Espectros de rodamiento en perfecto estado (A) y rodamiento con defecto en BPFO intermedia (B)	83
Figura 57. Espectros de rodamiento en perfecto estado (A) y rodamiento con defecto en BPFO avanzada (B)	84

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Aproximaciones para la frecuencia de falla en rodamientos	39
Tabla 2. Comparación de amplitudes antes y después del uso de la técnica	55
Tabla 3. Datos básicos del rodamiento SKF 6000	58
Tabla 4. Datos básicos del rodamiento SKF 30203	58
Tabla 5. Valores de las frecuencias naturales del banco	70
Tabla 6. Amplitudes de la frecuencia fundamental característica de falla (1X) ≈ 170 Hz	81
Tabla 7. Frecuencia de falla en la pista externa para cada uno de los escenarios analizados	85

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. CÓDIGO DE MATLAB APLICADO A UNA SEÑAL SIMULADA	90
ANEXO 2. CÓDIGO DE MATLAB APLICADO A LAS SEÑALES MEDIDAS EN LOS DIFERENTES ESCENARIOS DE FALLA	92

RESUMEN

TITULO: DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS CÓNICOS POR MEDIO DE LA APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE ENVELOPING*

AUTORES: SERGIO ALFONSO QUINTERO CARVALLIDO
GERSON TRUJILLO NAVARRO**

PALABRAS CLAVES: Enveloping, Análisis de vibraciones, fallas, rodamientos cónicos.

DESCRIPCION:

El objeto del presente proyecto de grado es contribuir a la misión de la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER de fomentar los procesos de apropiación tecnológica a través de la investigación de sistemas de monitoreo para la detección temprana de fallas en rodamientos cónicos.

Una de las fallas comunes presentes en maquinaria rotativa son las fallas en rodamientos. Las mayorías de las fallas en rodamientos cónicos involucran el crecimiento de pequeños defectos en las pistas, jaula o elementos rodantes que con el tiempo causan una falla catastrófica en el mismo, causando paro en las máquinas, pérdidas de tiempo y producción cuando se refiere a procesos industriales. Estos defectos al ir desarrollándose causan un cambio en el estado de vibración en el rodamiento, dicho cambio de vibración es aquel que se desea detectar. La técnica de *ENVELOPING* se basa en el tratamiento de la señal de vibración capturada en un equipo rotativo, con el fin de localizar la frecuencia característica de la falla del rodamiento. El tratamiento de la señal se llevará a cabo en MATLAB®.

La técnica se implementó en un banco desarrollado para el estudio de fallas en rodamientos ubicado en el Laboratorio de Vibraciones, en el cual, se implementarán distintos escenarios de falla sobre la pista externa de éstos. Las frecuencias de fallas en el rodamiento obtenidas de la experiencia se validaron con las frecuencias de falla teóricas que son dependientes de las características físicas del rodamiento.

Se demostró que el mantenimiento predictivo, resaltando el análisis de vibraciones, es una herramienta fundamental en el monitoreo de rodamientos, pero es necesario el uso de técnicas de procesamiento de señales como lo es la técnica de *ENVELOPING*, en la detección de fallas incipientes, por ser éstas, de baja energía y por tanto tienden a ser desapercibidas en un análisis de vibraciones tradicional.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Jabid Quiroga Méndez. Co-director Alfonso García Castro.

ABSTRACT

TITLE: DETECTION OF FLAWS IN CONICAL BEARINGS THROUGH APPLICATION OF TECHNIQUE ENVELOPING*

AUTHORS: SERGIO ALFONSO QUINTERO CARVALLIDO
GERSON TRUJILLO NAVARRO**

KEYWORDS: Enveloping, vibration analysis, faults, conical bearings.

DESCRIPTION:

The purpose of this degree project is to contribute to the mission at UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER in promoting processes of technological appropriation through the investigation of monitoring systems for early detection of faults in conical bearings.

One of the common faults found in rotating machinery failures are bearings. The majorities of conical bearings failures involving the growth of small defects on the slopes, cage or rolling elements that eventually causes catastrophic failure in it, causing unemployment in the machines, and production time losses when it refers to processes industrial. These defects cause a change be developed in the state of vibration in the bearing, the vibration is that change to be detected. Enveloping technique is based on the treatment of the vibration signal captured in rotating equipment, in order to find the characteristic frequency of bearing failure. The signal processing is carried out in MATLAB ®.

The technique was implemented in a bank developed for the study of faults in bearings located in the Laboratory of Vibration, which was implemented various failure scenarios on the outer track of them. The frequencies of the bearing failures from experience were validated with theoretical fault frequencies that are dependent on the physical characteristics of the bearing.

It was shown that predictive maintenance, vibration analysis highlighting, is an essential tool in monitoring bearings, but it is necessary to use signal processing techniques as is the enveloping technique in the detection of incipient failures by situations are low energy and therefore tend to be overlooked in a traditional vibration analysis.

* Thesis of Degree

** Faculty of Physical-Mechanical Engineerings. School of Mechanical Engineering. Director Jabid Quiroga Méndez. Co-Director Alfonso García Castro.

INTRODUCCIÓN

Hoy en día, debido a la globalización y a la fuerte competencia entre las empresas industriales, se hace necesario garantizar una alta efectividad en sus procesos. Uno de los factores para lograr éste objetivo es el de disminuir los tiempos de parada en los equipos causados por múltiples factores, siendo de mayor prioridad las fallas mecánicas.

Es de gran trascendencia en el área industrial tener un plan de mantenimiento para evitar las fallas incipientes y prolongar la vida útil de los equipos. Para lograr esto, diferentes tipos de mantenimiento son utilizados: mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo y mantenimiento predictivo; esto dependiendo del tipo de ocurrencia de falla en la máquina.

El análisis de vibraciones es una de las técnicas del mantenimiento predictivo que permite determinar las causas posibles de fallas anticipándose a la avería en maquinaria rotativa, 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.

Por ello nace la necesidad de implementar un método por el cual se logre la detección prematura de las fallas en rodamientos, en nuestro caso se detectarán fallas incipientes de un rodamiento de elementos cónicos causados por defectos ubicados en la pista externa, por medio de la técnica *ENVELOPING* o DEMODULACIÓN DE LA AMPLITUD.

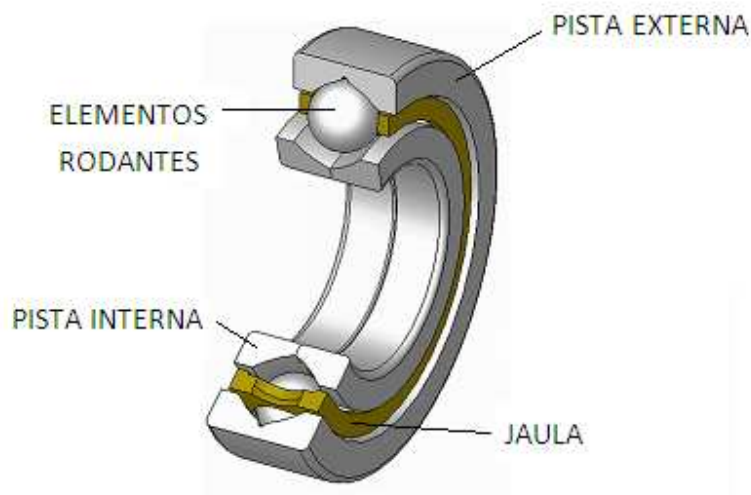
Con el empleo de la técnica de *ENVELOPING*, se beneficia al sector industrial en un aspecto importante; debido a que se apropia conocimiento tecnológico que permitirá la implementación de un sistema para la detección temprana de fallas en rodamientos evitando una mayor afectación del equipo y mejorando la confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad del mismo.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE RODAMIENTOS

El propósito fundamental de un rodamiento es soportar una carga y al mismo tiempo permitir el contacto relativo entre dos elementos de una máquina. El tipo más común de rodamiento soporta un eje rotatorio y resiste cargas puramente radiales, o una combinación de cargas radiales y axiales (de empuje). Algunos rodamientos están diseñados para soportar solamente cargas de empuje. La mayoría de los rodamientos se utilizan en aplicaciones que involucran rotación, pero hay algunos que se usan en aplicaciones de movimiento lineal.

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

Figura 1. Partes comunes de un rodamiento



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Four-point-contact-bearing_din628_type-qj_120.png

La figura 1 muestra un rodamiento con una sola hilera de bolas y ranura profunda, el cual es el tipo común. En general, la pista exterior es estacionaria, y está sujeta a la caja de la máquina. La pista interior se introduce a presión en el eje giratorio y, en consecuencia, gira con él. Entonces, los elementos rodantes ruedan entre la pista interior y la exterior.

La trayectoria de la carga es: del eje, a la pista interior, a los elementos rodantes, a la pista exterior y, por último a la chumacera. La presencia de los elementos rodantes permite una rotación muy uniforme, con poca fricción por parte del eje. El coeficiente de fricción típico para un rodamiento es de 0.001 a 0.005, aproximadamente. La presencia de sellos, demasiado lubricante, o cargas excepcionales aumenta esos valores.

1.1. RODAMIENTOS DE RODILLOS CÓNICOS

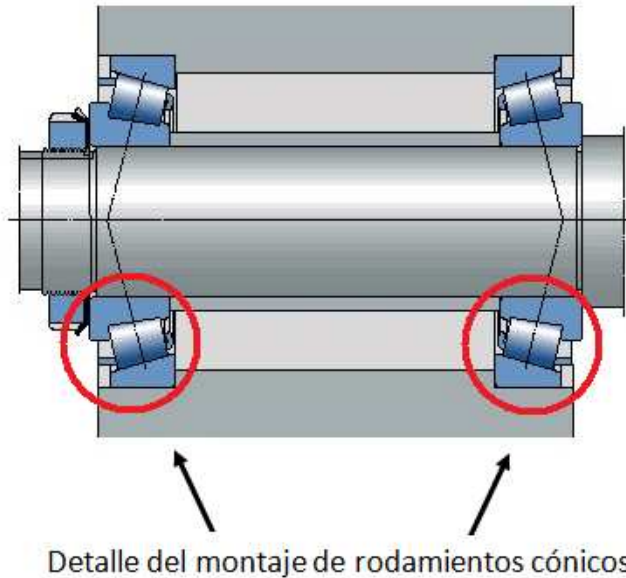
Los rodamientos cónicos están diseñados para tomar cargas apreciables de empuje y también grandes cargas radiales, por lo tanto presentan excelentes calificaciones para ambas cargas. Para casos en que la carga axial es muy importante hay una serie de rodamientos cuyo ángulo es muy abierto. Este rodamiento debe montarse en oposición con otro rodamiento capaz de soportar los esfuerzos axiales en sentido contrario (ver figura 3).

Figura 2. Rodamiento Cónico



Fuente: http://www.smilovic.cl/images/rod_conicos.jpg

Figura 3. Posición de los rodamientos cónicos en el eje



Fuente: http://www.skf.com/images/cat/images/1/1_0/0008f21.gif

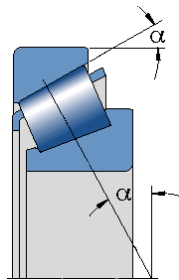
Con frecuencia se usan en rodamientos de rueda de vehículos, equipos móviles, y en maquinaria pesada con grandes cargas inherentes de empuje.

1.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO

Los rodamientos de rodillos cónicos tienen los rodillos dispuestos entre unos caminos de rodadura cónicos en las pistas interior y exterior. Al prolongar las superficies cónicas de ambos caminos de rodadura, convergen sobre un mismo punto en el eje del rodamiento. Su diseño hace que los rodamientos de rodillos cónicos sean especialmente adecuados para soportar cargas combinadas (radiales y axiales). Su capacidad de carga axial viene determinada en gran medida por el ángulo de contacto (α) (figura 4); cuanto mayor sea este ángulo, mayor será la capacidad de carga axial (figura 5). El factor de cálculo e sirve

como indicación del tamaño del ángulo; cuanto mayor sea el valor de e , mayor será el ángulo de contacto y más apropiado será el rodamiento para soportar cargas axiales.

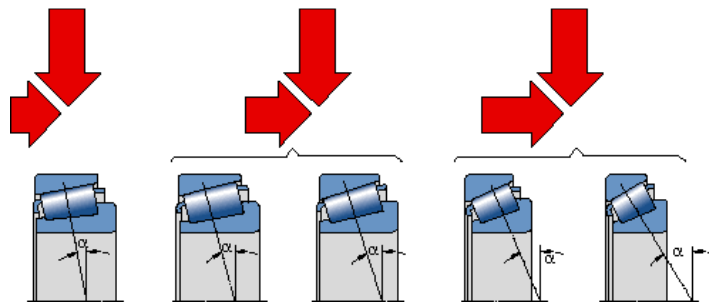
Figura 4. Angulo de contacto del rodillo cónico



Fuente: http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=es&newlink=1_14_0

Los rodamientos de rodillos cónicos suelen ser de diseño desarmable, es decir, el cono que consta de pista interior, rodillos y jaula, forman una unidad que puede montarse por separado de la pista exterior.

Figura 5. Capacidad de carga axial según el ángulo de contacto



Fuente: http://www.skf.com/portal/skf/home/products?maincatalogue=1&lang=es&newlink=1_14_0

1.2 RELACIÓN ENTRE CARGA Y DURACIÓN

Todos los rodamientos tienen una duración finita, y terminarán por fallar debido a la fatiga causada por altos esfuerzos de contacto. Pero es obvio que, mientras menor sea la carga, la duración será mayor, y viceversa.

La carga transmitida por medio de los elementos rodantes de una pista a la otra, depende de la magnitud de la carga, de la geometría interna del rodamiento y del tipo de carga (dinámica o estática). Cuando se cambian las condiciones de carga y velocidad de una máquina, se debe tener presente el efecto causado sobre sus componentes. La ecuación (1) es empleada para estimar la vida nominal de un rodamiento para velocidad constante (norma DIN/ISO 281), además muestra como un incremento en la carga disminuye significativamente la resistencia a la fatiga del rodamiento, y por consiguiente disminuye su vida nominal.

La relación entre carga P y la duración L para los rodamientos, se determina como sigue:

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

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 COMUNES EN RODAMIENTOS

Hay un número de mecanismos que pueden conducir a la falla del rodamiento, como lo son: daño mecánico, daño por grieta, daño por desgaste, deficiencia del lubricante y la corrosión. El manejo abusivo puede inducir muescas y abolladuras, que son especialmente

dañinas cuando están localizadas en las pistas de los rodamientos. Cuando se presentan defectos en la superficie de la pista y condiciones de alta tensión impuestas sobre ella, la vida útil del rodamiento se reduce de una manera muy significativa. Una grieta en un componente del rodamiento puede comenzar por defecto de fabricación, inducidas por funcionamiento bajo sobrecarga o por fatiga. La muesca formada por la sobrecarga aplicada al elemento rodante en las pistas se llama *brinelling*.

Los rodamientos actúan como una fuente de ruido y vibración debido tanto a la variación de compliancia como a la presencia de defectos en ellos. Los defectos en los rodamientos se pueden clasificar como distribuidos y localizados. El hecho de que la distribución de carga varíe sobre los elementos rodantes a medida que éstos giran sobre las pistas de rodadura hace que los rodamientos se comporten por sí mismos como generadores de vibraciones. Este comportamiento puede provenir tanto de rodamientos geoméricamente perfectos como de rodamientos con imperfecciones de manufactura, problemas de instalación, lubricación y condiciones ambientales inadecuadas o de algún otro factor que ayude a producir desgaste o fatiga¹.

1.3.1 DEFECTOS LOCALIZADOS

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

¹ *MONDACA MARINO, Cristian Mauricio. Estudio de fallas comunes en rodamientos rígidos de una hilera de bolas mediante análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Valdivia, Chile. 2002. Trabajo de grado (Licenciado en Acústica y al Título profesional de Ingeniero Acústico). Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería.*

1.3.2 DEFECTOS DISTRIBUIDOS

Dentro de éstos se encuentran: las rugosidades superficiales, ondulaciones sobre las pistas, desalineamiento de las pistas y elementos rodantes desiguales. Pueden ser causados por errores en la manufactura, inadecuada instalación o debidos al desgaste. Las vibraciones debidas a defectos de manufactura han resultado ser más bajas en la mayoría de los casos, que las debidas a defectos producidos por desgaste o fatiga. La variación de las fuerzas de contacto entre los elementos rodantes y las pistas 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.

1.4 MODOS DE FALLA EN RODAMIENTOS

1.4.1 DAÑO EN LAS SUPERFICIES DE RODADURA:

Fatiga Superficial: Se desarrolla un agrietamiento en las superficies con posterior pérdida de material, el cual puede ser poco profundo (micro picado) o generar descascaramiento de áreas grandes y profundas (macro picado).²

Figura 6. Casos de fatiga superficial



Fuente: <http://bit.ly/8ZXO4M>

² ESPEJO, Edgar., GARCÍA Jim. Febrero 2008, Modos de falla comunes en rodamientos, Obtenido el 21 de Diciembre de 2009, de <http://bit.ly/8ZXO4M>

Causas:

- Carga de servicio superior a la esperada o fuerza de apriete elevada (montaje).
- Montaje inadecuado que distorsione las pistas o genere desalineamiento.
- Gradientes de temperaturas que generen esfuerzos térmicos elevados.
- Consecuencia de la indentación, corrosión descarga eléctrica o ludimiento.
- Lubricante o lubricación inadecuada.

Descarga eléctrica: Por paso de corrientes eléctricas AC o DC a través del rodamiento se generan arcos eléctricos entre los elementos rodantes, las pistas y las jaulas, que erosionan las superficies debido a fusión a pequeña escala. Producto de los arcos se pueden generar patrones de estrías o cráteres profundos si la corriente es alta.

