

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES MECÁNICAS.

MARIA EUGENIA MORENO S.

Asesor:

Profesor: Ph.D. Junes Abdul Villarraga Ossa
Doctor en Ciencia y Tecnología de los Materiales

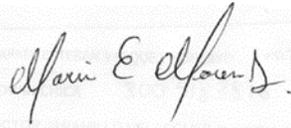
Trabajo de investigación para obtener el título de:
Magister en Ingeniería

**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECANICA
GRUPO DE DISEÑO MECÁNICO**

Noviembre de 2018

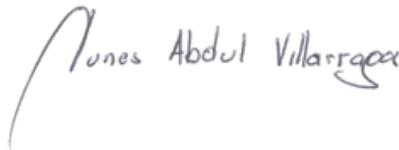
UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Facultad de Ingeniería



MARIA EUGENIA MORENO

Autor



JUNES ABDUL VILLARRAGA OSSA

Tutor

Fecha: 29/10/2018

AGRADECIMIENTOS

Agradezco muy especialmente al profesor Ricardo Moreno por sus enseñanzas en los temas de análisis vibracional, por su interés en el tema de los rodamientos y por su aporte continuo en esta investigación

Le agradezco a mi Hermano el profesor Ricardo Moreno por su bondad y su apoyo en el diario vivir, el cual recibo desde que aún no tenía memoria y que hoy da este trabajo como fruto. Le doy gracias a mis hijos Miguel y Sofia por inspirarme y a mi madre Marta Lucia por tener fe en mí.

Le agradezco al profesor Junes Villarraga por su acompañamiento en todo el proceso de esta investigación.

Le agradezco al grupo de diseño mecánico GDM por proporcionar los elementos requeridos en la experimentación, en especial a Jorge Mario Sánchez por el apoyo en el diseño y planimetría del banco de experimentación.

Le agradezco a la profesora Ingrid Natalia Gómez, por su apoyo en el análisis estadístico y por enseñarme como inferir.

PUBLICACIONES: Revistas y Conferencias

Parte de este trabajo será divulgado en foro internacional y publicado en revista Nacional según se lista a continuación:

Ponencia Oral: Congreso Internacional sobre Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura - AMDM 2018 (8/11/2018).

Diagnóstico de Fallas Tempranas de Rodamientos en Mecanismos Susceptibles al Desbalanceo y a la Desalineación

“Diagnosis of Early Failures in Bearing on Mechanisms Susceptible to Unbalance and Misalignment”

Artículo en Revista Nacional Indexada:

Diagnóstico de Fallas Tempranas de Rodamientos en Mecanismos Susceptibles al Desbalanceo y a la Desalineación, Revista UIS Ingeniería, Universidad Industrial de Santander. Aceptado para publicación 15/10/2018.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS 3

PUBLICACIONES: Revistas y Conferencias..... 4

ABREBIATURAS..... 10

RESUMEN..... 12

INTRODUCCIÓN 13

1. OBJETIVOS 14

2. JUSTIFICACIÓN..... 15

3. MARCO TEORICO 17

 3.1 Modelo de Desgaste y Cálculo de la Vida de Servicio de un Rodamiento 17

 3.2 Técnicas de Monitoreo de Rodamientos. 20

 3.3 Análisis de Fallas en Rodamientos Utilizando Vibraciones Mecánicas. 21

 3.3.1 Evolución de la falla en un rodamiento en espectros vibracionales 22

 3.3.2 Parámetros vibracionales utilizados para diagnosticar fallas en rodamientos. 24

 3.4 Descripción de los Diseños de Experimentos a Utilizar 30

 3.4.1 Diseño de un solo factor. 30

 3.4.2 Diseño factorial multinivel 2 niveles (2^k). 31

4. ESTADO DEL ARTE..... 31

 4.1 Metodologías en el Dominio del Tiempo 31

 4.2 Metodologías en el Dominio de la Frecuencia. 33

 4.3 Estudios que Permiten Fijar Alarmas con Valores Globales..... 36

5. DISEÑO DEL EXPERIMENTO..... 37

 5.1 Diseño del Banco del Experimento..... 37

 5.2 Experimento de un Solo Factor para Estudiar la Sensibilidad de Parámetros al Defecto en el Rodamiento..... 42

 5.3. Experimento Multifactorial 2^4 para Estudiar el Efecto de los Factores Desalineación, Desbalanceo, Falta de Lubricante y Defecto en el Rodamiento en los Parámetros Estudiados. 46

5.3.1 Efecto de los factores desalineación, desbalanceo y lubricación en las gráficas de espectros frecuenciales de la señal.	47
5.3.2 Efecto de los factores desalineación, desbalanceo y lubricación en las gráficas de espectros frecuenciales de envolvente de aceleración de la señal.....	50
5.3.3 Efecto de los factores defecto del rodamiento, desalineación, desbalanceo y cantidad de lubricación en las gráficas de espectros de frecuencia para el zoom de alta frecuencia hfd de la señal de aceleración.	50
5.3.4 Análisis de los parámetros globales de diagnóstico	53
6. DISCUSIÓN	56
Seguimientos de nuevos parámetros.	56
6.1 Regresión Logística para Defecto.....	59
6.2 Parámetros de diagnóstico para identificar las demás anomalías introducidas en el banco.	61
6.3 Funciones Discriminantes para la Identificación de las Anomalías.	65
7. PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO DE ASIGNACIÓN DE ALARMAS TEMPRANAS PARA FALLAS EN RODAMIENTOS.....	67
8. CONCLUSIONES	69
9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	72
ANEXO 1. DATOS EXPERIMENTO UN SOLO FACTOR.	76
ANEXO 2. DATOS EXPERIMENTO MULTIFACTORIAL 2 ^K	77
Anexo 2 a) Datos Variables Analizadas para Diagnostico de Rodamientos.	77
Anexo 2 b) Tabla de Datos para Análisis de Anomalías Desbalanceo Y Desalineación.	79
ANEXO 3. TABLAS DE CLASIFICACIÓN DE LAS FUNCIONES DISCRIMINANTES PARA DEFECTO EN RODAMIENTO, DESBALANCEO, DESALINEACIÓN Y CAMBIO EN LA CANTIDAD DE LUBRICANTE.....	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Partes del rodamiento e inicio de fatiga subsuperficial 17

Figura 2. Extracto de la carta ilustrada de diagnóstico de los asociados técnicos de Charlotte.
<http://es.scribd.com/doc/58748416/carta-de-charlotte> 22

Figura 3. Procesamiento para obtener la Envolvente de aceleración, espectros ENV 26

Figura 4. Comparación de espectros obtenidos de la señal de aceleración y de la envolvente de la misma señal. 26

Figura 5. Espectro de aceleración de la señal y espectro de aceleración de la señal filtrada para obtener el parámetro HFD. 27

Figura 6 . Cepstrum y espectro de envolvente de la misma señal, rodamiento 6305 con falla BPFO= 44.52, 1/BPFO=0.022 29

Figura 7. Microperforado por electroerosión para generar la falla en el rodamiento. 38

Figura 8. Imágenes del banco de experimentación. 39

Figura 9. Detalles constructivos del banco. 40

Figura 10. Esquema del sistema de adquisición de la señal..... 41

Figura 11. Procesamientos matemáticos sobre la señal para encontrar los valores globales para el análisis. 43

Figura 12. Grafica de medias con el intervalo LSD para los factores para los diferentes tamaños de defecto. 45

Figura 13. Espectros tomados como ejemplo para indicar modificación del espectro al variar los niveles de desbalanceo a) nivel 0 y b) nivel 1..... 47

Figura 14. Espectros de frecuencia de la señal de aceleración para diferente interacción de factores (defecto, desalineación, desbalanceo, cantidad de lubricante). 48

Figura 15. Espectros de frecuencia la envolvente de la señal de aceleración para diferente interacción de factores (defecto, desalineación, desbalanceo, cantidad de lubricante)..... 51

Figura 16. Espectros de frecuencia de la señal de aceleración en el Zoom de alta frecuencia HFD para diferente interacción de factores (defecto, desalineación, desbalanceo, cantidad de lubricante). 52

Figura 17. Diagrama Pareto de efecto estandarizado de los factores sobre el parámetro envolvente de aceleración.....	53
Figura 18. Diagrama Pareto estandarizado de los efectos para el parámetro HFD.	54
Figura 19. Diagrama Pareto estandarizado de efectos para los parámetros K, FC, RMS, Ske.	55
Figura 20. Proceso matemático para obtener las nuevas variables respuesta.	57
Figura 21. Diagramas de Pareto estandarizado para RMSenvband2, PeaKenvband2, FCenvband2, Kenvband2.....	58
Figura 22. a) Diagrama de dispersión de los datos para los niveles de defecto en el rodamiento en las variables RMSenvband2, HFD, K. b) grafica de la gráfica de clasificación obtenida manteniendo la K en un valor de 2.984.	61
Figura 23. Diagramas de dispersión para anomalías de desbalanceo, desalineación y cambios de cantidad de lubricante.	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 . Estadísticos para describir la señal de aceleración.....	29
Tabla 2. Resumen de investigaciones en el dominio del tiempo.....	32
Tabla 3. Resumen de investigaciones realizadas en el dominio de la frecuencia	34
Tabla 4. Correlación de Pearson de cada uno de los parámetros con el tamaño de defecto.....	43
Tabla 5. Niveles para los factores experimento 2 ⁴	47
Tabla 6. Parámetros globales propuesto para diagnóstico de desbalanceo y desalineación y cambio en la cantidad de lubricante.	62
Tabla 7. Parámetros introducidos al análisis.	63
Tabla 8. Coeficientes de la Función de Clasificación para defecto	65
Tabla 9. Coeficientes de la Función de Clasificación para desbalanceo.....	66
Tabla 10. Coeficientes de la Función de Clasificación para desalineación	66
Tabla 11. Coeficientes de la Función de Clasificación para Lubricante	66
Tabla 12. Línea base para alarmas de diagnóstico para el banco de ensayos de rodamientos.	68

ABREVIATURAS

1X	Frecuencia de giro o fundamental
a₁	Factor de ajuste para la fiabilidad del calculo de la vida del rodamiento.
aSKF	Factor de ajuste SKF para el calculo de la vida en el rodamiento.
BPFI	(Ball Pass Frequency, Inner race) frecuencia de falla de la pista interna
BPFO	(Ball Pass Frequency, Outer race) es la frecuencia de falla generaría una señal
BSF	(Ball Spin Frequency) es la frecuencia de falla de los elementos rodantes
C	Capacidad de carga dinámica
EA	Espectro de aceleración
Env	RMS de la envolvente de aceleración de la señal filtrada (1-10) khz.
FC	Factor de cresta de la señal
FCb1banddesa	Valor del pico máximo de la señal en el filtro (1.0-3.2) la frecuencia fundamental
FCb1banddesb	Factor de cresta de la señal en el filtro (0.8-1.5) la frecuencia de giro
FCenvband2	Factor de cresta de la envolvente de la señal en el filtro (43-45) Hz
FFT	Transformada rápida de Fourier
FTF	(Fundamental Train Frequency) es la frecuencia fundamental de giro de la jaula.
Gs	Gravedades
HFD	RMS de la señal filtro pasa alta 5Khz
HT	Transformada de Hilbert
K	Curtosis de la señal
Kenvband2	Curtosis de la envolvente de la señal en el filtro pasa banda (43-45) Hz
L10	Vida nominal (con un 90% de fiabilidad) [millones de revoluciones]
LSD	Diferencia menos significativa (LSD) de Fisher para comparaciones múltiples
n	Velocidad de giro [rpm]
P	Carga dinámica equivalente
p	Exponente de la ecuación de la vida
Peakb1banddesalineas	Valor del pico máximo de la señal en el filtro (1.0-3.2) la frecuencia fundamental
Peakb1banddesb	Valor del pico máximo de la señal en el filtro (0.8-1.5) la frecuencia de giro
Peakenvband2	Valor pico máximo de la envolvente de la señal en el filtro (43-45) Hz
RMS	Valor RMS de la señal
RMSb1banddesalineas	Valor RMS de la señal en el filtro (1.0-3.2) la frecuencia fundamental
RMSb1banddesb	RMS de la señal en el filtro (0.8-1.5) la frecuencia de giro

Rmsenvband2	Valor de la envolvente de la señal en el filtro (43-45) Hz
SKE	Asimetría de la señal
STFT	Transformadas rápidas de Fourier en ventanas de tiempo STFT
WT	Transformadas de wavelet



RESUMEN

En este trabajo se estudian los efectos que el desbalanceo, la desalineación y los cambios en la cantidad de lubricante causan en los parámetros de vibración de aceleración comúnmente utilizados en el diagnóstico de fallas tempranas de rodamientos. Esta investigación plantea un procedimiento de asignación de alarmas tempranas a fallas en rodamientos que puede utilizarse en cualquier sistema, el cual se basa en el seguimiento de valores globales en bandas alrededor de la frecuencia de falla del defecto en la envolvente de aceleración, parámetros como HFD muy sensible al defecto y también el seguimiento de variables poco sensibles al defecto y muy sensibles a las demás anomalías de forma que pueda hacerse un diagnóstico integral y temprano con valores globales.

Entre los métodos estudiados se encuentran: el análisis espectral, el estudio de valores globales de la medición de la aceleración con diferentes procesamientos como la detección de alta frecuencia HFD, la envolvente de aceleración ENV, la curtosis K, el factor de cresta FC, la asimetría de la señal Ske, entre otros parámetros propuestos por los autores. Para realizar la evaluación de los parámetros se construyó un banco experimental y se diseñó un experimento factorial multinivel (2^4) donde los factores fueron: daño del rodamiento, desequilibrio, desalineación cambio en la cantidad de lubricante. Se realizaron 3 réplicas (48 unidades experimentales). En los análisis estadísticos empleados para analizar la respuesta de los parámetros al defecto encontramos, distancia de Fisher para diferencia de medias, diagramas Pareto de efecto estandarizado, regresiones logísticas y análisis de funciones discriminantes.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se realizó un estudio comparativo de los parámetros utilizados para la asignación de alarmas tempranas a fallas en rodamientos a partir de medidas de vibración en aceleración, para esto se estudiaron estadísticos temporales típicos de la señal de vibración como curtosis K (por sus siglas en ingles), raíz media cuadrática RMS, factor de cresta CF y valores globales obtenidos a partir de procesamientos en la onda como detección de alta frecuencia HFD y envolvente de aceleración ENV entre otros. Se realizó también una comparación de los espectros de aceleración y envolvente de aceleración.

En la experimentación se analizó la respuesta de K, RMS, CF, HFD y ENV a diferentes tamaños de defecto en el rodamiento y se cambiaron las condiciones de operación en desalineación, desbalance y cantidad de lubricante para validar el efecto que esto ocasionaba en la medida.

Se evaluó cuál de los parámetros estudiados fue el más sensible al daño del rodamiento y menos sensible a fenómenos como el desalineamiento, el desbalanceo y el cambio en la cantidad de lubricante, este parámetro fue el más indicado para identificar el daño en rodamientos evitando falsas alarmas debidas a otros problemas.

Se analizó también el efecto de los cambios de condición en desbalanceo, desalineación y falta de lubricante en los espectros de aceleración y envolvente de aceleración.

Al finalizar el trabajo se realiza un análisis de los resultados y se propone un procedimiento de asignación de alarmas tempranas a fallas en rodamientos a partir del estudio de la aceleración de la vibración.

1. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un procedimiento para la asignación de alarmas tempranas a fallas en rodamientos a partir de medidas de vibración en aceleración.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseño y construcción de banco de pruebas para fallos en rodamientos que permita la generación de desalineamientos, desbalanceo y variación de la lubricación en el sistema.
- Evaluar la respuesta de la medida de estadísticos de la señal de vibración como Curtosis (K), Raíz media cuadrática (RMS), factor de cresta (CF), asimetría de la señal (SKE) y valores globales obtenidos a partir de otros procesamientos de la señal como espectros como la detección de alta frecuencia (HFD) y Envolvente de aceleración (ENV) a fallas provocadas en rodamientos, identificando cuál muestra más rápidamente la aparición del defecto.
- Evaluar la influencia de diferentes tamaños de defecto y cambios de condición en la operación como desalineación, desbalanceo y falta de lubricante.
- Desarrollar un procedimiento de asignación de alarmas tempranas a fallas en rodamientos con medidas de vibración en aceleración donde se eviten diagnósticos equivocados por la interacción de otros desperfectos de la máquina.

2. JUSTIFICACIÓN

Dentro del mantenimiento predictivo se presta especial interés a las fallas en rodamientos debido a su alto costo y al interés de sacarle provecho a la mayor parte de su vida útil [1]. La falla de un rodamiento es una de las principales causas de daños en la maquinaria rotativa, estas pueden ser catastróficas y pueden ocasionar tiempos de inactividad costosos [2],[3],[4],[5]. En los motores eléctricos el 41% de las averías prematuras son atribuidas a fallas en los rodamientos [6].

Los beneficios de obtener un diagnóstico de falla incipiente en un rodamiento serían principalmente el poder planificar su remplazo con mucho más tiempo y el poder realizar acciones durante el avance de la falla que extiendan la vida útil del componente como cambios en la lubricación, reducir carga de trabajo y/o velocidad de operación. [7] La planificación en compras, la reducción de stock, la reducción en compra de repuestos impacta el costo total del capital del activo. Algunos estudios [7] y [8] han concluido que realizar mantenimiento basado en condición es la estrategia más rentable para el mantenimiento.

El mantenimiento predictivo puede conducir a disminuir el tiempo de inactividad planificado de la máquina entre un 30% a un 50% y el extender la vida útil de los componentes haciendo el remplazo optimo reduce los costos de repuestos entre un 20% al 40%, adicionalmente los costos de mano de obra y servicios de mantenimiento se podrían reducir entre un 10 % a 40% [9]. Los beneficios del diagnóstico de la falla a tiempo dependerían del tipo de maquinaria y del contexto operacional de la misma, hacerlo de manera más precisa nos permitiría ajustar más la estrategia de mantenimiento y lograr los mayores porcentajes de ahorro, es válido resaltar que para máquinas de gran tamaño que involucran grandes inversiones de capital se produciría mucho más beneficio.

Los rodamientos están presentes en la mayor parte de la maquinaria rotativa, en una amplia diversidad de máquinas con múltiples condiciones de operación y formando parte de montajes muy diferentes. Por ejemplo, una misma referencia de rodamiento puede pertenecer a un

ventilador o a un reductor de velocidad, lo que implica señales vibratorias muy diferentes con registros distintos dificultando la asignación de alarmas [10].

En la industria un ingeniero de confiabilidad se enfrenta a la tarea de asignar alarmas de fallo a centenares de equipos con rodamientos para ingresarlos a un programa de mantenimiento predictivo, por lo general para fijar los valores de alarma debe basarse en recomendaciones de los fabricantes de los analizadores comerciales como por ejemplo la que presenta SKF en [11]. Debido a lo sensible de algunos parámetros se ha evidenciado en la práctica que pueden generarse falsas alarmas de rodamientos a causa de cambios en la alineación, desbalanceo o lubricación. Por tal motivo es importante intentar establecer modelos que tengan en cuenta otras mediciones importantes y procedimientos que puedan descartar otros defectos como desalineación, desbalanceo y falta de lubricación.

3. MARCO TEORICO

3.1 Modelo de Desgaste y Cálculo de la Vida de Servicio de un Rodamiento

Los rodamientos pueden ser considerados como un elemento complejo de maquina cuya función es transmitir una carga requerida según la aplicación de una parte que está en movimiento a otra que esta estacionaria. Para poder realizar esta función el rodamiento cuenta con cinco componentes, la pista exterior, la pista interior, los elementos rodantes, la canastilla y el lubricante. El comienzo de una falla podría empezar por alguno de estos elementos y dependiendo de donde comience la falla puede crecer lento o aceleradamente hasta la pérdida total de la función del rodamiento ver Figura 1.

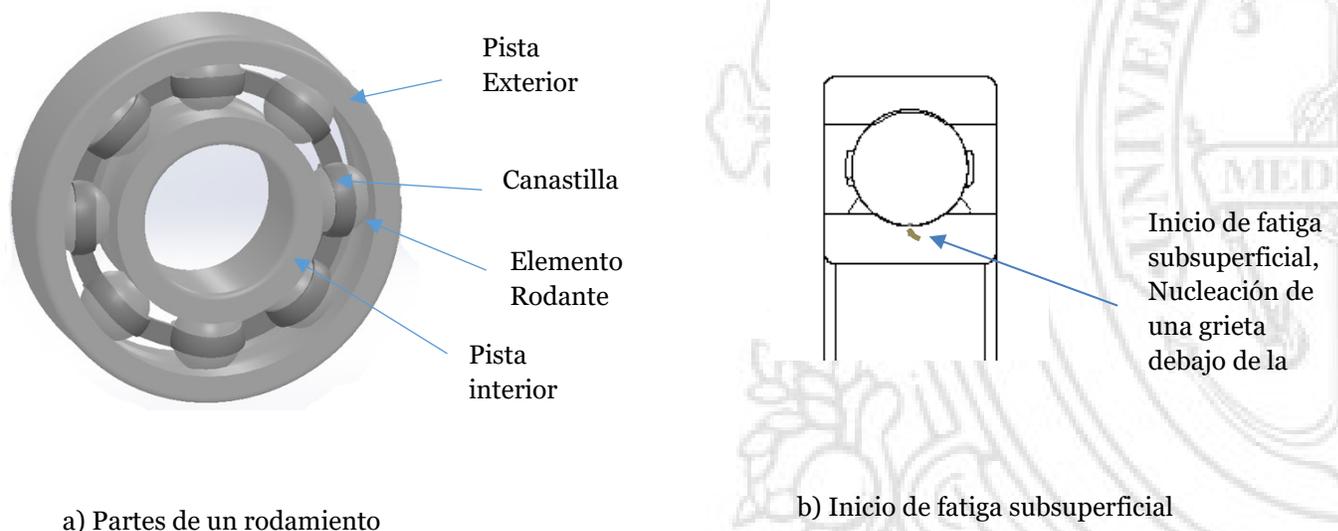


Figura 1. Partes del rodamiento e inicio de fatiga subsuperficial

La fatiga de contacto rodante en la superficie y subsuperficial son dos Modos de fallas típicas de los rodamientos, ambos son debidos a los esfuerzos de contacto que se presentan en la rodadura la primera es un Modo de falla que comienza en la superficie y se propaga por esta misma por el

efecto de paso continuo de los elementos rodantes, la segunda es una falla iniciada por debajo de la superficie donde los esfuerzos de contacto tangenciales son máximos y pueden iniciar el crecimiento de una grieta existente desde el interior de la superficie hasta el exterior, desde ahí la grieta crece hasta generar el desconchado de la superficie y crecerá debido al paso continuo de los elementos rodantes.

