



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**APLICACIÓN DE LA ACELERACIÓN ENVOLVENTE PARA EL
DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN DE RODAMIENTOS**

Renato González Arriaza

Asesorado por el Ing. Arturo García Sandoval

Guatemala, septiembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**APLICACIÓN DE LA ACELERACIÓN ENVOLVENTE PARA EL
DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN DE RODAMIENTOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

RENATO GONZÁLEZ ARRIAZA

ASESORADO POR EL ING. ARTURO GARCÍA SANDOVAL

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Ismael Véliz Padilla
EXAMINADOR	Ing. Carlos Enrique Chicol Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortíz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

APLICACIÓN DE LA ACELERACIÓN ENVOLVENTE PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN DE RODAMIENTOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 9 de agosto de 2018.

Renato González Arriaza

Guatemala, 22 de Marzo del 2021

Ingeniero
Gilberto Enrique Morales Baiza
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Morales:

Atentamente me dirijo a usted para informarle que he revisado el trabajo de graduación titulado: **APLICACIÓN DE LA ACELERACIÓN ENVOLVENTE EN EL DIAGNÓSTICO DE CONDICIÓN DE RODAMIENTOS**, elaborado por el estudiante de Ingeniería Mecánica Renato González Arriaza, quien se identifica con el registro académico 201212647 y CUI 2370519740101. En virtud de lo anterior, le informo que doy por revisado y aprobado el trabajo de graduación realizado por el estudiante.

Agradeciendo su atención, atentamente



Ing. Arturo García Sandoval
Ingeniero Mecánico
Colegiado 3879
Asesor

Ing. Arturo García Sandoval
Colegiado 3879



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.EIM.060.2021

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **APLICACIÓN DE LA ACELERACIÓN ENVOLVENTE PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN DE RODAMIENTOS** desarrollado por el estudiante **Renato González Arriaza** con Registro Académico **201212641** y CUI **2370519740101** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"

Carlos Humberto Pérez Rodríguez
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL
Colegiado 3071



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Área Complementaria
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, abril 2021



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.114.2021

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria del trabajo de graduación titulado: **APLICACIÓN DE LA ACELERACIÓN ENVOLVENTE PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN DE RODAMIENTOS** del estudiante **Renato González Arriaza, CUI 2370519740101, Reg. Académico 201212641** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"




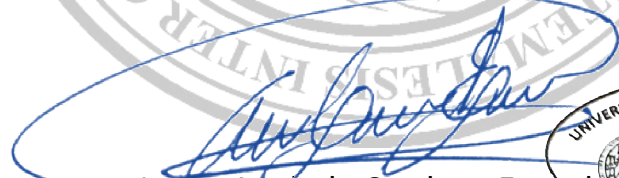
Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, agosto 2021
/aej

DTG. 428.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **APLICACIÓN DE LA ACELERACIÓN ENVOLVENTE PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN DE RODAMIENTOS**, presentado por el estudiante universitario: **Renato González Arriaza**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



ing. Angélica Cordova Estrada
Decana

Guatemala, septiembre de 2021.

AACE/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por brindarme de sabiduría, escuchar mis oraciones y ponerme en el camino del estudio de la ingeniería en la Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Mis padres** Rosbi Arriaza Paiz y Luis Fernando González Melgar, por su amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Su entrega, esfuerzo y ejemplo han sido mi motivación e inspiración y serán el baluarte de mi actuar profesional.
- Mis hermanos** Luis Fernando y José Rubén González, por su comprensión, apoyo y cariño durante esta etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Mi <i>alma máter</i> , por brindarme la posibilidad de estudiar en sus aulas.
Facultad de Ingeniería	Por ser la cuna de mi conocimiento profesional y permitirme formar mi carrera profesional.
Catedráticos	A todos los profesionales que me brindaron clases y compartieron su conocimiento y experiencias.
Mis amigos	Por su apoyo en todo momento y motivación para culminar mi carrera.
Ing. Arturo García Sandoval	Por brindarme su apoyo y conocimiento en la elaboración del presente trabajo de graduación.
Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez	Por su pasión a la docencia y el apoyo que brinda a todos los estudiantes de la escuela de ingeniería mecánica, siendo una inspiración para ser un excelente profesional.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XIX
OBJETIVOS.....	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
1. CONCEPTOS BÁSICOS.....	1
1.1. Mantenimiento basado en condición	1
1.2. Mantenimiento predictivo.....	2
1.3. Beneficios del mantenimiento predictivo.....	3
1.4. Curva P-F	5
1.5. Análisis de vibraciones	9
2. RODAMIENTOS.....	13
2.1. Tipos de rodamientos	13
2.1.1. Radiales	14
2.1.2. Axiales	18
2.1.3. Mixtas	20
2.2. Causas de falla en rodamientos	21
2.3. Que buscar durante el funcionamiento de los rodamientos.....	24
2.3.1. Inspecciones durante la operación	26
2.3.2. Inspecciones durante un paro.....	31
2.4. Síntomas de falla en rodamientos	32
2.5. Clasificación de los modelos de falla según ISO	37

2.5.1.	Fatiga	37
2.5.2.	Desgaste	41
2.5.3.	Corrosión	45
2.5.4.	Erosión eléctrica	49
2.5.5.	Deformación plástica	52
2.5.6.	Agrietamiento y fractura	55
2.6.	Etapas de falla en rodamientos	59
2.6.1.	Primera etapa	63
2.6.2.	Segunda etapa	64
2.6.3.	Tercera etapa	66
2.6.4.	Cuarta etapa	67
2.7.	Cuando cambiar un rodamiento	68
3.	MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN TEMPRANA DE DAÑOS EN RODAMIENTOS	75
3.1.	Comprobación de estado	75
3.2.	Señales moduladas	76
3.3.	Tecnología SEE	78
3.4.	Análisis de zoom real	80
3.5.	Peakvue	81
3.6.	Ceptrum	82
3.7.	HFD	85
3.8.	Factor de cresta	85
4.	ACELERACIÓN ENVOLVENTE	87
4.1.	Introducción a la aceleración envolvente	87
4.2.	Pasos para derivar la aceleración envolvente	88
4.3.	Forma de onda	90
4.4.	Aplicación del filtro de paso de banda	97

4.5.	Creación y configuración de parámetros para la adquisición de datos de aceleración envolvente con software microlog.....	99
4.6.	Configuración de los límites de alarma.....	109
4.7.	Aspectos a tomar en cuenta	112
5.	CASOS DE ESTUDIO	115
5.1.	Caso No.1.....	115
5.2.	Caso No.2.....	133
5.3.	Caso No.3.....	147
	CONCLUSIONES	155
	RECOMENDACIONES	157
	BIBLIOGRAFÍA.....	159
	APÉNDICES	161

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Costo de instalación y operación	4
2.	Ahorros potenciales generados por la implementación del mantenimiento predictivo	5
3.	Curva P-F	7
4.	Señales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia	11
5.	Componentes de un rodamiento	14
6.	Rodamientos radiales tipo NU, N, de agujas y toroidales	15
7.	Rodamientos de bola de una y doble hilera	15
8.	Rodamientos de bola a rótula	16
9.	Rodamientos de rodillos cilíndricos.....	17
10.	Rodamientos de agujas.....	17
11.	Rodamientos axiales de simple y doble efecto	18
12.	Rodamiento axial de rodillos cilíndricos	19
13.	Rodamientos axiales de agujas	19
14.	Disposiciones de ángulo para rodamientos de cargas mixtas.....	20
15.	Rodamiento axial de rodillos a rótula	21
16.	Progreso de daño en un rodamiento.....	26
17.	Mecánica de falla para la fatiga subsuperficial.....	38
18.	Mecánica de falla para la fatiga superficial.....	40
19.	Mecánica de falla del desgaste abrasivo.....	42
20.	Mecánica de falla del desgaste adhesivo.....	43
21.	Mecánica de adherencia al entrar a zona de carga	44

22.	Fenómeno de acumulación de agua en rodamiento fuera de operación	46
23.	Mecánica de corrosión por fricción	47
24.	Pista externa afectada por falso brinelling	49
25.	Mecánica de falla producida por el paso de corriente sobre un rodamiento.....	50
26.	Falla en pista externa causada por el fenómeno de paso de corriente por erosión.....	51
27.	Falla en pista interna y rodillo causada por el paso de corriente	52
28.	Deformación en jaula de rodamiento debido a mala manipulación del rodamiento durante el montaje	53
29.	Distribución de fuerza a través de elementos rodantes durante un mal montaje... ..	53
30.	Mecánica de falla en zonas adyacentes a indentaciones	55
31.	Fractura en pista interna de un rodamiento debido a una manipulación incorrecta durante su montaje	56
32.	Fractura de pista interna de un rodamiento resultante de un calado excesivo	57
33.	Fractura de pista externa por esfuerzos excesivos y soporte deficiente en zona de carga	58
34.	Grietas térmicas transversales en pista interna de un rodamiento	59
35.	Primera etapa de falla en un rodamiento en la zona D.....	64
36.	Segunda etapa de falla en un rodamiento en la zona C	65
37.	Tercera etapa de falla en un rodamiento en la zona B	67
38.	Tercera etapa de falla en un rodamiento en la zona A	68
39.	Tipos de modulación en onda de tiempo	77
40.	Método de monitorización de tecnología SEE	79
41.	Análisis de zoom real para observar bandas laterales.....	81
42.	Captura de datos con técnica de peakvue.....	82