Figura 7. Casos de descarga eléctrica en rodamientos



Fuente: <http://bit.ly/8ZXO4M>

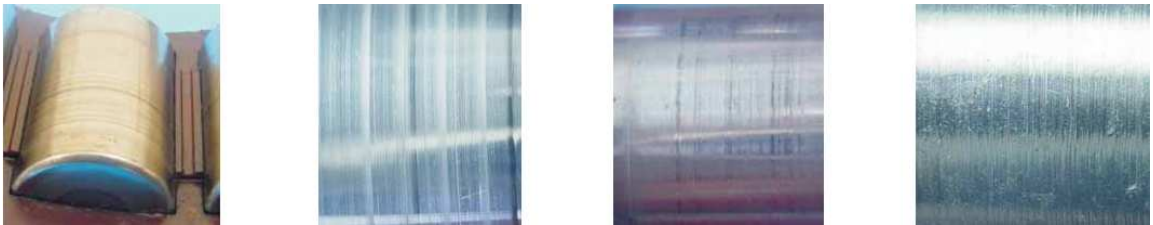
Causas:

- Problemas en el aislamiento eléctrico, contaminación del lubricante con líquidos o partículas conductoras o ausencia de polo a tierra en maquinaria que lo requiera.
- No usar rodamientos con aislamiento eléctrico cuando la aplicación lo requiere.

- Proceso de reparación inadecuado por soldadura de una máquina, que haga circular la corriente a través de los rodamientos (inapropiada ubicación de la pinza o masa).

Desgaste abrasivo: Se presenta en servicio la generación de un rayado abrasivo sobre las superficies de rodadura y también sobre las jaulas, indicando que se está perdiendo material por abrasión. Normalmente está acompañado por el proceso de indentación.

Figura 8. Desgaste abrasivo en rodamientos



Fuente: <http://bit.ly/8ZXO4M>

Causas:

- Contaminación del lubricante con partículas abrasivas provenientes del medio.
- Contaminación del lubricante con partículas metálicas provenientes de una zona desgastada.
- Problema en sellos o filtrado del sistema de lubricación.
- Montaje y/o mantenimiento inapropiado que permite el acceso de partículas al lubricante

Desgaste adhesivo: Se presenta en servicio pérdida de material por contacto metal-metal entre las partes del rodamiento incluyendo las jaulas, producto de la pérdida parcial o total de la película del lubricante. Si la pérdida de lubricación es parcial las zonas de

contacto se pulen y si es total se eleva fuertemente la temperatura quemando el lubricante, oxidándose las partes o incluso fundiéndose.

Figura 9. Desgaste adhesivo en rodamientos



Fuente: <http://bit.ly/8ZXO4M>

Causas:

- Lubricante inapropiado por baja viscosidad y/o bajo índice de viscosidad y/o falta de aditivos de extrema presión y/o temperatura de operación alta.
- Lubricación inapropiada por bajo caudal y/o bajo presión.
- Degradación del lubricante por sobre temperatura y/o contaminación con otros fluidos.
- Sobre velocidad y/o sobre temperatura de operación.

Corrosión: Se genera ataque corrosivo sobre las superficies de rodadura o las jaulas, por la acción del lubricante o de otro fluido que entra en contacto con el rodamiento, generándose daño superficial y depósitos.

Figura 10. Corrosión en rodamientos



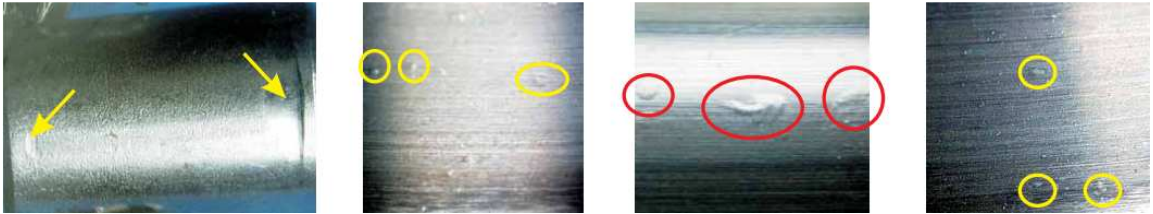
Fuente: <http://bit.ly/8ZXO4M>

Causas:

- Contaminación del lubricante con agua, otros lubricantes o fluidos de la máquina.
- Degradación del lubricante por tiempo o sobre temperatura.
- Mala selección del lubricante por ausencia o deficiencia de aditivos antioxidantes y antiherrumbre.
- Problemas en sellos del sistema de lubricación.
- Mal almacenamiento o manipulación.

Indentación: Se trata de generación de cráteres o hendiduras sobre la superficie de rodadura, producto de la deformación plástica derivada de fuerzas de contacto excesivas entre los elementos del rodamiento (macro indentaciones) y/o por presencia de partículas contaminantes entre ellos (micro indentaciones).

Figura 11. Indentación en rodamientos



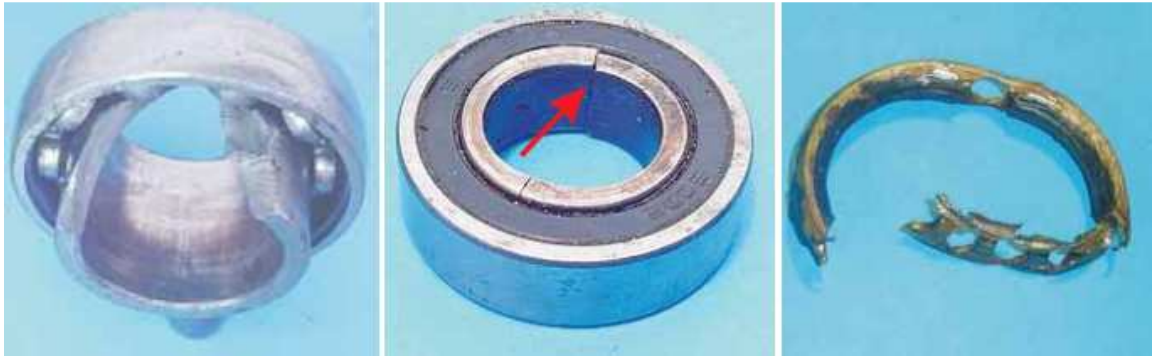
Fuente: <http://bit.ly/8ZXO4M>

Causas:

- Contaminación del lubricante con partículas abrasivas provenientes del medio.
- Contaminación del lubricante con partículas metálicas provenientes de una zona desgastada.
- Problemas en sellos y/o filtrado del sistema de lubricación.
- Sobrecarga sobre el rodamiento especialmente por impactos durante operación o un mal montaje.
- Fuerza de apriete elevada (montaje).

Fractura: Las pistas o las jaulas presentan fractura o agrietamiento en montaje o servicio, llevando algunas veces a destrucción total del rodamiento.

Figura 12. Fractura en rodamientos



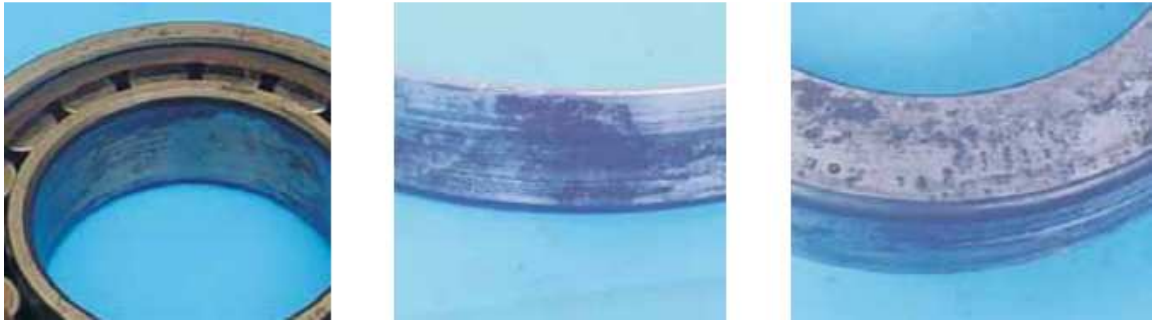
Fuente: <http://bit.ly/8ZXO4M>

Causas:

- Montaje incorrecto con impactos o excesiva fuerza de apriete.
- Mala lubricación, carga excesiva o desgaste adhesivo.
- Excesiva velocidad y/o alta vibración (crítico para las jaulas).
- Desalineamiento, lubricante contaminado con partículas, consecuencias de picaduras e indentaciones, giro por ajuste muy holgado o mecanizado irregular de eje o alojamientos.

Ludimiento: Se presentan depósitos oscuros en las superficies de apoyo con el eje o su alojamiento, indicando que en servicios se dieron pequeños movimientos oscilantes entre las partes (desgaste y/o oxidación).

Figura 13. Ludimientos en rodamientos



Fuente: <http://bit.ly/8ZXO4M>

Causas:

- Selección de ajuste muy holgado.
- Mecanizado irregular de eje o alojamiento, que no genera presión uniforme.
- Carga elevada o alto estado vibratoria de la máquina.
- Deflexiones excesivas de eje o alojamientos en servicio.

1.4.2 FACTOR DE RIESGO

Rodadura irregular: El rodamiento presenta un camino oblicuo de rodadura de sus elementos rodantes sobre las pistas.

Figura 14. Rodadura irregular



Fuente: <http://bit.ly/8ZXO4M>

Causas:

- Desalineamiento o mal montaje, diseños incorrectos que dejan rodamientos muy juntos o demasiados separados sobre un mismo eje, orientación anormal de las cargas en servicio, deflexiones excesivas de eje o alojamientos en servicio.

1.5 FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS DE FALLA EN LOS RODAMIENTOS³

Los rodamientos pueden ser diseñados para tener una carga predominantemente radial, aunque una pequeña carga de empuje puede resultar desde el ángulo de contacto de los rodamientos. Esta carga radial es debido al peso del sistema rotatorio (la maquinaria) y fuerzas aplicadas al sistema. Debido a la holgura en éste tipo de rodamientos y la existencia de carga radial, sólo una pequeña porción del rodamiento experimentará la carga en un momento particular. Esta área a lo largo de la pista del rodamiento se denomina zona de carga y ocurre en la pista interior y exterior en cada revolución. Durante éste período de tiempo, para cada revolución del sistema, un número específico de elementos rodantes pueden ser golpeados por un defecto en alguna de las pistas. Este

³ *MONDACA MARINO, Cristian Mauricio. Estudio de fallas comunes en rodamientos rígidos de una hilera de bolas mediante análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Valdivia, Chile. 2002. Trabajo de grado (Licenciado en Acústica y al Título profesional de Ingeniero Acústico). Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería.*

número es una función del tamaño del defecto, geometría del rodamiento y longitud de la zona de carga.

1.5.1 DETERMINACIÓN DE LAS FRECUENCIAS CARACTERÍSTICAS DE FALLA

Para entender la relación entre los diferentes elementos rotatorios de un rodamiento, se debe desarrollar las ecuaciones que describen las velocidades relativas. Estas ecuaciones definen las frecuencias que puede generar un rodamiento con un defecto localizado.

1.5.1.1 FRECUENCIA FUNDAMENTAL DEL TREN DE ELEMENTOS (FFTE)

$$FFTE = \frac{1}{2} \left[W_i \left(1 - \frac{B_d \cos \phi}{P_d} \right) + W_o \left(1 + \frac{B_d \cos \phi}{P_d} \right) \right] [Hz] \quad (2)$$

Figura 15. Falla en la canastilla del rodamiento

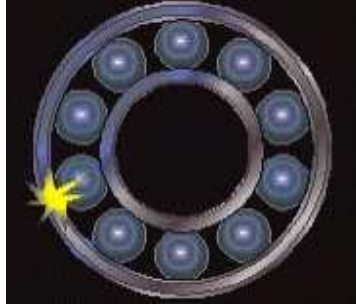


Fuente: <http://www.whitmores.cl/Vibraciones/RodFallas1.htm>

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

$$BPFO = \left| \frac{N_b}{2} (W_i - W_o) \left(1 - \frac{B_d \cos \phi}{P_d} \right) \right| [Hz] \quad (3)$$

Figura 16. Falla en la pista externa del rodamiento

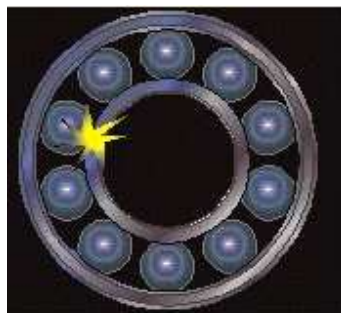


Fuente: <http://www.whitmores.cl/Vibraciones/RodFallas1.htm>

1.5.1.3 FRECUENCIA DE PASO DE LOS ELEMENTOS RODANTES POR LA PISTA INTERIOR
(BPFI)

$$BPFI = \left| \frac{N_b}{2} (W_i - W_o) \left(1 + \frac{B_d \cos \phi}{P_d} \right) \right| \text{ [Hz]} \quad (4)$$

Figura 17. Falla en la pista interna del rodamiento



Fuente: <http://www.whitmores.cl/Vibraciones/RodFallas1.htm>

1.5.1.4 FRECUENCIA DE GIRO DE LOS ELEMENTOS RODANTES SOBRE SU EJE (BSF)

$$BSF = \left| \frac{P_b}{2B_d} (W_i - W_o) \left(1 - \frac{B_d^2 \cos^2 \phi}{P_d^2} \right) \right| [Hz] \quad (5)$$

Figura 18. Falla en los elementos rodantes del rodamiento



Fuente: <http://www.whitmores.cl/Vibraciones/RodFallas1.htm>

De donde:

W_i = Velocidad angular de la pista interior del rodamiento.

W_o = Velocidad angular de la pista exterior del rodamiento.

B_d = Diámetro del elemento rodante.

N_b = Número de elementos rodantes.

P_d = Diámetro efectivo del rodamiento.

ϕ = Ángulo de contacto tomado desde la línea central del elemento rodante y el eje del rodamiento.

1.5.2 APLICACIÓN DE LAS FÓRMULAS PARA RODAMIENTOS

Las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) son fórmulas generales donde las dos pistas del rodamiento pueden estar girando. También, el ángulo de contacto de los elementos rodantes puede ser igual a cero como en rodamientos con rieles profundos. Para el caso donde la pista exterior se encuentra estacionaria y la interna rotando (es decir, $W_o = 0$ y

$W_i = \text{RPM}/60$, donde RPM es la velocidad de giro del sistema rotatorio). Las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) se pueden reducir a las ecuaciones (6), (7), (8), y (9) respectivamente.

$$FFT = \left(\frac{1}{2}\right) \left(1 - \frac{B_d \cos \phi}{P_d}\right) \quad [\text{Hz}] \quad (6)$$

$$BPFO = \frac{\text{RPM}}{60} \left(\frac{N_b}{2}\right) \left(1 - \frac{B_d \cos \phi}{P_d}\right) \quad [\text{Hz}] \quad (7)$$

$$BPFI = \frac{\text{RPM}}{60} \left(\frac{N_b}{2}\right) \left(1 + \frac{B_d \cos \phi}{P_d}\right) \quad [\text{Hz}] \quad (8)$$

$$BSF = \frac{\text{RPM}}{60} \left(\frac{P_b}{2B_d}\right) \left(1 - \frac{B_d^2 \cos^2 \phi}{P_d^2}\right) \quad [\text{Hz}] \quad (9)$$

Todas estas fórmulas de frecuencias para rodamientos son basados en condiciones ideales, es decir, contacto puro de los rodamientos y las pistas. El posible error que existiera al comparar éstos valores con los reales es debido al desplazamiento de las superficies (las pistas) o pérdida de contacto de la pista con el elemento rodante, las cuales pueden producir variaciones en algunas frecuencias con respecto a las ecuaciones teóricas.

1.5.3 APROXIMACIONES PARA FRECUENCIAS EN RODAMIENTOS

Aproximaciones para las frecuencias típicas de rodamientos pueden estar aproximadas entre un 20% para los defectos citados anteriormente, la mayor parte de las discrepancias entre las frecuencias teóricas y reales se ven reflejadas principalmente cuando los rodamientos presentan cargas significativas de empuje o existe resbalamiento, para éstas aproximaciones observar la tabla 1.

Tabla 1. Aproximaciones para la frecuencia de falla en rodamientos

Pista exterior estacionaria [Hz]		Pista interior estacionaria [Hz]	
FFTE	$0.4 * \frac{RPM}{60}$	FFTE	$0.6 * \frac{RPM}{60}$
BPFO	$0.4 * N_b * \frac{RPM}{60}$	BPFO	$0.4 * N_b * \frac{RPM}{60}$
BPMI	$0.6 * N_b * \frac{RPM}{60}$	BPMI	$0.6 * N_b * \frac{RPM}{60}$
BSP	$0.23 * N_b * \frac{RPM}{60}$ para $N_b < 10$	BSP	$0.23 * N_b * \frac{RPM}{60}$ para $N_b < 10$
PSP	$0.18 * N_b * \frac{RPM}{60}$ para $N_b > 10$	PSP	$0.18 * N_b * \frac{RPM}{60}$ para $N_b > 10$

Estas aproximaciones pueden ser adecuadas para identificar armónicos no sincrónicos en algunos casos. Las fórmulas para determinar las diferentes frecuencias generadas por los rodamientos fueron desarrolladas por Thomas D. Millar y Harvey L. Bladerstron.

2. ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA DIAGNÓSTICOS DE FALLAS EN RODAMIENTOS

El mantenimiento predictivo basado en la aplicación de pruebas no destructivas como lo es el análisis de vibraciones, tiene como finalidad disminuir costos de operación e incrementar la disponibilidad en cuanto a maquinaria en general, en nuestro caso maquinaria rotativa. Los rodamientos son una de las partes de la máquina que con más frecuencia fallan y conducen a pérdidas de alto costo.