La duración de un rodamiento bajo estos medios de desgaste puede pronosticarse con la ecuación para la vida de los rodamientos normalizada (ISO 281 e ISO/TR 1281-2), que corresponden a la $L_{10} = \left[\frac{C}{P} \right]^p n$

[12].[13]

$$L_{10} = \left[\frac{C}{P} \right]^p n$$

Ecuación 1. Vida del rodamiento en millones de revoluciones

L ₁₀	vida nominal (con un 90% de fiabilidad) [millones de revoluciones]
C	capacidad de carga dinámica [kN] para la cual el rodamiento es capaz de girar un millón de revoluciones con un 90% de fiabilidad.
P	carga dinámica equivalente [kN], es una carga radial y centrada para los rodamientos radiales o axial centrada para los rodamientos axiales que tendría el mismo efecto en la vida del rodamiento que las cargas reales de trabajo.
n	velocidad de giro [rpm]
p	exponente de la ecuación de la vida = 3 para los rodamientos de bolas = 10/3 para los rodamientos de rodillos

Esta ecuación no tiene en cuenta factores como la efectividad del lubricante y su efecto en los esfuerzos de contacto, en realidad no tiene en cuenta los esfuerzos de la fatiga de los elementos rodantes y de las pistas.

La ecuación de la vida del rodamiento correspondiente a la norma (ISO 281 e ISO/TR 1281-2), se calculó para una confiabilidad del 90%, es decir que hay una probabilidad de error en la predicción del 10%. SKF ajustó la fórmula de la vida de los rodamientos con un factor a_{SKF} para considerar en esta la afectación de factores como la lubricación, la contaminación, la capacidad de carga a la fatiga y adicionalmente da la posibilidad de cambiar la fiabilidad del cálculo.

$$L_{nm} = a_1 a_{SKF} L_{10}$$

Ecuación 2. Formula de la vida modificada SKF

L_{10}	vida nominal (con un 90% de fiabilidad) [millones de revoluciones]
a_{SKF}	Factor de ajuste que depende de la viscosidad del aceite de lubricación del rodamiento, la contaminación y la capacidad de carga a la fatiga de los rodamientos.
a_1	Factor de ajuste para la fiabilidad del calculo

La vida promedio del rodamiento (L_{50}), es decir la vida con un 50% de confiabilidad es de 5 veces más la vida nominal L_{10} ya la vida del rodamiento se ajusta a una distribución de Weibull. [14] la asignación de un tiempo estimado de vida de servicio del rodamiento puede generar remplazos en los rodamientos cuando aún les queda mucho tiempo de servicio.

La norma ISO 15243 expone una clasificación de las posibles causas de falla de los rodamientos basada principalmente en la características visibles en las superficies de contacto de elementos rodantes y otras superficies funcionales, esta norma nos trae 6 modos de fallas donde la fatiga por rodadura es uno solo de esos modos y los otros serian, corrosión por humedad, corrosión por

fricción, desgaste abrasivo y adhesivo por problemas de lubricación, erosión eléctrica, deformación plástica por sobre carga, fracturas por fatiga o sobrecarga.

Para analizar el desgaste de los rodamientos es necesario contemplar analizar las concentraciones de esfuerzo que ocurren en la zona de contacto entre los elementos rodantes y las pistas, cualquier fenómeno que aumente los esfuerzos de contacto en la superficie o cerca de esta será un elemento facilitador del comienzo de una falla [15].

El aumento de las cargas de operación, el desbalanceo, la desalineación, la contaminación, mellas por manejo descuidado durante el montaje, la degradación del lubricante, la vibración, la pérdida de ajustes son factores que favorecen el comienzo y el crecimiento de una falla.

Analizando los modelos de desgaste presentes en los rodamientos, los modos de falla y los factores que afectan su durabilidad puede notarse los riesgos de estimar una vida de servicio y se entiende las ventajas que podría tener en la estrategia de mantenimiento realizar un remplazo por condición. Los rodamientos pueden ser tomados como elementos complejos para los cuales realizar un mantenimiento por condición resultaría la mejor estrategia de mantenimiento en cuanto a confiabilidad.

3.2 Técnicas de Monitoreo de Rodamientos.

Se encuentran numerosas investigaciones donde estudian las técnicas de detección de fallas en rodamientos como la emisión acústica, el ultrasonido, la onda de corriente, impulsos de choque, el análisis de vibraciones. Entre ellas la técnica donde se encuentran más estudios es el análisis de las vibraciones mecánicas [16].

En el análisis de vibraciones se pueden estudiar la onda en el tiempo de aceleración de la vibración, los estadísticos de la onda en el tiempo y hacer procesamientos de señal más sofisticados encontrando espectros frecuenciales con las transformadas rápidas de Fourier, y en equipos de velocidad y carga variable espectros con las transformadas de wavelet.

En el caso de requerir la automatización del diagnóstico, los investigadores utilizan técnicas de procesamiento de la información como redes neuronales y lógica difusa [16], [17].

La medición de emisión acústica, utiliza sensores acústicos y filtros a muy altas frecuencias 150 Khz a 500 Khz, es la herramienta de detección más sensible que detectaría la falla en su etapa más temprana, estudios han determinado su efectividad, pero es muy poco utilizada ya que requiere de un sensor especial y se aconseja utilizarla en combinación con otras técnicas para detectar un problema. (SKF Reliability Systems, 2000, p.7)

La técnica de impulsos de choque SPM, por sus siglas en inglés, requiere de un sensor especial de vibración con una frecuencia natural de 32 Khz, cuando hay un defecto en la rodadura de un rodamiento se presentan impulsos de choque a muy alta frecuencia, estos impulsos existen la frecuencia natural del sensor, la magnitud de estos impulsos dependerá del tamaño y velocidad del rodamiento y de la severidad del daño del mismo, esta técnica utiliza un medidor especial para detectar fallas solo en rodamiento, se utiliza un filtro de ancho de banda entre (15-60) Khz. este método por ejemplo no permite identificar fuente de defecto en el rodamiento, requiere de un sensor exclusivo para la técnica.

En el medio industrial se pueden encontrar equipos de análisis de vibraciones que traen opciones de parámetros para la evaluación de los rodamientos como HFD (High frequency detection) y ENV (Envolvente de aceleración), Peackvue, Crest factor +, Cepstrum entre otros.

3.3 Análisis de Fallas en Rodamientos Utilizando Vibraciones Mecánicas.

Los rodamientos son elementos que generan vibración, cuando el elemento rodante del rodamiento pasa de la zona de carga a la zona no cargada se genera un pequeño impacto que hace que los rodamientos se comporten como fuentes de vibraciones. Esto ocurre en rodamientos en buen estado como de rodamientos con deteriorados por el uso o en falla [10].

3.3.1 Evolución de la falla en un rodamiento en espectros vibracionales

En la tabla de diagnóstico realizada por la asociación de técnicos de Charlotte, ver Figura 2 se representa cada una de las fallas comunes en las máquinas y el método para el análisis e identificación de defecto. En este caso ellos diferencian 4 etapas de daño en los rodamientos y explican forma de evidenciarlo en los espectros de aceleración de la vibración.

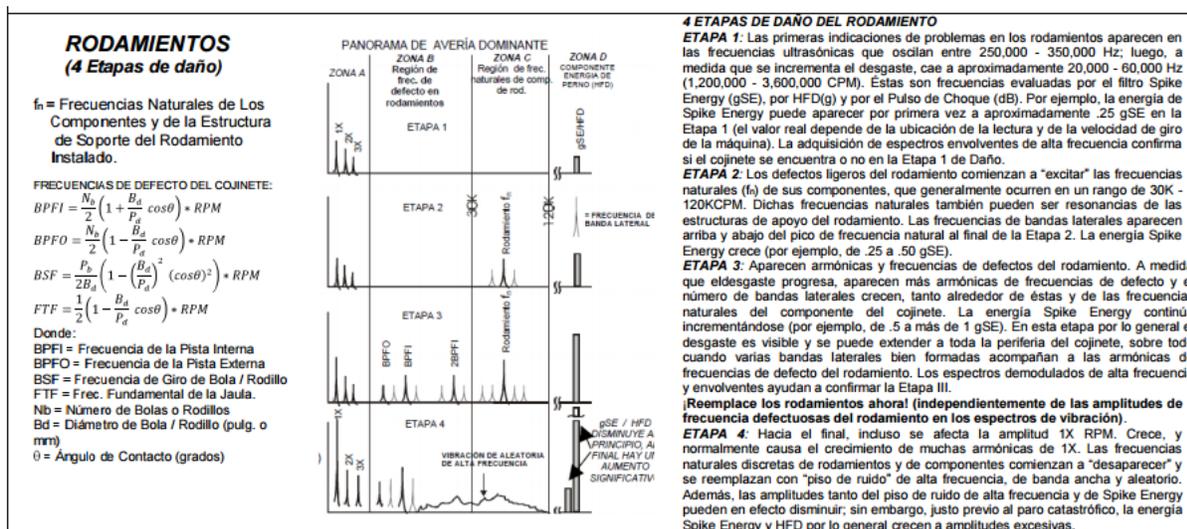


Figura 2. Extracto de la carta ilustrada de diagnóstico de los asociados técnicos de Charlotte.

<http://es.scribd.com/doc/58748416/carta-de-charlotte>

La Etapa 1

Etapa 1 del fallo corresponde a una falla insipiente que se asemeja a un desgaste distribuido y se evidencia vibracionalmente cuando aumenta la amplitud a muy altas frecuencias entre 250 KHz y 350 KHz, cuando el desgaste aumenta se perciben aumentos entre 20Khz a 30 KHz. Filtros pasa banda y pasa alta, en alta frecuencia, son utilizados para detectar fallos incipientes en esta etapa. En cuanto a los parámetros globales más utilizados, se encuentran los valores RMS de envolvente de aceleración con filtros entre 20 KHz a 30Khz y el valor RMS de la onda de aceleración por encima de 5 KHz [17].

La Etapa 2

La etapa 2 del daño corresponde en el rodamiento a una acentuación de este desgaste que produce una excitación de la frecuencia natural del rodamiento F_n y se evidencia la aparición de un pico por lo general entre 30 y 120 KHz.

En estas dos etapas de daños la identificación a nivel espectral es muy difícil, por lo general no se conoce la frecuencia natural de un rodamiento en operación.

En estas etapas la mejor forma de evidenciar el daño es haciendo seguimiento del incremento de la energía vibracional en las altas frecuencias. En la etapa 2 no es posible identificar a simple vista algún defecto en las partes del rodamiento, es necesario utilizar microscopio para observar microgrietas inferiores a 40 micras [17].

La Etapa 3

En la etapa 3 la falla aparecería visualmente en el componente del rodamiento. Espectralmente se observaría la aparición de la frecuencia de fallo del componente, por sus siglas en inglés estas frecuencias se nombran de la siguiente manera:

BPFO (Ball Pass Frequency, Outer race) es la frecuencia donde un defecto en la pista exterior generaría una señal

BPFI (Ball Pass Frequency, Inner race) frecuencia de falla de la pista interna

BSF (Ball Spin Frequency) es la frecuencia de falla de los elementos rodantes

FTF (Fundamental Train Frequency) es la frecuencia fundamental de giro de la jaula, y es la velocidad rotacional de la jaula.

Las frecuencias de defecto de los componentes se pueden encontrar mediante ecuaciones en función de la geometría del rodamiento y de la velocidad de giro puede consultar estas ecuaciones en las cartas de Charlott [18].

En la etapa 3 es donde se recomienda el cambio del rodamiento [18], ya que se esperaría una vida residual entre 1-5% de la vida útil [17].

A medida que crece la falla se observa un crecimiento del pico de la frecuencia de falla, pero la altura del pico empieza a disminuir con la aparición de armónicos de este pico y espectralmente no puede asignarse una severidad por la altura del pico, se interpreta que con la aparición de la frecuencia de falla del componente y de armónicos de esta frecuencia el rodamiento debe ser remplazado.

La característica de las frecuencias de falla de las partes del rodamiento es que no son ordenes exactos de la frecuencia de giro y no son tampoco un valor exacto la frecuencia puede variar hasta un 20% ya que sus ecuaciones dependen del ángulo de contacto y este cambia de acuerdo a la carga a la que se somete el rodamiento.

La Etapa 4

A medida que la falla empeora, aparecen múltiples grietas y se genera un descascarillado de la superficie de rodamiento, en esta etapa los indicios de falla del rodamiento como las frecuencias de falla de sus elementos tiende a desaparecer, sin embargo todo el espectro se levanta debido a que el ruido de fondo incrementa, la frecuencia de la velocidad de giro (1X) aumentará [17].

En esta etapa aumenta la energía de alta frecuencia HFD [18].

3.3.2 Parámetros vibratoriales utilizados para diagnosticar fallas en rodamientos.

Envolvente de aceleración ENV

La importancia de este parámetro en la detección de fallas en rodamientos radica en la cualidad de este procesamiento para extraer las frecuencias de falla de los rodamientos desde la señal donde están moduladas. La técnica de envolvente de aceleración o demodulación extrae una señal de alta frecuencia que es modulada por otra.

Para obtener el parámetro de envolvente de aceleración se utiliza la parte real de la transformada de Hilbert que se obtiene de la Ecuación 3.

$$\hat{x}(t) = \left| \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t-\tau} d\tau \right|$$

Ecuación 3. Transformada de Hilbert parte Real

$x(t)$	Es la función a la cual se le quiere sacar la transformada de Hilbert.
$\hat{x}(t)$	Es la convolución de la señal $x(t)$ con la función $1/\pi t$.

Esta función arroja como resultado una parte real y otra imaginaria, de la cual solo tomamos la parte real y por eso se expresa en valor absoluto.

El Procesamiento para obtener un espectro de envolvente para detectar fallas en rodamientos se muestra en la Figura 3. Puede resumirse en tres pasos [19]:

- filtrado de la señal
- extracción de la envolvente del filtrado aplicando la transformada de Hilbert.
- Determinación del espectro mediante la aplicación la transformada rápida de Fourier (FFT).

Los filtros pasan banda propuestos por SKF y que se encuentran en sus analizadores de vibraciones son filtro 1 :1–2.5 kHz; filtro 2: 2.5–5 kHz; filtro **3: 5–10 kHz**; filtro 4:10–20 kHz, y el filtro 5: 20–40 kHz.

El filtro más utilizado es el filtro 3 debido a que SKF propone unos valores de alarma utilizando este filtro [11].

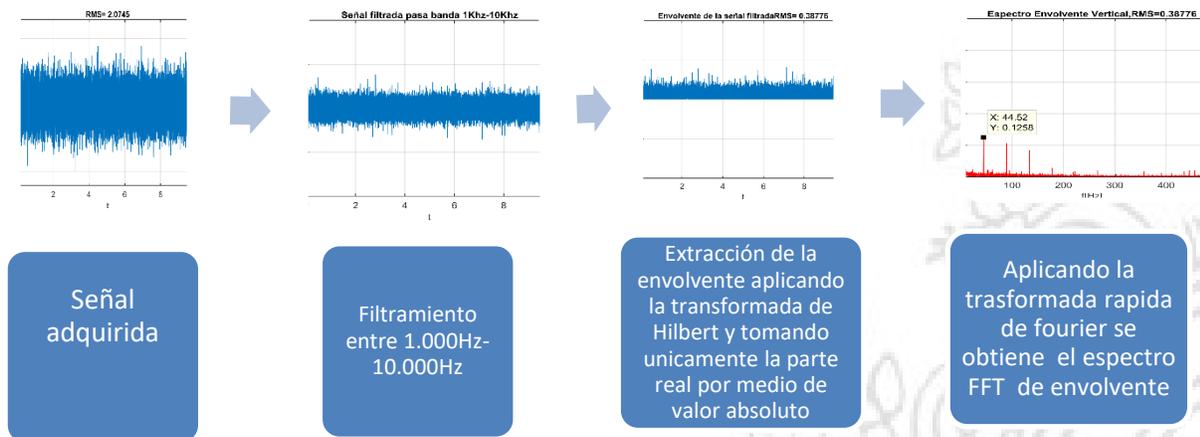
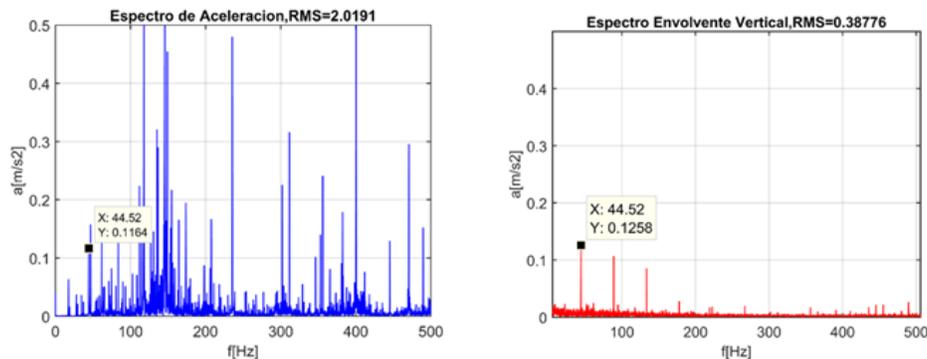


Figura 3. Procesamiento para obtener la Envolvente de aceleración, espectros ENV.

En la Figura 4 se compara el espectro obtenido de la señal de aceleración con el espectro de resultante de la envolvente de aceleración. Lo potente del espectro de envolvente de aceleración es que muestra la frecuencia de falla del rodamiento resaltada.



a) Espectro de aceleración rodamiento 6305 con falla en la pista externa (BPFO=44.52).
 b) Espectro de envolvente de aceleración rodamiento 6305 con falla en la pista externa.
 Figura 4. Comparación de espectros obtenidos de la señal de aceleración y de la envolvente de la misma señal.

El objetivo del parámetro conocido como “Envolvente de aceleración” es filtrar las bajas frecuencias y detectar los componentes repetitivos relacionados con los impactos generados por los defectos en los rodamientos en el rango de las frecuencias típicas de fallo. Este parámetro ha mostrado ser útil para determinar el progreso del fallo en rodamientos[10],[20],[21]. SKF patenta esta técnica y publica artículos donde muestran su efectividad para identificar fallos aun en rodamientos que trabajan a baja velocidad [22].

HFD (High Frequency Detection)

La detección de alta frecuencia realiza un filtro paso alto (5 kHz-60 kHz) para detectar picos generados por pequeños defectos. HFD generalmente se mide en Gs (gravidades) con valores pico o RMS[23]. En la Figura 5 se observa un espectro normal y se compara después de realizarse el filtro

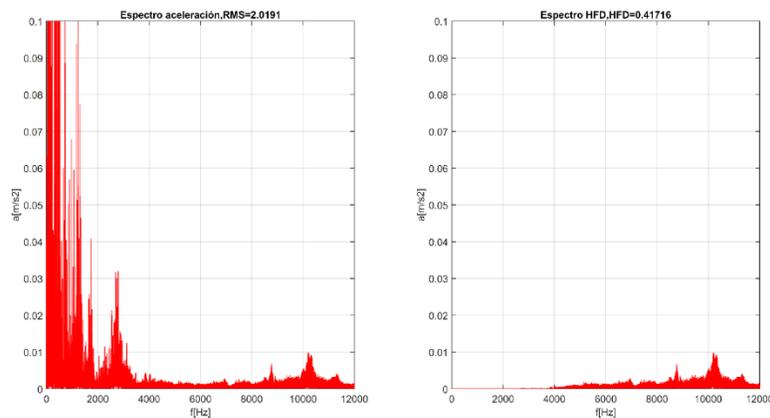


Figura 5. Espectro de aceleración de la señal y espectro de aceleración de la señal filtrada para obtener el parámetro HFD.

Peakvue y Crest Factor +

Estos procesamientos de la señal fueron propuestos por fabricantes de analizador comerciales, CSI propone Peak vue y Adash propone Crest factor +. La tecnología PeakVue elimina las señales de vibración normales y captura la amplitud real de los impactos de alta frecuencia en intervalos de un pequeño periodo. Las frecuencias de defecto aparecen en el espectro de PeakVue en sus frecuencias fundamentales y armónicos. Los espectros obtenidos son similares a los obtenidos con el proceso de demodulación.

El parámetro Crest factor +, entrega un valor global de la relación del pico máximo y el RMS, en la energía de alta frecuencia.

Cepstrum

El Cepstrum de una señal es el resultado de sacar la transformada inversa de Fourier al espectro

Ecuación 4.

~
s
c
a
l
a

$$C(q) = \text{real} (FTT^{-1}(\log[FTT C(t)]))$$

Ecuación 4. Cepstrum de una señal

Donde C(t) es la señal en el tiempo y C(q) es el cepstrum de la señal en el tiempo en orden de Quefrecy.

Este procesamiento resalta los armónicos en el orden Quefrecy, esta técnica es más compleja que en el caso de técnica de envolvente en donde se evidencia de forma más marcada y directa la frecuencia de falla del componente. En los cepstrum se resaltan todos los picos que presentan armónicos de un espectro en el inverso de sus frecuencias asociadas. En la Figura 6 se muestra un comparativo del espectro de envolvente de aceleración con el espectro de cepstrum.

c
a
,
v
e
r

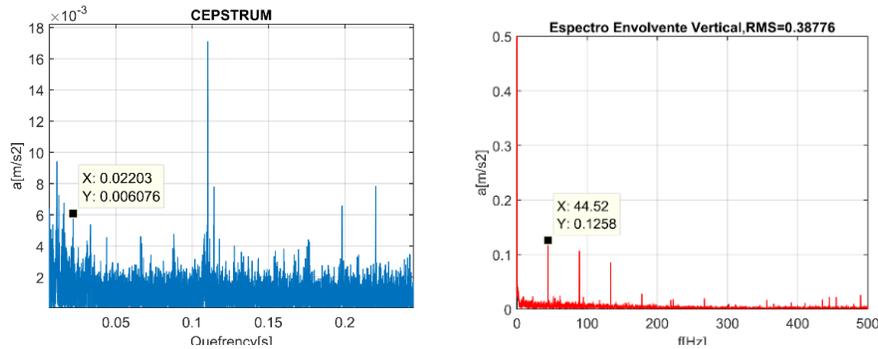


Figura 6 . Cepstrum y espectro de envolvente de la misma señal, rodamiento 6305 con falla BPFO= 44.52, 1/BPFO=0.022

Para tomar el Cepstrum de la señal debe filtrarse la señal alrededor de la frecuencia de falla de interés, en este caso se utilizó un filtro Butterworth de orden 8 pasa banda entre (20Hz-200Hz).