43.	Pasos para la formación del ceptrum.....	84
44.	Onda de esfuerzo con una representación en color rojo de la onda mediante la técnica de envolvente	89
45.	Pasos para la obtención de una señal y espectro de envolvente.....	90
46.	Representación de forma de onda en alta frecuencia.....	92
47.	Representación del envolvimiento realizado sobre la onda del tiempo rectificada durante el procesamiento de la señal envolvente	93
48.	Forma de onda de un rodamiento con daño en pista externa	94
49.	Forma de onda de un rodamiento con daño en pista interna	95
50.	Forma de onda habitual de un rodamiento con daño en elemento rodante	96
51.	Jerarquía de datos en aptitude analyst	100
52.	Creación de un punto nuevo en aptitude analyst	101
53.	Configuración de propiedades de punto	102
54.	Configuración de pestaña general	103
55.	Configuración para la adquisición del punto.....	105
56.	Configuración de bandas de frecuencia	106
57.	Referencia para el cálculo de frecuencias de banda.....	107
58.	Creación de notas	108
59.	Asignación del grupo de frecuencias de falla del rodamiento	109
60.	Configuración de alarmas de aceleración envolvente	112
61.	Diagrama de montaje del equipo	116
62.	Tendencia en gE del punto A caso No.1	117
63.	Espectro de cascada en gE punto A caso No.1	117
64.	Tendencia en gE del punto B caso No.1	118
65.	Espectro de cascada en gE punto B caso No.1	118
66.	Tendencia de aceleración envolvente en gE punto C caso No.1	120
67.	Espectro de aceleración envolvente en gE 20 de junio del 2018 punto C caso No.1	121

68.	Espectro de aceleración envolvente en gE 12 de octubre del 2018 punto C caso No.1	122
69.	Espectro de aceleración envolvente en gE 2 de diciembre del 2018 punto C caso No.1	123
70.	Espectro de velocidad en mm/s rms 12 de octubre del 2018 punto C caso No.1.....	124
71.	Aumento de la componente 1X entre las ultimas 2 mediciones de vibración previo al cambio del rodamiento.....	125
72.	Espectro de aceleración en g rms 12 de octubre del 2018 punto C caso No.1.....	125
73.	Tendencia en mm/s rms del punto C caso No.1	126
74.	Tendencia en g rms del punto C caso No.1.....	126
75.	Espectro de cascada en mm/s rms punto C caso No.1	127
76.	Espectro de cascada en g punto C caso No.1.....	127
77.	Tendencia de aceleración envolvente en gE punto D caso No.1.....	129
78.	Espectro de aceleración envolvente en gE 20 de junio del 2018 punto D caso No.1	130
79.	Espectro de aceleración envolvente en gE 12 de octubre del 2018 punto D caso No.1	130
80.	Espectro de aceleración envolvente en gE 2 de diciembre del 2018 punto D caso No.1	131
81.	Espectro de cascada en gE punto D caso No.1	132
82.	Diagrama de montaje del equipo.....	134
83.	Tendencia de aceleración envolvente en gE punto A caso No.2.....	135
84.	Tendencia de aceleración en g rms del punto A caso No.2.....	136
85.	Espectros superpuestos de aceleración envolvente en gE del 20 de febrero y 30 de julio del 2018 punto A caso No.2	137
86.	Espectro de aceleración en g 20 de febrero del 2018 punto A caso No.2	137

87.	Espectro de aceleración en g 30 de julio del 2018 punto A caso No.2...	138
88.	Tendencia de aceleración envolvente en gE punto B caso No.2	139
89.	Tendencia de aceleración en g del punto B caso No.2	139
90.	Tendencia de aceleración envolvente en gE punto B caso No.2	141
91.	Espectro de cascada en gE punto B caso No.2	142
92.	Espectro de cascada en g punto B caso No.2	142
93.	Espectros superpuestos de aceleración envolvente en gE del 20 de febrero del 2018 y 21 enero del 2019 del punto B caso No.2	143
94.	Condición de la grasa punto A tras el desarme	144
95.	Condición de la grasa punto B tras el desarme	145
96.	Desprendimiento del aceite base en el punto B tras el desarme	145
97.	Condición de la grasa punto A previo al montaje del rodamiento nuevo	146
98.	Condición de la grasa punto B previo al montaje del rodamiento nuevo	146
99.	Diagrama de montaje del equipo	148
100.	Tendencia de aceleración envolvente en gE punto C caso No.3	149
101.	Tendencia de aceleración en g rms del punto C caso No.3	149
102.	Espectros superpuestos de aceleración envolvente en gE del 2 de diciembre y 4 diciembre del 2018 del punto C caso No.3	150
103.	Espectro de cascada en gE punto C caso No.3	151
104.	Tendencia de aceleración envolvente en gE punto D caso No.3	152
105.	Tendencia de aceleración en g rms del punto D caso No.3	152
106.	Espectros superpuestos de aceleración envolvente en gE del 2 de diciembre y 4 diciembre del 2018 del punto D caso No.3	153
107.	Espectro de cascada en gE punto D caso No.3	153

TABLAS

I.	Síntomas de falla en rodamientos	32
II.	Cálculo de frecuencias de falla de rodamientos	60
III.	Filtros de paso de banda predeterminados por SKF	99
IV.	Datos de equipo ventilador de desempolve	116
V.	Datos de equipo motor de trituradora	133
VI.	Datos de equipo motor de ventilador	147

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
0,46X	0,46 veces la velocidad de giro
2XBSF	2 veces la frecuencia de falla en elemento rodante
2XFL	2 veces la frecuencia de línea
4,06X	4,06 veces la velocidad de giro
4,22X	4,22 veces la velocidad de giro
6,78X	6,78 veces la velocidad de giro
g	Aceleración
gE	Aceleración envolvente
HJ	Aros angulares
hp	Caballos de fuerza
°C	Celsius
HFD	Demodulado de alta frecuencia
FFT	Espectro de frecuencias
P-F	Fallo potencial a fallo funcional
TF	Fallo total
BSF	Frecuencia de falla de elemento rodante
BPFO	Frecuencia de falla en pista externa
BPFI	Frecuencia de falla en pista interna
FL	Frecuencia de línea
FTF	Frecuencia fundamental de la jaula
fmax	Frecuencia máxima
°	Grados
Fe₂O₃	Hematita

I-P	Instalación a fallo potencial
kcpm	Kilociclos por minuto
kHz	Kilohertz
kW	Kilovatio
Fe₃O₄	Magnetita
dbμV	Microvoltio por decibel
mm	Milímetros
HRC	Número de dureza Rockwell C
%	Porcentaje
gSE	Pico de energía
rms	Raíz cuadrática media
rpm	Revoluciones por minuto
NU, N, NJ y NUP	Rodamiento de rodillos cilíndricos
TMEF	Tiempo promedio entre fallos
Pico	Valor pico
1X	Velocidad de giro
mm/s	Velocidad expresado en milímetros por segundo
VOSO	Ver, oler, sentir y oír

GLOSARIO

Alemite	Es un elemento que se utiliza para el engrasado de piezas o partes mecánicas donde la grasa o lubricante debe penetrar pero no debe salir, es decir debe permanecer dentro de la pieza que se procedió a engrasar.
Armónicas	Son frecuencias de vibración que son múltiplos integrales de una frecuencia fundamental específica.
BPFO	<i>Ball pass frequency of the outer race</i> , en español significa frecuencia de falla de la pista externa.
BPFI	<i>Ball pass frequency of the inner race</i> , en español significa frecuencia de falla de la pista interna.
Brinelling	Es la aparición de puntos huecos que se parecen a las marcas Brinell que se producen al medir dureza bajo este método; se deben al desgaste causado por la vibración en los puntos de contacto entre los elementos rodantes y la pista de rodadura.
BSF	<i>Ball spin frequency</i> , en español significa frecuencia de giro de bola.