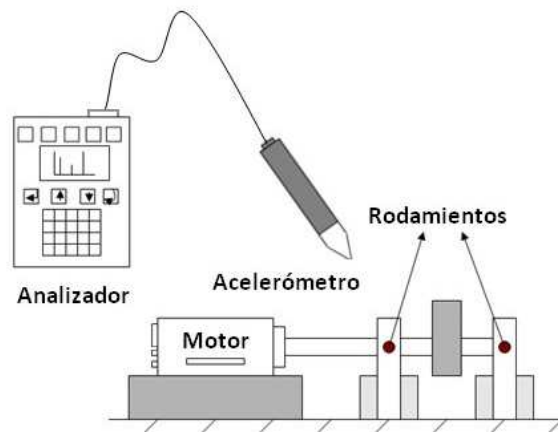
La filosofía del Mantenimiento Predictivo es no solo predecir la ocurrencia de una falla, sino llegar a determinar la causa primaria del problema para evitar que se vuelva presentar, es decir, llegar a la causa raíz del problema, para lo cual se deben analizar los datos y buscar la ocurrencia de patrones ó influencias de variables de proceso (ver figura 19).

Figura 19. Evaluación del estado de la máquina



En la figura 20, se puede observar la medición de la señal vibratoria en un rodamiento.

Figura 20. Medida de vibración por medio del analizador



Para el diagnóstico de la condición de un rodamiento, la señal vibratoria es usualmente medida en aceleración, ya que determina la severidad en la máquina.

El diagnóstico consiste en juzgar si la evolución de los diferentes parámetros estimados (caracterizados) en la onda de vibración es representativo de un estado normal de la maquinaria o de una de las fallas que se pueden presentar.

Algunas de las caracterizaciones posibles de un defecto pueden ser extraídos directamente desde la señal en el tiempo (Oscilograma). Sin embargo, en la mayoría de fallas resulta imposible caracterizar o detectar el defecto presente, y a razón de esto es que surge la necesidad de la implementación de técnicas que permitan determinar, de una manera eficiente, la falla en el rodamiento.

2.1 TÉCNICA DE “ENVELOPING” PARA DETECCIÓN DE FALLAS EN RODAMIENTOS

Todas las máquinas presentan un nivel de vibración que puede ser considerado normal o inherente a su funcionamiento. Cuando este nivel aumenta y empieza a ser excesivo, es normalmente el síntoma de la presencia de una falla.

El porcentaje de rodamientos que vienen con defectos de fábrica es muy bajo, debido a los sistemas de control de calidad de los fabricantes, por lo que una falla de fábrica, si bien es posible, es poco probable.

Debido a la presencia de defectos localizados, se producen cambios abruptos en los esfuerzos de contacto en las interfaces, lo cual resulta en la generación de pulsos de muy corta duración, que pueden excitar las frecuencias naturales de las pistas y soporte del rodamiento.

La presencia de componentes de alta frecuencia, es el síntoma que permite detectar incipientemente la falla. Cuando la falla progresa, la excitación de tipo impulsiva aumenta por un tiempo hasta cuando los filos, esquinas o rebordes de los defectos se alisan producto del desgaste y los niveles de impacto disminuyen e incluso pueden llegar a desaparecer.

La técnica de *ENVELOPING* busca principalmente detectar zonas resonantes excitadas o moduladas por fuerzas de impacto periódicas, cuya frecuencia de repetición es un indicador del lugar donde se encuentra el defecto y la amplitud de la señal de los impactos puede ser utilizada en algunos casos como un indicador de la severidad y progresión de la falla.

Para facilitar el diagnóstico se deben aislar entonces las vibraciones de alta frecuencia de las otras vibraciones, empleando un filtro pasa alto o pasa banda alrededor de la frecuencia natural que es excitada. De esta forma es posible extraer la frecuencia y la amplitud de los impactos de la vibración global.

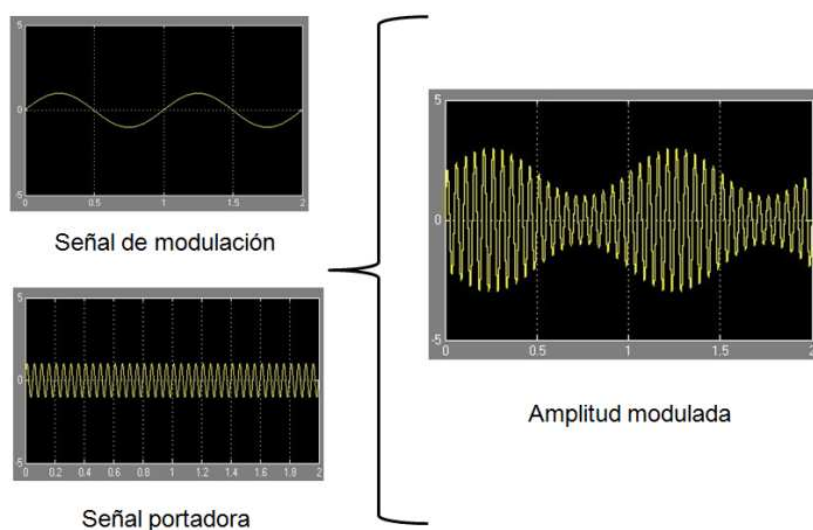
La técnica de *ENVELOPING* se basa en la detección de la frecuencia característica de falla en el rodamiento, mediante un tratamiento que se le realiza a la señal en el dominio del tiempo (oscilograma) de la vibración adquirida por el analizador.

Cuando se presentan defectos incipientes en los rodamientos, la señal de pulsos se presenta modulada con respecto a los modos naturales de vibración del rodamiento montado. El problema de detectar ésta señal es que se encuentra contaminada por otras señales, tales como el ruido aleatorio, desbalanceo, desalineamiento, defectos en el eje, etc. Sin contar que ésta señal de pulso es de menor magnitud en comparación de las señales contaminantes. La técnica *ENVELOPING* se encarga de detectar estos pulsos que se encuentran ocultos a raíz de las otras componentes de vibración producto de la modulación. La demodulación o *ENVELOPING* tiene como fin encontrar la envolvente de una señal modulada en amplitud.

2.2 MODULACIÓN DE LA AMPLITUD

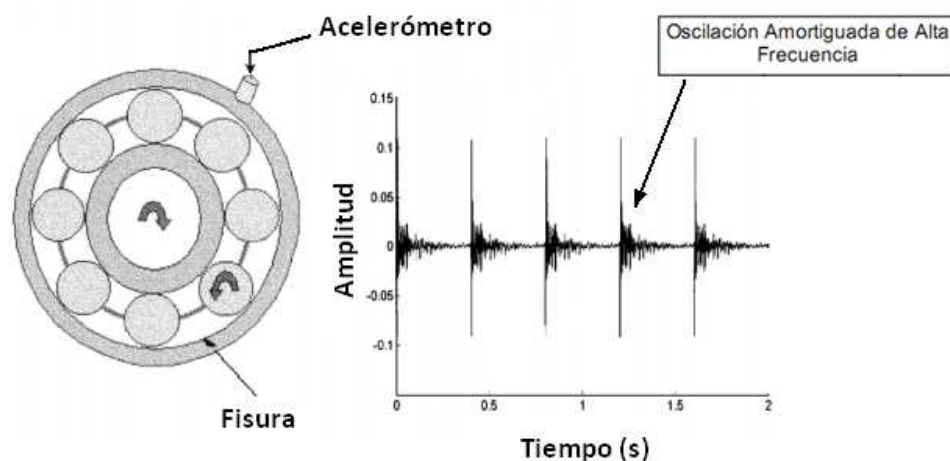
El análisis de la envolvente se explica en términos de modulación de amplitud y demodulación. La modulación de amplitud es definida como la multiplicación de una señal portadora de alta frecuencia por una señal de modulación de baja frecuencia, según lo ilustrado en la figura 21. Este proceso no lineal da lugar a componentes de frecuencia diferentes a la de las señales originales.

Figura 21. Efecto de la modulación de señales



La secuencia de pulsos mostrados en la figura 22 modela la respuesta periódica del paso de los elementos rodantes sobre un defecto ubicado en la pista externa. Esta forma de onda se puede ver como: La señal portadora (dada a altas frecuencias debido a la resonancia de la carcasa del rodamiento) modulada por la envolvente de caída (dada a una frecuencia del paso de los elementos rodantes sobre la fisura). La frecuencia de interés en la detección de los defectos de rodamientos es la frecuencia de modulación.

Figura 22. Representación de la señal de falla adquirida en el rodamiento



Fuente: MCINERNY, S. A., DAI Y. (2003). Basic Vibration Signal Processing for Bearing Fault Detection. IEEE Transactions On Education

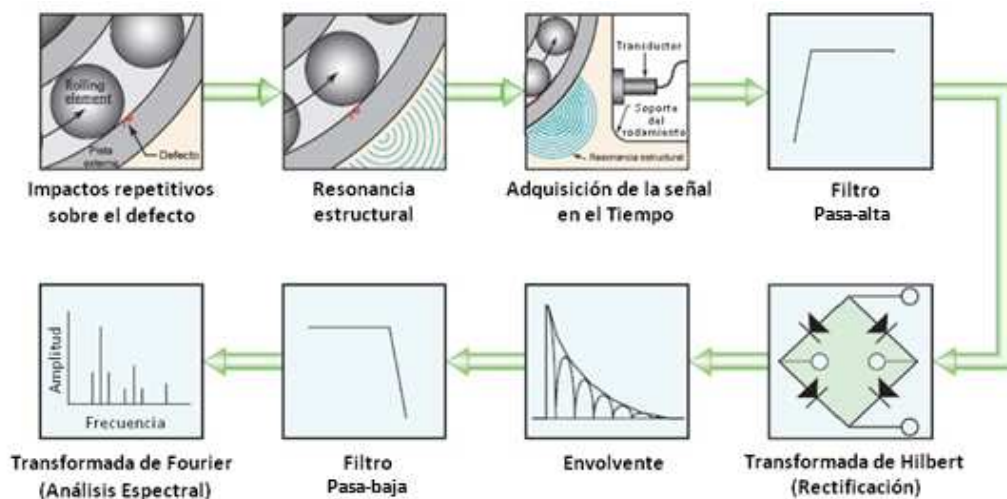
La técnica de demodulación permite obtener una medida directa de la frecuencia de la señal de modulación (es decir, la frecuencia de falla debido al paso de los elementos rodantes sobre el defecto en la pista del rodamiento).

El proceso que se realiza a la señal de vibración, se basa en la aplicación de un filtro pasa-altas, el cual se encarga de separar señales vibratorias de alta frecuencia de las de baja frecuencia. Luego se procede a demodular la señal, la cual se lleva a cabo con la

Transformada de Hilbert, encargada de rectificar la señal y encontrar la señal envolvente (señal de interés causada por el paso de los elementos rodantes sobre el defecto). Por último se aplica un filtro pasa-bajas con el fin de eliminar frecuencias altas que pueden encontrarse aún en la señal, y luego se procesa la señal con la FFT (Fast Fourier Transform o Transformada rápida de Fourier), con la cual se obtiene el espectro de la frecuencia característica de falla.

En general el algoritmo de la técnica *ENVELOPING* procede de la siguiente manera:

Figura 23. Representación del proceso realizado por la técnica de *ENVELOPING*



Fuente: 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.

2.3 TRANSFORMADA DE HILBERT

Un paso fundamental en la demodulación de la amplitud es rectificar la señal. Este paso se alcanza usando la Transformada de Hilbert. Al considerar una señal $d(t)$ modulada con una portadora cosenoidal de frecuencia (ω_d) de la siguiente forma:

$$x(t) = \cos(\omega_d t + \varphi_d) * d(t) \quad (10)$$

La Transformada de Hilbert de la señal modulada se define como:

$$H(x(t)) = \tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \left(\frac{1}{t - \tau} \right) d\tau \quad (11)$$

La ecuación (11) se puede ver como la señal vibratoria convolucionada con la función $\frac{1}{\pi t}$.

En el dominio de la frecuencia esta expresión corresponde a:

$$\zeta(\tilde{x}(t)) = X(f) * (-j \operatorname{sign}(f)) \quad (12)$$

Donde ζ es el operador Transformada de Fourier. Se puede ver que para obtener la transformada de Hilbert sólo se necesita multiplicar componentes de frecuencia positiva con $-j$ (desfase de -90°) y las frecuencias negativas por j (desfase de 90°), así la señal que se obtiene esta con un desfase de 90° .

De la Transformada se crea una nueva señal llamada función analítica, la cual es una función compleja, en donde la componente real es la señal vibratoria y su componente imaginaria la Transformada de Hilbert de la señal vibratoria.

$$\hat{x} = x(t) + j * \tilde{x}(t) \quad (13)$$

Así reemplazando la ecuación (10) y (11) en la ecuación (13), se obtiene:

$$\hat{x} = \cos(\omega_d t + \varphi_d) * d(t) + j * \operatorname{sen}(\omega_d t + \varphi_d) * d(t) \quad (14)$$

$$\hat{x} = d(t) * e^{j(\omega_d t + \varphi_d)} \quad (15)$$

y tomando el módulo de la función analítica, se tiene:

$$|\hat{x}| = \sqrt{\cos^2(\omega_d t + \varphi_d) * d^2(t) + \operatorname{sen}^2(\omega_d t + \varphi_d) * d^2(t)} = d(t) \quad (16)$$

En la cual podemos ver que la señal original se ha recuperado (ecuación 16). En el anterior ejemplo, se observa la utilidad de la Transformada de Hilbert, para obtener una señal que está alterada por un proceso de modulación. Este método se resume en:

1. Filtrar la señal en torno a (ω_d) con un filtro pasabanda o filtrar permitiendo el paso de esta frecuencia por medio de un filtro pasa altas.
2. Calcular la señal analítica (ecuación 13).
3. Calcular el módulo de la función analítica ecuación 16 (la cual es la señal demodulada).

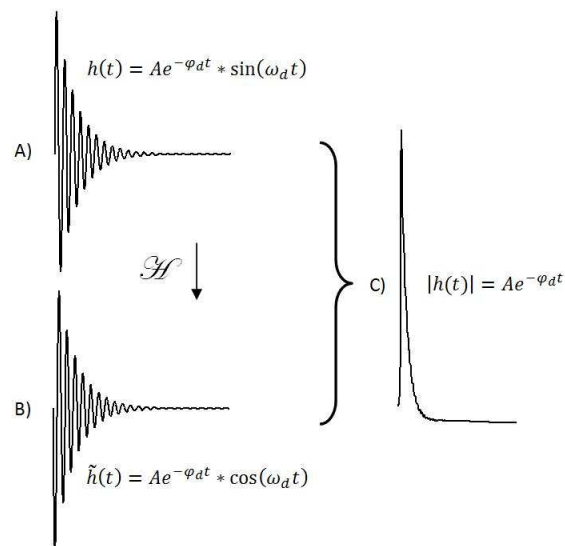
Para realizar el anterior procedimiento, se emplea la Transformada de Fourier, la señal analítica tiene la propiedad de sólo tener un lado en frecuencias, las frecuencias negativas son cero. Para aproximar la señal analítica, se usa un algoritmo que calcula la FFT de la secuencia entrante, reemplazando por cero aquellos coeficientes que corresponden a frecuencias negativas, y calcular su inversa.

En detalle, el algoritmo implementa cuatro pasos:

1. Calcula la FFT de los datos reales (señal vibratoria), y los almacena en un vector "y".
2. Crear un vector "h" cuyos elementos tienen los siguientes valores:
 - 1 para $i = 1, (n/2) + 1$
 - 2 para $i = 2, 3, \dots, (n/2)$
 - 0 para $i = (n/2) + 2, \dots, n$
3. Calcular el producto del vector "y" con el vector "h".
4. Calcular la inversa del vector entregado por el paso tres y retorna un vector con n elementos.

Para el modelo del sistema rodamiento eje, se observa la utilidad de la anterior Transformada debido a que permite obtener la envolvente de la respuesta impulso del sistema analizado, de la figura 24 se observa la respuesta impulso en la parte a), la Transformada de Hilbert de la señal en b), la cual es una señal desfasada en 90° con respecto a la original pero que conserva la misma envolvente y en c) la envolvente libre de las oscilaciones del sistema.

Figura 24. A) Respuesta impulso B) Transformada de Hilbert C) Envolvente del sistema rodamiento eje

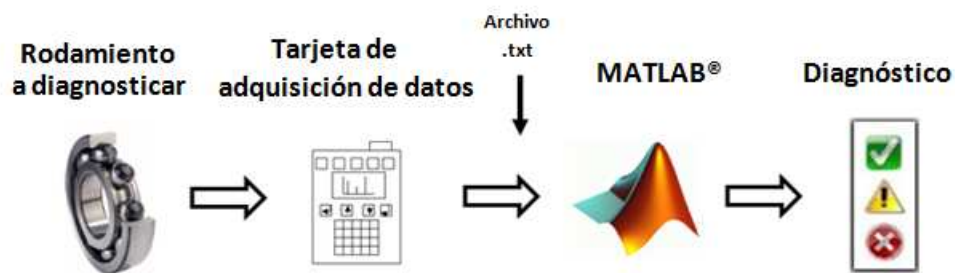


La Transformada de Hilbert al emplear señales analíticas para modelar señales moduladas en amplitud, obliga a que la señal no sufra de “overlap” o sobre-posición de frecuencias en torno a la frecuencia cero, ya que de ocurrir no se podría recuperar por completo el espectro modulado, ésta es la misma condición que se requiere para la demodulación asíncrona, y se cumple si la frecuencia de la portadora es más grande que la mayor frecuencia de la señal moduladora.