Estadísticos de la señal de aceleración

La señal de vibración puede ser estudiada como si fuera información de origen aleatorio y obtener información por medio de estadísticos de prueba, los más comunes y que serán utilizados en esta investigación se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 . Estadísticos para describir la señal de aceleración.

FORMULA	DESCRIPCION Y UTILIDAD ESPERADA
$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i)^2}$	Raíz Media Cuadratica (RMS). Es un valor global que se obtiene con la raíz cuadrada del promedio de la suma de los cuadrados de la señal. Ayuda a identificar la desviación estándar de la señal. Se espera que dicha desviación aumente con el defecto.
$CF = \frac{Maximo\ pico}{RMS}$	Factor de Cresta (CF). Es el valor del pico máximo sobre el valor RMS. CF se incrementa con la presencia de pocos picos de gran amplitud causados por daños localizados en el rodamiento. (el numerador se vuelve de alto por la

	magnitud del pico y el denominador no se afecta) se espera que este valor aumente con el defecto.
$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - \bar{x})^4}{(RMS)^4}$	Curtosis (K), es el momento es normalizado por la raíz cuadrada de la varianza. Es una medida relacionada con la cantidad y la amplitud de picos presentes en la señal. Para una señal que posee ruido Gaussiano se espera un valor de 3. Mientras más número de picos o más amplitud de los mismos, el estadístico tiende a crecer. Se espera que este valor aumente con el defecto.
$Ske = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^3}{\left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^2 \right]^{3/2}}$	Asimetría de la señal en valor absoluto (Ske): La asimetría es una medida de cómo se distribuyen los datos alrededor de la media, si los datos están sesgados a la derecha toma valores positivos, si están muy sesgados a la izquierda toman valores negativos, si la distribución es simétrica tomaría el valor de cero. Se espera que la asimetría este correlacionada con el defecto.

3.4 Descripción de los Diseños de Experimentos a Utilizar

3.4.1 Diseño de un solo factor.

Los diseños experimentales se realizan para evaluar y cuantificar la influencia de un factor sobre una variable dependiente.

La metodología del diseño de experimentos se basa en la experimentación, es necesario para poder tomar conclusiones repetir el experimento en condiciones iguales (réplicas) y analizar la variabilidad del resultado, para comprobar si cuando se utiliza un determinado tratamiento el cambio en la variable respuesta o variable de interés es debido al tratamiento o al error intrínseco. Si la variabilidad experimental es grande, sólo se detectará la influencia del uso del tratamiento cuando éste produzca grandes cambios en relación con el error de observación [24].

En este trabajo se realizó un experimento de un solo factor, donde se analizó la influencia de variar el tamaño del defecto en la respuesta medida de los parámetros RMS, CF, K, ENV, HFD, Ske. El motivo con el que se realiza el experimento fue comparar las respuestas y obtener un modelo estadístico-matemático que permita realizar comparaciones.

3.4.2 Diseño factorial multinivel 2 niveles (2^k).

Cuando el objetivo es medir cómo influyen k factores en un proceso y descubrir si interaccionan entre ellos, el diseño factorial completo 2^k es la estrategia experimental óptima [25]. En esta investigación nos interesa conocer los efectos de los factores tamaño de defecto, desalineación, desbalanceo y cantidad de lubricante sobre las variables utilizadas para la detección de fallas. El diseño 2^k nos permitirá explorar y determinar rápidamente los efectos de cada uno de los cuatro factores a estudiar desbalanceo, desalineación, defecto, lubricación en las variables respuesta dentro de un intervalo específico de variación de los factores.

4. ESTADO DEL ARTE

El análisis de las señales de vibraciones mecánicas ha sido ampliamente utilizado para el diagnóstico de fallos en rodamientos porque no solo detecta un defecto localizado, sino que también detecta el desgaste superficial causado por el deterioro en su ciclo normal de trabajo [1].

Para diagnosticar fallos en rodamientos se han encontrado estudios de las señales vibratorias en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia y en el dominio cepstral de quefrequency.

4.1 Metodologías en el Dominio del Tiempo

Los análisis de la señal de vibración en el dominio del tiempo utilizan la señal de aceleración para obtener estadísticos de prueba como: el valor RMS, el factor de cresta y la curtosis de la señal. En la Tabla 2 se resumen las investigaciones en el dominio del tiempo.

Tabla 2. Resumen de investigaciones en el dominio del tiempo

Referencia	Parámetros estudiados y comparados.	Metodología de la experimentación.	Conclusión	Discusión planteada
[26]	K	Generación de fallas en rodamientos de bolas.	La K tendría un valor cercano a 3, crece al aumentar la falla.	Proponen el estudio de K en bandas de frecuencia cerca de las frecuencias del defecto.
[27],[28],[29]	RMS, K	Generación de fallas en rodamientos.	RMS, K son parámetros correlacionados con el tamaño del defecto.	La curtosis tiende a disminuir cuando el defecto es muy severo.
[28], [30]	RMS, CF, Espectros de frecuencia de aceleración FTT	Generación de fallas en rodamientos.	Las señales en el dominio del tiempo no permiten identificar la ubicación del defecto.	los espectros de frecuencia identifican la fuente del defecto.
[31]	K y Ske	Generación de fallas en rodamientos.	El enfoque estadístico muestra una gran promesa para lograr el seguimiento del daño del rodamiento desde una etapa temprana de su desarrollo, con resultados que son esencialmente independiente de las variaciones de carga y velocidad.	El uso de los momentos estadísticos de los datos brutos rectificadas, especialmente el sesgo y la curtosis proporciona un enfoque más simple pero prometedor en el caso de identificar daños en estado incipiente.

Las metodologías en el dominio del tiempo demuestran ser útiles para identificar fallos en rodamientos, pero no son muy utilizadas en la industria ya que no arrojan identificación de la ubicación del defecto y son sensibles a falsas alarmas debido al cambio en factores operacionales.

El valor RMS de la señal de aceleración está correlacionado con el tamaño de defecto y es la forma más simple de llevar una tendencia, la comparación de los valores de RMS con valores recomendados se utiliza para determinar la condición de un rodamiento [32].

Se identifica que la curtosis tiene un valor de 3 en rodamientos en buen estado y tiende a aumentar con el crecimiento del defecto hasta un punto de inflexión donde baja con la severidad del defecto, se reporta que los rodamientos en buen estado tienen un factor de cresta cercano a 3.

En [26], [28], [31] se realizaron ensayos generando defectos en rodamientos y variando velocidad y carga. La K y CF demostraron ser insensibles a estas variaciones operacionales pero sensibles a la generación y crecimiento del defecto. Podría considerarse monitorear los rodamientos con estos estadísticos y al detectar una variación proceder a realizar un análisis espectral para determinar un diagnóstico.

Las frecuencias de fallo de una referencia de rodamiento pueden ser diferentes de un fabricante a otro lo que puede dificultar la interpretación espectral aun teniendo la referencia del rodamiento. Estos estadísticos pueden ser de utilidad cuando no se conoce la referencia del rodamiento.

Las investigaciones encontradas en [26]- [29], estudiaron la sensibilidad de los estadísticos a fallas generadas en rodamientos, variando en algunos casos velocidad, pero no se analizan condiciones de funcionamiento diferentes asociadas a desalineaciones y falta de lubricación.

4.2 Metodologías en el Dominio de la Frecuencia.

En el dominio de la frecuencia se encuentran los análisis de espectros obtenidos a partir de las transformadas rápidas de Fourier FFT, Transformadas rápidas de Fourier en ventanas de tiempo STFT, las transformaciones de Hilbert HT, las transformadas de Wavelet WT.

En el análisis espectral se pueden identificar las amplitudes en las frecuencias de fallo de los componentes de los rodamientos como son; frecuencia de fallo canastilla, frecuencia de fallo de

pista exterior, frecuencia de fallo elementos rodantes, frecuencia de fallo jaula. A medida que el daño va creciendo crece la amplitud en la frecuencia del daño [18].

Se ha evidenciado que las técnicas que realizan filtraciones de la señal de bajas frecuencias y solo hacen procesamientos en las altas frecuencias son más eficientes para la detección de fallos incipientes en rodamientos [23].

Las metodologías que realizan ventaneo en el tiempo SFFT y las transformadas de Wavelet son efectivas en maquinarias donde hay fenómenos transitorios o donde la carga y velocidad varían. En la tabla 3 se resumen los estudios encontrados en el dominio de la frecuencia:

Tabla 3. Resumen de investigaciones realizadas en el dominio de la frecuencia

Referencia	Parámetros estudiados y comparados.	Metodología de la experimentación.	Conclusión
[33]	FFT, PSD (espectros de ruido).	Generaron fallas en rodamientos, se compara la sensibilidad de los sensores.	El incremento en amplitud del nivel acústico es un parámetro que permitió detectar el daño en un estado más incipiente en el rodamiento que los espectros de vibración, mientras que la serie de picos separados por la frecuencia de falla permitió determinar la ubicación del daño en la jaula.
[10], [21] ,[22], [34]	Análisis de frecuencias en FFT normal, Espectros Env- Espectros de peak value.	Generación de fallas en rodamientos para comparar sensibilidad del parámetro.	En el análisis de vibraciones de rodamientos que giran a baja velocidad, las técnicas de Envolvente y peak-value resultan ser más útiles en la detección incipiente de fallas, que el análisis espectral normal.
[35]	Detector matemático de bandas laterales.	Generación de fallas en pista exterior de rodamientos.	Solo efectivo si la falla genera bandas laterales, como falla en la pista exterior y elementos rodantes.

[36]	FFT, SFFT, Espectros de Env	Generación de fallas en rodamientos, comparación de sensibilidad de parámetros.	SFFT y Espectros de Envolvente de Aceleración son más efectivos para detectar fallas en rodamientos. La interpretación espectral con ventaneo en el tiempo SFFT es muy útil mientras se tenga conocimientos de las frecuencias de resonancia del rodamiento, lo que permite una buena selección de las bandas del ventaneo para SFFT.
[37]	WT	Generación de fallas en rodamientos y medirlos durante variación de velocidad.	Las WT son efectivas para la identificación de fallas en rodamientos aun en mecanismos de velocidad variable.
[38]	Estadísticos de la señal, FFT, espectros de Env.	Generación de fallas en rodamientos.	El análisis de envolvente es el método que resulta más confiable y efectivo para capturar las características de falla.
[39]	Espectros de Env y Cepstrum.	Ensayo en un soplador industrial con rodamiento en falla comparándolo con otro con rodamiento sin falla.	El análisis de espectros de envolvente de aceleración muestra más claramente el defecto que los espectros en cepstrum

Técnicas como SFFT, WT, EA son efectivas si se conoce con exactitud las frecuencias de fallo y las frecuencias resonantes de modo que permitan ejecutar correctamente los procesamientos de la señal con los filtros y ventaneos indicados.

La técnica de envolvente de aceleración se ha establecido como punto de referencia para el diagnóstico de fallas en rodamientos [40], Se ha utilizado para el diagnóstico de fallas en las aplicaciones más difíciles como es el caso de las cajas de engranaje de helicópteros y se espera sea efectiva también para la maquinaria industrial [41]. Se decide utilizar y evaluar los espectros de envolvente de aceleración y los espectros de frecuencia de aceleración en la investigación.

4.3 Estudios que Permiten Fijar Alarmas con Valores Globales

Actualmente no hay asociada una norma ISO para la severidad de fallos en rodamientos como la norma ISO10816 -3 para problemas estructurales.

SKF Condition Monitoring en el año 2003 publica un artículo en el cual proporcionan una guía para la asignación de alarmas utilizando valores globales de Envolvente de aceleración. En esta investigación encuentran estadísticamente fórmulas para encontrar niveles de alarma y peligro utilizando bases de datos de mediciones en motores y bombas que giran a 3600 rpm. No se entregan detalles del trabajo estadístico. Esta carta es una recomendación general y siempre se recomienda fijar los niveles de severidad de acuerdo al análisis de una tendencia en el tiempo del nivel de vibración [11].

En [42] se realizan investigaciones donde se comparan valores globales de estadísticos en el dominio del tiempo (RMS, K) y espectrales WT, PSD.

Aunque el análisis de valores globales no permite identificar la fuente del defecto en la maquinaria, alertaría su presencia para la realización de estudios espectrales más rigurosos. El seguimiento de valores globales puede ser realizado más fácilmente y por personal inexperto lo que hace meritorio la investigación.

No se han encontrado estudios que comparen valores globales de envolvente en aceleración, HFD, con estadísticos en el dominio del tiempo como CF y K, es un aporte importante el estudio de estas tecnologías si se desea proponer un procedimiento de asignación de alarmas con estadísticos y valores globales.

5. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados se realizó el diseño de un experimento que permitió obtener los datos necesarios para evaluar y comparar los parámetros HFD, Env, RMS, CF, K, Ske. Después de realizar el experimento y obtener los datos, estos se analizaron con ayuda de herramientas estadísticas que permitieron concluir acerca de la respuesta de los parámetros al defecto.

Posteriormente se realizó un segundo experimento que contemplo 4 factores (tamaño de defecto, desbalanceo, desalineación y cantidad de lubricante), este experimento permitió estudiar el efecto de estos factores y sus interacciones en la firma vibracional del banco de pruebas.

El reto estadístico fue encontrar parámetros de medición de aceleración de vibración que fueran más sensibles a la falla en los rodamientos que a los cambios de condición como desalineación, desbalanceo, cambio en la cantidad de lubricante. Con estos parámetros se podrá proponer un procedimiento de asignación de alarmas tempranas que evite las falsas alarmas.

5.1 Diseño del Banco del Experimento.

Selección de la referencia del rodamiento: El rodamiento más usado en la industria es del tipo rígido de bolas, se seleccionó el rodamiento 6305 para realizar la experimentación.

Generación del defecto en los rodamientos: se realizó una perforación en la pista externa hasta el canal de rodadura, estas perforaciones se realizaron retirando un sello del rodamiento y utilizando la técnica de microperforado por electroerosión, vigilando de no dañar otros elementos del rodamiento en el proceso ver Figura 7.

La selección de la parte del rodamiento donde se generó el defecto tiene principalmente el motivo de que los rodamientos que fallan por fatiga y donde la pista que gira es la interior, la falla tiende a comenzar en la pista exterior, ya que hay un tramo de esta pista que está continuamente bajo la zona de carga. Es de esperar que al dañar otras partes

del rodamiento los resultados de la experimentación sean similares y solo cambie la frecuencia de interés.

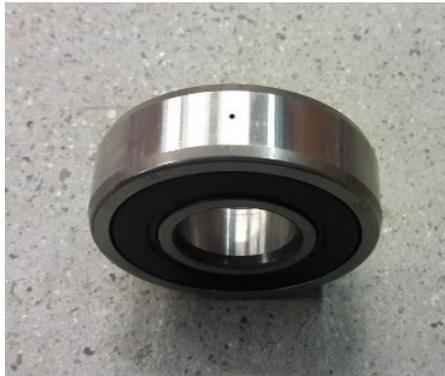


Figura 7. Microperforado por electroerosión para generar la falla en el rodamiento.

La detección de defectos en la pista exterior en el caso del banco de experimentación diseñado puede ser más difícil porque ese defecto no presenta bandas laterales en el espectro como lo hacen el defecto de la pista interior (o la pista que gira) y los elementos rodantes, por la modulación la energía vibracional es mayor y son más fáciles de detectar.

Detalles Constructivos del Banco de Experimentación.

El diseño mecánico del banco de experimentación debe permitir generar desalineación y desbalance en forma controlada manteniendo las mismas condiciones iniciales para cada prueba garantizando la repetitividad en las mediciones.

Los componentes del banco incluyen: la unidad donde se alojaría la unidad experimental, un apoyo adicional con dos rodamientos y un sistema de transmisión, ver Figura 8.

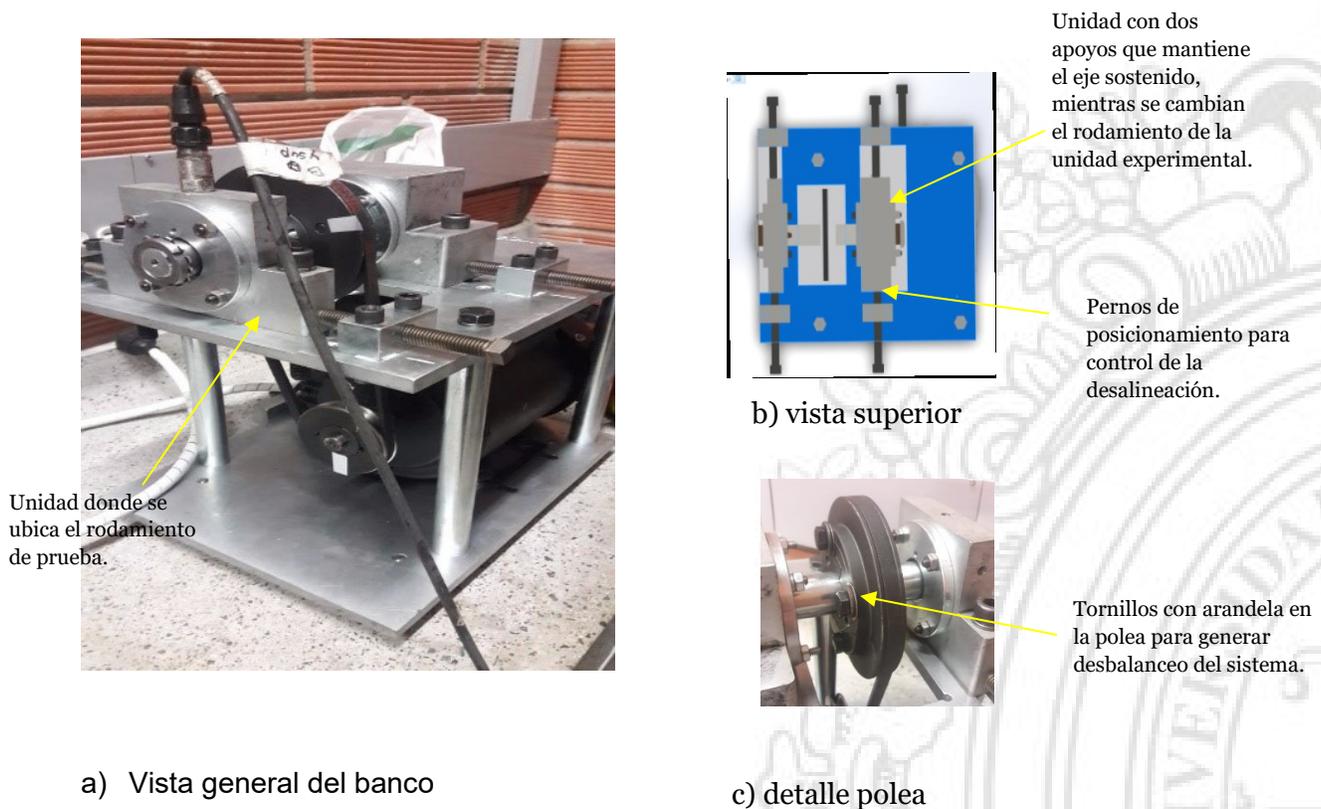
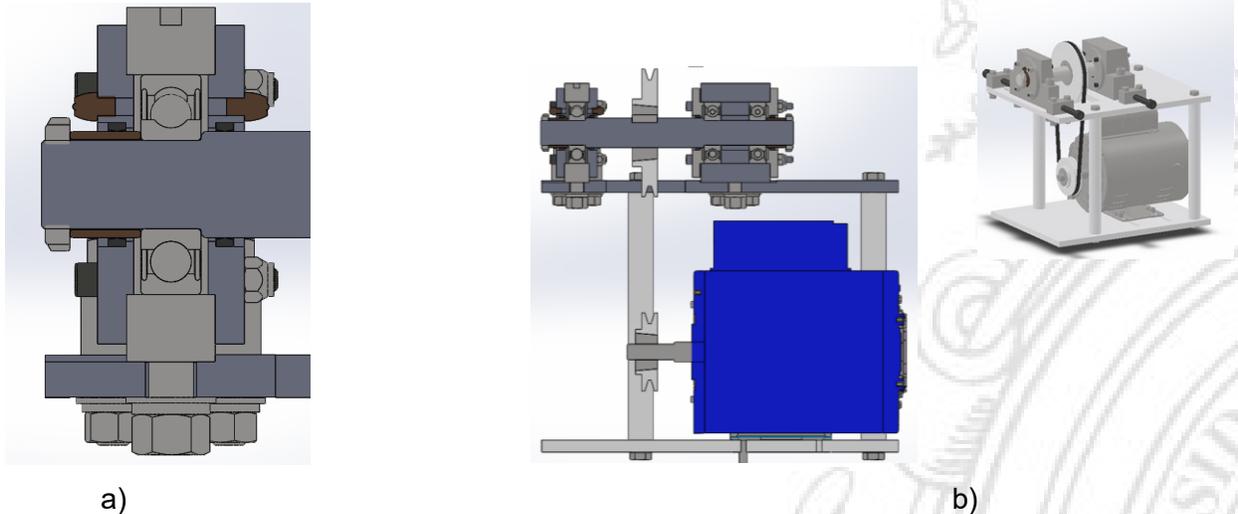


Figura 8. Imágenes del banco de experimentación.