Demodulado	Proceso que consiste en obtener a partir de una señal de vibración, una señal nueva que contenga únicamente la señal modulada.
Demodulador	Es un circuito electrónico que modula o rectifica una señal.
Espectro	Se caracteriza por la distribución de amplitudes para cada frecuencia de una señal de tiempo específica; para el caso del presente trabajo nos referimos al espectro de frecuencia específicamente, obtenido mediante la aplicación de la transformada rápida de Fourier.
<i>Fluting</i>	Estrías que se forman en un rodamiento cuando a través de él pasa una corriente eléctrica.
<i>Fretting</i>	Proceso de desgaste especial que ocurre en el área de contacto entre dos materiales bajo carga y sujeto a un movimiento relativo mínimo por vibración o alguna otra fuerza.
FTF	<i>Ball pass frequency of the outer race</i> , en español significa frecuencia de falla de la pista externa.
<i>Haystacks</i>	Zonas en el espectro de frecuencias con alta energía, que tienden a caracterizarse por generar vibración aleatoria, generalmente se deben a deficiencia en la lubricación de un rodamiento.

HFD	<i>High frequency demodulation</i> , en español significa demodulado de alta frecuencia.
Indentación	Hendiduras o deformaciones plásticas causadas sobre una superficie, cuando pequeñas partículas se introducen en la zona de contacto entre dos componentes causando una deformación plástica sobre alguno de los mismos.
Líneas	Representa el número de líneas de resolución que le permita al analista distinguir entre los diferentes problemas asociados a frecuencias que se pueden ver en un espectro.
Martensita	Es el nombre que recibe la fase cristalina BCT, en aleaciones ferrosas. Dicha fase se genera a partir de una transformación de fases sin difusión, es decir, infiltración de partículas ajenas al material procesado.
Microcracks	Se refiere a las roturas microscópicas derivado de las asperezas superficiales, que suceden al producirse contacto entre dos superficies.
Microlog	Analizador de vibraciones de la marca SKF.
Peakvue	Tecnología exclusiva de CSI y que significa valor máximo.

<i>Shock pulse</i>	Método de impulso de choque, que representa una técnica para utilizar señales de rodamientos rotativos como base para un control eficiente del estado de las máquinas.
<i>Spall</i>	Término en inglés, que hace referencia a un desprendimiento o descascaramiento de una superficie.
<i>Spalling</i>	Termino en inglés, que se producido al iniciar un desprendimiento superficial, resultado de exceder la vida de fatiga de un material, en los rodamientos se suele producir, debido a esfuerzos producido por sobrecargas, precarga excesiva, anillo interior ajustado y exceder la vida útil de algún componente.
<i>Spike energy</i>	La energía de impulsos mide los impulsos de energía de vibración de breve duración y, por lo tanto, de alta frecuencia. Puede haber impulsos debido a defectos en la superficie de elementos de rodamientos o engranajes; rozamiento, impacto, contacto entre metal-metal en máquinas rotativas, fugas de vapor o de aire a alta presión, y cavitación debida a turbulencia en fluidos.
Bainita	Es una mezcla de fases de ferrita y cementita, que en su formación intervienen procesos de difusión.

Vibración

Movimiento de un cuerpo sólido alrededor de una posición de equilibrio, sin que se produzca desplazamiento neto del mismo.

RESUMEN

Derivado a que los rodamientos constituyen uno de los componentes más críticos en una máquina rotativa y que el 90 % no alcanza su vida útil de diseño según estudios de fabricantes; encontrándose expuestos continuamente a problemas de lubricación, contaminación, desgaste, fatiga y a la posibilidad de un mal montaje o almacenaje, se considera importante y prudente abordar el tema *APLICACIÓN DE LA ACELERACIÓN ENVOLVENTE PARA EL DIAGNÓSTICO DE LA CONDICIÓN DE RODAMIENTOS*.

En la actualidad, la forma convencional de analizar y diagnosticar fallas en rodamientos se basa en emplear los registros de señales de vibración obtenidos mediante un acelerómetro, en términos generales la información aportada por las vibraciones en el dominio de la frecuencia nos permite detectar etapas tempranas de falla indicándonos posibles condiciones anormales en la operación de los rodamientos, pudiendo así tomar decisiones preventivas y correctivas que eviten fallas catastróficas o paradas no programadas.

Asimismo, se observará posteriormente que para la detección temprana de fallas en rodamientos utilizando las señales de vibración se nos demanda la utilización de técnicas adecuadas del campo de procesamiento de señales como la medición de aceleración de vibración con envolvente.

OBJETIVOS

General

Aportar el conocimiento necesario para implementar la técnica de aceleración envolvente en el diagnóstico de fallas en rodamientos.

Específicos

1. Estudiar las fallas características en los rodamientos.
2. Dar a conocer las técnicas de vibración que se utilizan en industria para la detección temprana y diagnóstico de daño en rodamientos.
3. Analizar la técnica de envolvente y su importancia en la detección temprana de fallas.
4. Detectar fallas en rodamientos utilizando el método de procesamiento de señal de la envolvente de aceleración.

INTRODUCCIÓN

Hoy día en el ámbito industrial, la incursión de las tecnologías predictiva para la detección temprana de daños en componentes mecánicos y eléctricos han permitido el aumento de la productividad en las diversas industrias, esto derivado a los continuos avances en la electrónica y los sistemas de cómputo con la capacidad de procesar grandes cantidades de datos a una alta velocidad y poco tiempo proporcionando datos cualitativos y cuantitativos capaces de brindar información veraz que revela el estado de una máquina; dicha tecnología es aplicada sin necesidad de incrementar considerablemente el personal dedicado a la actividad de mantenimiento de equipos, asimismo la industria exige cada vez más, técnicos mejor preparados para el diagnóstico de la condición de la maquinaria industrial que monitorean, debido a que parte del éxito de un programa de monitoreo de condición radica en la asertividad del mismo en cuanto a la detección de fallas, reduciendo así costos en mantenimiento no programado así como paradas de producción no previstas.

El análisis de vibraciones mecánicas es una de las técnicas para el diagnóstico de maquinaria rotativa más desarrollada e implementadas en la industria actualmente, debido a la asertividad en la detección de problemas en equipos, apoyado de un técnico experimentado capaz de realizar un buen análisis de los datos obtenidos. Con esta técnica se puede anticipar las fallas hasta seis o más meses antes que ocurra un problema catastrófico, el 90 % de los problemas encontrados en maquinaria rotativa pueden ser diagnosticados mediante un análisis de vibraciones, por ello esta técnica es aplicada en empresas donde existen equipos rotativos críticos que pueden provocar la

detención de la producción, poner en riesgo la seguridad de las personas o el medio ambiente.

En el presente documento se analizara la técnica de procesamiento de señal utilizada para la detección temprana y monitoreo de daños en los rodamientos conocida como envolvente de la aceleración o aceleración envolvente, asimismo se presentan casos de estudio donde se observa los beneficios de la aplicación de dicha técnica en la determinación de la condición en rodamientos.

1. CONCEPTOS BÁSICOS

1.1. Mantenimiento basado en condición

La productividad, confiabilidad y rentabilidad de una planta productiva usualmente se ven afectadas por una falla no prevista sin embargo la causa de ruptura rara vez se identifica. Los rodamientos se dañan y fallan a menudo y al suceder simplemente se reemplazan, esperando que puedan durar más la próxima vez. A pesar de ello, los rodamientos no fallan sin razón; siempre hay una explicación del por qué lo hacen y generalmente es por una de las siguientes razones: la máquina está funcionando desbalanceada, desalineada o a una velocidad crítica; un rodamiento no se ha instalado correctamente o ha sido mal dimensionado; ha ocurrido lubricación excesiva, insuficiente utilización de lubricante contaminado o incorrecto.

El monitoreo de condición en industria se ocupa de la extracción de información de las máquinas para indicar su condición, determinando a su vez si estos pueden ser operados de manera segura y confiable; cabe señalar que un equipo puede estar disponible, sin embargo esto no garantiza que su operación sea confiable y definiremos el concepto de confiabilidad como la capacidad de un producto, persona o activo de realizar su función de la manera prevista o bien se podría definir como la probabilidad de realizar su función prevista sin incidentes por un periodo de tiempo específico y bajo las condiciones estipuladas.

Derivado de ello ya no se habla únicamente de disponibilidad de los equipos. Es la diferencia que existe entre la garantía que ofrece una operación confiable de nuestros activos y la disponibilidad de operación como tal, donde

recae el impacto y la importancia del monitoreo de condición de la maquinaria, ya que es en esta diferencia donde se ven reflejados los aspectos económicos que ofrecen posibles ahorros en paradas no previstas en la producción de una planta así como los ahorros en términos de mantenimiento de la maquinaria. Por ello la confiabilidad nos asegura la menor cantidad de fallas no previstas planteando un análisis estadístico especializado de los datos obtenidos en la etapa de adquisición de datos propia del mantenimiento basado en condición.