2.4 PROCESAMIENTO DE LA SEÑAL

El esquema general del proceso que se llevará a cabo en la detección de fallas incipientes en rodamientos es como se muestra en la figura 25.

Figura 25. Representación de la técnica de *ENVELOPING*



A continuación se explica brevemente éstos elementos y los criterios más importantes a tener en cuenta:

Rodamientos a diagnosticar: El presente trabajo de grado se basa en el análisis de fallas en rodamientos cónicos. Se debe tener en cuenta la geometría del rodamiento, que es el parámetro base, ya que con esto se logra calcular la frecuencia característica de falla.

Analizador de vibraciones: Herramienta importante en el estudio de fallas en rodamientos cónicos, pues se encarga de capturar la señal de vibración por medio de un transductor que es el acelerómetro. La señal en el tiempo o oscilograma será importada al computador como un archivo (.txt) para ser procesada por MATLAB®.

MATLAB®: Es el paso fundamental para llevar a cabo la realización y análisis de fallas en rodamientos por medio de la técnica *ENVELOPING*. MATLAB® se encarga de procesar la señal capturada del analizador por que lleva a cabo la función:

- Filtrado de la señal: Aislar las frecuencias indeseadas.
- Rectificador o diodo: Realizar la Transformada de Hilbert a la señal en el tiempo.

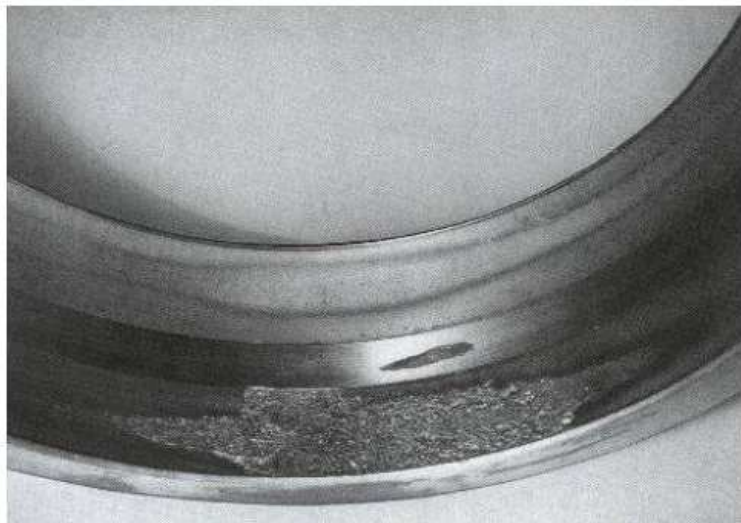
- Mostrar el espectro de la señal resultante del proceso, dando a conocer el grado de severidad de la falla en el rodamiento.

2.5 PROCEDIMIENTO DE LA TÉCNICA DE “ENVELOPING”

La técnica *ENVELOPING* se explica mediante el siguiente ejemplo:

Al presentar el rodamiento un defecto en la pista exterior, como se muestra en la figura 26. Se tiene que cada vez que un elemento rodante pasa sobre el defecto, genera un pequeño impacto que se percibe como un “campaneo”.

Figura 26. Defecto localizado en la pista externa del rodamiento



Fuente: SINASIS INGENIERÍA, *Sistema de Monitorización en continuo para mantenimiento predictivo (Vibraciones)*. Pontevedra, España. 2008

Si se mide la vibración en éste rodamiento durante una revolución completa del eje se obtiene una forma de onda como la representada en la figura 27. Esta señal se construyó en MATLAB® (Ver anexo 1), que simula el comportamiento del paso de los elementos rodantes por el defecto del rodamiento; que resulta de la repetición de la función con un período de 0.05 segundos:

$$y = 2 e^{(-400t)} \sin(2\pi * 1000 * t) \quad (17)$$

Figura 27. Pulsos repetidos producto del campaneo en el rodamiento (señal simulada)

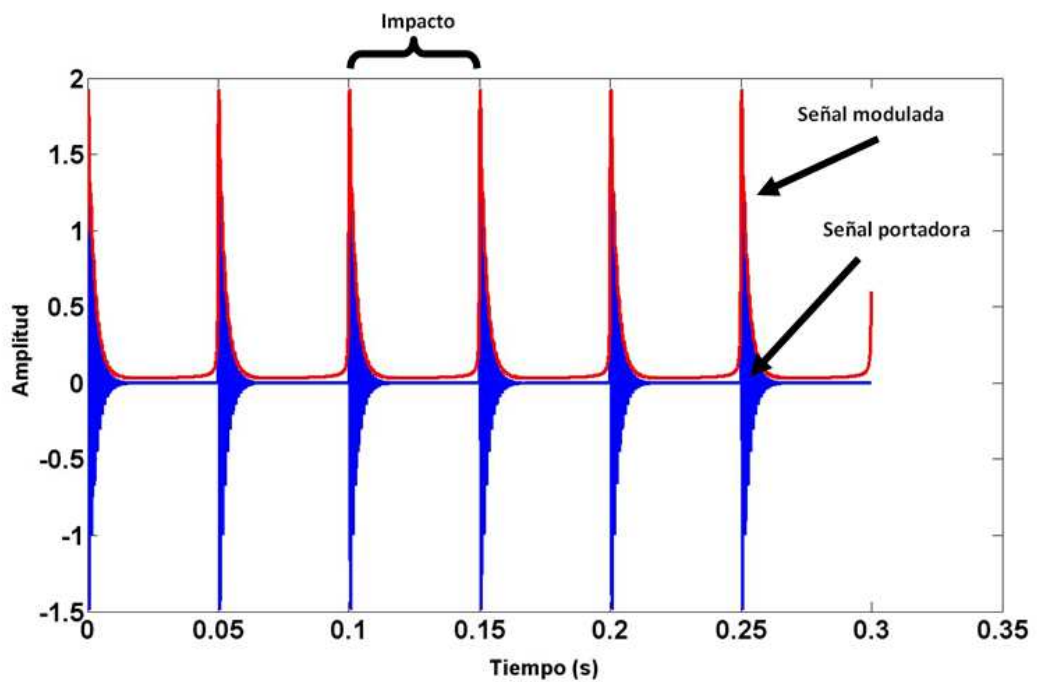
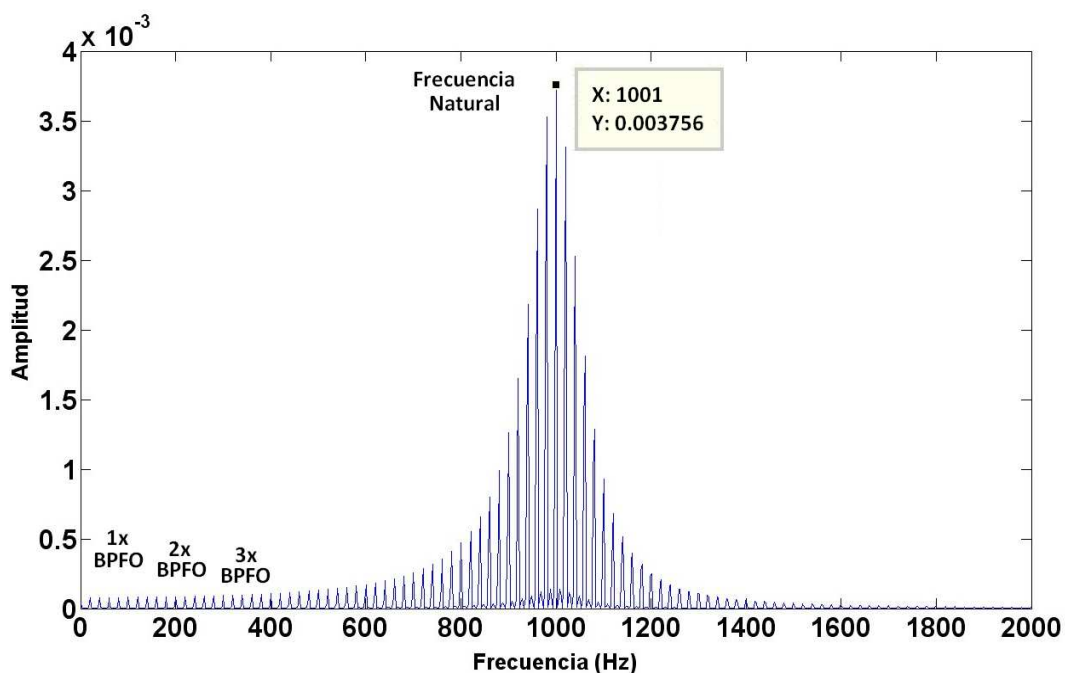


Figura 28. Espectro de la señal simulada

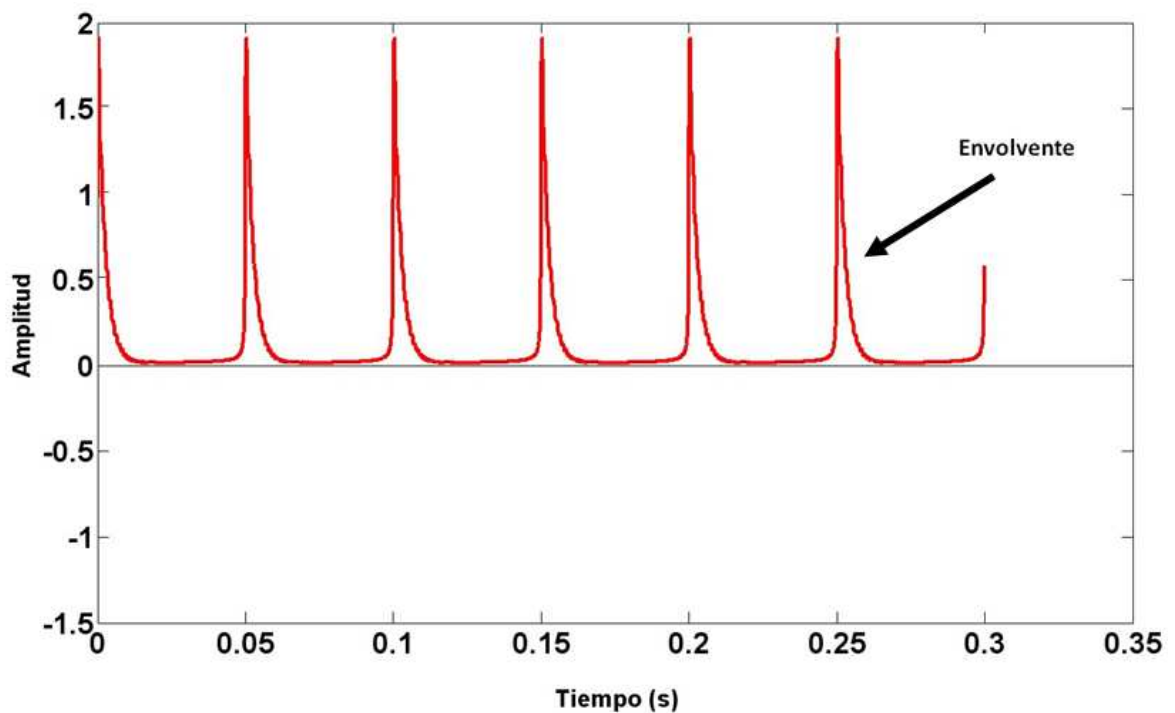


Al analizar en el dominio de la frecuencia, el espectro de la vibración simulada en un rodamiento por la ecuación 17 (ver figura 28), se encuentran picos armónicos de la BPFO ocultos en el espectro. Dichos picos están directamente relacionados con éste defecto en el rodamiento.

La estructura formada por el rodamiento, su carcasa y el eje de la máquina, todos ellos en conjunto actúan como una campana en resonancia. El sonido que hace cuando un elemento golpea el defecto se corresponde con una determinada frecuencia denominada frecuencia natural o frecuencia de resonancia, que es típicamente una frecuencia alta, dependiendo de la masa y la dureza de la estructura del rodamiento, y no queda sólo concentrada en algunas frecuencias en particular, sino en bandas de frecuencias. Esta frecuencia de resonancia es una propiedad de la estructura y no es afectada por cuántas veces o como de intenso sea el impacto.

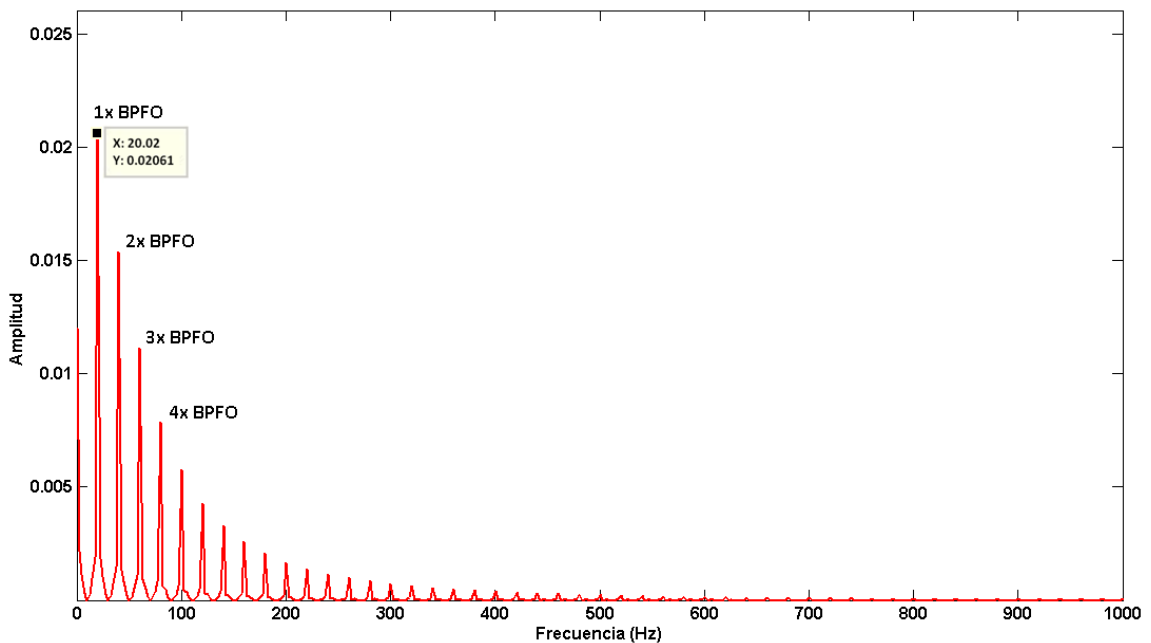
Por lo anterior, se considera que el rodamiento está sonando todo el tiempo y cuando el defecto es golpeado por el elemento éste simplemente sonará más fuerte. Este efecto de variación en la amplitud de la frecuencia natural se conoce como modulación de amplitud y se puede apreciar claramente en la figura 27, donde la frecuencia natural actúa como señal portadora y la frecuencia de paso de elementos rodantes sobre el defecto (BPFO) actúa como señal modulada. El proceso de demodulación consiste en obtener a partir de la vibración original de la figura 27 una nueva señal que contenga únicamente la señal modulada, tal y como se representa en la figura 29. Esta nueva señal también se conoce como envolvente de la señal original. El espectro de la señal demodulada se denomina espectro de demodulación (ver figura 30) y contiene picos armónicos a la frecuencia de “campaneo” (BPFO) de la señal de vibración original.

Figura 29. Envolvente de la señal



Se observa que con la aplicación de esta técnica se localiza la frecuencia característica de falla (cercana a los 20 Hz) causada por el defecto en la pista externa del rodamiento (ver figura 30). Esta frecuencia no se detecta fácilmente en el espectro de la señal adquirida por el analizador (ver figura 28), debido a que se encuentra en el piso del espectro por su baja amplitud (aproximadamente 0.000079) en comparación con la frecuencia natural del rodamiento (cercana a los 1000 Hz y con una amplitud de 0.02061).

Figura 30. Espectro de la envolvente



Después de aplicar la técnica a la señal adquirida por el analizador se obtiene el espectro de la figura 30, en la cual se presenta una ganancia considerable en la amplitud de la frecuencia característica de falla.

A continuación se presenta el cuadro de comparación de amplitudes de la frecuencia de falla característica (de 20 Hz) antes y después de la aplicación de la técnica, como sigue:

Tabla 2. Comparación de amplitudes antes y después del uso de la técnica

Amplitud antes de la aplicación de la técnica	Amplitud después de la aplicación de la técnica
$79,04 \times 10^{-6}$	$20,61 \times 10^{-3}$

Dado una ganancia en la amplitud del espectro:

$$Ganancia = \frac{20,61 * 10^{-3}}{79,04 * 10^{-6}} = \mathbf{260,75}$$

En la práctica la aplicación de éste método se efectúa de una manera similar, salvo por otras fallas presentes en la máquina como lo son: desalineamiento, desbalanceo y ruido. Los registros de la señal de vibración en los rodamientos se ven afectados de igual manera por éstas señales, debido a esto, se hace necesario filtrar la señal mediante un filtro pasaltas, el cual atenúa las componentes de baja frecuencia que presentan una alta amplitud (éstas componentes están asociadas a problemas típicos como desbalanceo y desalineamiento, que no son interés para éste trabajo de grado) y para eliminar el ruido presente fuera del filtro, dejando las frecuencias altas que es el rango donde se encuentra la frecuencia característica de la falla.