Los ajustes del rodamiento con el eje y el alojamiento son deslizantes, la fijación de los aros de los rodamientos para que no deslicen se realiza de forma axial como se observa en la Figura 9. Detalles constructivos del banco., por medio de un resalte en el eje y buje con tuerca de fijación al eje.

Los alojamientos y el eje son en material 4140 para evitar desgaste de la pieza en los procesos de montaje y desmontaje.



a) Detalle chumacera donde se aloja el rodamiento de prueba, b) sección del banco de experimentación completo.

Figura 9. Detalles constructivos del banco.

La unidad doble, con dos rodamientos se diseña de forma que sostenga el eje y mantenga la tensión de la correa.

Se realizan perforaciones en la polea simétrica y se balancea después de realizada las perforaciones.

Sistema de Adquisición

Los equipos utilizados para adquirir la señal fueron una tarjeta de adquisición de datos National Instruments referencia NI 9234, en un chasis NI cDAQ-9172 y tres acelerómetros de propósito general de sensibilidad 100 mV/g. La interfaz de adquisición y el procesamiento de los datos se realizó en Python®. La calibración de los acelerómetros utilizados para la adquisición de datos

se realizó utilizando un shaker marca Hardy Instruments con una frecuencia de 100 Hz y una amplitud de 9.8 m/s² (valor RMS).

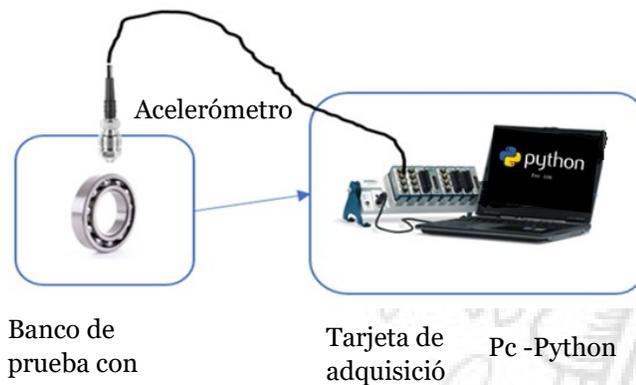


Figura 10. Esquema del sistema de adquisición de la señal.

Variables a Controlar para Repetitividad en las Mediciones:

En la Figura 9 se observa el banco de experimentación, para obtener repetitividad en las mediciones se deben controlar las siguientes variables:

- Apriete de uniones pernaadas
- Tensión en la correa
- Posicionamiento de pernos para control de desalineación.

En el diseño del banco se trata de mitigar la soltura tratando de hacer más rígido el sistema desde los sistemas de fijación y también con precisión en la manufactura de todas las piezas, las cuales se fabricarán en control numérico.

Para la desalineación de los soportes se maquinarán en la placa superior unos cuadrantes que posicionarán las chumaceras en el lugar de cero desalineaciones, estos cuadrantes serán maquinados y rectificados. Desde la posición cero se graduará la desalineación con los pernos posicionadores, la forma es desplazar el soporte con la unidad experimental es aflojando uno de los pernos una distancia axial medida con la ayuda de galgas de precisión, luego se desplazará el otro perno hasta ajustar el soporte del rodamiento contra el primer perno y el soporte quedará posicionado en la posición deseada.

El sistema de transmisión por correa puede incluir variación en la medida, será necesario medir la tensión de la correa para verificar que no varíe de una unidad experimental a otra, ya que la diferencia de carga puede afectar la respuesta a medir.

Se debe cuidar de poner el rodamiento en el banco con el defecto en la misma dirección de la zona de carga, para esto se marcará el soporte del rodamiento donde debe ir la parte que tiene la falla en la pista exterior.

5.2 Experimento de un Solo Factor para Estudiar la Sensibilidad de Parámetros al Defecto en el Rodamiento.

Se realizó un experimento para evaluar la sensibilidad de los parámetros bajo análisis (ENV, HFD, RMS, CF, K, Ske) al tamaño de defecto; se evaluaron rodamientos sin defecto, con un defecto de 0.5mm y de 1 mm en la pista exterior. En la Figura 11, se ilustran los procesamientos matemáticos realizados a la señal de aceleración para obtener estos parámetros.

En la tabla 5 se encuentran la correlación de Pearson con el tamaño de defecto obtenidas con los datos.

Se realizaron modelos lineales generalizados y test de rangos múltiples para discriminar entre las medias de los tamaños de defecto. Las gráficas de las medias con el intervalo LSD se observan en la figura 12.

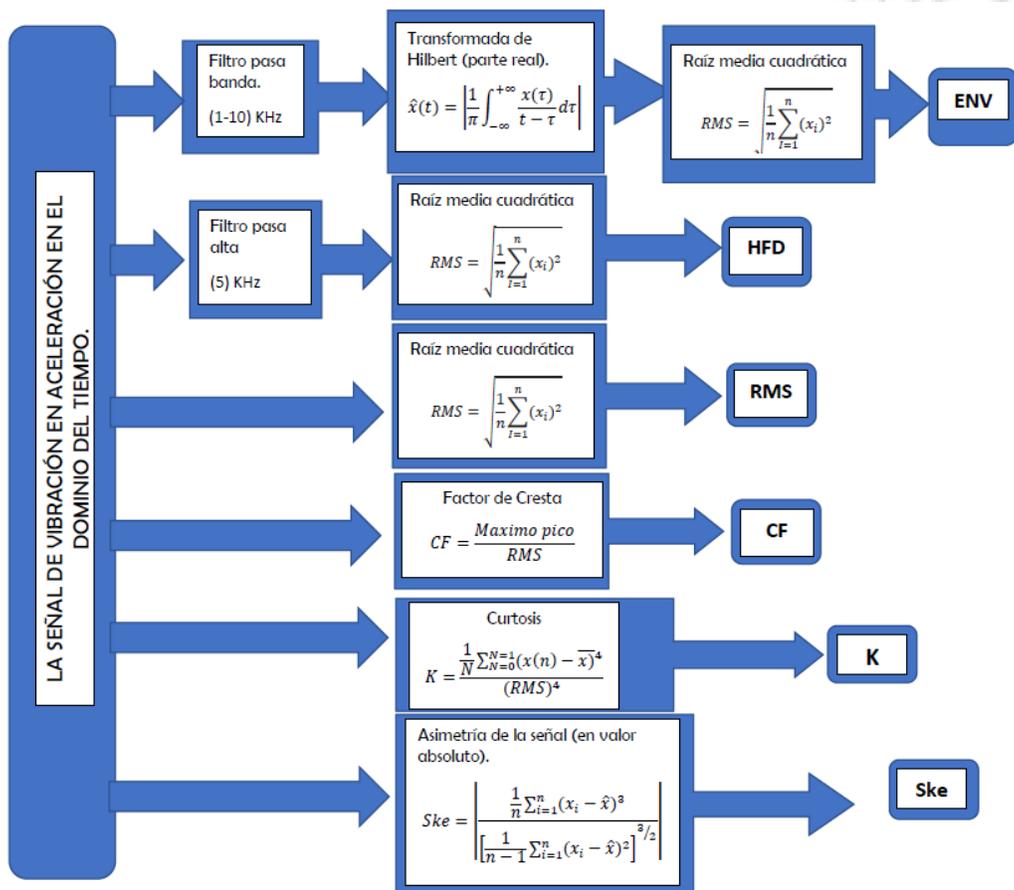


Figura 11. Procesamientos matemáticos sobre la señal para encontrar los valores globales para el análisis.

Tabla 4. Correlación de Pearson de cada uno de los parámetros con el tamaño de defecto.

	Env	Fc	HFD	K	RMS	Ske
Correlaciones momento producto de Pearson de las variables con el defecto.	0.7971	0.35	0.71	0.35	0.65	-0.72

En resumen, podemos concluir:

- Los parámetros Env, HFD, RMS, Ske están correlacionados con el tamaño del defecto, el más correlacionado es Env.
- Tamaños de defecto de 0 mm y 0.5 mm no fueron discriminados por los parámetros.
- No existe una diferencia estadísticamente significativa entre los tamaños de defecto para los valores obtenidos de los parámetros K, RMS y Fc.

Se decide que para el siguiente experimento se utilizaran los niveles (0 y 1 mm) ya que Env y Ske lograron discriminar estas dos medias.

Se podría pensar que un tamaño de defecto de 1mm es grande, pero es apenas discriminado por dos variables (Env, Ske). El banco diseñado se pensó para que las cargas a introducir en los sistemas sean por desalineación y desbalanceo, las únicas cargas en este primer ensayo son la tensión de la correa que es muy baja, la energía vibracional también es baja.

Si comparamos los valores de referencia propuestos por SKF para la envolvente de aceleración con los valores de envolvente de aceleración obtenidos, estos valores son considerados por SKF como satisfactorios (hasta 2.5 Gs o 0.25 m/s²)[11].

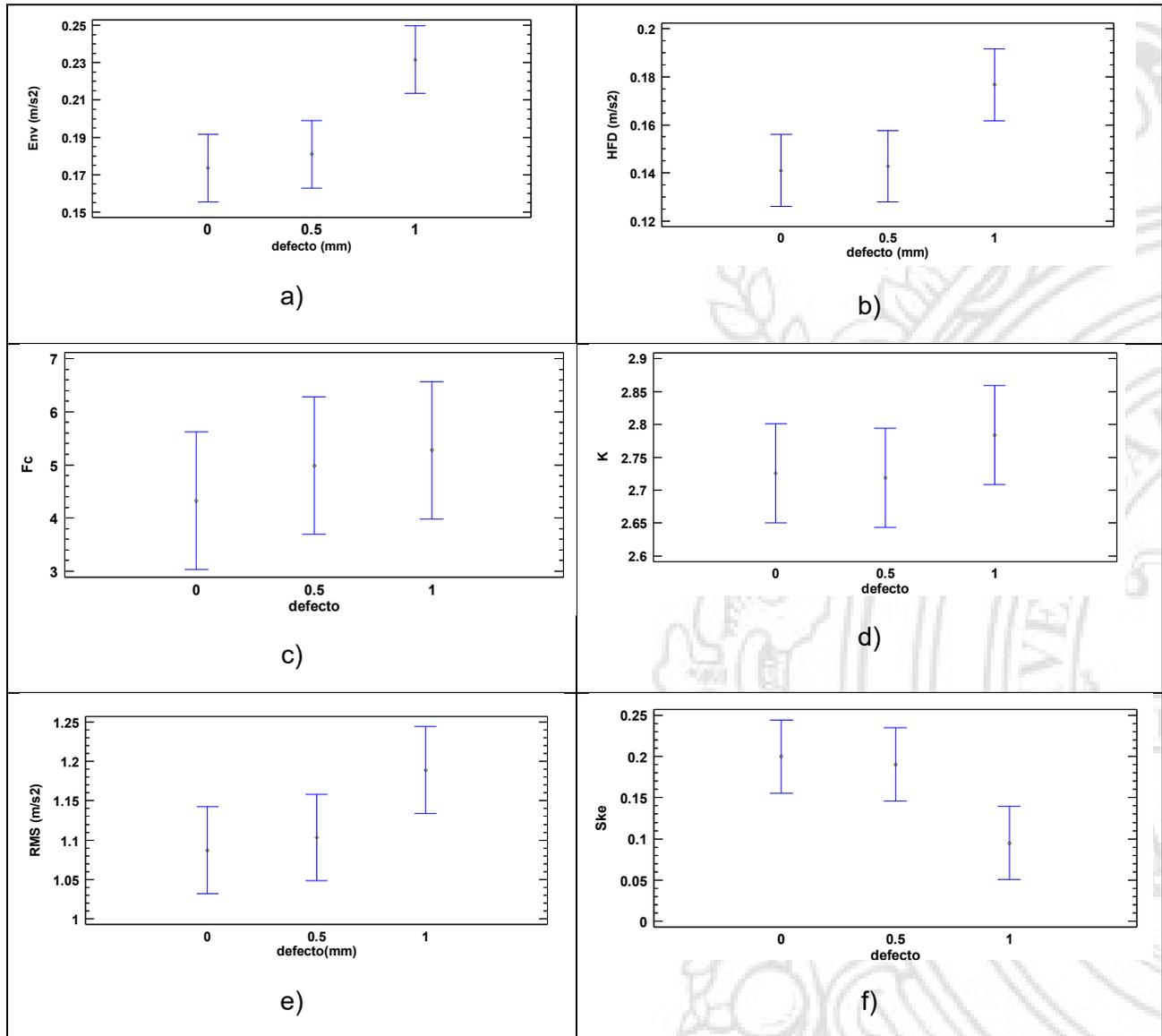


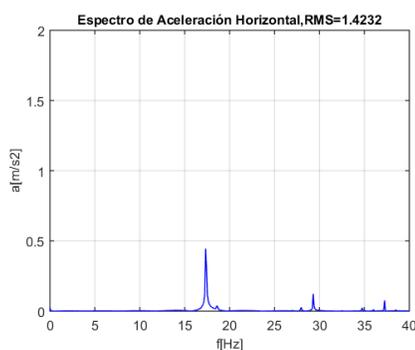
Figura 12. Grafica de medias con el intervalo LSD para los factores para los diferentes tamaños de defecto.

5.3. Experimento Multifactorial 2⁴ para Estudiar el Efecto de los Factores Desalineación, Desbalanceo, Falta de Lubricante y Defecto en el Rodamiento en los Parámetros Estudiados.

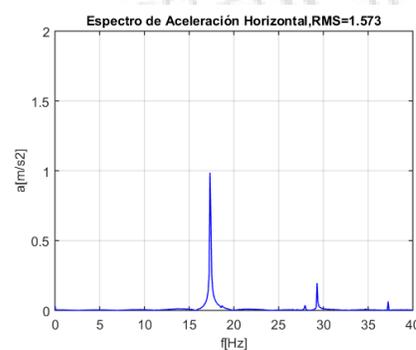
Se realizó un diseño multifactorial 2⁴, las variables respuesta fueron los diferentes parámetros de diagnóstico obtenidos de la onda de aceleración de la vibración Env, HFD, RMS, FC, K, Ske, los factores fueron presencia del defecto, desalineación, desbalanceo y cantidad de lubricante.

Para este experimento el tamaño de defecto en rodamiento se tomó de 1mm, debido a que en el primer experimento Env, HFD y Ske apenas logran tener una diferencia significativa entre las medias de rodamientos sin defecto y defectos de 1mm. Para los demás parámetros las medias para sin defecto y defectos de 1mm no son estadísticamente diferentes como se puede apreciar en la Figura 12.

El nivel de desbalanceo alto se eligió colocando peso en la polea de forma que en los espectros en dirección vertical se evidenciara un incremento en la frecuencia fundamenta 1X de más del doble, ver **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Figura 13, Para el nivel alto de la desalineación se desalinearon los soportes hasta incrementar la vibración global axial entre un 10 a 12%, ver Tabla 5.



a) (0,0,0)



b) (0,0,1)

Figura 13. Espectros tomados como ejemplo para indicar modificación del espectro al variar los niveles de desbalanceo a) nivel 0 y b) nivel 1.

Tabla 5. Niveles para los factores experimento 2⁴

Nivel	Defecto en el rodamiento	Niveles desbalanceo 1x Espectro horizontal	Nivel desalineación. Valor global RMS de la onda de aceleración en dirección axial	Nivel de Lubricación. gr de lubricante
0	Sin defecto	0.48 m/s ²	1.07 m/s ² , 0mm de desalineación entre apoyos.	2 g.
1	Defecto de 1mm en la pista exterior.	0.9 m/s ²	1.28 m/s ² , desalineación medida con galgas de 0.6mm entre soportes.	3 g.

La notación utilizada para el diseño es la siguiente (defecto, desalineación, desbalanceo, cantidad de lubricante) ejemplo:

(0,0,0,0), Respuesta para los cuatro factores en el nivel inferior

(0,0,1,1), Respuesta para defecto en el rodamiento y desalineación en el nivel inferior y desbalanceo y cantidad de lubricante en el nivel superior.

(1,1,1,1), Respuesta para los cuatro factores en el nivel superior.

Los datos del experimento pueden encontrarse en el anexo 2. En este anexo encontrara muchos más parámetros que serán introducidos en el análisis más adelante.

5.3.1 Efecto de los factores desalineación, desbalanceo y lubricación en las gráficas de espectros frecuenciales de la señal.

En la Figura 14 se observan un Zoom de los espectros de frecuencia de la señal de aceleración cercanos en la frecuencia del defecto (BPFO= 44.52) para diferentes condiciones de presencia de los factores.

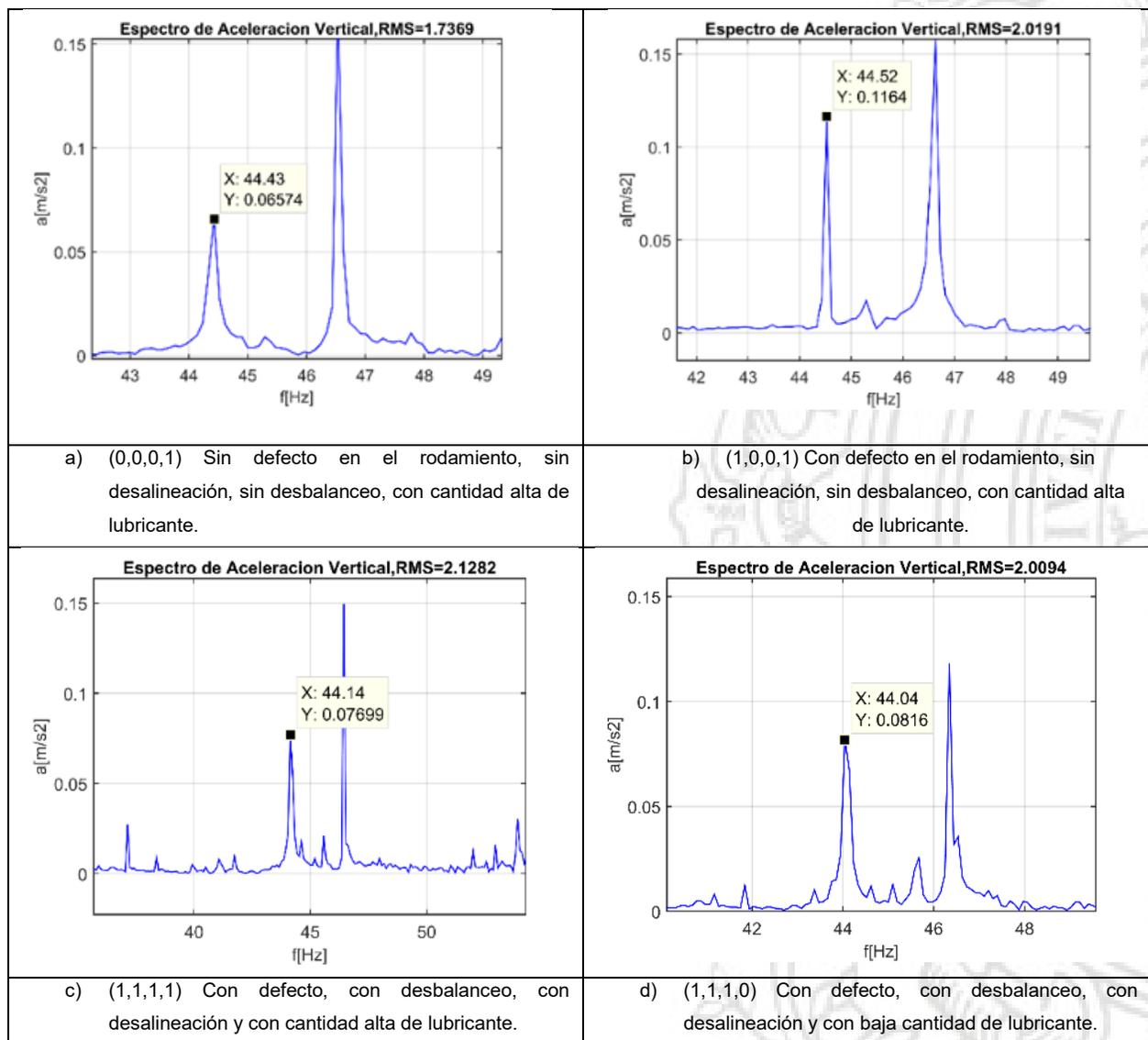


Figura 14. Espectros de frecuencia de la señal de aceleración para diferente interacción de factores (defecto, desalineación, desbalanceo, cantidad de lubricante).

El seguimiento de la existencia de una falla por la aparición de la frecuencia de falla en un espectro de frecuencia puede dificultarse por la presencia de frecuencias cercanas, en la Figura 14 a) se observa que hay un pico cerca a la frecuencia del defecto (44.43 Hz) que puede ser interpretado como si hubiera un defecto en la pista exterior cuando en realidad no lo hay, este pico puede ser una frecuencia natural del sistema. La resolución espectral definida por la frecuencia máxima y la frecuencia de muestreo puede hacer que un pico se monte sobre otro pico y genere esta confusión.

Al introducir el defecto en el rodamiento se observa un pico de un tamaño significativo con el cual podríamos llegar a diagnosticar la existencia del defecto ver Figura 14 b).

Al introducir desbalanceo y desalineación al sistema la altura del pico de la frecuencia de falla del rodamiento (BPFO) disminuye, la desalineación y el desbalanceo incrementan la carga del sistema y el valor global de la vibración aumenta en este caso de 2.0 a 2.12 ver Figura 14 b) y c).

El desbalanceo y la desalineación modifican el ángulo de contacto entre las pistas y los elementos rodantes causando un cambio en la frecuencia de falla del defecto, el seguimiento de una sola frecuencia de falla puede dificultarse en el diagnóstico temprano de defectos en rodamientos más aún si existe la interacción de otras condiciones anómalas como la desalineación, el desbalanceo y cambios en la cantidad del lubricante.

La desalineación puede disminuir las holguras del rodamiento y generar la disminución de los picos de las frecuencias de falla de los elementos, el diagnóstico de la severidad de falla por el incremento de un pico en la frecuencia de falla puede dificultarse por la interacción de otras condiciones anómalas.

5.3.2 Efecto de los factores desalineación, desbalanceo y lubricación en las gráficas de espectros frecuenciales de envolvente de aceleración de la señal.