El mejor método actualmente para llevar a cabo la actividad de monitoreo de condición en mantenimiento es el mantenimiento predictivo.

1.2. Mantenimiento predictivo

Para conocer la condición de una máquina como vimos con anterioridad será necesario monitorear la vida útil de la misma por medio de alguna variable que nos ayude a ello, como suele ser el caso de la vibración mecánica o la temperatura de un equipo, donde siguiendo las tendencias o la evolución de la variable en función del tiempo, tenemos la oportunidad de evaluar en cualquier momento la condición de nuestro equipo, contrastando el valor mostrado en nuestra tendencia con valores catalogados como niveles de alarma preestablecidos previamente proporcionándonos el momento más oportuno para intervenir la máquina evitando así un fallo no previsto de la máquina.

Para la implementación del mantenimiento predictivo se emplean diversas técnicas de adquisición de datos, requiriendo de equipos tecnológicos sofisticados y personal altamente capacitado capaz de integrar los datos de diagnóstico necesarios para la toma de decisiones.

1.3. Beneficios del mantenimiento predictivo

A continuación, se listan algunos de los beneficios que trae consigo la implementación de mantenimiento predictivo:

- Incremento en la vida útil y disponibilidad de los equipos alrededor de un 30 %.
- Realizar actividades correctivas de manera preventiva reduciendo fallas inesperadas hasta en un 55 % y tiempo de reparación en un 60 %.
- Disminución de costos y mano de obra.
- Incrementa la seguridad industrial y ambiental.
- Ahorros de energía al operar correctamente por mayor tiempo.
- Incremento en alrededor de un 30 % el TMEF¹.

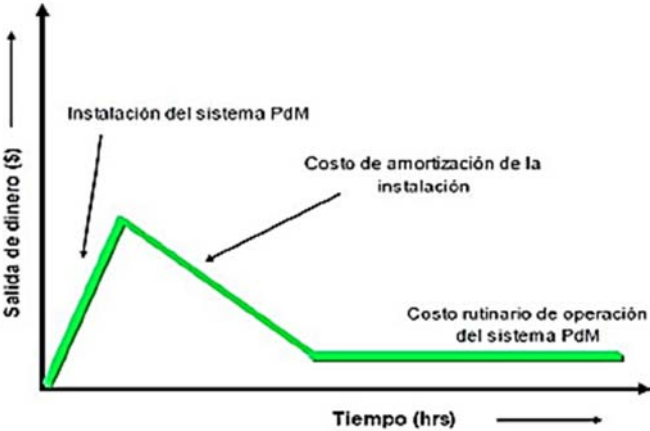
Además de los aspectos técnicos enumerados, también se cuenta con otros beneficios indirectos asociados a aspectos psicológicos del ser humano que pueden impactar incluso en el clima organizacional en una institución como son:

- Reducir el estrés asociado a los inconvenientes que existen en una planta de producción.
- Mayor tranquilidad ya que se conoce con mayor certeza la condición de los equipos, pudiendo anticiparse a catástrofes no previstas.
- Facilita el trabajo, ya que se direcciona la carga de trabajo a aquello que es considerado relevante que ha sido diagnosticado de forma predictiva.
- Más tiempo libre, ya que se reducen las actividades correctivas y preventivas.
- Mejores relaciones laborales, al mantener optimizados los aspectos antes descritos.

¹ RUIZ ACEVEDO, Ana. *Modelo para la implementación de mantenimiento predictivo en las facilidades de producción de petróleo*. p. 37.

Los ahorros reales pero intangibles provienen de la reducción del tiempo de inactividad por paros no programados, a pesar de que el costo de la implementación del mantenimiento predictivo es considerablemente alto, rápidamente se encuentra en un punto de amortización de la inversión, hasta que llega a un costo continuo catalogado como costo rutinario de operación donde su valor se vuelve constante a lo largo del tiempo como se puede observar en la figura 1.

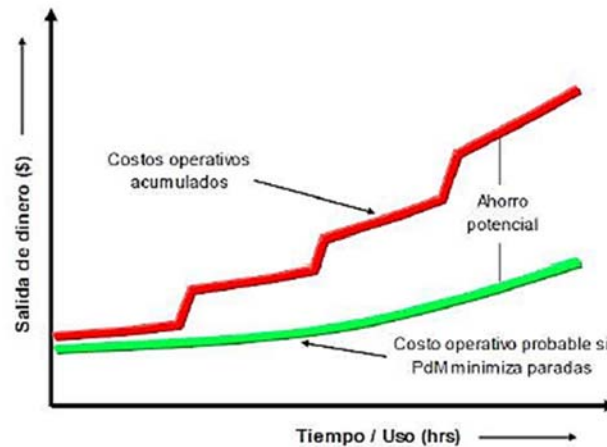
Figura 1. **Costo de instalación y operación**



Fuente: RUIZ ACEVEDO, Adriana. *Modelo para la implementación de mantenimiento predictivo en las facilidades de producción de petróleo.* p. 42.

Por otra parte, en la figura 2 se observa el ahorro potencial esperado al minimizar las paradas por la implementación de un sistema de mantenimiento predictivo.

Figura 2. **Ahorros potenciales generados por la implementación del mantenimiento predictivo**



Fuente: RUIZ ACEVEDO, Adriana. *Modelo para la implementación de mantenimiento predictivo en las facilidades de producción de petróleo*. p. 43.

1.4. Curva P-F

El mantenimiento de un activo, visto con un enfoque proactivo, inicia mucho antes de la instalación y construcción del mismo, por ende, debe tomarse en cuenta desde la etapa de diseño la filosofía de mantenimiento de los activos a llevarse a cabo; luego en las etapas de construcción y montaje deben de aplicarse las normas de control de calidad y aseguramiento, pasando luego hacia la puesta en marcha de los equipos.

A pesar de la aparente simpleza de la curva P-F, está sigue siendo desconocida por muchos profesionales del área de mantenimiento. El correcto conocimiento de la curva P-F es imprescindible ya que, si no se tienen claros estos conceptos, no será posible aplicar las estrategias aconsejadas por el

mantenimiento basado en condición, que a su vez son la base para la optimización de los planes de mantenimiento.

En la curva P-F de la figura 3, se representa en el eje X el tiempo de vida u operación de un equipo o componente de máquina, por su parte en el eje Y se representa la resistencia a la falla. Por ende, la curva P-F muestra el proceso de cómo una falla comienza y prosigue su deterioro hasta un punto en el cual puede ser detectado. A partir de allí, si no se detecta y no se toman las acciones adecuadas, continuará el deterioro, a veces a un ritmo acelerado, hasta alcanzar el punto de falla funcional.

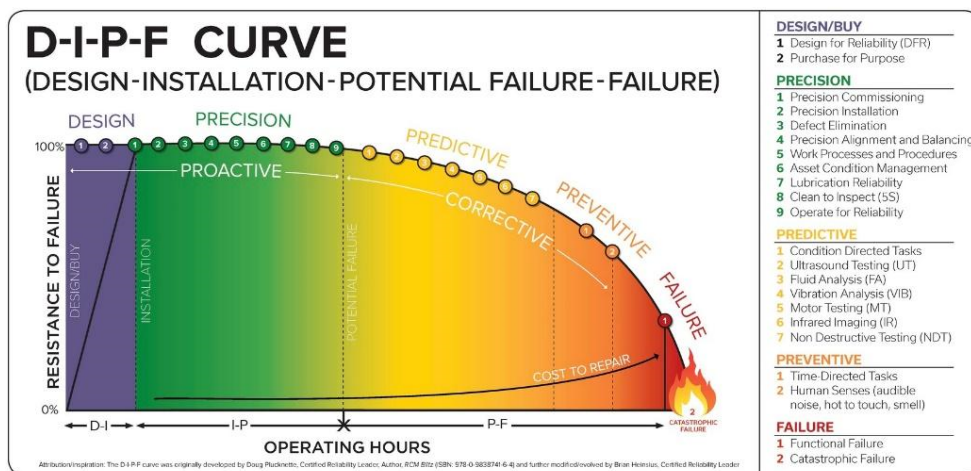
Comenzando en la parte superior izquierda de la curva y moviéndose hacia la derecha nos encontramos previo al punto I la etapa de diseño e instalación; el punto I es considerado como el momento de puesta en marcha, avanzando hacia la derecha en la curva observamos el punto FSP, que se conoce como el punto donde se produce la falla, sin embargo, esta no es identificable aún ya que no es detectable, seguidamente a este punto nos encontramos con el punto P, donde la falla es detectada mediante la utilización de alguna técnica predictiva, prueba o inspección este punto es conocido como fracaso potencial. Cuando continuamos moviéndonos a la derecha por esta curva, la resistencia al fracaso continúa cayendo hasta que encontremos el punto F, conocido como fracaso funcional, este es el punto en el tiempo cuando la resistencia del componente o equipo empeora a un punto donde desempeñar su función destinada se ve comprometida; y por último tenemos el punto TF que se define como el momento donde la máquina alcanza su fallo total siendo a veces catastrófico.