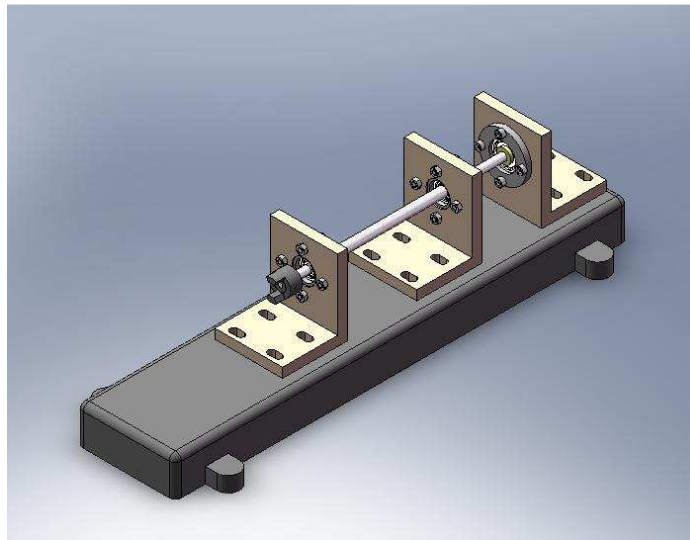
3. ENSAYOS EXPERIMENTALES

En el presente capítulo se describe la metodología que se emplea para medir las vibraciones presentes en rodamientos en perfecto estado y con las fallas inducidas, junto con los resultados de la experiencia. Para ello se utiliza un banco de ensayos del Laboratorio de Vibraciones de la Universidad Industrial de Santander.

3.1 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.

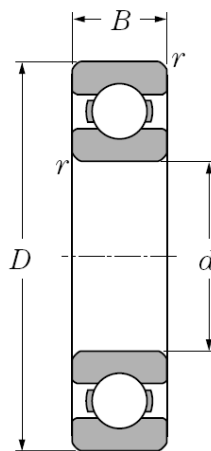
Figura 31. Banco de pruebas de rodamientos cónicos



En detalle 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. Eje mecanizado.
3. Dos rodamientos de una hilera de bolas rígido SKF referencia 6000 (ver figura 32).
4. Cuatro rodamientos cónicos de pruebas (uno de ellos en perfecto estado y tres con diferentes niveles de severidad de falla, incipiente, intermedia y avanzada) SKF de referencia 30203 (ver figura 33).
5. Estructura metálica de acero para soporte de motor y rodamientos.

Figura 32. Rodamiento de una hilera de bolas

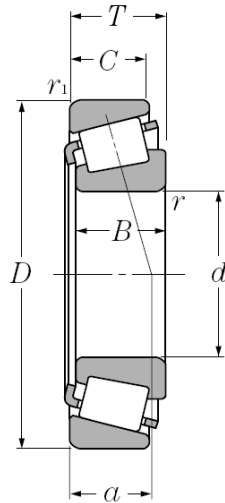


Fuente: NTN Corporation. *Ball and Roller Bearings*. Estados Unidos de América. 2002. Catálogo de la empresa NTN Corporation. 399 p. Disponible en el catálogo en línea de la Empresa NTN.
<http://www.ntsudamericana.com/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=16&Itemid=56>

Tabla 3. Datos básicos del rodamiento SKF 6000

Dimensiones (mm)				Rango de carga básica (KN)		Velocidades límite (RPM)		Número del rodamiento
D	d	B	R	Estática	Dinámica	Grasa	Aceite	
26	10	8	0.3	1.96	4.55	29000	34000	6000

Figura 33. Rodamiento cónico de pruebas



Fuente: NTN Corporation. *Ball and Roller Bearings*. Estados Unidos de América. 2002. Catálogo de la empresa NTN Corporation. 399 p. Disponible en el catálogo en línea de la Empresa NTN.
http://www.ntnsudamericana.com/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=16&Itemid=56

Tabla 4. Datos básicos del rodamiento SKF 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

3.2 EQUIPOS DE MEDICIÓN

Los equipos de medición usados son:

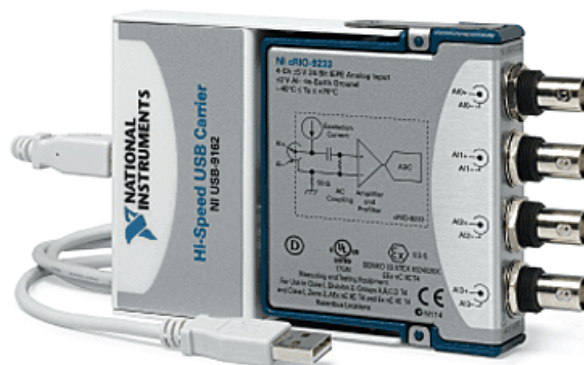
ANALIZADOR DE VIBRACIONES: Para la captura de las señales de vibración se emplea una tarjeta de adquisición de datos de marca National Instruments con su respectivo chasis, con las siguientes especificaciones técnicas.

TARJETA PARA ADQUISICIÓN DE DATOS:

Tarjeta para la adquisición de señal dinámica de 24 bits marca National Instruments modelo NI USB-9233.

- Rango de entrada de +/- 5 voltios
- Conversor Análogo-Digital con resolución de 24 bits, rango dinámico de 102 dB
- 4 entradas analógicas muestreadas simultáneamente hasta 50 KS/s
- Transferencia de datos Hi-Speed USB y USB energizafo por bus

Figura 34. Tarjeta de adquisición de datos marca NI modelo NI USB-9233



Fuente: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/202100>

CHASIS DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS:

Chasis de NI CompactDAQ Legado de marca National Instruments modelo NI cDAQ-9172.

- Fuente de alimentación de 11-30 voltios
- Soporta 8 módulos en serie entrada y/o salida para la adquisición de datos
- Soporta hasta 256 canales entrada/salida

Figura 35. Chasis del sistema de adquisición de datos



Fuente: http://sine.ni.com/images/products/us/cdaq-9172_1.jpg

ACELERÓMETRO:

Acelerómetro de marca PCB Piezotronics modelo 325C34.

- Rango de frecuencias: De 0.5 a 10KHz
- Sensibilidad de 100 mV/g o 10.2 mV/(m/s²)
- Rango de medición: +/-50 g pk
- Resolución de ancho de banda: (1 a 10 KHz) 0.00015 g rms (0.0015 m/s² rms)

Figura 36. Acelerómetro de marca PCB Piezotronics modelo 325C34



Fuente: http://www.pcb.com/spec_sheet.asp?model=352C34&item_id=9450

LÁMPARA ESTROBOSCÓPICA:

Lámpara Estroboscópica marca Lutron modelo DT-2249

- Suministro de poder: 115 V AC a 50/60 Hz
- Suministro de corriente: 260 mA
- Rango de RPM a medir: de 10 a 12000 RPM

Figura 37. Lámpara Estroboscópica marca Lutron



MAZO DE IMPULSO:

Mazo de marca PCB Piezotronics modelo 086C01

- Sensibilidad (+/-%) 50 mV/lbf (11.2 mV/N)
- Resolución de ancho de banda: +/- 100 lbf pk (+/- 440 N pk)
- Frecuencia resonante: > 15 KHz
- Voltaje de excitación: 18 a 30 VDC
- Masa total: 0.23 lb

Figura 38. Mazo de impulso de marca PCB Piezotronics modelo 086C01



Fuente: http://www.pcb.com/spec_sheet.asp?model=086C01&item_id=10427

Accesorios:

- Cinta reflectiva SCI modelo 403

SISTEMA DE ANÁLISIS: Para el sistema de análisis de la señal adquirida por el sistema de adquisición de datos, se realiza el importe de la señal por medio del puerto USB del chasis del sistema de adquisición de datos hacia el computador personal.

MATLAB[®]: (Abreviatura de *MATrix LABoratory*, "Laboratorio de Matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

Es la herramienta más importante para el procesamiento de la señal capturada del analizador. Aquí se llevarán a cabo procesos de filtrado, rectificación y FFT, elementos fundamentales en el procedimiento de la técnica *ENVELOPING*.

3.3 METODOLOGÍA DE LA EXPERIMENTACIÓN

Se desea capturar las señales de vibración mediante un acelerómetro piezoeléctrico que emplea una tarjeta de adquisición de datos a rodamientos sin y con defectos inducidos para diferentes escenarios de falla, posteriormente analizar la señal de vibración empleando la técnica de *ENVELOPING* en *MATLAB*[®] comparando el resultado obtenido con la información que provee la Transformada de Fourier entre los diferentes escenarios de falla.

Para lograr un mejor análisis de vibración se emplea ANSYS Workbench para analizar los modos de vibración del sistema y con ello encontrar el punto óptimo para la ubicación del acelerómetro.

Es necesario ubicar las frecuencias naturales del sistema, con el fin, de localizar las frecuencias de corte en los filtros. Un análisis nodal es necesario para la determinación de dichas frecuencias. Se excita el sistema con una señal de entrada tipo impulso en el lugar de interés (apoyo de pruebas), con el mazo de impulso, y los acelerómetros se encargan de capturar la respuesta del sistema determinando las frecuencias naturales.

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.

Se analizarán cuatro estados de la pista externa del rodamiento. Un primer nivel es la pista externa en perfecto estado. 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 desarrollada, que representa cuando el rodamiento está por deteriorarse.

A cada uno de los anteriores casos de falla se le realizará su análisis respectivo de vibraciones con el fin de comparar y analizar los espectros cuando ya han pasado por el tratamiento de señal en MATLAB® (Técnica *ENVELOPING*).

Una vez preparados los rodamientos se procede a tomar las lecturas de vibraciones con el acelerómetro, para el rodamiento en perfecto estado y sus tres escenarios de falla, pero 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)).

Una vez efectuada las medidas y almacenados los datos en el computador personal, por medio del programa LabView Signal Express de versión libre sólo es de interés el oscilograma u onda en el tiempo del análisis resultante. El software permite importar la

onda de tiempo en tablas en un archivo (.txt), es decir muestra las columnas y filas en donde se encuentra almacenada la información de la señal, el vector tiempo y el vector de amplitud de la vibración. Esto con el fin de que pueda ser reconocido por MATLAB®.

MATLAB® es el paso fundamental para llevar a cabo el objetivo de la técnica. Una vez se carga la información de la onda de tiempo proveniente del analizador en MATLAB® se procederá a realizar el tratamiento de la señal. Primero se realiza un filtrado para eliminar frecuencias no deseadas, luego la rectificación y por último la FFT (Ver anexo 2).

En la etapa de filtrado de la técnica de *ENVELOPING* se emplea en primera instancia un filtro pasa-altas de orden 10 y con frecuencia de corte igual a los 1000 Hz (esta frecuencia de corte debe estar por debajo de la máxima frecuencia natural que presente el sistema, en nuestro caso aproximadamente 1145 Hz). La segunda etapa de filtrado se emplea un filtro pasa-bajas de orden 10 y de frecuencia de corte igual a los 600 Hz; frecuencia con la cual se obtiene una ganancia aceptable en cuanto a amplitud y se restringe el ancho de la ventana de salida a 600 Hz para visualizar los primeros 3 armónicos de la frecuencia característica de falla del rodamiento⁴.

3.4 INDUCCIÓN DE FALLAS

Se selecciona el rodamiento cónico SKF de referencia 30203 como rodamiento de pruebas 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.

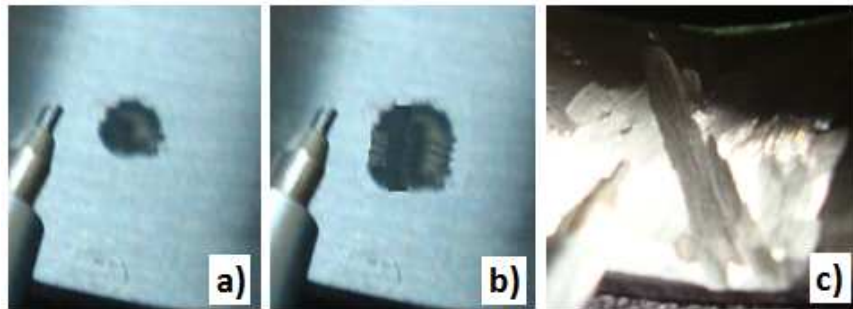
Segunda condición: Rodamiento con falla incipiente (ver figura 39-a).

⁴ FIDLER, P. (2003). *Theoretical Verification Of Envelope Analysis Of Rolling Element Bearings With Using Matlab*

Tercera condición: Rodamiento con falla intermedia (ver figura 39-b).

Cuarta condición: Rodamiento con falla desarrollada (ver figura 39-c).

Figura 39. Defectos presentes en la pista externa: a) Incipiente, b) Intermedia y c) Avanzada⁵



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 39-a y 39-b), 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 39-c). 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 FRECUENCIA DE FALLA TEÓRICAS

Como parámetro importante en el análisis de vibraciones en rodamientos se debe conocer las características de falla teóricas de cada uno de los elementos del mismo, como punto de partida para realizar el diagnóstico. Estas frecuencias se hallan de las características

⁵ Se ubica en la fotografía una mina de diámetro 0.5 mm para comparar con el tamaño del defecto

físicas del rodamiento y sirven como datos para corroborar con la frecuencia de falla obtenida de la experiencia.

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:

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

4. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN

4.1. DETERMINACIÓN DE LAS FRECUENCIAS NATURALES DEL BANCO

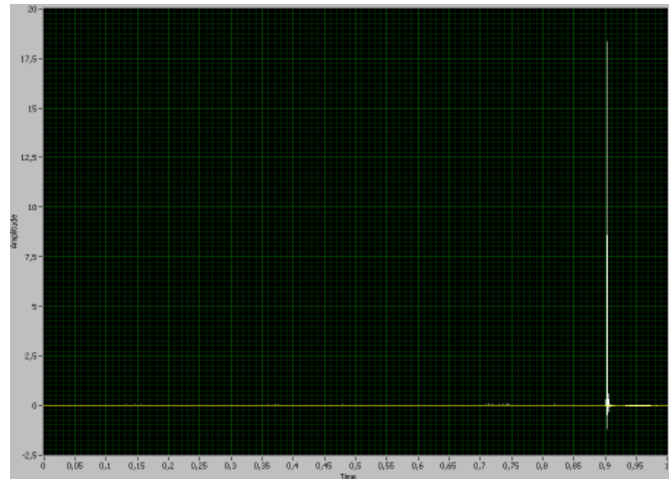
Como parámetro base para determinar las frecuencias de corte en cada uno de los filtros a emplearse (filtro pasa-altas y filtro pasa-bajas, utilizadas en MATLAB®), se hace necesario determinar las frecuencias naturales del banco por medio del sistema de adquisición de datos, procediéndose de la siguiente manera:

Se excita el sistema con una entrada de tipo impulso (Alta amplitud en un período corto de tiempo, por lo tanto presenta amplitud considerable en un amplio rango de frecuencias), en éste caso, se excitó el sistema con el golpe del martillo sobre una de las caras del sistema.

Figura 40. Montaje y ubicación de la excitación para el cálculo de las frecuencias naturales del sistema

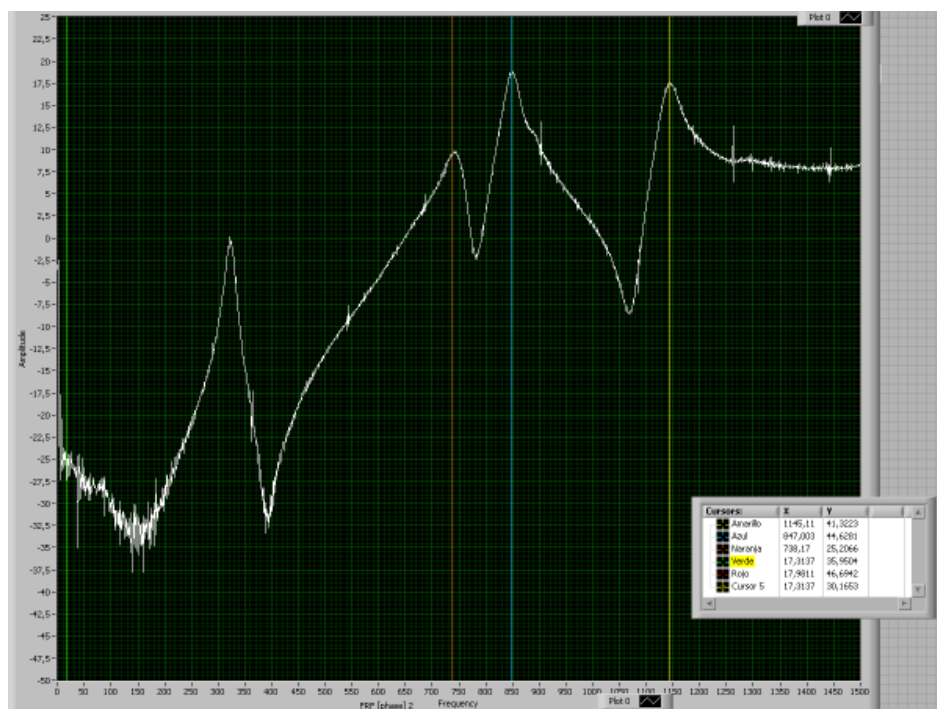


Figura 41. Señal en el dominio tiempo de la excitación al sistema



Al excitar el sistema y dejar que éste oscile de manera libre; ésta oscilación la realiza bajo sus frecuencias naturales, dando como resultado la figura 42:

Figura 42. Determinación de las frecuencias naturales del sistema



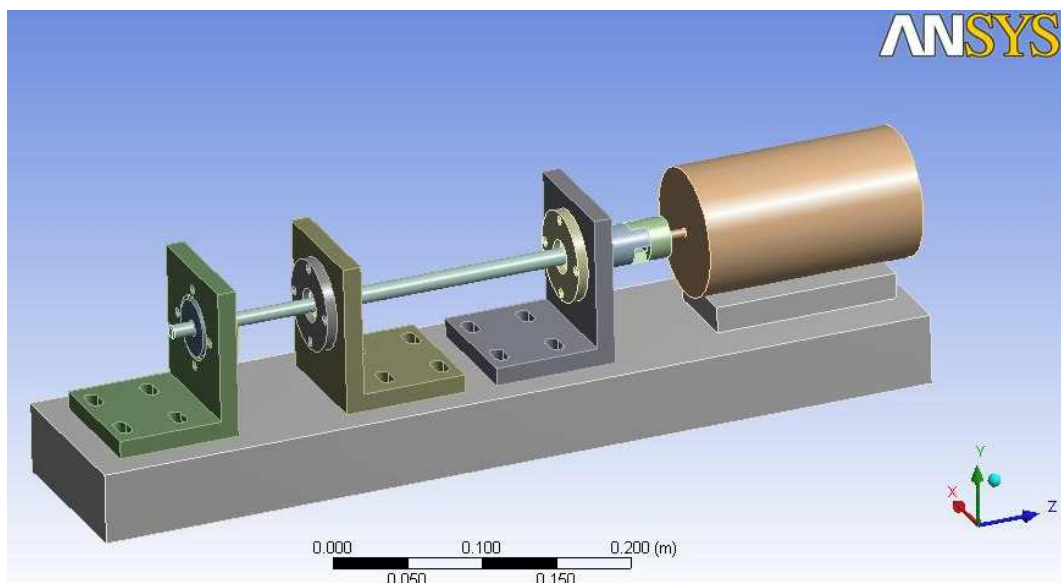
Al observar la figura 42 se puede determinar que presenta el sistema 3 frecuencias naturales ya que se toma como parámetro de referencia la amplitud de cero dB y se determina que todo pico manifestado con una amplitud mayor a cero se debe contar como una frecuencia natural presente en el sistema (picos de la señal resaltados por la línea naranja, azul y amarilla), éstas frecuencias son:

Tabla 5. Valores de las Frecuencias naturales del banco

Frecuencias naturales del sistema (Hz)	Color de línea
738,17	Naranja
847	Azul
1145	Amarilla

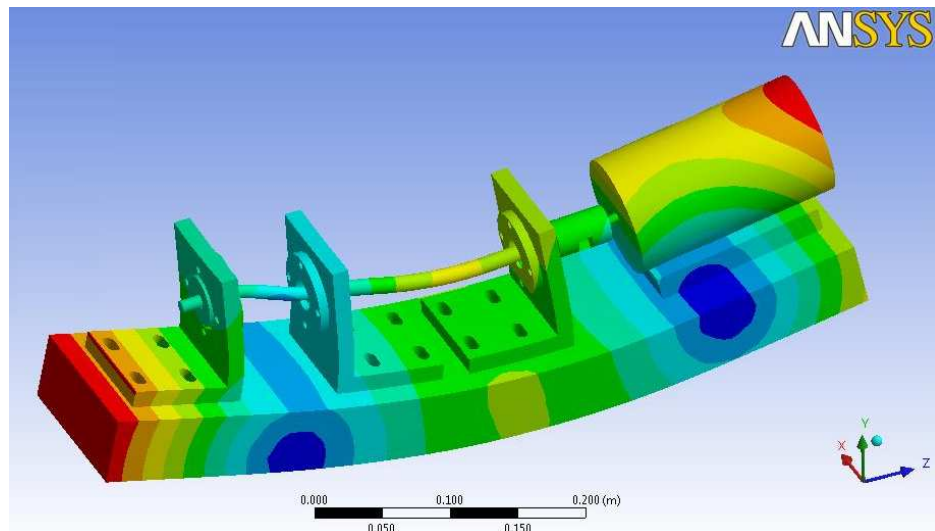
Además al simular el sistema en ANSYS Workbench se pudo determinar sus modos de vibración como se muestra en las figura 44, 45 y 46:

Figura 43. Modelo exportado a ANSYS para la determinación de los modos de vibración



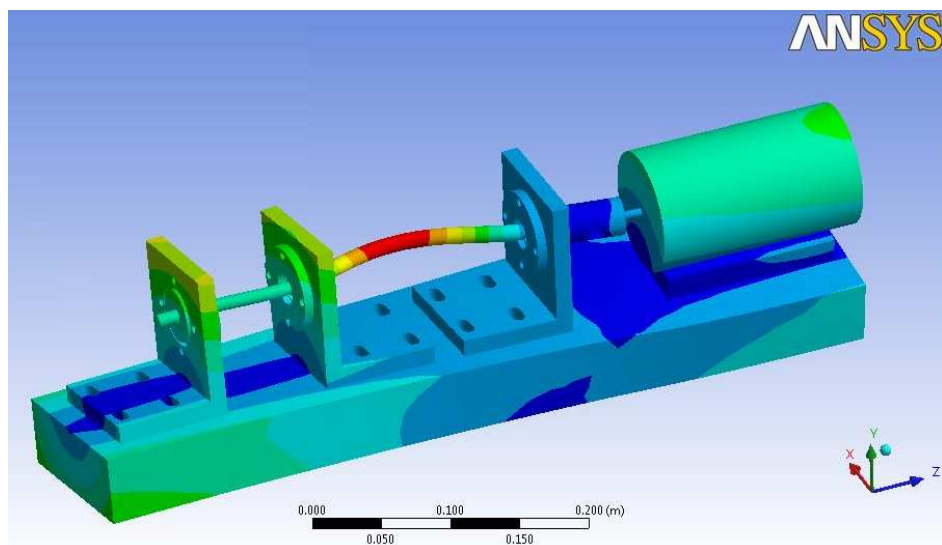
Primer modo de vibración:

Figura 44. Primer modo de vibración del banco a frecuencia natural de 738.17 Hz



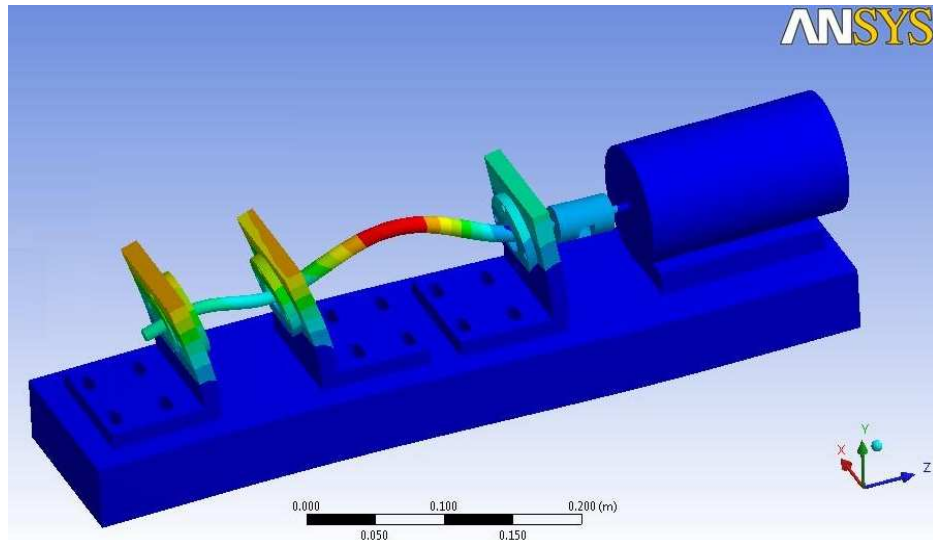
Segundo modo de vibración:

Figura 45. Segundo modo de vibración del banco a frecuencia natural de 847 Hz



Tercer modo de vibración:

Figura 46. Tercer modo de vibración del banco a frecuencia natural de 1145 Hz



La información obtenida del análisis nodal al banco se emplea para conocer los modos de vibración del mismo a sus frecuencias naturales determinadas, con el fin de encontrar la ubicación óptima del sensor (acelerómetro) para efectuar las mediciones a las señales de vibración. Una vez hecho el análisis, se concluyó que la dirección axial es el punto óptimo en debido a que es aquí en donde presentan mayor magnitud los desplazamientos en comparación a las otras direcciones posibles (horizontal y vertical). Lo anterior se pudo corroborar con las mediciones realizadas al sistema, ya que en todas ellas siempre presentaba una mayor amplitud la dirección axial que la horizontal y vertical.

De las frecuencias naturales obtenidas (ver tabla 5) anteriormente se escoge la frecuencia natural de mayor valor (aproximadamente 1145 Hz) como parámetro base para llevar a

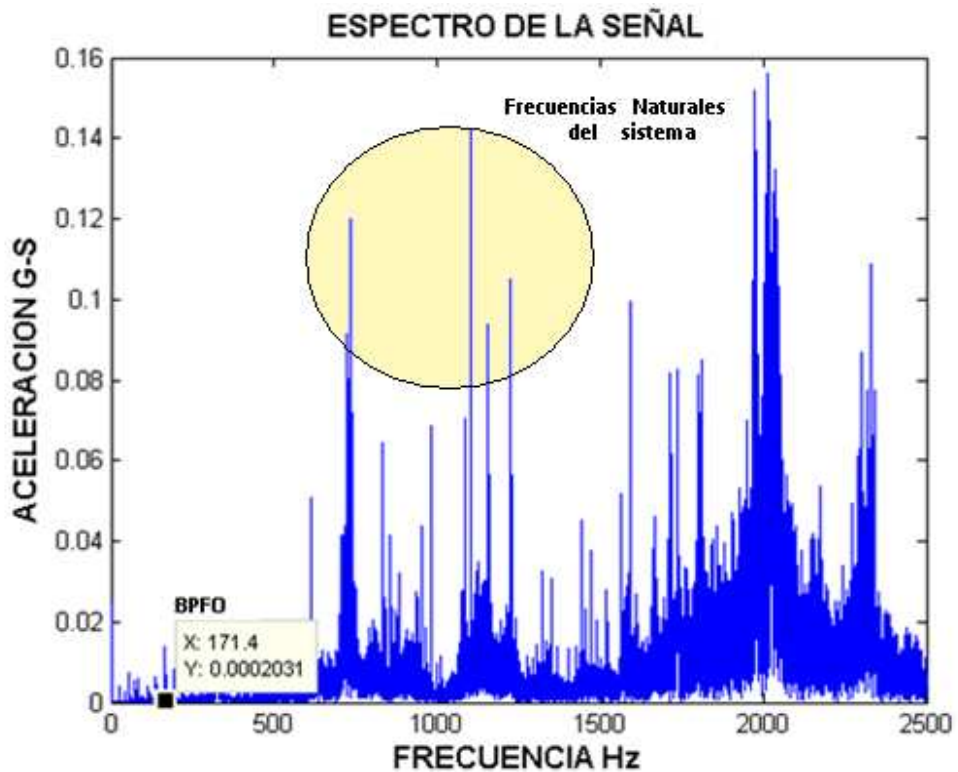
cabo el filtrado de la señal a bajas frecuencias (Diseño de un filtro pasa-altas), necesario para eliminar frecuencias indeseadas que irrumpen en el proceso de la detección de fallas en rodamientos cónicos.

A continuación se mostrarán los espectros correspondientes a los análisis de vibraciones para cada escenario de falla en los rodamientos obtenidos de la experiencia. Cada situación se procesó en MATLAB® para llevar a cabo la técnica *ENVELOPING* y demostrar su eficacia en detección de fallas en rodamientos cónicos.

4.2. ANÁLISIS A RODAMIENTO EN PERFECTO ESTADO

Se analizó un rodamiento cónico en perfecto estado con el fin de establecer la condición inicial y como punto de comparación, en lo que se refiere a frecuencias presentes en él.

Figura 47. Espectro de la vibración para rodamiento en perfecto estado



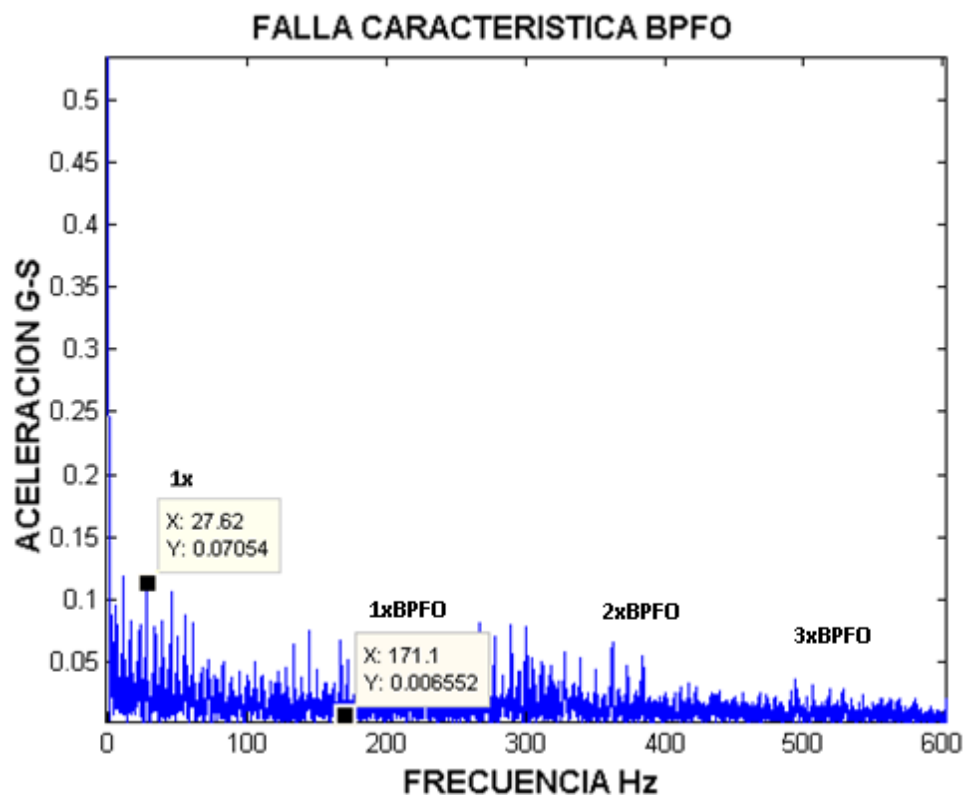
El rodamiento en perfecto estado genera vibración aleatoria debido a la fricción y choque que existe entre sus partes internas.

Se observa que el espectro de la señal da a conocer las frecuencias naturales del sistema, como ya se habían determinado anteriormente, y además, se nota cierto nivel de vibración, con picos en la frecuencia característica de falla en la pista externa, debido a producto de pequeñas imperfecciones en el diseño o defectos de fábrica.

Aplicando ENVELOPING:

Como es de esperarse, no se presenta ningún pico representativo asociado a la BPFO en el espectro de la señal después de haber sido tratada con *ENVELOPING*.

Figura 48. Espectro de la señal tratada por la técnica de Enveloping para rodamiento en perfecto estado

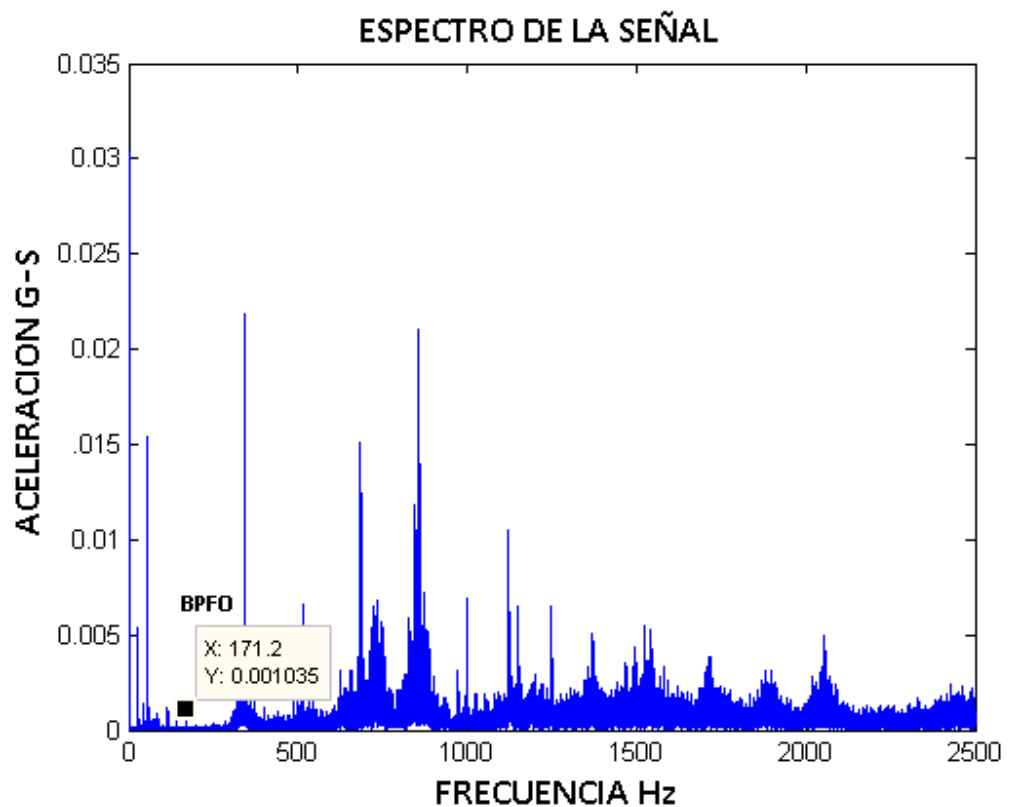


4.3. RODAMIENTO CON DEFECTO INCIPIENTE EN LA PISTA EXTERNA

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

En el espectro de la señal apenas es visible la BPFO, como es de esperarse son frecuencias de baja energía, por tanto, está en el piso del espectro y no es perceptible.