En la Figura 14 Figura 15 se observan un Zoom de los espectros de frecuencia de envolvente de la señal de aceleración entre 0 y 200 Hz para diferentes condiciones de presencia de los factores. La introducción del rodamiento defectuoso al sistema causa una evidente manifestación espectral de la envolvente de aceleración ver en la figura 15 b), sin embargo, en las figuras 15 b), c) y d) puede observarse el cambio espectral sufrido por la interacción de los factores los cuales también mitigan el efecto del defecto en él espectro.

5.3.3 Efecto de los factores defecto del rodamiento, desalineación, desbalanceo y cantidad de lubricación en las gráficas de espectros de frecuencia para el zoom de alta frecuencia hfd de la señal de aceleración.

En la Figura 14
Figura 16 se observan los espectros de frecuencia de la señal de aceleración en el ZOOM de alta frecuencia utilizado para el parámetro HFD.

El espectro en HFD muestra un aumento en todos los picos al introducir el defecto, el desbalanceo y la desalineación
Figura 16 a), b) y c).

En nuestro Banco de vibraciones el disminuir cantidad de lubricante al sistema mitiga la vibración en general, Esto podría explicarse por qué estamos en el límite donde la cantidad de lubricante es suficiente para conseguir una lubricación del tipo elastohidrodinamica donde la fricción es inferior que con un poco más de lubricante donde el sistema estaría bajo el régimen de lubricación hidrodinámica donde la fricción fluida es mayor.

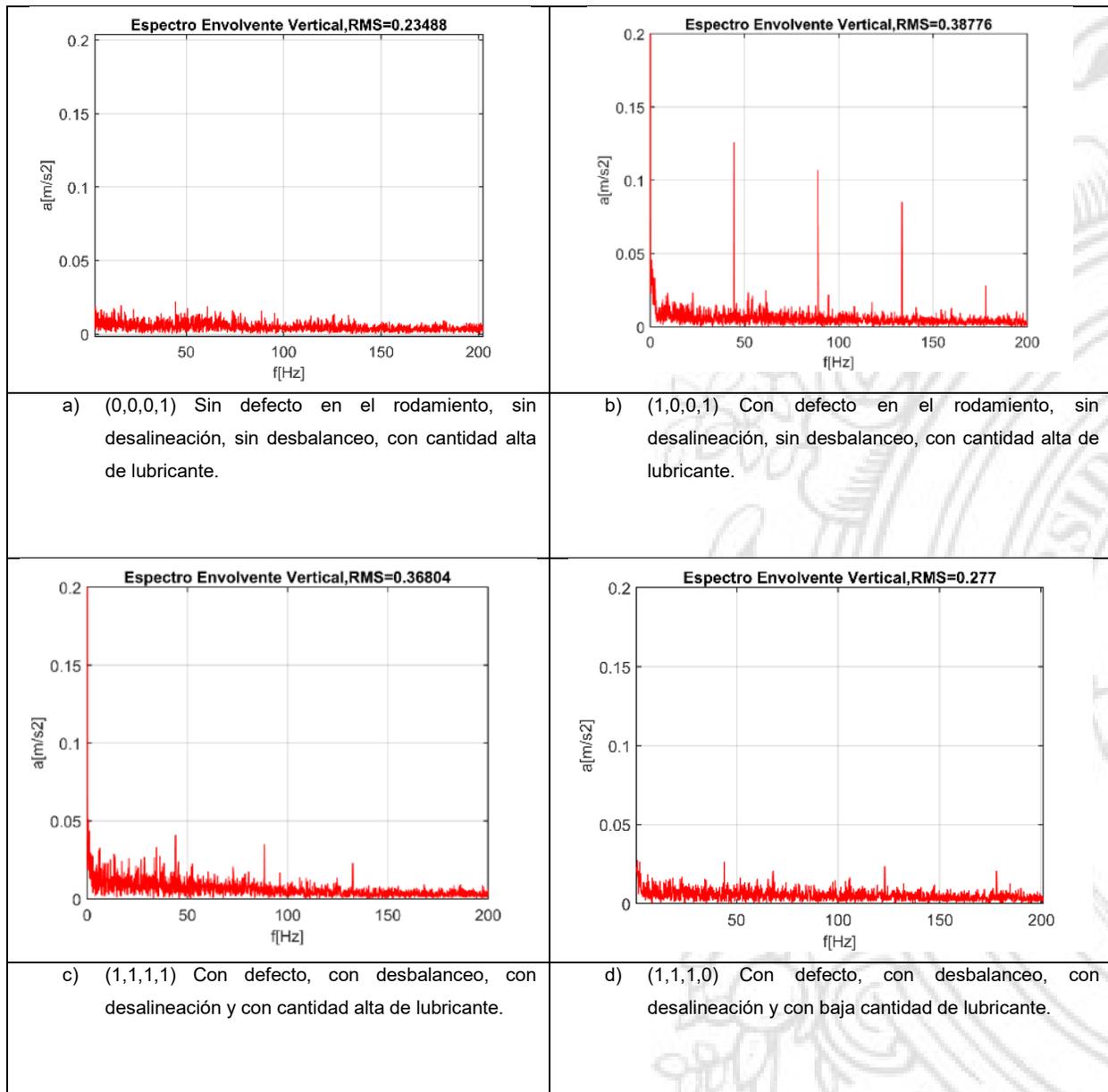


Figura 15. Espectros de frecuencia la envolvente de la señal de aceleración para diferente interacción de factores (defecto, desalineación, desbalanceo, cantidad de lubricante).

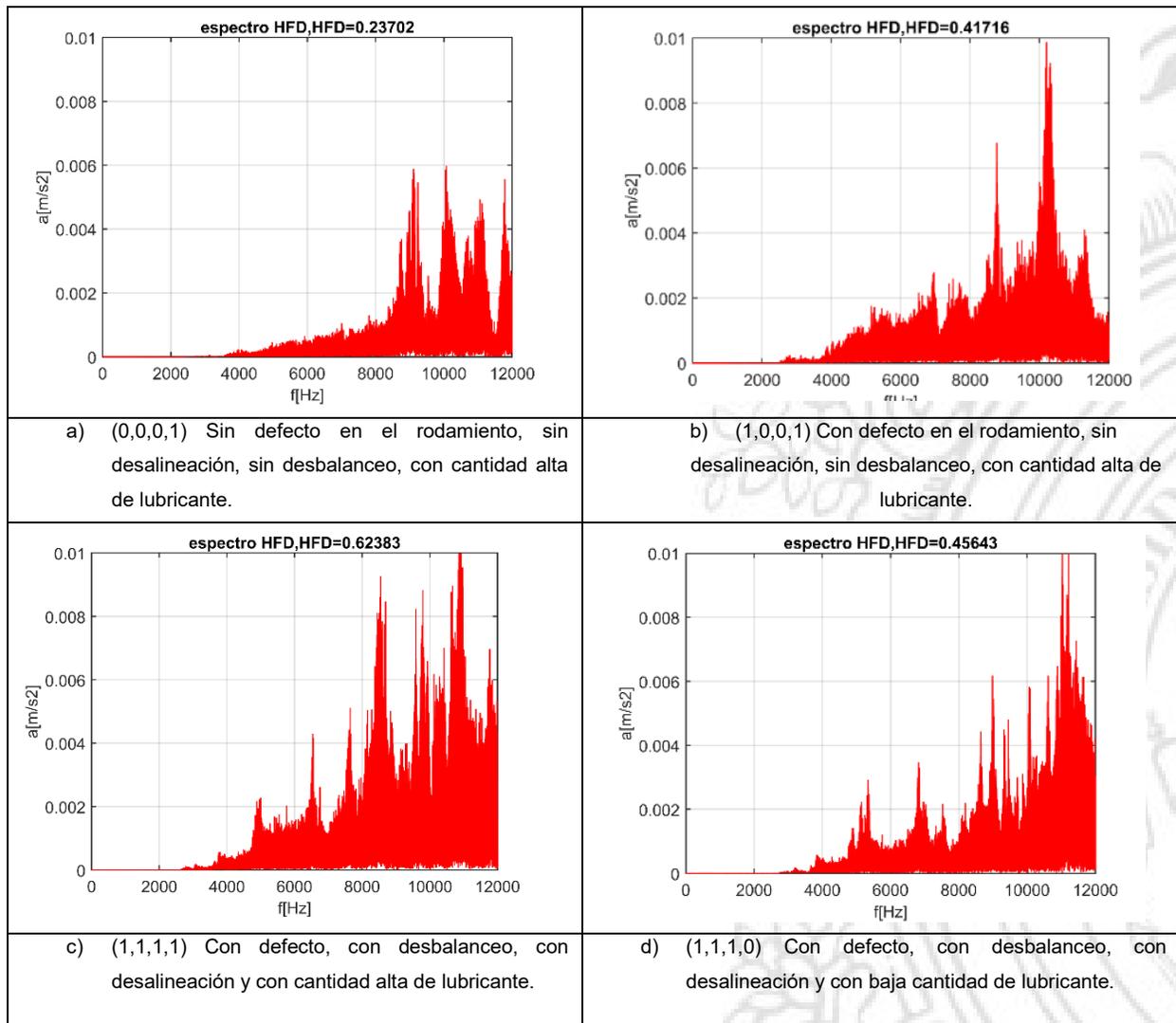
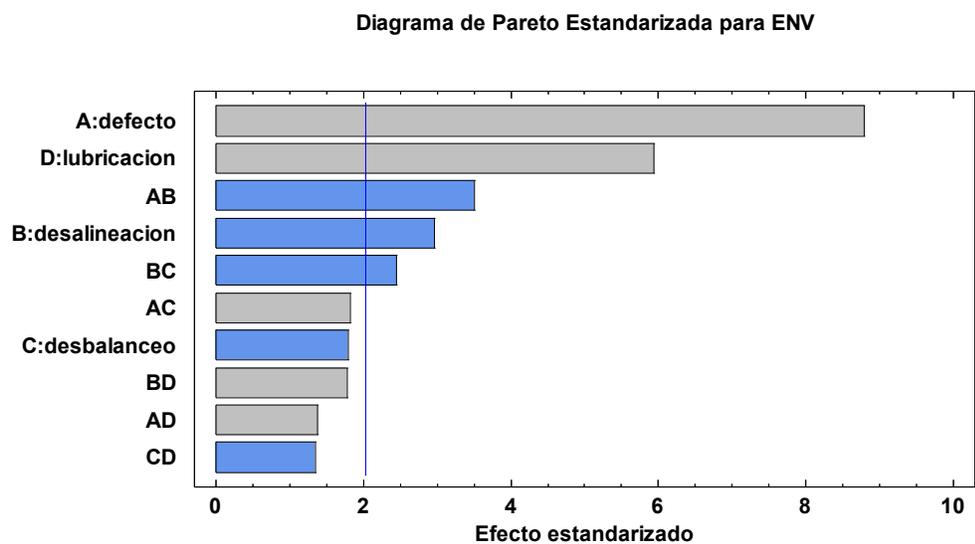


Figura 16. Espectros de frecuencia de la señal de aceleración en el Zoom de alta frecuencia HFD para diferente interacción de factores (defecto, desalineación, desbalanceo, cantidad de lubricante).

5.3.4 Análisis de los parámetros globales de diagnóstico

En la Figura 17 se observa el diagrama Pareto obtenidos de los efectos estandarizados de los factores sobre el parámetro ENV. La línea azul hace referencia a la significancia estadística del efecto, cuando la barra que simboliza el efecto del factor la cruza puede decirse que existe una significancia estadística del efecto.



R-cuadrada = 80.53%

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 75.27%

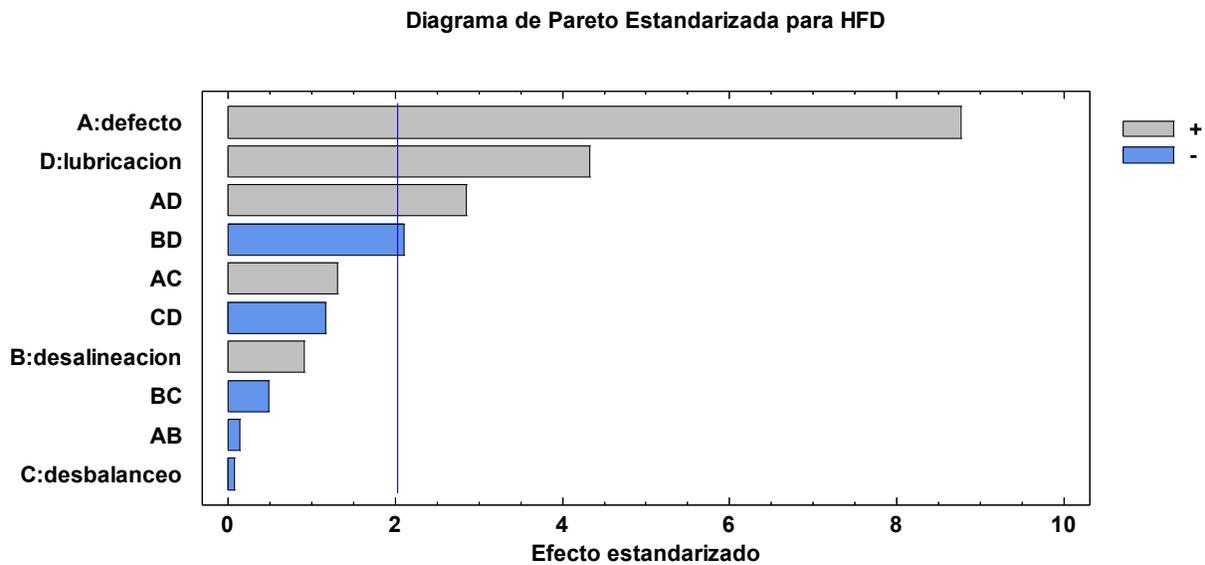
Figura 17. Diagrama Pareto de efecto estandarizado de los factores sobre el parámetro envolvente de aceleración.

El parámetro envolvente es afectado más por el defecto en el rodamiento, pero la interacción del desbalanceo y la desalineación es negativa lo que puede generar encubrimiento del defecto.

El efecto estandarizado de la lubricación es alto lo que podría generar falsas alarmas.

En la Figura 18 se encuentra el diagrama de Pareto estandarizado para el parámetro HFD donde se puede ver que es afectado principalmente por el defecto, la lubricación y la interacción

de ambos. Sin embargo, el efecto de estandarizado de la lubricación es mucho más bajo que para el parámetro ENV.



R-cuadrada = 75.21%

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 68.51%

Figura 18. Diagrama Pareto estandarizado de los efectos para el parámetro HFD.

Los parámetros K, Fc, Ske, RMS son afectados estadísticamente por más de tres factores y sus interacciones como se puede observar en la Figura 19.

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES MECÁNICAS

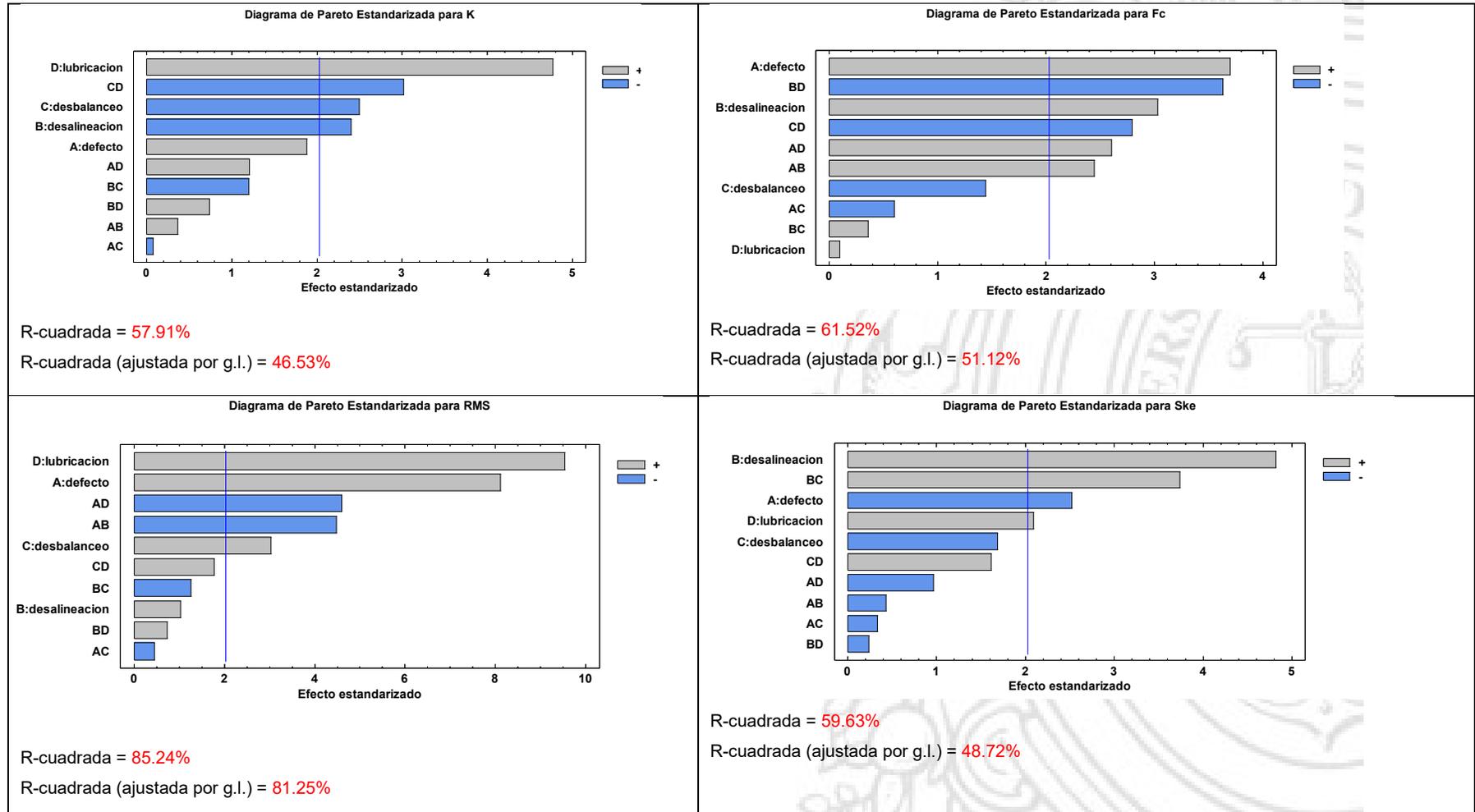


Figura 19. Diagrama Pareto estandarizado de efectos para los parámetros K, FC, RMS, Ske.

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES MECÁNICAS

Sobre el estudio de parámetros globales, podemos afirmar lo siguiente:

- Parámetros globales como RMS, Ske, K son afectados por los factores como desbalanceo y desalineación con más efecto que el defecto en el rodamiento.
- El Factor de cresta se ve afectado principalmente casi en la misma proporción por el defecto que por las interacciones de la desalineación y la lubricación.
- La lubricación es el factor que más afecta la K.
- El parámetro HFD es estadísticamente más significativa la afectación del defecto en el rodamiento que la afectación que puede hacer el desbalanceo y la desalineación, La lubricación lo afecta en menor proporción que a los demás parámetros.
- El cambio en la cantidad de lubricante afecta todos los parámetros globales de aceleración de manera significativa.

6. DISCUSIÓN

Seguimientos de nuevos parámetros.

Teniendo en cuenta el análisis espectral realizado a la envolvente de la aceleración se decidió obtener nuevas variables respuesta aplicando un filtro a la envolvente de aceleración cerca de la frecuencia de falla. En este caso, como la frecuencia de falla es $BPFO = 44.52$, se escogió el filtro pasa banda entre 43 y 45 Hz que se llamó (band2). En la Figura 20 se especifica cómo se obtuvieron las nuevas variables.

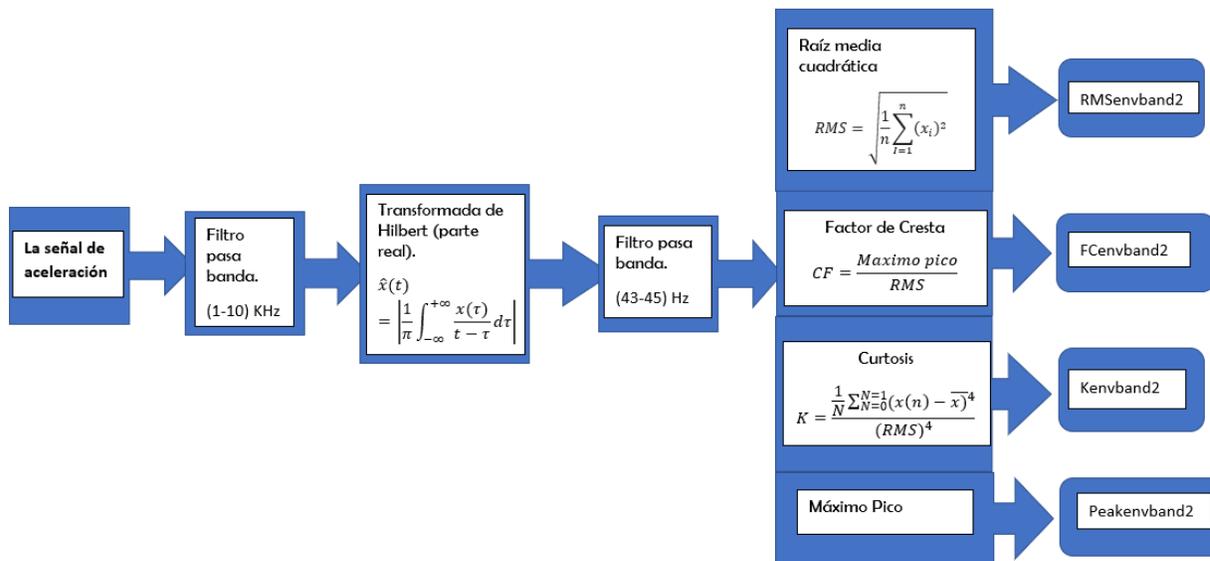


Figura 20. Proceso matemático para obtener las nuevas variables respuesta.

En la figura 21 se observa los diagramas Pareto estandarizado de los factores para cada uno de estos nuevos parámetros.

Es importante resaltar el efecto estandarizado que tiene el defecto sobre la variable **RMSenvband2**, es más alto que cualquier otra variable dentro de este estudio.