La curva P-F básicamente busca gestionar las posibles fallas a medida que pasan a ser fallas funcionales con las técnicas predictivas más adecuadas según la fase en la que se encuentra la falla, buscando prolongar el tiempo hacia la falla

o determinar el momento óptimo para planificar el cambio de la pieza o equipo con falla, cabe destacar que ninguna de las actividades realizadas una vez desarrollada la falla evitará que la misma ocurra, es decir, la falla es inevitable.

Al observar la curva P-F, apreciamos dos categorías principales de acción de confiabilidad en mantenimiento en las que se pueden enfocar los recursos, conocidas como el área P-F y el área I-P.

Figura 3. Curva P-F



Fuente: PLUCKNETTE, Douglas. *Expanding the Curve uptime magazine*.

www.reliabilityweb.com/assets/uploads/articles/10596/figure1-2.jpg. Consulta: abril 2018.

La única manera de prevenir la falla del equipo es realizar alguna acción previa a las posibles fallas a desarrollarse, es decir, durante el área I-P, esta área denota el intervalo de tiempo desde el momento en que el equipo fue instalado hasta el punto en el que comienza la falla. Generalmente en la cultura de confiabilidad se invierte más tiempo en el área P-F que en el área I-P, sin embargo, a medida que las organizaciones y los programas de mantenimiento

maduran, el área I-P adquiere mayor relevancia. Existen varias herramientas para combatir las posibles fallas desde esta área, sin embargo, quedan fuera del alcance del presente trabajo.

Como se mencionó previamente el área P-F es la porción que recibe la mayor parte de la atención, por ello se le conoce a esta curva con dicho nombre, en esta porción de la gráfica el defecto o falla del equipo ya ha comenzado, en esta área se trata predecir y detectar los modos de falla del equipo, de manera que las reparaciones se puedan realizar de manera planificada y previo a una falla funcional del equipo.

Las actividades en el área P-F incluyen esfuerzos de gestión de la condición de activos, tales como: análisis de ultrasonido, análisis de vibraciones, análisis de lubricante, termografía infrarroja y algunos otros elementos de confiabilidad, una buena implementación de estas herramientas junto a una buena gestión de la zona P-F nos arroja los intervalos de tiempo óptimos para ejecutar cada actividad predictiva e identificar cuáles de estas actividades son las mejores a aplicar a cierto activo.

Se da por hecho que siempre existen parámetros de supervisión de modos de falla para que pueda componerse la curva P-F, pero esto no siempre es así. A veces no existe ningún parámetro de supervisión que indique cómo el fallo potencial va evolucionando. En ese caso no es posible aplicar la estrategia predictiva y se tendrán que buscar otras opciones. En otras ocasiones la velocidad de evolución al fallo es tan rápida que, aunque es posible configurar la curva P-F, el intervalo entre P y F es tan corto que no se puede dar un aviso para actuar con la antelación suficiente. Por su parte, a veces los costos del monitoreo no se compensan con los beneficios que produce la detección temprana de los fallos en desarrollo.

Asimismo, se concluye que la idea de implementar un mantenimiento basado en condición se basa en las siguientes ideas o conceptos.

La existencia de parámetros indicadores de modos de fallo que sirvan para la supervisión y el diagnóstico predictivo de la máquina.

- Que el desarrollo de la falla no siga un patrón de desgaste uniforme, sino aleatorio.
- La inversión en el monitoreo de la máquina se recupere. La curva P-F refleja perfectamente cuándo, cómo y, sobre todo, por qué debe aplicarse la estrategia predictiva para la optimización de los planes de mantenimiento.

1.5. Análisis de vibraciones

Como observamos previamente el análisis de vibraciones es considerado una herramienta predictiva que probablemente sea la que mayor implementación tenga en los programas de monitoreo de condición, esto debido al amplio espectro de fallas que se pueden detectar, así como el amplio rango de la curva P-F que cubre pudiendo monitorear una falla desde su inicio hasta que se produzca la falla total.

La vibración en toda maquinaria es causada por una fuerza de excitación, esta fuerza puede ser originada por el contacto entre los componentes internos de la máquina o por fuerzas externas asociadas al entorno en el que se encuentra.

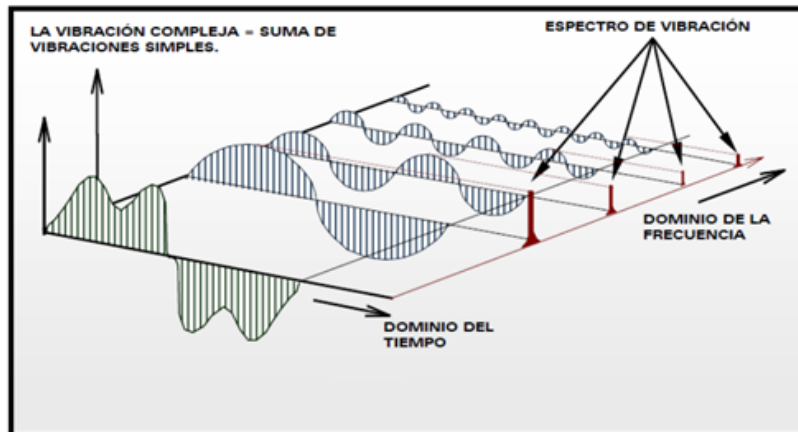
De manera inherente, todo mecanismo vibra por la naturaleza de sus componentes, sin embargo, las consecuencias de las vibraciones excesivas son

el aumento de los esfuerzos y las tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales, daños por fatiga de los materiales, además de ruidos molestos en el ambiente laboral, entre otros.

Todo equipo encierra una interesante historia que cuenta la vibración, por ende, un análisis detallado de la vibración puede apoyar en detectar una falla y evaluar su severidad.

La vibración es expresada como la sumatoria de ondas armónicas simples en una onda de tiempo compleja la cual generalmente es obtenida mediante un transductor o sensor de vibración y convertida a una señal de voltaje que luego es procesada por un analizador de vibraciones generalmente utilizando la transformada rápida de Fourier para brindar a su vez un gráfico más sencillo de entender y analizar que se conoce como espectro de frecuencia como se muestra en la figura 4. Este espectro busca descomponer cada onda individual que conforman la onda de tiempo compleja adquirida por los sensores de vibración, brindándonos los datos de frecuencia y amplitud, los cuales nos proporcionan la información necesaria para definir la posible falla en el equipo y el nivel de severidad que esta presenta.

Figura 4. **Señales en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia**



Fuente: A-MAQ S.A. *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*, p.14.

Más adelante observaremos como esta descomposición de la señal compleja junto a una técnica de procesamiento de señal nos da un espectro de frecuencia más detallado que nos brinda la información necesaria para visualizar las frecuencias de falla propias de los rodamientos para así poder determinar el tipo de falla y la severidad de la misma.

2. RODAMIENTOS

2.1. Tipos de rodamientos

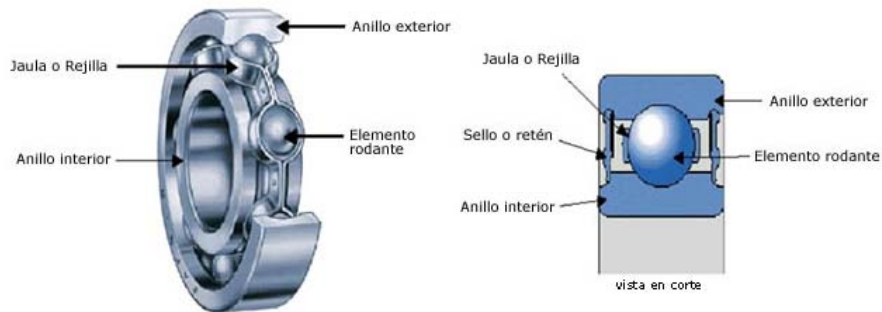
Las maquinas rotativa basan el éxito de su operación en los componentes que brindan la rotación, es decir, el rodamiento en su conjunto.

La función de los rodamientos es soportar las cargas estáticas y dinámicas del equipo, así como mantener la posición del eje. La identificación oportuna de fallas en rodamientos antes de interrumpir la operación o afectar la calidad del producto, es la base para la mayoría de los programas de mantenimiento predictivo.

La eficiencia de transmisión de potencia, nivel de ruido, durabilidad y fiabilidad son elementos claves a considerar en la elección adecuada de un rodamiento, existen diversos tipos de rodamiento los cuales se emplean según la aplicación requerida, por ende, la elección del rodamiento idóneo en cada elemento rotativo es fundamental para mejorar el rendimiento y funcionamiento de la máquina.