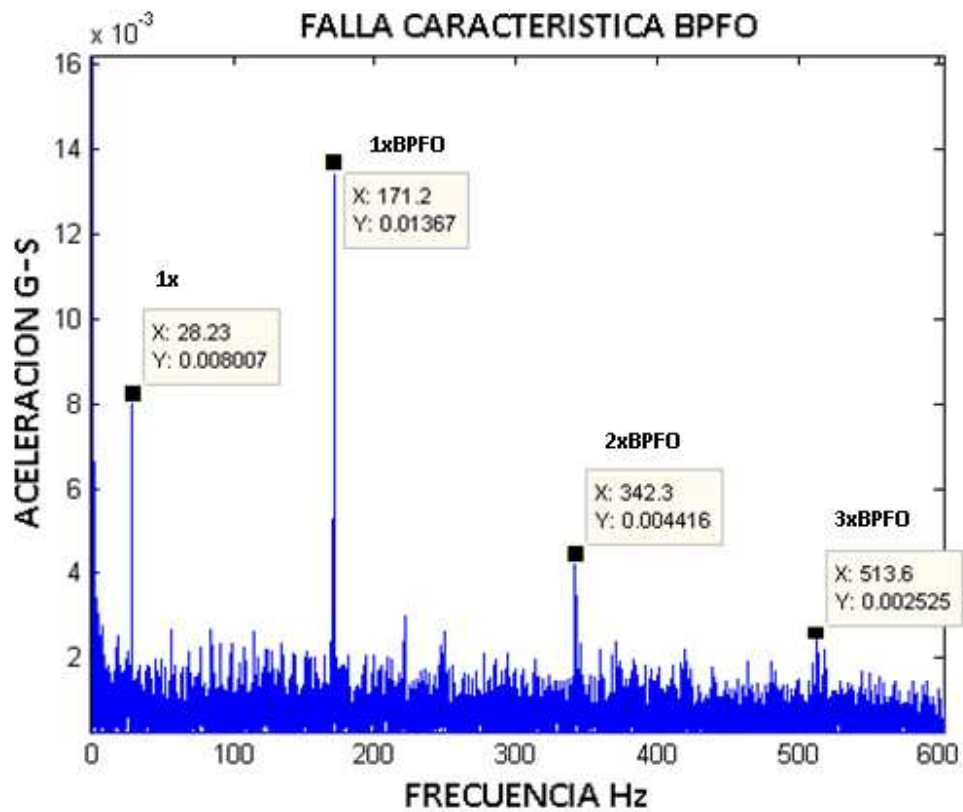
Figura 49. Espectro de la vibración para rodamiento con defecto en la pista externa incipiente



Aplicando ENVELOPING

Después de haber sido tratada la señal por MATLAB® (ENVELOPING), se observa la efectividad de la técnica, resaltando los picos de la BPFO y sus armónicos, dándole una ganancia en comparación que el espectro original. En el espectro se observa el pico presente al 1x asociado a problemas de desbalanceo.

Figura 50. Espectro de la señal tratada por la técnica de Enveloping para rodamiento con defecto en la pista externa incipiente

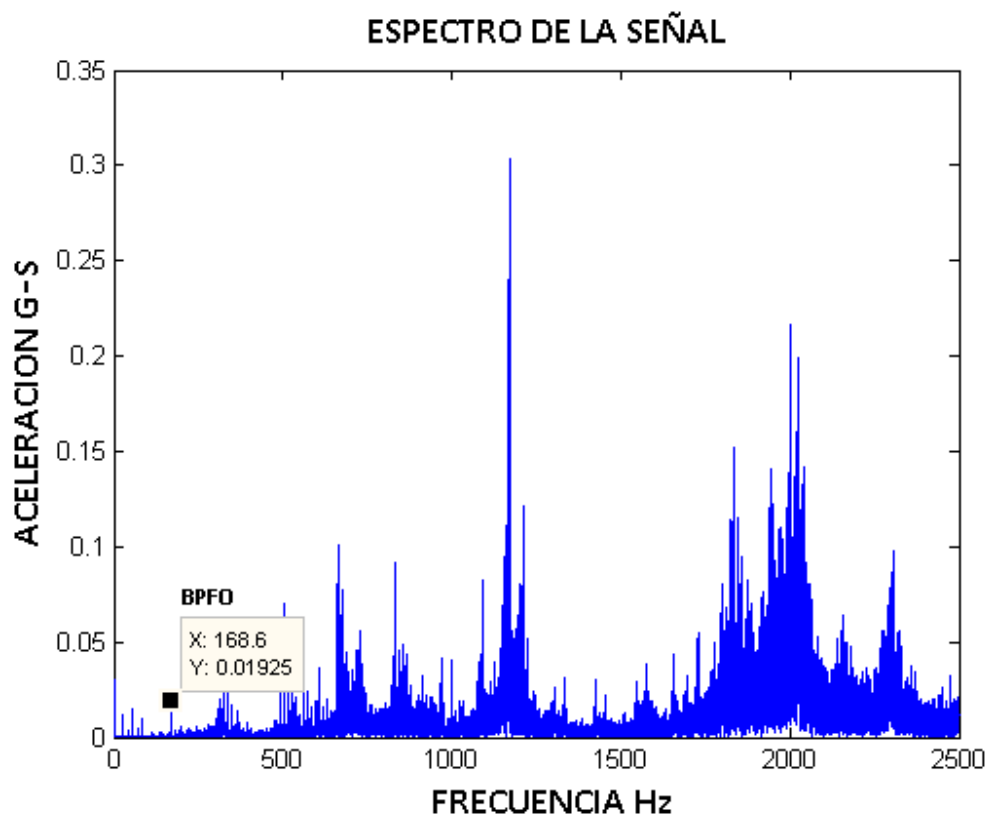


4.4. RODAMIENTO CON DEFECTO INTERMEDIO EN LA PISTA EXTERNA

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

Se observa que la amplitud de la BPFO es mayor que el de la falla incipiente, y es de esperarse pues al ser el defecto más profundo, repercute directamente en la magnitud de la frecuencia de falla.

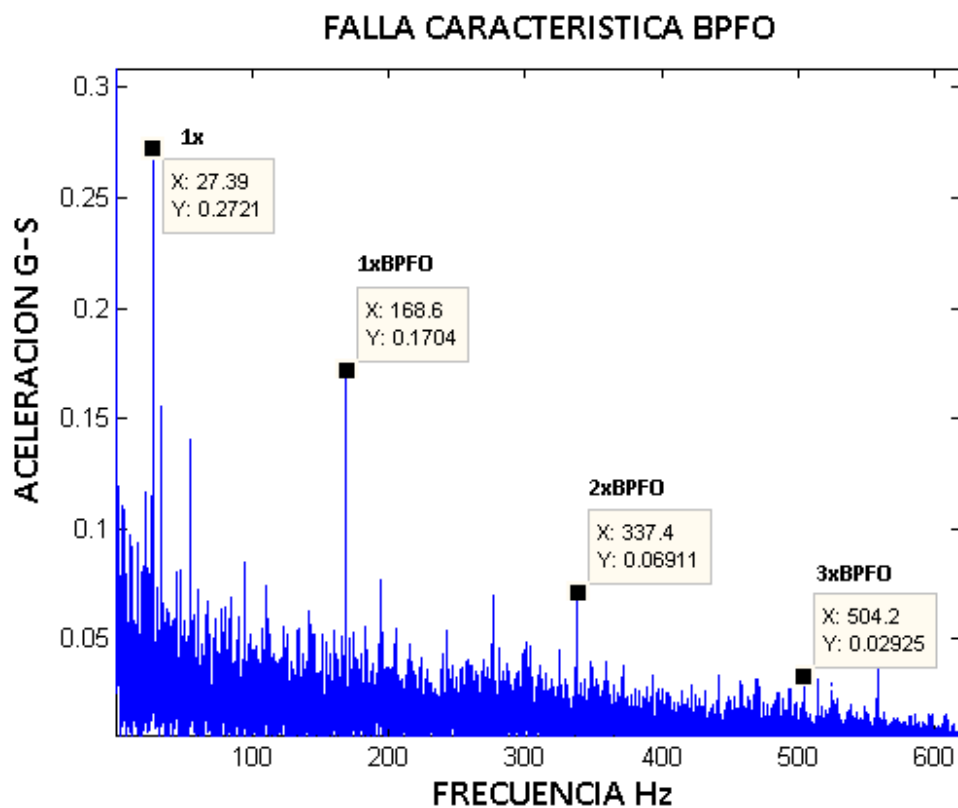
Figura 51. Espectro de la vibración para rodamiento con defecto en la pista externa intermedia



Aplicando ENVELOPING:

Aplicando la técnica se observa la ganancia que se obtiene en la BPFO, siendo esta perceptible junto con sus armónicos. Se observa presente desbalanceo al 1x.

Figura 52. Espectro de la señal tratada por la técnica de Enveloping para rodamiento con defecto en la pista externa intermedia

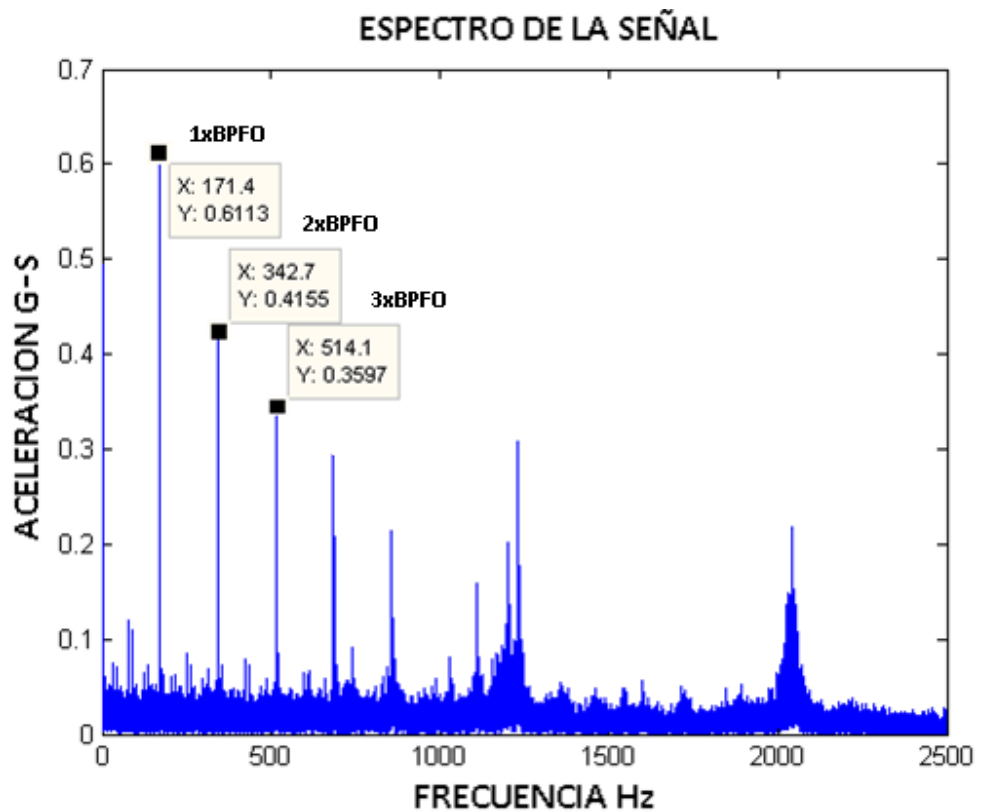


4.5. RODAMIENTO CON DEFECTO AVANZADO EN LA PISTA EXTERNA

Tercer nivel de severidad de falla, se asemeja un poco a la situación en la que el rodamiento está a punto de fallar catastróficamente. Es un defecto bastante pronunciado de 1 a 2 mm de profundidad, el cual asocia una gran cantidad de energía para la BPFO.

Este espectro da a conocer la BPF0 y sus armónicos sin necesidad de utilizar *ENVELOPING*, debido a la magnitud de la falla. Por tanto el defecto es perceptible en un análisis de vibraciones tradicional.

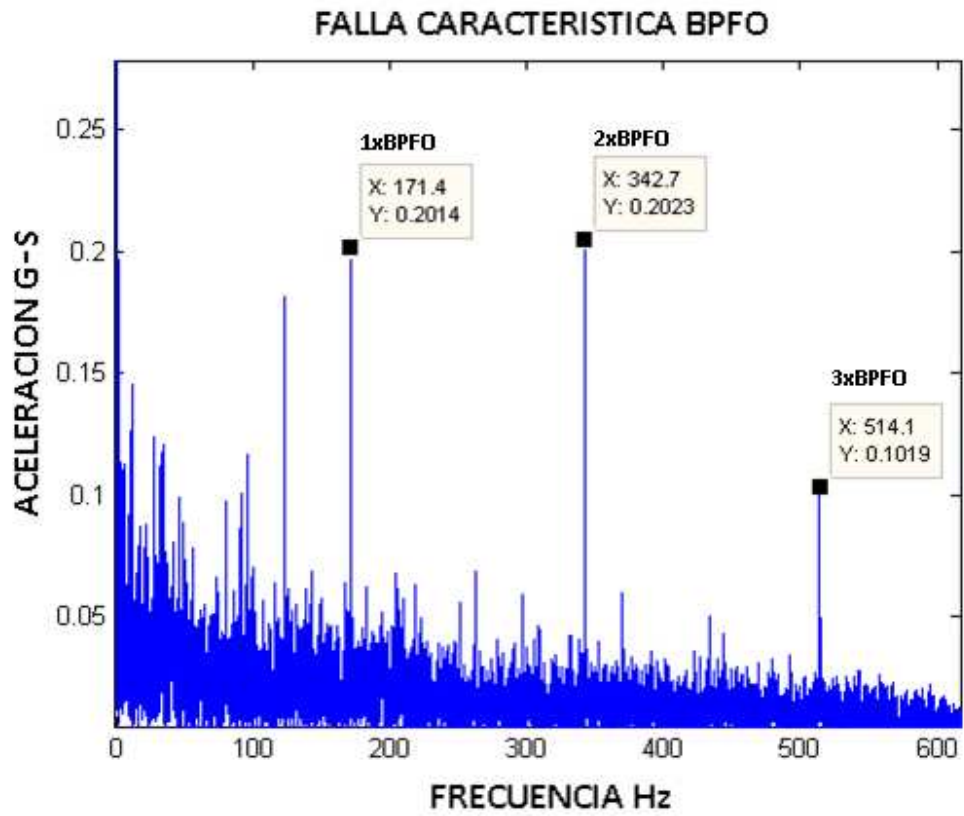
Figura 53. Espectro de la vibración para rodamiento con defecto en la pista externa avanzada



Aplicando ENVELOPING:

Se observa las fallas características asociadas con el defecto en la pista externa en menor magnitud, debido a que la magnitud de la BPF0 aplicada en la técnica, oscila en un valor cercano a la magnitud de la frecuencia natural más alta, que para nuestro caso es la frecuencia cercana a los 1145 Hz.

Figura 54. Espectro de la señal tratada por la técnica de Enveloping para rodamiento con defecto en la pista externa avanzada



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se muestra la tabla de comparaciones de las diferentes amplitudes para cada condición de estudio, especificando los resultados antes y después de la aplicación de la técnica. Se observa en la tabla 6 que a medida que la severidad del defecto aumenta, la ganancia dada por la técnica disminuye debido a que la limitante de la amplitud de la BPFO es la amplitud de la frecuencia natural alrededor de 1145 Hz dada en el espectro original.

Tabla 6. Amplitudes de la frecuencia fundamental característica de falla (1X) \approx 170 Hz

	Amplitud antes de aplicar técnica (G-s)	Amplitud después de aplicar técnica (G-s)	Ganancia
Rodamiento en perfecto estado	0.0002031	0.006552	32,26
Rodamiento con falla incipiente	0.001035	0.01367	13,21
Rodamiento con falla intermedia	0.01925	0.1704	8,86
Rodamiento con falla avanzada	0.6113	0.2014	0.329

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

Figura 55. Espectros de rodamiento en perfecto estado (A) y rodamiento con defecto en BPFO incipiente (B)

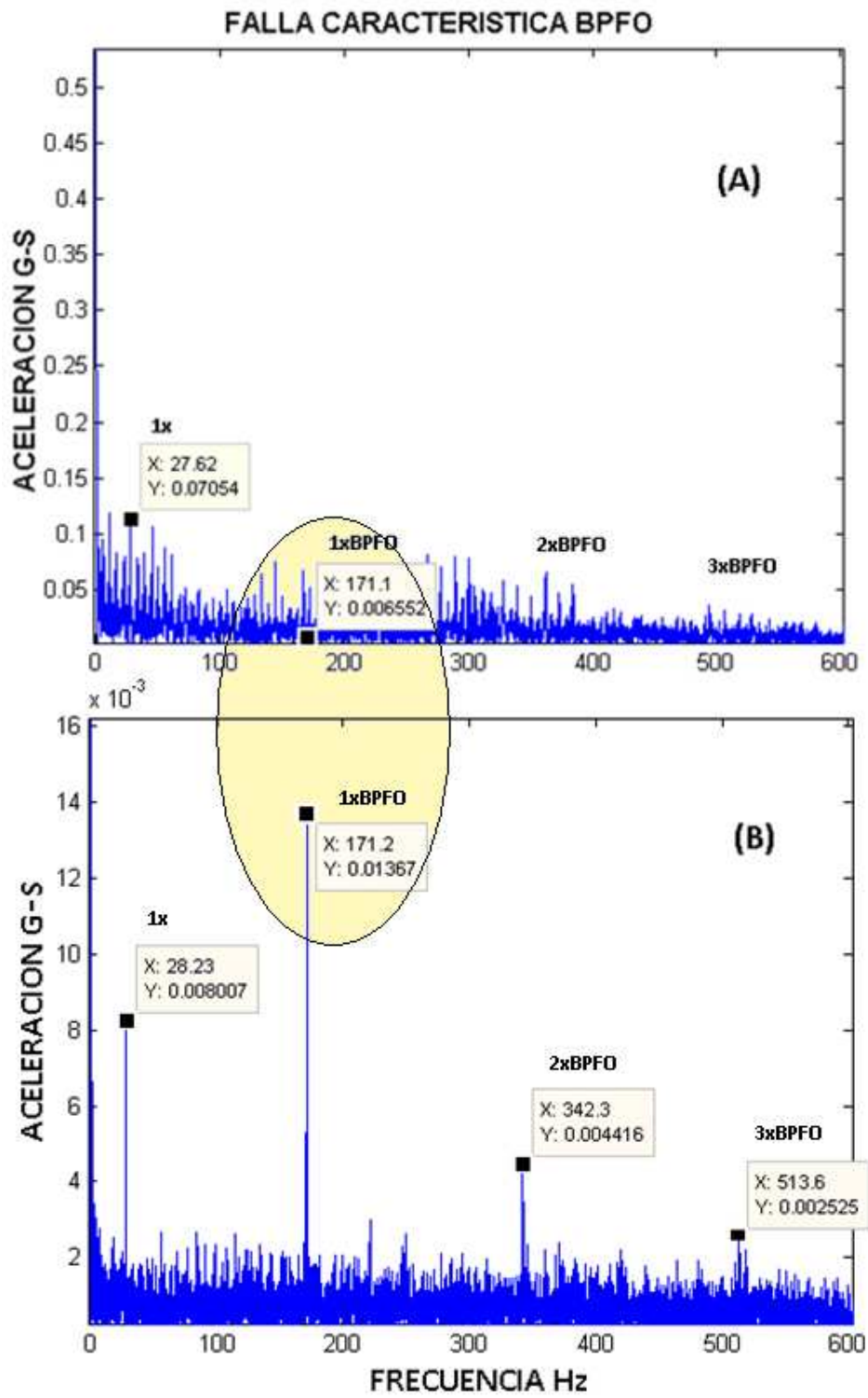


Figura 56. Espectros de rodamiento en perfecto estado (A) y rodamiento con defecto en BPFO intermedio (B)