De poderse retirar el efecto de la lubricación encontraríamos que sobre el parámetro **peackenvband 2** solo es estadísticamente significativo el efecto del defecto.

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES MECÁNICAS

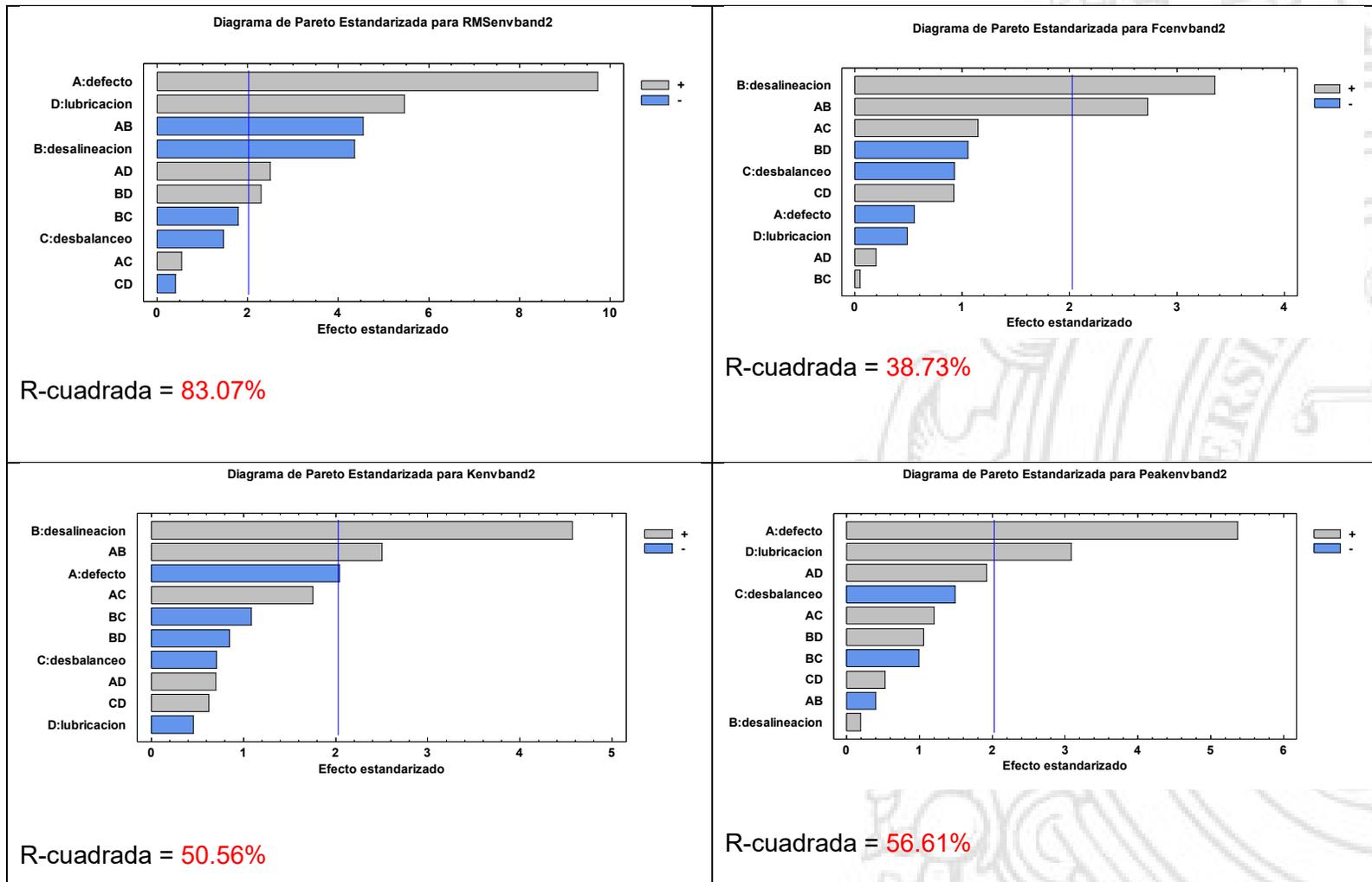


Figura 21. Diagramas de Pareto estandarizado para RMSenvband2, PeaKenvband2, Fcenvband2, Kenvband2.

6.1 Regresión Logística para Defecto

Las regresiones logísticas nos permiten predecir una variable respuesta categórica en función de unas variables continuas independientes (variables explicativas), en nuestro caso podemos analizar la probabilidad de que exista el defecto (0,1) en función de las variables continuas independientes (RMS, Env, HFD, Ske, K, Fc, RMSenvband2, FCenvband 2, Kenvban2, Peackenvband2).

Se realizaron múltiples funciones logísticas contemplando combinaciones de entre 3 y 4 parámetros predictores y se encontró una función que explica el 99.9 % de la variabilidad de los datos, ver *Ecuación 5*.

$$defecto = \frac{\exp(\eta)}{1 + \exp(\eta)}$$

en donde:

$$\eta = 56.188 - 81.9539 * K + 1927.44 * RMSenvband2 + 265.946 * HFD$$

Ecuación 5. Ecuación del modelo ajustado con una regresión logística.

Del análisis anterior se encuentra que los mejores predictores para la falla del rodamiento en este ensayo donde se varía desalineación, desbalanceo y cantidad de lubricante es **K**, **Rmsenvband2**, **HFD**.

Podría conocerse en este sistema la probabilidad de que el rodamiento este malo o bueno conociendo los valores de **K**, **Rmsenvban2** y **HFD**.

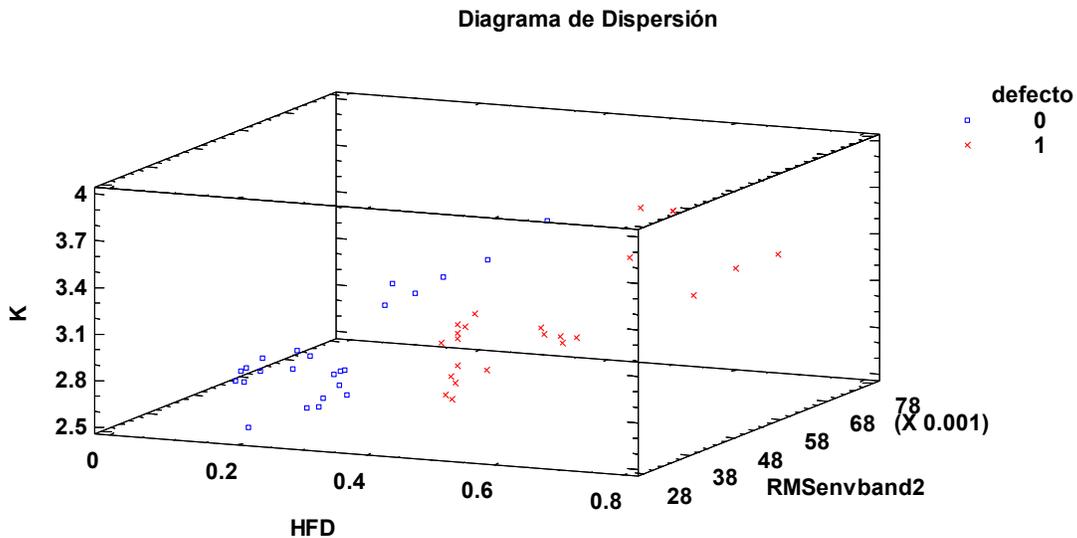
Analizando los coeficientes de la ecuación nos damos cuenta que el parámetro más importante es RMSenvband2, si utilizamos los valores promedio para la K=2.98 y HFD= 0.373, el punto de inflexión donde la función de probabilidad toma un valor de

50% es cuando el valor de RMSenvband2 es de 0.046 m/s^2 esta sería la alarma del sistema.

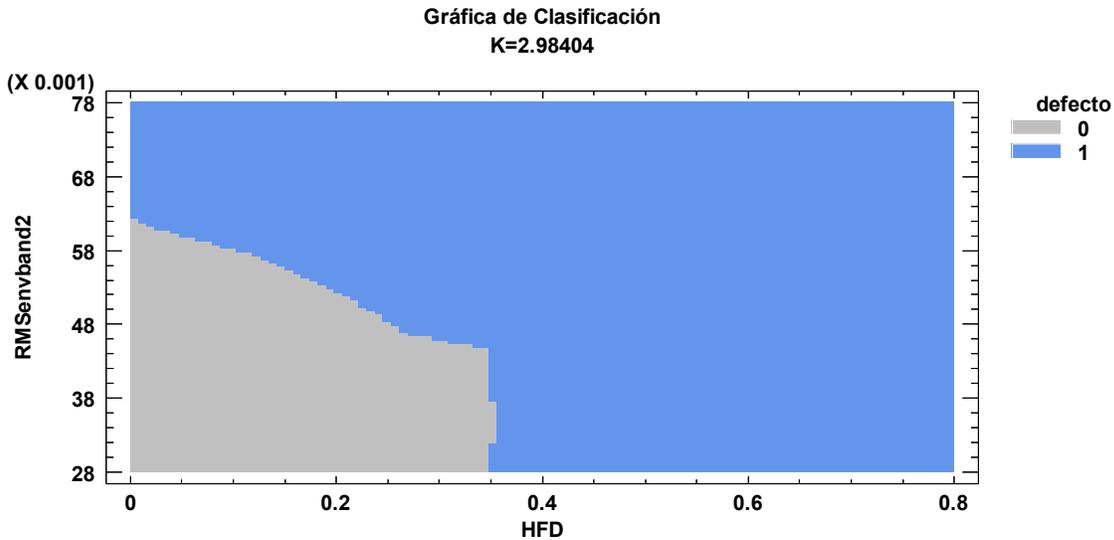
La K es un parámetro que es muy sensible a los cambios de lubricación y a la desalineación, en nuestro sistema el defecto no afecta los valores de K de forma significativa pero la lubricación y la desalineación sí.

La K es elemento que evita una falsa alarma, si se aumentan solo RMSenvband2 y HFD, seguramente es una falla de rodamientos, pero si la curtosis aumenta por encima de 3.4 se deben descartar problemas de lubricación, desbalanceo y desalineación.

En la figura 22 se observa el diagrama de dispersión de los datos en las variables (HFD, RMSenvband2, K) y la gráfica de clasificación obtenida manteniendo la K en un valor de 2.984.



a)



b)

Figura 22. a) Diagrama de dispersión de los datos para los niveles de defecto en el rodamiento en las variables RMSenvband2, HFD, K. b) grafica de clasificación obtenida manteniendo la K en un valor de 2.984.

6.2 Parámetros de diagnóstico para identificar las demás anomalías introducidas en el banco.

En el experimento se introducen 4 tipos diferentes de anomalías, defecto en el rodamiento, desalineación, desbalanceo y cambio en la cantidad de lubricante. Hemos encontrado unas variables que nos permiten identificar y clasificar el problema en el rodamiento. Sería interesante poder identificar valores globales para el diagnóstico de desbalanceo, desalineación y cambios en la cantidad de lubricante.

Es sabido las anomalías de desbalanceo y desalineación en el análisis espectral se caracterizan por incremento de los picos correspondientes a la frecuencia fundamental para desbalanceo y 2 y 3 veces la frecuencia fundamental para desalineación. Se introduce en

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES
MECÁNICAS

el análisis otros parámetros de diagnóstico como son RMS, valor pico y factor de cresta de la señal en filtros pasa banda cerca a la frecuencia fundamental y a 2 y 3 veces esta. En la Tabla 7 se describen los parámetros globales de diagnóstico que se plantean para las anomalías desalineación, desbalanceo y cambio en la lubricación.

Tabla 6. Parámetros globales propuesto para diagnóstico de desbalanceo y desalineación y cambio en la cantidad de lubricante.

Defecto	Procesamiento matemático		Nombre del parámetro	Correlación de Pearson con el Defecto
Desbalanceo	<i>señal</i>	<i>Filtro pasabanda entre 0.8-1.5 FF</i>	<i>RMS</i>	RMSBanddesb 0.9029
			<i>Factor de cresta</i>	FCb1banddesb 0.83
Desalineación	<i>señal</i>	<i>Filtro pasabanda 1.8 -3.2 FF</i>	<i>Pico</i>	Peakbanddesa 0.7948
			<i>Factor de cresta</i>	FCb1banddesa 0.77
Lubricación	<i>señal</i>		<i>curtosis</i>	K 0.5
			<i>RMS de la señal</i>	RMS 0.6

Se analizaron las correlaciones de las anomalías desbalanceo, desalineación, lubricación con los parámetros, estas correlaciones se presentan en la Tabla 7.

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES MECÁNICAS

En la tabla 7 se resumen los parámetros que se han contemplado hasta ahora para detectar defecto en el rodamiento y anomalías como desalineación, desbalanceo y cambio en la cantidad de lubricante.

Tabla 7. Parámetros introducidos al análisis.

Detección de problemas en rodamientos	
parámetros	Descripción
FC	Factor de cresta de la señal
K	curtosis de la señal
RMS	valor RMS de la señal
Env	RMS de la envolvente de aceleración de la señal filtrada (1-10) KHz
HFD	RMS de la señal filtro pasa alta 5Khz
SKE	Asimetría de la señal
Rmsenvband2	Valor de la envolvente de la señal en el filtro (43-45) Hz
Peakenvband2	Valor pico máximo de la envolvente de la señal en el filtro (43-45) Hz
FCenvband2	Factor de cresta de la envolvente de la señal en el filtro (43-45) Hz
Kenband2	curtosis de la envolvente de la señal en el filtro pasa banda (43-45) Hz
Detección problemas en desbalanceo	
RMSb1banddesb	RMS de la señal en el filtro (0.8-1.5) la frecuencia de giro
Peakb1banddesb	valor del pico máximo de la señal en el filtro (0.8-1.5) la frecuencia de giro
FCb1banddesb	factor de cresta de la señal en el filtro (0.8-1.5) la frecuencia de giro
Detección problemas en desalineación	
RMSb1banddesaline	valor RMS de la señal en el filtro (1.0-3.2) la frecuencia fundamental
Peakb1banddesaline	valor del pico máximo de la señal en el filtro (1.0-3.2) la frecuencia fundamental
FCb1banddesa	valor del pico máximo de la señal en el filtro (1.0-3.2) la frecuencia fundamental
Detección de problemas en lubricación	
K	curtosis de la señal
RMS	valor RMS de la señal

En la figura 23 se muestran los diagramas de dispersión para desalineación, desbalanceo y cambio en el lubricante en las variables seleccionadas para su detección.

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES MECÁNICAS

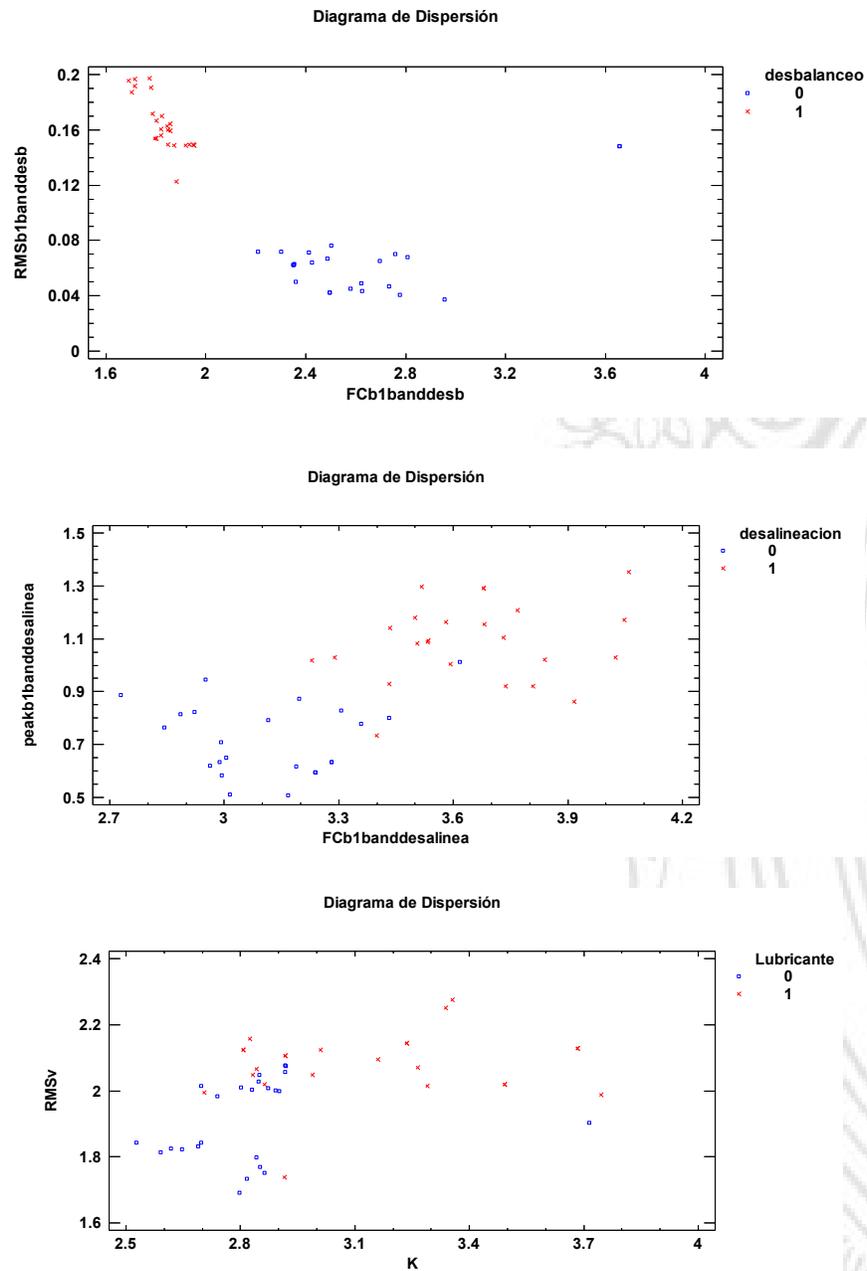


Figura 23. Diagramas de dispersión para anomalías de desbalanceo, desalineación y cambios de cantidad de lubricante.

6.3 Funciones Discriminantes para la Identificación de las Anomalías.

Se realizó el procedimiento de Fisher de análisis de discriminante para encontrar funciones que realicen predicción de la existencia o no de las anomalías con base en los valores de las variables cuantitativas, para defecto en rodamiento se tomaron las variables (K, HFD, RMSenvband2), para desbalanceo (RMSb1banddesb, Fcb1banddesb), para desalineación (Fc b1banddesalineas, peakb1banddesalineas) y para lubricación (RMS,K).

Este modelo de predicción de una variable respuesta categórica a partir de variables explicativas generalmente continuas entrega funciones discriminantes, que son combinaciones lineales de las variables independientes que mejor discriminan o separan los grupos. Las funciones discriminantes encontradas son iguales al número de grupos a clasificar y para la función donde se encuentre la mayor puntuación nos indica el grupo para el cual pertenece la observación, el método se describe en la referencia [43].

Para todos los casos se encontraron funciones de clasificación con un valor-P menor que 0.05 lo que significa que son estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95.0%.

Ecuaciones de discriminación para el defecto en el rodamiento:

Para el defecto en el rodamiento las funciones encontradas clasifican el **100%** de las observaciones.

Los coeficientes de la función clasificación para defecto se encuentran en la Tabla 8.

Tabla 8. Coeficientes de la Función de Clasificación para defecto.

	0	1
HFD	-91.9884	-55.4187
K	59.3263	46.0343
RMSenvband2	-267.151	35.4594
CONSTANTE	-70.2835	-58.2506

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES MECÁNICAS

Utilizando el mismo procedimiento se encontraron funciones discriminantes para las demás anomalías desbalanceo, desalineación y falta de lubricante, en todos los casos el nivel de confianza es del 95%.

Ecuaciones de discriminación para desbalanceo:

Para desbalanceo el método logro clasificar el **100%** de los casos.

Tabla 9. Coeficientes de la Función de Clasificación para desbalanceo.

	0	1
FCb1banddesb	41.0632	17.6949
RMSb1banddesb	-96.8499	191.499
CONSTANTE	-51.3928	-32.6203

Ecuaciones de discriminación para desalineación:

Para desalineación el método logro clasificar el 95.83% de los casos

Tabla 10. Coeficientes de la Función de Clasificación para desalineación.

	0	1
FCb1banddesaline	63.7726	73.3412
peakb1banddesaline	21.0717	36.8303
CONSTANTE	-107.816	-154.407

Ecuaciones de discriminación para cambio en la cantidad de lubricante:

Tabla 11. Coeficientes de la Función de Clasificación para Lubricante.

	0	1
K	28.388	31.8102
RMSv	137.54	149.181
CONSTANTE	-172.389	-205.845

Para desalineación el método logró clasificar el **83.33%** de los casos

En el anexo 3, se encuentra la tabla de clasificación para cada una de las anomalías donde se puede encontrar los valores entregados por las ecuaciones, el grupo actual y el grupo para el cual se encontró el valor más alto en las ecuaciones de discriminación.

7. PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO DE ASIGNACIÓN DE ALARMAS TEMPRANAS PARA FALLAS EN RODAMIENTOS.

Después de la experimentación realizada y los análisis de los datos se plantea el seguimiento de los parámetros: **HFD, RMSenvband2, K** para asegurar la existencia de una falla en rodamientos. Los parámetros globales; **RMSbanddesb, Peakbanddesa, RMS y K** se les realiza seguimiento para diagnosticar en forma cruzada otras anomalías.

Para el procedimiento de asignación de alarmas tempranas es necesario conocer la referencia de los rodamientos y la velocidad de giro para estimar las frecuencias de los defectos de los rodamientos y realizar los filtramientos adecuados para obtener los valores de **RMSenvband2** alrededor de cada frecuencia de fallo. BPFO, BPFI y BSF.

- Conocer la velocidad de giro para poder realizar los filtramientos y obtener los valores de las frecuencias de filtrado para los parámetros **RMSbanddesb** y **Peakbanddesa**.
- Establecer una línea base del sistema con los valores promedio de la maquinaria en buen estado, para el caso del banco de experimentación serían los valores de los parámetros en las observaciones (0,0,0,0)
- Establecer los valores de alarma, el cual se propone empezar siguiendo la ley empírica de control de procesos el cual sería el valor del promedio más 3 veces la desviación estándar.