En general, los rodamientos están formados por dos anillos también conocidas como pistas de rodadura, los elementos rodantes, y una jaula también conocida como rejilla y canastilla como se observa en la figura 5. Los rodamientos se clasifican según la dirección de carga principal, así como del tipo y ángulo de contacto de los elementos rodantes que los conforman.

Figura 5. **Componentes de un rodamiento**



Fuente: Aficionados a la mecánica. *Componentes del rodamiento*.

www.aficionadosalamecanica.com/images-hazlo/rodamiento-elementos.jpg. Consulta: abril 2016.

Para fines prácticos y debidos a que la clasificación de los rodamientos no es el tema principal de la presente obra, los rodamientos se clasificaran principalmente según la dirección en que actué la carga, como:

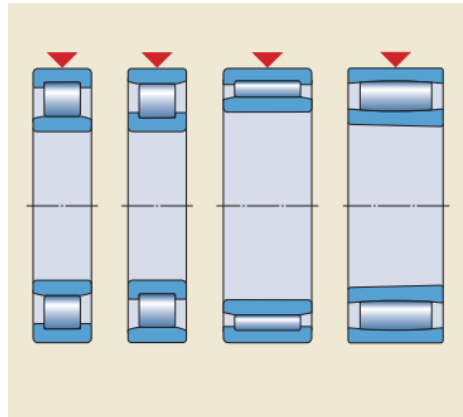
- Radiales
- Axiales
- Mixtas

2.1.1. Radiales

Los rodamientos de bolas, rodillos cilíndricos de diseño NU y N, los rodamientos de agujas y los rodamientos toroidales, solo pueden soportar cargas puramente radiales. El resto de rodamientos radiales pueden soportar algunas cargas axiales además de las cargas radiales con sus correspondientes limitaciones de carga².

² SKF GROUP. *Rodamientos*. p. 52.

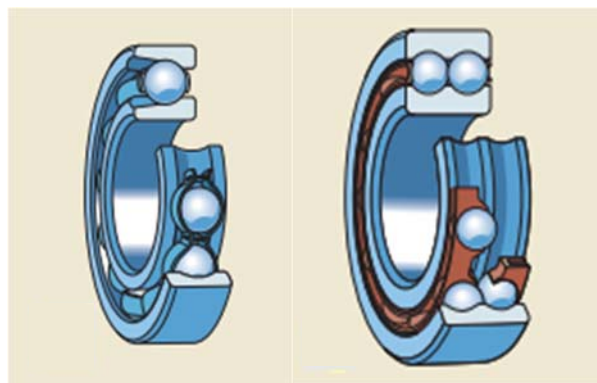
Figura 6. **Rodamientos radiales tipo NU, N, de agujas y toroidales**



Fuente: SKF GROUP. *Manual de rodamientos*. p. 48.

Los rodamientos rígidos de bolas y de doble hilera de bolas mostrados en la figura 7, son de los más empleados para el soporte de cargas radiales considerablemente grandes además de ser adecuados para trabajar a altas revoluciones, requieren poco mantenimiento y son de bajo costo.

Figura 7. **Rodamientos de bola de una y doble hilera**



Fuente: SKF GROUP. *Manual de rodamientos*. p. 35.

Los rodamientos de bolas a rótula de la figura 8 tienen la propiedad de ser autoalineables, lo que permite desviaciones angulares del eje con relación al soporte. Son especialmente adecuados para aplicaciones en las cuales se pueden producir desalineaciones por errores de montaje o por flexión del eje.

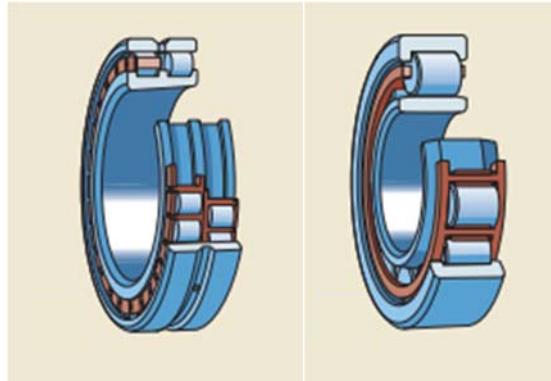
Figura 8. **Rodamientos de bola a rótula**



Fuente: SKF GROUP. *Manual de rodamientos*. p. 26.

Para altas velocidades y grandes cargas radiales, se utilizan los rodamientos de rodillos cilíndricos, como los de la figura 9. Estos encuentran su aplicación en máquinas herramientas y trenes de laminación. Su capacidad de absorber las desalineaciones angulares del aro interior con respecto al exterior está limitada.

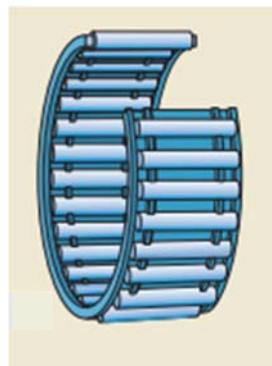
Figura 9. **Rodamientos de rodillos cilíndricos**



Fuente: SKF GROUP. *Manual de rodamientos*. p. 29.

Los rodamientos de aguja en la figura 10, son rodamientos de rodillos cilíndricos cuyos rodillos se caracterizan por ser finos y largos en relación a su diámetro, por lo que se les suele denominar como agujas; a pesar de la sección transversal tan pequeña de estos rodamientos, tienen una gran capacidad de carga radial, por tanto, son particularmente adecuados para aquellas disposiciones en las que se tiene de un espacio radial limitado.

Figura 10. **Rodamientos de agujas**



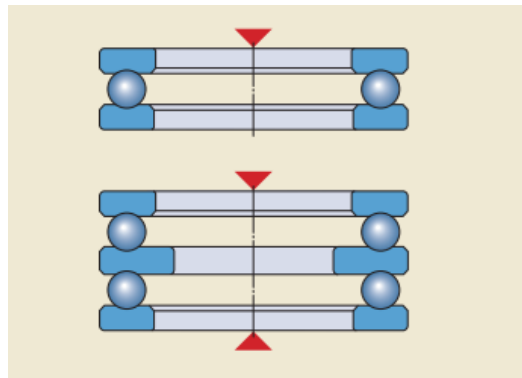
Fuente: SKF GROUP. *Manual de rodamientos*. p. 30.

2.1.2. Axiales

Pueden soportar cargas que actúan únicamente en la dirección del eje de rotación. A su vez pueden ser rodamientos de simple efecto, que pueden recibir cargas axiales en un sentido, y rodamientos de doble efecto, que pueden recibir cargas axiales en ambos sentidos³.

Los rodamientos axiales de bolas y los rodamientos de bolas con cuatro puntos de contacto son adecuados para cargas ligeras o normales puramente axiales.

Figura 11. **Rodamientos axiales de simple y doble efecto**

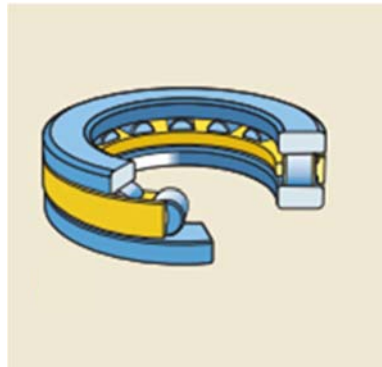


Fuente: SKF GROUP. *Manual de rodamientos*. p. 48.

Los rodamientos axiales de rodillos cilíndricos como el de la figura 12 son de simple efecto. Estos son adecuados para disposiciones que tengan que soportar grandes cargas axiales y en las que se requiera insensibilidad a las cargas de choque, rigidez y un espacio axial mínimo. Se emplean principalmente cuando la capacidad de carga de los rodamientos axiales de bolas es inadecuada.

³ SKF GROUP. *Rodamientos*. p.52.

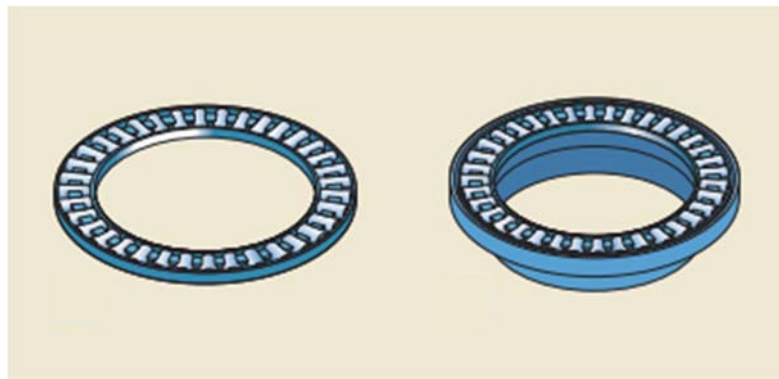
Figura 12. **Rodamiento axial de rodillos cilíndricos**



Fuente: SKF GROUP. *Manual de rodamientos*. p. 34.