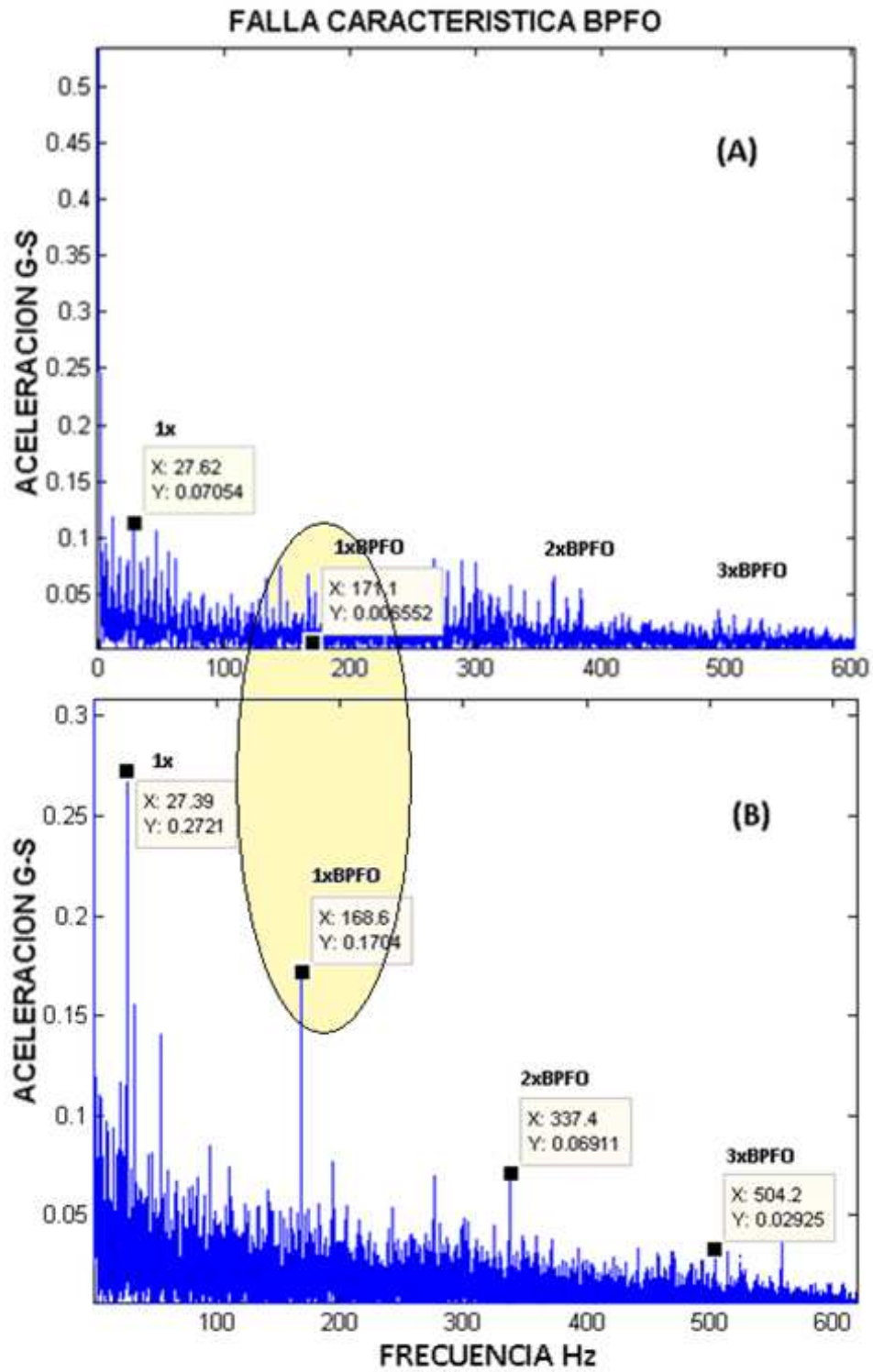
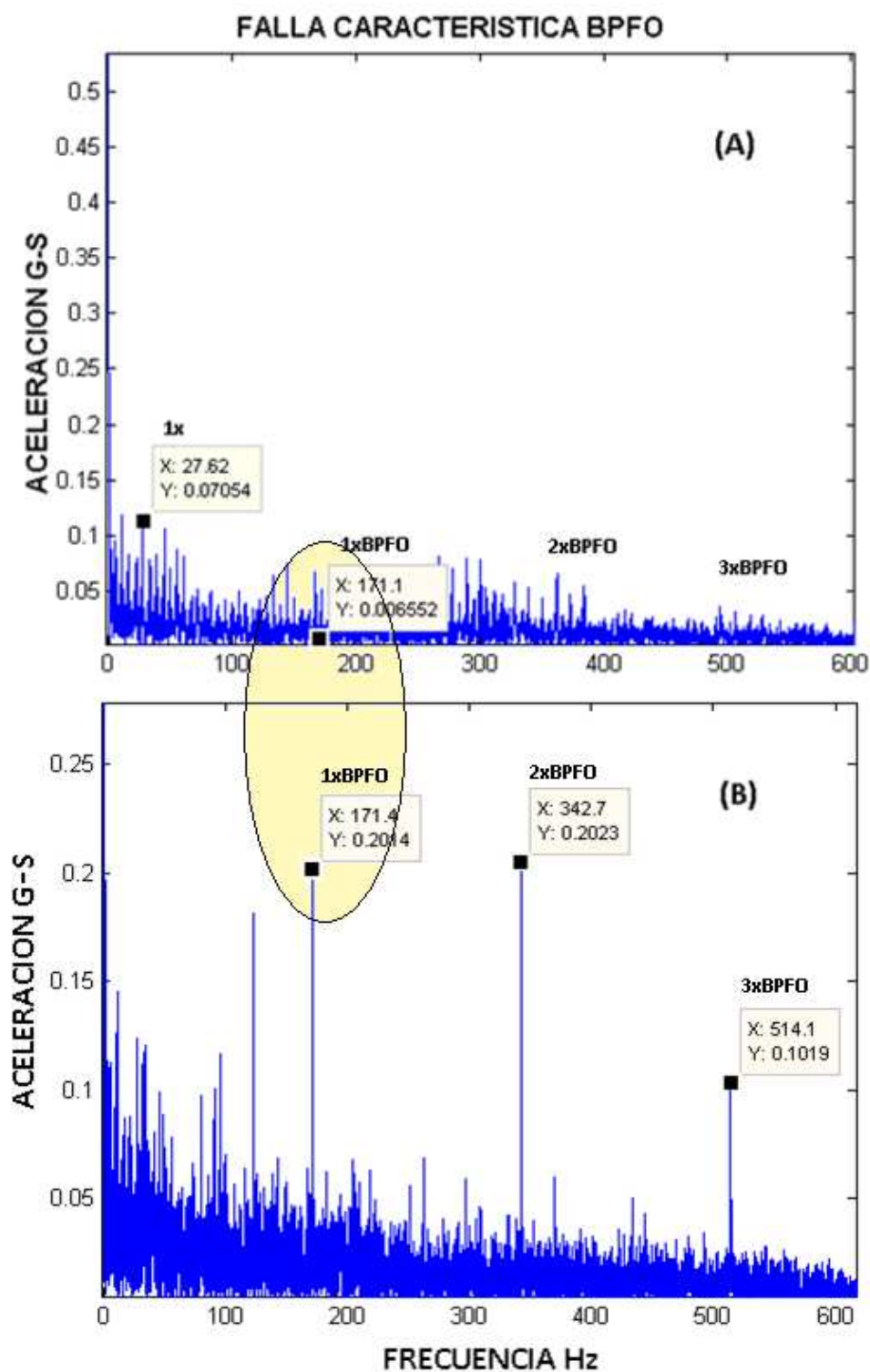


Figura 57. Espectros de rodamiento en perfecto estado (A) y rodamiento con defecto en BPFO avanzada (B)



En cada una de las figuras anteriores se observa el aumento de amplitud de la BPFO de acuerdo al grado de severidad de falla que es lo que se espera de la aplicación de la técnica.

Las pequeñas discrepancias presentes en la BPFO para los diferentes escenarios de medición, asocian un porcentaje de error pequeño. Estas pequeñas diferencias se asocian a la velocidad del eje (RPM), pues en cada condición del rodamiento (niveles de falla) no se garantiza un número de RPM constante, debido al apriete de los tornillos que mantienen la canastilla del rodamiento cónico ensamblado al sistema (se trató de mantenerla lo más constante posible durante el desarrollo de las mediciones y con esto mantener de igual manera la BPFO, como se observa en la tabla 7).

Tabla 7. Frecuencia de falla en la pista externa para cada uno de los escenarios analizados

	BPFO (Hz)
Rodamiento en perfecto estado	171.1
Rodamiento con falla incipiente	171.2
Rodamiento con falla intermedia	168.6
Rodamiento con falla avanzada	171.4

6. CONCLUSIONES

- Se demostró la efectividad de la técnica ENVELOPING en la detección temprana de fallas en rodamientos cónicos, pues permite mejorar el rango dinámico de la amplitud para señales de baja energía que están ocultas en el piso del espectro por señales de mayor energía; corroborando los datos que se obtuvieron de la experiencia con los teóricos (BPFO).
- A medida que el defecto en la pista externa es más severo, el análisis de vibraciones tradicional sirve como método de detección de ésta. Por otro lado, si la falla es menos perceptible (incipiente) es necesario la aplicación de la técnica ENVELOPING para encontrar la frecuencia característica de falla en la pista externa (BPFO), es decir, entre más incipiente es la falla mayor es la ganancia en amplitud otorgada por la técnica.
- El fundamento de la técnica ENVELOPING es poder detectar los defectos gracias a las frecuencias propias del rodamiento, las cuales son estimuladas por el defecto (impacto), esto como se mencionó antes, ocurre sólo en la etapa incipiente, cuando el defecto es localizado y pequeño; a medida que éste crece, irá perdiendo el carácter impulsivo y esto se observa claramente en los análisis anteriores. Así esta es la limitación del método a medida que el defecto pierda el carácter impulsivo éste dejará de estimular las frecuencias naturales del rodamiento y con esto la detección del defecto.

- El software MATLAB[®], demostró ser una herramienta muy útil en el procesamiento de señales, en nuestro caso, filtrado, rectificación (Transformada de Hilbert) y FFT (Fast Fourier Transform o Transformada Rápida de Fourier), aplicado a las señales de interés captadas por el sistema de adquisición de datos.
- Este proyecto de grado es de utilidad para investigaciones futuras en el campo del estudio de detección de fallas en rodamientos, como método alternativo de carácter académico al manejar una plataforma de procesamiento de señales como MATLAB[®].

BIBLIOGRAFÍA

- **CASTRO, Y. A., 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. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas.
- **ESPEJO, E., GARCÍA J.** Febrero 2008, Modos de falla comunes en rodamientos, Obtenido el 21 de Diciembre de 2009, de <http://bit.ly/8ZXO4M>
- **FIDLER, P.** (2003). Theoretical Verification Of Envelope Analysis Of Rolling Element Bearings With Using Matlab
- **JONES, R. M.** (1996). Enveloping for Bearing Analysis. San Diego, California
- **MCINERNY, S. A., DAI Y.** (2003). Basic Vibration Signal Processing for Bearing Fault Detection. IEEE Transactions On Education
- **MONCADA, C. M.** *Estudio de fallas comunes en rodamientos rígidos de una hilera de bolas mediante análisis en el dominio del tiempo y de la frecuencia*. Valdivia, Chile. 2002. Trabajo de grado (Licenciado en Acústica y al Título profesional de Ingeniero Acústico). Universidad Austral de Chile. Facultad de Ciencias de la Ingeniería.
- **MOTT, R. L.** Diseño de elementos de máquinas. Pearson. México, 2006.
- **SINISIS INGENIERÍA**, *Sistema de Monitorización en continuo para mantenimiento predictivo (Vibraciones)*. Pontevedra, España. 2008. 24 p.
- **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/>>

ANEXOS

ANEXO 1

CÓDIGO DE MATLAB APLICADO A UNA SEÑAL SIMULADA

```
clc;
clear all;
close all;

Fs1=1024;
t1= 0:0.05/Fs1:0.05;
y=2*(exp(-400*t1).*sin(2*pi*1000*t1));
figure
plot(t1,y)
title('Señal Impacto con resonancia de 1000 hz');
xlabel('Tiempo (seg)');
ylabel('Amplitud');

Y= repmat(y,1,6);
t2=0:0.3/length(Y):(0.3-0.3/length(Y));
figure
plot(t2,Y)
title('Señal de pulsos con T=0.05 F=20 Hz');
xlabel('Tiempo (seg)');
ylabel('Amplitud');

Fs2= length(Y)/0.3;
nfft= 2^(nextpow2(length(Y)));
fftx = fft(Y,nfft);
NumUniquePts = ceil((nfft+1)/2);
fftx = fftx(1:NumUniquePts);
mx = abs(fftx)/length(Y);
mx = mx.^2;
if rem(nfft, 2)
    mx(2:end) = mx(2:end)*2;
else
    mx(2:end -1) = mx(2:end -1)*2;
end

f = (0:NumUniquePts-1)*Fs2/nfft;
figure
plot(f,mx);
title('Espectro de la señal de pulsos');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Power');
```

```
H=hilbert(Y);
Z=abs(H);
figure
plot(t2,Z);
```

```
Fs2= length(Y)/0.3;
nfft= 2^(nextpow2(length(Z)));
fftx = fft(Z,nfft);
NumUniquePts = ceil((nfft+1)/2);
fftx = fftx(1:NumUniquePts);
mx = abs(fftx)/length(Z);
mx = mx.^2;
if rem(nfft, 2)
    mx(2:end) = mx(2:end)*2;
else
    mx(2:end -1) = mx(2:end -1)*2;
end
f = (0:NumUniquePts-1)*Fs2/nfft;
figure
plot(f,mx);
title('Espectro de la señal envolvente');
xlabel('Frecuencia (Hz)');
ylabel('Power');
```

ANEXO 2
CÓDIGO DE MATLAB APLICADO A LAS SEÑALES MEDIDAS EN LOS DIFERENTES
ESCENARIOS DE FALLA

```
close all;
clc;
load (Oscilograma de la señal).txt
matriz=(Oscilograma de la señal);
for j=1:30000
    t(1,j)=matriz(j,1);
    A(j,1)=matriz(j,2);
end

plot(t,A);
L=length(A);
title('Señal que entra del analizador')

Fs=5000;

figure
NFFT = 2^nextpow2(L); Y = fft(A,NFFT)/L;
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
title('Espectro de la señal')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')

load Num.mat;
load Numl.mat;
load Den.mat;
load Denl.mat;

b=Num;
a=Den;

Q = filter(b,a,A);
figure
plot(t,Q);
title('Señal después de ser filtrada por pasa-alta')

L1=length(Q);
figure
NFFT = 2^nextpow2(L1);
```

```

Y1 = fft(Q,NFFT)/L1;
f1 = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
plot(f1,2*abs(Y1(1:NFFT/2+1)))
title('Espectro de la señal filtrada por pasa-alta')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')

```

```

hilb=hilbert(Q);
Z=abs(hilb);
figure
plot(t,Z);
title('Envolvente de la señal')

```

```

L2= length(hilb);
figure
NFFT = 2^nextpow2(L2);
Y2 = fft(Z,NFFT)/L2;
f2 = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
plot(f2,2*abs(Y2(1:NFFT/2+1)))
title('Espectro de la envolvente')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')

```

```

c=Num1;
d=Den1;

```

```

W = filter(c,d,Z);
figure
plot(t,W);
title('Señal después de ser filtrada por pasa-bajo')

```

```

L3= length(W);
figure
NFFT = 2^nextpow2(L3); Y3 = fft(W,NFFT)/L3;
f3 = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
plot(f3,2*abs(Y3(1:NFFT/2+1)))
title('Frecuencia característica de falla')
xlabel('Frecuencia (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')

```