En el banco de experimentación podemos tomar el promedio de los parámetros de alarma en los rodamientos las pruebas hechas con rodamientos en buen estado, sin desalineación, ni desbalanceo en una cantidad de lubricante, ver tabla 12.

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES MECÁNICAS

Tabla 12. Línea base para alarmas de diagnóstico para el banco de ensayos de rodamientos.

Nombre variable	Valor normal	Valor de alarma
RMSbandesb	0.06	0.11
Peakbanddesa	0.6	0.82
RMSenvband2	0.037	0.055
K	2.8	2.9
HFD	0.17	0.18

Diagnóstico falla de rodamiento en el sistema:

Si HFD traspasa el valor de alarma y la curtosis está por debajo de 3 y RMSenvband2 está por encima del valor de alarma, se puede estar seguro de que hay una falla de rodamiento. Esto se cumple para los datos del experimento evaluado

Si la curtosis está por encima de 3 y los valores de HFD y RMSenvband2 están en alerta es posible que deba verificarse la presencia de desbalanceo, desalineación y cambios en la cantidad del lubricante antes de dar una alerta.

8. CONCLUSIONES

El diagnóstico y seguimiento de una falla incipiente por el monitoreo del pico de la frecuencia de falla del rodamiento en el espectro frecuencial de aceleración puede ser inexacta, en la experimentación realizada se evidenció que el desbalanceo, la desalineación y el cambio en la cantidad de lubricante modifican estos picos no solo en tamaño sino también en posición. La razón es que cualquier alteración en la operación modifica las cargas y las deformaciones en la zona de contacto del rodamiento (variación del ángulo contacto) modificando un poco la frecuencia de falla del rodamiento.

El seguimiento de bandas espectrales de envolvente de aceleración resulta más conveniente para el análisis de fallas en rodamientos que el seguimiento de picos frecuenciales en los espectros de aceleración como puede evidenciarse en la Figura 14 y Figura 15, el pico de la frecuencia BPFO es mitigado en los espectros de aceleración con la interacción de otros problemas de condición como desalineación, desbalanceo y lubricación; En los espectros de envolvente aunque también se mitiga se siguen evidenciando picos en las bandas espectrales cerca al defecto.

El espectro de aceleración en zona de alta frecuencia HFD aumenta al introducir desalineación y desbalanceo, el seguimiento de valores globales en esta zona siempre será una alarma de anomalías, sin embargo, HFD es más estable que ENV a cambios de lubricación desalineación y desbalanceo se sugiere utilizar este parámetro en mecanismos susceptibles a desalineación y desbalanceo para detectar fallas en rodamientos.

Al variar solo el defecto en el rodamiento el parámetro más correlacionado y más sensible es ENV, pero al introducir las demás anomalías la afectación sobre este parámetro es mucho mayor.

RMSenvband2 es el parámetro para el cual el efecto estandarizado del defecto (9.8) es mayor que para los demás parámetros estudiados.

Picoenvband2 es un parámetro para el cual es estadísticamente significativo la lubricación y el defecto del rodamiento, si retiramos la influencia de la lubricación solo afecta el defecto en el rodamiento.

Se encontró una regresión logística n que clasifica el 100% de los rodamientos con defecto, en esta ecuación intervienen las variables **K**, **HFD**, **RMSenvband2**.

Se encontraron ecuaciones discriminantes con las cuales se pueden clasificar el 100% de los rodamientos en falla, 100% de los casos que sufren desbalanceo, el 95% de los casos donde hay presencia de desalineación y el 80% de los casos donde hay cambios en la cantidad de lubricante en el sistema estudiado. Estas ecuaciones ayudan no solo a explicar el efecto de las anomalías sobre los parámetros, sino que ayudan a clasificar nuevas observaciones, prediciendo a que grupo pertenecen 0 o 1. Aunque estas predicciones son solo para el sistema del banco de experimentación y entre los valores de los niveles seleccionados permiten identificar que parámetros pueden ser oportunos para el seguimiento y detección de las diferentes anomalías.

En el caso de las ecuaciones que describen el defecto en el rodamiento y donde se pudo clasificar el 100% de los casos correctamente con los parámetros **K**, **HFD**, **RMSenvband2**, esta ecuación utiliza la K para evitar una falsa alarma. La K es un parámetro que es muy sensible a los cambios de lubricación y a la desalineación, en nuestro sistema el defecto no afecta los valores de K de forma significativa como puede verse en los diagramas Pareto, pero su sensibilidad a las demás anomalías lo hace útil para evitar falsas alarmas.

La K es elemento que evita una falsa alarma, si se aumentan solo **RMSenvband2** y **HFD**, seguramente es una falla de rodamientos, pero si la K aumenta por encima de 3.4 se deben descartar problemas de lubricación, desbalanceo y desalineación.

El sistema propuesto para asignar alarmas tempranas tiene en cuenta variables que son muy sensibles al defecto, pero también variables poco sensibles al defecto y muy sensibles a las demás anomalías de forma que pueda hacerse un diagnóstico integral muy sensible con valores globales.

El procedimiento planteado se realiza con base a valores globales con el soporte en el diagnóstico espectral. El valor global $RMS_{envband2}$, es más fácilmente revisado que la firma espectral de la envolvente y el seguimiento es más fácil.

Se plantea un procedimiento que puede utilizarse en cualquier sistema, el cual se basa en el seguimiento de valores globales en bandas alrededor de la frecuencia de falla del defecto en el rodamiento y el parámetro HFD para advertir la presencia de una anomalía, pero también hace seguimiento de la K y parámetros de alarma para desbalanceo y desalineación para evitar falsas alarmas.

Debido a que las amplitudes de la vibración varían con la carga, este procedimiento siempre debe realizarse para el mismo régimen de carga. Se sugiere realizar el procedimiento de monitoreo en el régimen de mayor carga mientras este régimen pueda ser replicado para poder llevar una tendencia.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] C. Scheffer y P. Girdhar, «Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance», *Mach. Vib. Anal. Predict. Maint.*, pp. 115-124, 2004.
- [2] T. Williams, X. Ribadeneira, S. Billington, y T. Kurfess, «Rolling element bearing diagnostics in run-to-failure lifetime testing», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 15, n.º 5, pp. 979-993, 2001.
- [3] T. Williams, T. Ribadeneira, X. Billington, S. & Kurfess, «Rolling element bearing diagnostics in run-to-failure lifetime testing», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 15, n.º 979-993, p. 5, 2001.
- [4] F. Cong, J. Chen, G. Dong, y M. Pecht, «Vibration model of rolling element bearings in a rotor-bearing system for fault diagnosis», *J. Sound Vib.*, vol. 332, n.º 8, pp. 2081-2097, 2013.
- [5] B. Graney y K. Starry, «Rolling element bearing analysis crosses threshold», *Mater. Eval.*, vol. 70, n.º 1, pp. 78-85, 2011.
- [6] A. Castellino, P. Donolo, G. Bossio, C. De Angelo, y G. García, «Diagnóstico de fallas en los rodamientos de motores eléctricos empleando variables eléctricas», en *XII Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Contro.*, 2007, p. 6.
- [7] S. Khatravath y A. Salour, «Cost Benefit Analysis for Maintenance of Rotating Machines», en *IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*, 2015, pp. 1-7.
- [8] N. Verma, S. Khatravath, y A. Salour, «Cost Benefit Analysis for Condition Based Maintenance», *Progn. Heal. Manag. (PHM), 2013 IEEE Conf.*, pp. 1-6, 2013.
- [9] H. Rødseth, P. Schjøberg, y A. Marhaug, «Deep digital maintenance», *Adv. Manuf.*, vol. 5, n.º 4, pp. 299-310, 2017.
- [10] E. Estupiñan y P. Saavedra, «Técnicas de Diagnóstico para el Análisis de Vibraciones de Rodamientos», *Mantenimiento Planificado*, 2017. [En línea]. Disponible en: [http://www.mantenimientoplanificado.com/articulos PREDICTIVO](http://www.mantenimientoplanificado.com/articulos/PREDICTIVO).
- [11] Wei, J, «General alarm Guidelines for Enveloped Acceleration Measurements», *SKF Reliability Syst.*, 2003.
- [12] J. Halme y P. Andersson, «Rolling contact fatigue and wear fundamentals for rolling bearing diagnostics - State of the art», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J J. Eng. Tribol.*, vol. 224, n.º 4, pp. 377-393, 2010.

- [13] V. Zaretsky, «A . Palmgren Revisited _ A Bearing Life Prediction Basis for», pp. 18-22, 1997.
- [14] *Rodamientos*. 2015.
- [15] I. El-Thalji y E. Jantunen, «Dynamic modelling of wear evolution in rolling bearings», *Tribol. Int.*, vol. 84, pp. 90-99, 2015.
- [16] I. El-Thalji y E. Jantunen, «A summary of fault modelling and predictive health monitoring of rolling element bearings», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 60. pp. 252-272, 2015.
- [17] W. Kruger, «Tracking rolling element bearing failure using mechanical and electrical vibration testing method.», *ALL-TEST Pro, LLC*, p. 14, 2010.
- [18] Técnicos Asociados de Charlott, «Cartas de Diagnóstico». [En línea]. Disponible en: [http://es.scribd.com/doc/58748416/carta de Charlotte](http://es.scribd.com/doc/58748416/carta-de-Charlotte). [Accedido: 27-oct-2016].
- [19] M. Feldman, «Hilbert transform in vibration analysis», *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 25, n.º 3, pp. 735-802, 2011.
- [20] F. Hernández y M. Gutiérrez, «Enfoques del análisis de envolvente al procesamiento de vibraciones para el diagnóstico de maquinarias», *Ing. Mecánica*, vol. 13, n.º 1, pp. 31-40, 2010.
- [21] SKF y R. Jones, «Enveloping for bearing analysis», *Sound Vib.*, pp. 10-15, 1996.
- [22] M. Barratt, «Low speed bearing monitoring a case study of low speed bearing monitoring in a paper board plant», *J. SKF @ptitud Exch.*, 2002.
- [23] SKF Realiability Sístems, «Vibration Diagnostic Guide», *SKF Realiability Sist.*, vol. CM5003, 2002.
- [24] D. Montgomery, *Diseño y Análisis de Experimentos*. Arizona, 1991.
- [25] P. Varela y A. Lopez, «Análisis critico del diseño factorial 2k sobre casos aplicados.», *Sci. Tech. Sci. Tech. Año XVIII*, vol. 47, n.º 47, pp. 101-106, 2011.
- [26] D. Dyer y R. Stewart, «Detection of Rolling Element Bearing Damage by Statistical Vibration Analysis», *J. Mech. Des.*, vol. 100, n.º 2, p. 229, 1978.
- [27] M. Behzad, A. AlandiHallaj, A. Bastami, B. Eftekharnjad, B. Charnley, y D. Mba, «Defect size estimation in rolling element bearings using vibration time waveform», *Insight Non-Destructive Test. Cond. Monit.*, vol. 51, n.º 8, pp. 426-430, 2009.
- [28] S. Kulkarni y A. Bewoor, «Vibration based condition assessment of ball bearing with

- distributed defects», *J. Meas. Eng.*, vol. 4, n.º 2, 2016.
- [29] N. Tandon y B. Nakra, «Detection of defects in rolling element bearings by vibration monitoring», *Inst. Eng. (India), Journal, Mech. Eng. Div.*, n.º 0020-3408, pp. 271-282, 1993.
- [30] N. Tandon, «A comparison of some vibration parameters for the condition monitoring of rolling element bearings», *Measurement*, vol. 12, n.º 3, pp. 285-289, 1994.
- [31] H. R. Martin y F. Honarvar, «Application of statistical moments to bearing failure detection», *Appl. Acoust.*, vol. 44, n.º 1, pp. 67-77, 1995.
- [32] S. Patidar y P. K. Soni, «An Overview on Vibration Analysis Techniques for the Diagnosis of Rolling Element Bearing Faults», *Int. J. Eng. Trends Technol.*, vol. 4, n.º May, pp. 1804-1809, 2013.
- [33] Z. Medrano, C. Pérez, J. Gómez, y M. Vera, «Nueva metodología de diagnóstico de fallas en rodamientos en una máquina síncrona mediante el procesamiento de señales vibro-acústicas empleando análisis de densidad de potencia», *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 17, n.º 1, pp. 73-85, 2016.
- [34] B. Vytutas, V. Zemaitis, K. Žebelys, y Z. Pocius, «Condition Monitoring of Rolling Bearing Using Different diagnostic methods», *J. Diagnostyka 30.*, 2005.
- [35] J. Stack, R. G. Harley, y T. G. Habetler, «An amplitude Modulation detector for fault diagnosis in rolling element bearings», *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, n.º 5, pp. 1097-1102, 2004.
- [36] W. Cocconcelli, R. Zimroz, R. Rubini, «STFT Based Approach for Ball Bearing Fault Detection in a Varying Speed Motor», en *Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations Springer, Berlin, Heidelberg*, 2012, pp. 41-50.
- [37] L. Eren y M. Devaney, «Bearing Damage Detection via Wavelet Packet Decomposition of the Stator Current», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 53, n.º 2, pp. 431-436, 2004.
- [38] S. Abdusslam, F. Gu, y A. Ball, «Bearing fault diagnosis based on vibration signals», en *Proceedings of Computing and Engineering Annual Researchers' Conference 2009*;, 2009, pp. 93-98.
- [39] W. Xin, Y. Liu, Y. He, y B. Su, «Amplitude envelope analysis for feature extraction of direct-driven wind turbine bearing failure», en *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 2012, pp. 3173-3176.
- [40] L. Zhou *et al.*, «Helicopter gearbox bearing fault detection using separation

techniques and envelope analysis», en *Proceedings of 2016 Prognostics and System Health Management Conference, PHM-Chengdu 2016*, 2017.

- [41] I. Howard, «A Review of Rolling Element Bearing Vibration “Detection, Diagnosis and Prognosis”», *DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory*. 1994.
- [42] Z. Huo, Y. Zhang, P. Francq, L. Shu, y J. Huang, «Incipient Fault Diagnosis of Roller Bearing Using Optimized Wavelet Transform Based Multi-Speed Vibration Signatures», *IEEE Access*, vol. 5, pp. 19442-19456, 2017.
- [43] D. Peña, «Análisis de datos multivariantes», *Editor. Mc Graw Hill Interam. España, SAV*, n.º December, p. 515, 2002.

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES MECÁNICAS

ANEXO 1. DATOS EXPERIMENTO UN SOLO FACTOR.

Defecto	Fc	K	RMS	Env	HFD	Ske
0	4.0416	2.6786	1.0778	0.1596	0.1442	0.2512
0.5	3.9515	2.6889	1.0871	0.1745	0.1493	0.224
1	7.3174	2.866	1.246	0.2382	0.1681	0.1393
0.5	4.6456	2.6414	1.1609	0.1806	0.139	0.1356
0	4.3003	2.7213	1.0935	0.1541	0.149	0.1774
1	4.8119	2.7585	1.2239	0.2362	0.2029	0.0869
1	3.7023	2.7264	1.0974	0.2205	0.159	0.0581
0.5	6.3528	2.826	1.0617	0.1879	0.14	0.2121
0	4.6253	2.7769	1.0901	0.207	0.1298	0.1715

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES MECÁNICAS

ANEXO 2. DATOS EXPERIMENTO MULTIFACTORIAL 2^K

Anexo 2 a) Datos Variables Analizadas para Diagnostico de Rodamientos.

defecto	desalineación	desbalance	Lubricante	FC	K	RMS	Env	HFD	SKE	RMSenvband 2	peakenvband 2	FCenvband 2	kenvband 2
0	0	0	1	8.68	3.49	2.02	0.31	0.44	0.18	0.04	0.17	4.62	3.55
1	0	0	1	10.19	3.68	2.13	0.37	0.62	0.19	0.06	0.21	3.31	2.27
1	1	1	1	8.50	3.01	2.12	0.34	0.55	0.17	0.05	0.21	4.21	3.53
0	0	1	1	3.45	2.71	1.99	0.23	0.15	0.11	0.05	0.16	3.49	2.76
1	0	1	1	6.63	3.16	2.09	0.40	0.66	0.08	0.06	0.20	3.29	2.72
1	1	0	1	12.43	3.75	1.99	0.37	0.60	0.07	0.06	0.30	5.13	4.51
0	1	1	1	4.35	2.81	2.13	0.24	0.27	0.30	0.04	0.14	3.84	3.11
0	1	0	1	4.79	3.24	2.14	0.38	0.33	0.07	0.04	0.15	3.72	3.12
1	1	1	1	6.92	2.92	2.11	0.34	0.52	0.15	0.05	0.24	4.64	3.71
0	0	0	1	5.65	2.91	1.74	0.23	0.24	0.12	0.04	0.17	4.62	3.55
0	0	1	1	3.78	2.84	2.07	0.27	0.14	0.05	0.04	0.15	3.79	2.96
0	1	0	1	4.79	3.24	2.14	0.38	0.33	0.07	0.05	0.17	3.61	3.35
1	0	0	1	6.52	2.86	2.02	0.39	0.42	0.08	0.06	0.21	3.31	2.27
1	0	1	1	7.76	3.34	2.25	0.40	0.72	0.05	0.06	0.21	3.27	2.67
1	1	0	1	10.76	3.26	2.07	0.39	0.50	0.16	0.07	0.22	3.20	2.95
0	1	1	1	4.44	2.83	2.16	0.27	0.28	0.29	0.04	0.15	3.94	2.88
0	0	1	1	3.73	2.83	2.05	0.29	0.15	0.06	0.04	0.13	3.75	3.18
1	0	0	1	10.19	3.68	2.13	0.37	0.62	0.19	0.06	0.21	3.31	2.27
1	1	1	1	6.92	2.92	2.11	0.34	0.52	0.15	0.06	0.26	4.70	3.52
0	1	1	1	4.35	2.81	2.13	0.24	0.27	0.30	0.04	0.15	3.63	3.40
1	1	0	1	5.42	2.99	2.05	0.33	0.51	0.12	0.05	0.20	3.87	2.97
0	0	0	1	8.68	3.49	2.02	0.31	0.44	0.18	0.05	0.17	3.65	3.19
1	0	1	1	7.09	3.35	2.27	0.43	0.74	0.04	0.07	0.24	3.38	2.75
0	1	0	1	5.10	3.29	2.01	0.26	0.29	0.33	0.05	0.17	3.61	3.35
0	0	0	0	4.29	2.80	1.69	0.26	0.18	0.15	0.03	0.10	3.28	2.91
1	0	0	0	3.99	2.85	2.03	0.33	0.33	0.08	0.05	0.17	3.23	2.42
1	1	1	0	9.11	2.74	1.98	0.26	0.45	0.15	0.04	0.19	5.10	4.26
0	0	1	0	3.80	2.86	1.75	0.24	0.17	0.05	0.03	0.11	3.51	2.97
1	0	1	0	4.04	2.85	2.05	0.35	0.32	0.02	0.06	0.18	3.14	2.54
1	1	0	0	11.19	2.90	2.00	0.29	0.45	0.17	0.04	0.17	4.32	3.65
0	1	1	0	5.50	2.53	1.84	0.21	0.19	0.13	0.03	0.10	3.23	3.02
0	1	0	0	7.11	2.62	1.82	0.27	0.22	0.20	0.05	0.25	5.45	5.78
1	1	1	0	9.06	2.70	2.01	0.28	0.45	0.15	0.04	0.14	3.63	3.14

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES MECÁNICAS

0	0	0	0	5.28	2.85	1.77	0.26	0.17	0.14	0.04	0.17	3.98	2.80
0	0	1	0	4.25	2.84	1.80	0.23	0.18	0.05	0.03	0.11	3.88	3.34
0	1	0	0	6.44	2.69	1.83	0.24	0.28	0.17	0.03	0.12	3.60	3.11
1	0	0	0	4.14	2.92	2.06	0.36	0.31	0.11	0.06	0.22	3.47	2.64
1	0	1	0	6.23	2.92	2.08	0.34	0.34	0.01	0.06	0.19	3.46	2.66
1	1	0	0	9.21	2.87	2.01	0.27	0.47	0.16	0.04	0.18	5.14	3.41
0	1	1	0	9.08	2.65	1.82	0.24	0.28	0.12	0.03	0.16	4.86	3.45
0	0	1	0	11.20	3.72	1.90	0.31	0.51	0.07	0.05	0.20	3.92	3.29
1	0	0	0	4.28	2.92	2.07	0.34	0.33	0.04	0.06	0.20	3.54	2.46
1	1	1	0	9.02	2.80	2.01	0.28	0.46	0.16	0.04	0.15	3.81	3.03
0	1	1	0	8.82	2.70	1.84	0.25	0.30	0.13	0.04	0.11	3.13	2.94
1	1	0	0	9.08	2.89	2.00	0.29	0.50	0.15	0.04	0.15	3.85	3.23
0	0	0	0	4.74	2.82	1.73	0.22	0.17	0.15	0.04	0.14	3.85	3.15
1	0	1	0	3.89	2.83	2.00	0.34	0.33	0.03	0.06	0.20	3.45	2.28
0	1	0	0	6.22	2.59	1.81	0.24	0.24	0.16	0.04	0.18	4.88	3.60

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES
MECÁNICAS

Anexo 2 b) Tabla de Datos para Análisis de Anomalías Desbalanceo Y Desalineación.