Los rodamientos axiales de agujas de la figura 13 son de simple efecto. Estos soportan grandes cargas axiales, son insensibles a las cargas de choque y proporcionan disposiciones rígidas de rodamientos que requieren un espacio axial mínimo. Para un mismo diámetro interior, los rodamientos de agujas requieren menor espacio axial comparado con un rodamiento de rodillos cilíndricos.

Figura 13. **Rodamientos axiales de agujas**



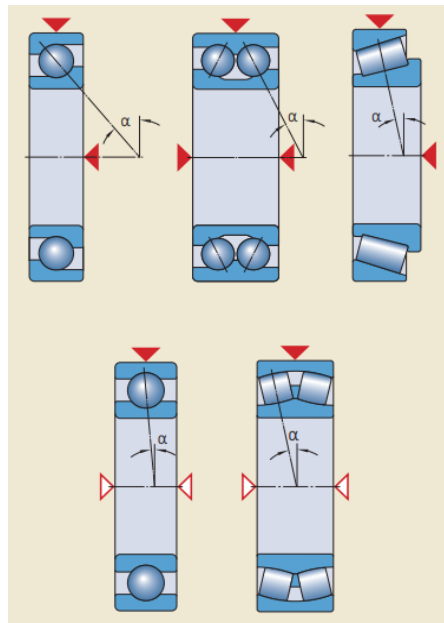
Fuente: SKF GROUP. *Manual de rodamientos*. p. 34.

2.1.3. Mixtas

Una carga combinada consta de una carga radial y una carga axial que actúan simultáneamente. La capacidad de un rodamiento para soportar una carga axial se determina mediante el ángulo de contacto, cuanto mayor sea dicho ángulo, mayor será la capacidad de carga axial del rodamiento.

Para las cargas combinadas, se usan principalmente los rodamientos de una y de dos hileras de bolas de contacto angular y los rodamientos de una hilera de rodillos cónicos, asimismo los rodamientos de bolas a rótula y los rodamientos de rodillos cilíndricos de diseño NJ, NU y NUP con aros angulares HJ, también se pueden utilizar cuando las cargas combinadas tienen un componente axial relativamente pequeño, en la figura 14 se muestran estas disposiciones⁴.

Figura 14. Disposiciones de ángulo para rodamientos de cargas mixtas



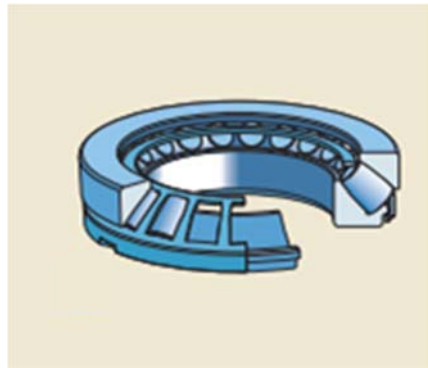
Fuente: SKF GROUP. *Manual de rodamientos*. p. 50.

En los rodamientos axiales de rodillos a rótula de la figura 15, la carga se transmite de un camino de rodadura al otro formando un ángulo con el eje del

⁴ SKF GROUP. *Rodamientos*. p.54.

rodamiento. Por consiguiente, a diferencia de todos los demás rodamientos axiales; los de rodillos a rótula son adecuados para absorber cargas radiales y axiales simultáneamente. Otra característica de estos rodamientos es su propiedad de autoalineación, lo cual los hace insensibles a las flexiones del eje y a los errores de alineación entre eje y alojamiento.

Figura 15. **Rodamiento axial de rodillos a rótula**



Fuente: SKF GROUP. *Manual de rodamientos*. p. 34.

2.2. Causas de falla en rodamientos

Según datos de SKF uno de los mayores fabricantes de rodamientos en el mundo cada año se fabrican un estimado de 10 billones de rodamientos alrededor del mundo donde únicamente un 0,5 % aproximadamente son reemplazados por cumplir con su vida útil estipulada, un 9,5 % son cambiados debido rutinas de mantenimiento preventivo mientras que un 90 % se estima que no llegan a su tiempo de vida estipulado fallando antes del mismo, esto derivado de las siguientes estadísticas:

- 16 % Fallas por montaje incorrecto.
- 36 % Fallas por lubricación inadecuada.
- 14 % Fallas por contaminación en el lubricante.
- 34 % Fallas por Fatiga⁵.

⁵ SKF GROUP. *Daños de rodamientos y análisis de fallas*. p. 6.

Los datos varían conforme al tipo de industria al que se refieren, pero generalizando su comportamiento es como el descrito con anterioridad; por tanto, la vida de servicio de un rodamiento puede ser alcanzada o excedida dependiendo de múltiples factores.

Un rodamiento no puede girar eternamente a menos que las condiciones de funcionamiento sean ideales y no se alcancen las cargas de límite de fatiga del material, en el cual son diseñados los componentes del rodamiento, lo cual es imposible en la realidad, antes o después de la vida útil estipulada del rodamiento este fallará por fatiga. El lapso de tiempo hasta que aparezca el primer signo de fatiga, es función del número de revoluciones a las que se somete el rodamiento, así como de la magnitud de la carga, la fatiga es el resultado del esfuerzo de cortadura que surge cíclicamente debajo de la superficie que soporta la carga, tras un determinado tiempo los esfuerzos causan grietas que se van extendiendo gradualmente hasta la superficie.

Conforme los elementos rodantes alcanzan los fragmentos agrietados del material, estos se van rompiendo produciendo un desconchado o descascarillado conocido por su término en inglés como *spalling*. El *spalling* es un proceso continuo y relativamente prolongado que anuncia su presencia por el incremento en los niveles de ruido y vibración en el rodamiento. En consecuencia y por regla general hay mucho tiempo para preparar el cambio en el rodamiento. La vida del rodamiento se define como el número de revoluciones que el rodamiento puede efectuar, antes de que se produzca el descascarillado incipiente.

Independientemente de las posibles fallas intrínsecas que pueden producirse en un rodamiento a causa de su fatiga, desgaste y mal cuidado durante su operación deben de tomarse en cuenta otros factores que se detallan a continuación:

Únicamente los rodamientos fabricados bajo los mayores estándares de calidad pueden proveer y garantizar una larga vida de servicio, por eso es sumamente importante comprar rodamientos de las marcas más reconocidas mundialmente, ya que así aseguramos su calidad, debido a que la mayoría de estas empresas basan sus procesos de fabricación bajo normativas internacionales como la ISO 9001 para cumplir con los estándares de calidad que son requeridos por la industria.

El tema del adecuado almacenaje de los rodamientos es crucial, por tanto un correcto manejo en el inventario de repuestos es sumamente importante garantizando así que tener rodamientos “frescos” en nuestro almacén, reduciendo las posibilidades de encontrarnos con un rodamiento deficiente debido al tiempo y modo en que ha sido almacenado, esto es particularmente importante en rodamientos sellados ya que estos son lubricados en fabrica y la grasa cuenta con tiempo de vida, cabe resaltar que los rodamientos fabricados con la más alta tecnología actual tienen un mayor tiempo de vida que los fabricados hace 15 años.

Otro factor importante que puede afectar la vida útil de los rodamientos sin notarlo, es que no se utiliza el rodamiento correcto para la aplicación requerida, ya sea por la maquina o proceso en el que el rodamiento es utilizado, factores como temperatura, carga y velocidad entre otros que afectan en la disposición final de un rodamiento.

Los rodamientos únicamente funcionarán correctamente si estos son montados adecuadamente con la herramienta y el cuidado adecuado, los métodos inapropiados de montaje pueden dañar fácilmente el rodamiento causando su daño prematuro, por tanto, la recomendación es siempre seguir las sugerencias del fabricante en cuanto a la instalación de su rodamiento.

Por último, el tema de los sellos en los rodamientos debe de ser sumamente analizado y estudiado, ya que el propósito de los sellos es mantener al lubricante dentro y los contaminantes fuera del rodamiento por lo cual, el daño en un rodamiento puede producirse si la aplicación del sello no es la adecuada o el sello es incorrecto para el montaje realizado.