defecto	desalineación	desbalance	Lubricante	RMSb1banddesb	peakb1banddesb	FCb1banddesb	RMSb1banddesal	peakb1banddesal	FCb1banddesal
0	0	0	1	0.04	0.11	2.50	0.19	0.63	3.28
1	0	0	1	0.06	0.15	2.35	0.18	0.59	3.24
1	1	1	1	0.16	0.28	1.82	0.31	1.03	3.29
0	0	1	1	0.15	0.29	1.92	0.24	0.71	2.99
1	0	1	1	0.15	0.28	1.85	0.27	0.76	2.84
1	1	0	1	0.08	0.19	2.50	0.25	0.92	3.74
0	1	1	1	0.12	0.23	1.88	0.32	1.21	3.77
0	1	0	1	0.15	0.54	3.66	0.35	1.29	3.68
1	1	1	1	0.16	0.30	1.85	0.31	1.15	3.68
0	0	0	1	0.05	0.13	2.62	0.16	0.51	3.17
0	0	1	1	0.15	0.29	1.95	0.28	0.81	2.89
0	1	0	1	0.15	0.54	3.66	0.35	1.29	3.68
1	0	0	1	0.06	0.15	2.35	0.18	0.59	3.24
1	0	1	1	0.15	0.29	1.94	0.32	0.95	2.95
1	1	0	1	0.05	0.12	2.36	0.22	0.86	3.92
0	1	1	1	0.15	0.28	1.80	0.33	1.14	3.43
0	0	1	1	0.15	0.29	1.95	0.28	0.82	2.92
1	0	0	1	0.06	0.15	2.35	0.18	0.59	3.24
1	1	1	1	0.16	0.30	1.86	0.32	1.02	3.23
0	1	1	1	0.15	0.28	1.80	0.34	1.18	3.50
1	1	0	1	0.07	0.19	2.76	0.37	1.30	3.52
0	0	0	1	0.04	0.11	2.50	0.19	0.63	3.28
1	0	1	1	0.15	0.28	1.87	0.32	0.89	2.73
0	1	0	1	0.04	0.11	2.78	0.27	0.93	3.43
0	0	0	0	0.04	0.11	2.96	0.17	0.51	3.01
1	0	0	0	0.05	0.12	2.58	0.19	0.62	3.19
1	1	1	0	0.17	0.31	1.79	0.31	1.09	3.53
0	0	1	0	0.20	0.34	1.72	0.23	0.80	3.43
1	0	1	0	0.19	0.33	1.72	0.25	0.83	3.31
1	1	0	0	0.07	0.17	2.49	0.30	1.10	3.73

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES
MECÁNICAS

0	1	1	0	0.16	0.30	1.84	0.27	1.02	3.84
0	1	0	0	0.06	0.16	2.42	0.22	0.73	3.40
1	1	1	0	0.17	0.31	1.82	0.32	1.16	3.58
0	0	0	0	0.06	0.15	2.35	0.22	0.65	3.01
0	0	1	0	0.20	0.33	1.69	0.25	0.79	3.11
0	1	0	0	0.07	0.19	2.81	0.26	1.03	4.03
1	0	0	0	0.04	0.11	2.62	0.19	0.58	2.99
1	0	1	0	0.19	0.34	1.78	0.27	0.87	3.20
1	1	0	0	0.07	0.17	2.41	0.31	1.08	3.51
0	1	1	0	0.19	0.32	1.70	0.28	1.01	3.59
0	0	1	0	0.16	0.29	1.82	0.28	1.01	3.62
1	0	0	0	0.05	0.13	2.73	0.23	0.78	3.36
1	1	1	0	0.17	0.30	1.80	0.33	1.35	4.06
0	1	1	0	0.16	0.31	1.86	0.29	1.17	4.05
1	1	0	0	0.07	0.16	2.21	0.31	1.09	3.53
0	0	0	0	0.07	0.16	2.30	0.21	0.63	2.99
1	0	1	0	0.20	0.35	1.77	0.21	0.62	2.96
0	1	0	0	0.07	0.18	2.70	0.24	0.92	3.81

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES
MECÁNICAS

ANEXO 3. TABLAS DE CLASIFICACIÓN DE LAS FUNCIONES DISCRIMINANTES PARA DEFECTO EN RODAMIENTO, DESBALANCEO, DESALINEACIÓN Y CAMBIO EN LA CANTIDAD DE LUBRICANTE.

Tabla de clasificación función discriminante para defecto.

	Grupo	Grupo	Valor	Distancia		2° Grupo	2° Valor	Distancia	
Fila	Actual	Más Alto	Más Alto	Cuadrada	Prob.	Más Alto	Más Alto	Cuadrada	Prob.
1	0	0	86.1367	0.151152	0.9990	1	79.2355	13.9536	0.0010
2	1	1	78.9049	0.0643693	0.9914	0	74.1539	9.56639	0.0086
3	1	1	51.7717	0.112045	0.9988	0	45.0514	13.5527	0.0012
4	0	0	64.3539	0.0742526	0.9909	1	59.6658	9.45056	0.0091
5	1	1	52.9094	4.67657	1.0000	0	40.072	30.3514	0.0000
6	1	1	82.9487	1.21361	0.8714	0	81.0354	5.04016	0.1286
7	0	0	61.3691	0.224153	0.9823	1	57.3535	8.2554	0.0177
8	0	0	80.5872	0.102097	0.9987	1	73.9177	13.441	0.0013
9	1	1	49.0134	0.597429	0.9997	0	40.8265	16.9711	0.0003
10	0	0	70.9016	0.125707	0.9989	1	64.1149	13.699	0.0011
11	0	0	74.4575	0.713273	0.9998	1	66.031	17.5664	0.0002
12	0	0	78.824	0.0768701	0.9907	1	74.1518	9.42131	0.0093
13	1	1	52.6478	0.550532	0.9997	0	44.5645	16.717	0.0003
14	1	1	57.9226	4.79567	1.0000	0	44.9937	30.6536	0.0000
15	1	1	66.499	0.561929	0.9997	0	58.3902	16.7796	0.0003
16	0	0	61.5079	0.277551	0.9789	1	57.6709	7.95149	0.0211
17	0	0	74.4519	1.30871	0.9999	1	65.0233	20.166	0.0001
18	1	1	78.9049	0.0643693	0.9914	0	74.1539	9.56639	0.0086
19	1	1	49.1198	1.09035	0.9999	0	40.0251	19.2797	0.0001
20	0	0	60.7279	0.476734	0.9641	1	57.4386	7.05545	0.0359
21	1	1	53.1011	0.0224909	0.9978	0	46.9991	12.2265	0.0022
22	0	0	83.5453	0.238441	0.9814	1	79.5794	8.17026	0.0186
23	1	1	57.889	8.57186	1.0000	0	42.4906	39.3686	0.0000
24	0	0	85.1564	0.0965541	0.9987	1	78.5164	13.3766	0.0013
25	0	0	71.1702	1.19635	0.9999	1	61.9096	19.7176	0.0001
26	1	1	56.5533	1.02029	0.9020	0	54.3336	5.45958	0.0980
27	1	1	44.3575	0.507307	0.9614	0	41.1411	6.94014	0.0386
28	0	0	75.6086	1.96978	1.0000	1	65.3114	22.564	0.0000
29	1	1	57.3197	0.447624	0.9665	0	53.9587	7.16966	0.0335
30	1	1	51.7039	1.28439	0.8590	0	49.8966	4.89897	0.1410
31	0	0	53.9501	0.0010112	0.9959	1	48.4564	10.9884	0.0041
32	0	0	52.5723	2.04869	0.6921	1	51.7624	3.66854	0.3079
33	1	1	42.2305	0.167141	0.9857	0	37.9986	8.63091	0.0143
34	0	0	71.5264	0.0569216	0.9983	1	65.1279	12.854	0.0017
35	0	0	73.8793	2.0904	1.0000	1	63.4405	22.968	0.0000
36	0	0	54.7492	0.528064	0.9596	1	51.5811	6.86434	0.0404
37	1	1	61.0155	0.334562	0.9750	0	57.3512	7.66324	0.0250
38	1	1	59.0534	0.697161	0.9430	0	56.2476	6.30868	0.0570

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES
MECÁNICAS

39	1	1	49.4814	1.33607	0.8496	0	47.7497	4.79953	0.1504
40	0	0	52.2939	0.660319	0.9469	1	49.4133	6.42151	0.0531
41	0	0	89.8151	0.456378	0.9658	1	86.4758	7.13484	0.0342
42	1	1	59.9843	0.921816	0.9158	0	57.5974	5.69566	0.0842
43	1	1	46.778	0.611922	0.9518	0	43.7958	6.57622	0.0482
44	0	0	52.4317	1.26312	0.8628	1	50.5929	4.94076	0.1372
45	1	1	48.6473	0.350388	0.9739	0	45.0283	7.58856	0.0261
46	0	0	71.6905	0.723629	0.9998	1	63.2435	17.6176	0.0002
47	1	1	55.9851	0.393742	0.9707	0	52.485	7.39395	0.0293
48	0	0	51.8271	0.746196	0.9376	1	49.118	6.16451	0.0624

* = incorrectamente clasificado.

Tabla de clasificación función discriminante para desbalanceo

	Grupo	Grupo	Valor	Distancia		2° Grupo	2° Valor	Distancia	
Fila	Actual	Más Alto	Más Alto	Cuadrada	Prob.	Más Alto	Más Alto	Cuadrada	Prob.
1	0	0	46.9535	0.275542	1.0000	1	19.648	54.8865	0.0000
2	0	0	39.1087	0.652946	1.0000	1	20.9789	36.9125	0.0000
3	1	1	29.43	0.12463	1.0000	0	8.16798	42.6486	0.0000
4	1	1	29.803	0.981514	1.0000	0	12.9306	34.7264	0.0000
5	1	1	28.6866	0.543504	1.0000	0	10.0693	37.7782	0.0000
6	0	0	43.9152	0.771347	1.0000	1	26.2687	36.0643	0.0000
7	1	1	24.1366	3.88699	1.0000	0	14.0159	24.1285	0.0000
8	0	0	84.473	0.00205712	1.0000	1	60.4687	48.0107	0.0000
9	1	1	30.7106	0.0763624	1.0000	0	8.92066	43.6562	0.0000
10	0	0	51.5842	0.472672	1.0000	1	23.1595	57.322	0.0000
11	1	1	30.3925	1.23584	1.0000	0	14.3528	33.3153	0.0000
12	0	0	84.473	0.00205712	1.0000	1	60.4687	48.0107	0.0000
13	0	0	39.1087	0.652946	1.0000	1	20.9789	36.9125	0.0000
14	1	1	30.2102	1.05991	1.0000	0	13.6048	34.2705	0.0000
15	0	0	40.6686	0.0602164	1.0000	1	18.6657	44.0661	0.0000
16	1	1	28.5967	0.139884	1.0000	0	7.47913	42.375	0.0000
17	1	1	30.4579	1.16002	1.0000	0	14.1797	33.7163	0.0000
18	0	0	39.1087	0.652946	1.0000	1	20.9789	36.9125	0.0000
19	1	1	30.7688	0.106809	1.0000	0	9.32634	42.9917	0.0000
20	1	1	28.6955	0.148301	1.0000	0	7.65423	42.2308	0.0000
21	0	0	55.1085	0.0644096	1.0000	1	29.6694	50.9426	0.0000
22	0	0	46.9535	0.275542	1.0000	1	19.648	54.8865	0.0000
23	1	1	29.022	0.680886	1.0000	0	11.01	36.705	0.0000
24	0	0	58.6874	2.45279	1.0000	1	24.2146	71.3985	0.0000
25	0	0	66.3529	5.29694	1.0000	1	26.8181	84.3666	0.0000
26	0	0	50.0809	0.46951	1.0000	1	21.6721	57.2872	0.0000
27	1	1	31.8579	0.172756	1.0000	0	5.30467	53.2792	0.0000
28	1	1	35.4677	2.93228	1.0000	0	-0.011847	73.8914	0.0000
29	1	1	34.5138	2.2568	1.0000	0	0.480615	70.3231	0.0000
30	0	0	44.273	0.266911	1.0000	1	24.1372	40.5385	0.0000
31	1	1	31.2011	0.0250097	1.0000	0	8.59757	45.232	0.0000

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES
MECÁNICAS

32	0	0	41.902	0.398576	1.0000	1	22.5558	39.0912	0.0000
33	1	1	32.2292	0.0477847	1.0000	0	7.03235	50.4415	0.0000
34	0	0	39.1617	0.662316	1.0000	1	21.0717	36.8424	0.0000
35	1	1	34.797	3.07854	1.0000	0	-0.972956	74.6184	0.0000
36	0	0	57.2806	0.268394	1.0000	1	30.0223	54.785	0.0000
37	0	0	52.1717	0.857152	1.0000	1	22.1066	60.9874	0.0000
38	1	1	35.4129	1.52624	1.0000	0	3.21667	65.9187	0.0000
39	0	0	40.8369	0.902089	1.0000	1	23.6828	35.2104	0.0000
40	1	1	33.4273	1.84112	1.0000	0	0.394936	67.9058	0.0000
41	1	1	30.3144	0.0259269	1.0000	0	7.73068	45.1934	0.0000
42	0	0	56.3388	1.33432	1.0000	1	24.6952	64.6215	0.0000
43	1	1	31.2077	0.0265595	1.0000	0	6.39371	49.6545	0.0000
44	1	1	31.6915	0.0159839	1.0000	0	8.86967	45.6597	0.0000
45	0	0	32.3811	2.82018	1.0000	1	20.2489	27.0846	0.0000
46	0	0	36.1674	1.83914	1.0000	1	21.8105	30.5529	0.0000
47	1	1	36.5859	2.38715	1.0000	0	2.25833	71.0423	0.0000
48	0	0	53.0662	0.0681932	1.0000	1	27.5765	51.0476	0.0000

* = incorrectamente clasificado.

Tabla de clasificación función discriminante para desalineación.

Fila	Grupo Actual	Grupo Más Alto	Valor Más Alto	Distancia Cuadrada	Prob.	2° Grupo Más Alto	2° Valor Más Alto	Distancia Cuadrada	Prob.
1	0	0	114.853	0.00481282	0.9945	1	109.659	10.3933	0.0055
2	0	0	111.253	0.0626716	0.9981	1	105.006	12.5569	0.0019
3	1	1	124.676	1.73311	0.7479	0	123.589	3.90756	0.2521
4	0	0	97.9422	0.174125	0.9989	1	91.1453	13.7679	0.0011
5	0	0	89.5673	0.342699	0.9994	1	82.2168	15.0438	0.0006
6	1	1	153.628	0.276378	0.9757	0	149.937	7.65915	0.0243
7	1	1	166.315	0.855323	0.9998	0	157.847	17.7921	0.0002
8	1	1	162.909	1.15338	0.9999	0	153.95	19.0723	0.0001
9	1	1	158.028	0.179145	0.9989	0	151.212	13.8123	0.0011
10	0	0	104.821	0.763678	0.9998	1	96.5202	17.3649	0.0002
11	0	0	93.3773	0.0486484	0.9979	1	87.2282	12.3468	0.0021
12	1	1	162.909	1.15338	0.9999	0	153.95	19.0723	0.0001
13	0	0	111.253	0.0626716	0.9981	1	105.006	12.5569	0.0019
14	0	0	100.293	0.358868	0.9692	1	96.8432	7.25859	0.0308
15	1	1	164.558	0.0867824	0.9885	0	160.106	8.99187	0.0115
16	1	1	139.443	0.128103	0.9859	0	135.199	8.6161	0.0141
17	0	0	95.9077	0.00551955	0.9966	1	90.2403	11.3402	0.0034
18	0	0	111.253	0.0626716	0.9981	1	105.006	12.5569	0.0019
19	1	1	119.875	2.38168	0.5843	0	119.534	3.06237	0.4157
20	1	1	145.601	0.000130048	0.9958	0	140.14	10.9206	0.0042
21	1	1	151.219	0.394982	0.9994	0	143.727	15.3798	0.0006
22	0	0	114.853	0.00481282	0.9945	1	109.659	10.3933	0.0055
23	0	0	84.9134	0.1079	0.9985	1	78.4089	13.1168	0.0015
24	1	1	131.441	1.90367	0.7066	0	130.562	3.66148	0.2934

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES
MECÁNICAS

25	0	0	95.2046	1.68443	0.9999	1	85.5077	21.0781	0.0001
26	0	0	108.497	0.0831108	0.9983	1	102.125	12.8273	0.0017
27	1	1	144.705	0.103736	0.9874	0	140.343	8.82775	0.0126
28	0	0	127.826	1.67116	0.7623	1	126.661	4.00199	0.2377
29	0	0	120.479	1.14334	0.8700	1	118.577	4.94601	0.1300
30	1	1	159.867	0.10965	0.9985	0	153.354	13.136	0.0015
31	1	1	164.712	0.060686	0.9980	0	158.478	12.5286	0.0020
32	1	*0	124.344	0.774569	0.9258	1	121.82	5.82323	0.0742
33	1	1	150.931	0.0285743	0.9975	0	144.952	11.9873	0.0025
34	0	0	97.4983	0.44236	0.9995	1	89.8853	15.6684	0.0005
35	0	0	107.447	0.109544	0.9870	1	103.115	8.77498	0.0130
36	1	1	178.671	0.67505	0.9997	0	170.542	16.932	0.0003
37	0	0	95.3917	1.02648	0.9998	1	86.6325	18.545	0.0002
38	0	0	114.444	0.939258	0.9030	1	112.213	5.40135	0.0970
39	1	1	142.561	0.185737	0.9821	0	138.558	8.19254	0.0179
40	1	1	146.038	0.301427	0.9738	0	142.423	7.53069	0.0262
41	0	*1	148.17	0.196168	0.9814	0	144.206	8.12435	0.0186
42	0	0	122.802	0.966493	0.8989	1	120.617	5.3367	0.1011
43	1	1	193.144	6.11243	1.0000	0	179.58	33.2417	0.0000
44	1	1	185.654	2.48654	1.0000	0	175.038	23.718	0.0000
45	1	1	145.043	0.0855082	0.9886	0	140.583	9.00489	0.0114
46	0	0	96.0212	0.630413	0.9997	1	87.9837	16.7054	0.0003
47	0	0	94.1995	0.853836	0.9998	1	85.7337	17.7853	0.0002
48	1	1	158.756	0.107513	0.9872	0	154.413	8.79325	0.0128

* = incorrectamente clasificado.

Tabla de clasificación función discriminante para cambio en la lubricación.

	Grupo	Grupo	Valor	Distancia		2° Grupo	2° Valor	Distancia	
Fila	Actual	Más Alto	Más Alto	Cuadrada	Prob.	Más Alto	Más Alto	Cuadrada	Prob.
1	1	1	206.479	0.078496	0.8808	0	204.48	4.07772	0.1192
2	1	1	228.779	1.91411	0.9805	0	224.86	9.75113	0.0195
3	1	1	206.797	0.00111368	0.8278	0	205.227	3.14189	0.1722
4	1	*0	178.78	0.0945581	0.7266	1	177.803	2.04966	0.2734
5	1	1	207.096	0.0163696	0.8500	0	205.362	3.4861	0.1500
6	1	1	209.84	0.322238	0.9241	0	207.34	5.32145	0.0759
7	1	1	200.432	0.130953	0.7074	0	199.549	1.89693	0.2926
8	1	1	217.021	0.377429	0.9296	0	214.44	5.53905	0.0704
9	1	1	201.044	0.0751439	0.7380	0	200.008	2.14635	0.2620
10	1	*0	149.25	1.01361	0.9631	1	145.987	7.54023	0.0369
11	1	1	192.655	0.478738	0.5766	0	192.346	1.09675	0.4234
12	1	1	217.021	0.377429	0.9296	0	214.44	5.53905	0.0704
13	1	*0	186.602	0.60943	0.5386	1	186.447	0.918735	0.4614
14	1	1	236.195	2.33995	0.9848	0	232.022	10.6854	0.0152
15	1	1	206.841	0.0300182	0.8598	0	205.028	3.65737	0.1402
16	1	1	205.971	0.0106385	0.7913	0	204.639	2.67657	0.2087
17	1	1	189.687	0.689447	0.5171	0	189.619	0.825984	0.4829

DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN RODAMIENTOS UTILIZANDO VIBRACIONES
MECÁNICAS

18	1	1	228.779	1.91411	0.9805	0	224.86	9.75113	0.0195
19	1	1	201.044	0.0751439	0.7380	0	200.008	2.14635	0.2620
20	1	1	200.432	0.130953	0.7074	0	199.549	1.89693	0.2926
21	1	1	194.684	0.271969	0.6469	0	194.078	1.4827	0.3531
22	1	1	206.479	0.078496	0.8808	0	204.48	4.07772	0.1192
23	1	1	240.236	2.9596	0.9891	0	235.732	11.9682	0.0109
24	1	1	199.267	0.0235142	0.7765	0	198.021	2.51483	0.2235
25	0	0	139.632	2.38292	0.9852	1	135.435	10.777	0.0148
26	0	0	187.293	0.648917	0.5278	1	187.182	0.871632	0.4722
27	0	0	178.097	0.0864201	0.7313	1	177.096	2.08858	0.2687
28	0	0	149.812	1.02044	0.9634	1	146.543	7.55883	0.0366
29	0	*1	190.167	0.638596	0.5306	0	190.045	0.883683	0.4694
30	0	0	184.9	0.519362	0.5644	1	184.641	1.03734	0.4356
31	0	0	152.776	1.12917	0.9664	1	149.416	7.85004	0.0336
32	0	0	152.851	1.01156	0.9631	1	149.589	7.53465	0.0369
33	0	0	181.174	0.175733	0.6864	1	180.391	1.7423	0.3136
34	0	0	151.846	0.84285	0.9573	1	148.736	7.0609	0.0427
35	0	0	155.449	0.56012	0.9434	1	152.635	6.18804	0.0566
36	0	0	155.817	0.670642	0.9496	1	152.88	6.54384	0.0504
37	0	*1	193.701	0.365258	0.6133	0	193.24	1.28777	0.3867
38	0	*1	196.696	0.22093	0.6671	0	196.001	1.6107	0.3329
39	0	0	185.199	0.515656	0.5655	1	184.936	1.04259	0.4345
40	0	0	153.426	0.92364	0.9602	1	150.242	7.29123	0.0398
41	0	*1	196.056	0.0044858	0.8015	0	194.66	2.79622	0.1985
42	0	*1	196.458	0.230093	0.6633	0	195.78	1.58631	0.3367
43	0	0	183.519	0.353456	0.6174	1	183.041	1.31021	0.3826
44	0	0	157.727	0.520945	0.9409	1	154.959	6.05618	0.0591
45	0	0	184.944	0.513884	0.5660	1	184.678	1.04512	0.4340
46	0	0	145.92	1.50434	0.9746	1	142.275	8.79526	0.0254
47	0	0	183.396	0.366754	0.6128	1	182.937	1.28497	0.3872
48	0	0	150.55	1.28403	0.9702	1	147.067	8.2502	0.0298

* = incorrectamente clasificado.