2.3. Que buscar durante el funcionamiento de los rodamientos

Debemos de monitorear los parámetros importantes que sean un indicador de la correcta operación del equipo; en el monitoreo de la condición de rodamientos se monitorea el ruido, la temperatura y vibración principalmente, para ello nos podemos valer de nuestros sentidos ya que los sentidos entrenados de un operador pueden percibir cuando un ruido no es habitual o sentir temperaturas y vibraciones anormales a la operación correcta del equipo, cabe destacar que llegar a este nivel de experiencia conlleva mucho tiempo y en ello no deja de haber una limitación de la capacidad de los sentidos humanos, a su vez al lograr percibir con los sentidos ruidos, temperatura o vibración generalmente la falla va en su etapa final como observamos en la curva P-F, a su vez la utilización de los sentidos no es completamente exacta, sin embargo, en muchos casos es una opción funcional que puede apoyarnos en detecciones tempranas de fallas en rodamientos.

En programas de monitoreo de condición con mayor solidez se elimina el factor humano de percepción debido a que mientras a un operador le parece una temperatura, ruido o vibración anormal a otro operador de la misma planta le puede parecer algo normal; estos programas buscan establecer rutinas de mantenimiento programadas conocidas como VOSO apoyando a los operadores con herramientas tecnológicas más avanzadas que proporcionan datos cuantificables de los valores de interés; en el caso del ruido por ejemplo se aplica

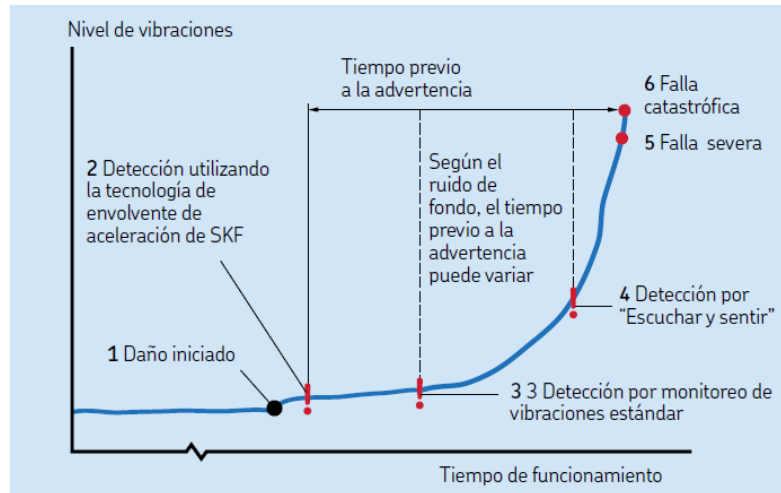
la técnica de ultrasonido y se miden generalmente decibeles, en el caso de la vibración se utilizan vibrómetros portátiles que arrojan un valor global de vibración en mm/s u otra unidad de medida, mientras que para la medición de temperatura se utilizan pirómetros que nos brindan valores en grados Celsius u otra unidad; brindando así un valor numérico que puede utilizarse para la comparación entre equipos con operación o características similares así como comparar con mediciones anteriores sobre los mismos equipos y observar cambios en el comportamiento tendencial a través del tiempo, brindándonos apoyo para evaluar la severidad en la condición de un equipo, esto nos brinda la posibilidad de detectar una falla en su etapa temprana para poderle dar un correcto seguimiento y gestión a la misma.

La figura 16 muestra el progreso del daño de un rodamiento:

- El cojinete exhibe un desgaste abrasivo incipiente.
- Primer spall, detectado por aceleración envolvente.
- El spalling se ha desarrollado hasta el punto de que el daño puede ser detectado por monitoreo de vibraciones.
- El spalling avanzado causa una alta vibración, elevados niveles de ruido y un aumento en la operación temperatura.
- Se produce daño severo, fractura por fatiga del anillo interior del rodamiento.
- Falla catastrófica se produce con posibles daños secundarios a otros componentes⁶.

⁶ SKF GROUP. *Daños de rodamientos y análisis de fallas*. p.9.

Figura 16. Progreso de daño en un rodamiento



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 8.

2.3.1. Inspecciones durante la operación

El método más común de identificar irregularidades en el funcionamiento de un rodamiento consiste en escucharlo, el sonido ultrasónico que emiten puede ser escuchado mediante un equipo de ultrasonido electrónico que nos permita detectar cualquier ruido anormal e incluso localizar el componente dañado que produce el ruido, los rodamientos en buenas condiciones de funcionamiento

emiten un zumbido suave que se asemeja al correr de un río, mientras que cuando crujen, producen un suave ronroneo, rechinan, o emite sonidos irregulares generalmente son síntomas que está funcionando mal.

Los rodamientos tienden a emitir sonidos irregulares como consecuencia de una lubricación deficiente, también pueden producir un ruido cuando existe suciedad dentro del lubricante y las superficies de contacto rozan con la suciedad ocasionando ruidos fuertes e irregulares, mientras que si el rodamiento no tiene el juego interno adecuado puede producirse un sonido metálico denotando contactos metal con metal, por su parte las indentaciones en la pista de rodadura del aro exterior causan vibraciones que resultan en un sonido claro y suave; por último los daños sobre los aros que se provocan por golpes durante el montaje o las ralladuras pueden originar a su vez ruidos que varían según la velocidad de giro del rodamiento.

No cabe duda que el daño del rodamiento se puede detectar escuchando el ruido emitido, sin embargo, cuando esto ocurre el rodamiento esta tan dañado que hay que cambiarlo a la brevedad posible; cabe resaltar que los dispositivos de ultrasonido ofrecen diagnósticos más precisos y seguros que el método empírico de colocar la punta de un destornillador u otro componente sobre el soporte del rodamiento y colocar el oído en el otro extremo.

A pesar que escuchar un rodamiento mediante un equipo de ultrasonido puede permitirnos tener un acercamiento oportuno a la condición del mismo, cabe resaltar que esta herramienta se encuentra en la etapa temprana de la curva P-F por tanto la medición de vibración suele ser otra herramienta considerablemente útil para el seguimiento de una falla, la esencia del monitoreo de vibraciones surge partir de los siguientes tres hechos:

- Toda máquina vibra.
- Por lo general el comienzo de un problema mecánico es acompañado por un aumento en los niveles de vibración.
- La naturaleza de la falla puede ser determinada.

El monitoreo de temperatura de los rodamientos en funcionamiento suele ser otra herramienta de gran apoyo ya que generalmente si las condiciones de operación de un equipo no han sido alteradas, un aumento en los valores de temperatura es a menudo una indicación de un funcionamiento anormal que puede referirse a un inminente daño del rodamiento.

Las temperaturas elevadas pueden ser perjudiciales principalmente para el lubricante y sellos, llegando incluso a afectar el ajuste u holguras entre partes del rodamiento debido a la dilatación térmica que puedan sufrir por tanto el valor que debería de alarmar un mal funcionamiento de un rodamiento debe ir ligado al componente que resista la menor temperatura de operación, es decir, la temperatura a partir de la cual se pone en riesgo la operación del componente.

Se debe tomar en cuenta que al realizar la medición de temperatura por fuera de una carcasa donde se aloja un rodamiento debe considerarse que la temperatura interna del mismo es aún mayor, es decir al valor obtenido sobre la carcasa se deberá aumentar de entre 15 a 20 °C más para estimar la temperatura real interna del rodamiento.

Un prolongado funcionamiento a temperaturas superiores a 125 °C puede acortar la vida útil del rodamiento. Entre las principales causas que provocan altas temperaturas en los rodamientos podemos citar el exceso o falta de lubricante, siendo el exceso el más común, las impurezas que puedan encontrarse en el

lubricante, las sobrecargas, el daño del rodamiento, la falta de holgura y el exceso de rozamiento en los sellos.

Por tanto, se hace necesario comprobar la temperatura constantemente tanto en el propio rodamiento como en otros componentes vitales.

Los equipos considerados como críticos en una planta, deben idealmente estar equipados con una sonda térmica.

Cabe destacar que, tras la lubricación de los rodamientos, es perfectamente normal que se produzca un aumento de la temperatura por espacio de uno o dos días.

Un rodamiento lubricado de forma correcta que se encuentra adecuadamente protegido contra la humedad y suciedad no debe presentar problemas de contaminación y desgaste. No obstante, es aconsejable comprobar visualmente los rodamientos al descubierto y comprobar periódicamente la condición de los sellos. La comprobación de las condiciones de los sellos nos asegura que estos no permitan la entrada de calor, líquidos o gases corrosivos a lo largo del eje. Para asegurar el máximo de protección, los collares de protección y los sellos de laberinto se deben mantener engrasados. Los sellos de fieltro y de caucho que están gastados se deben cambiar lo antes posible.

Además de evitar la entrada de suciedad los sellos también son importantes para que el soporte del rodamiento retenga el lubricante, cualquier fuga de lubricante en los lugares donde están colocados los sellos se deben inspeccionar inmediatamente para ver si los sellos están gastados, defectuosos o han perdido su ajuste correcto de diseño. Las fugas también pueden ser resultados de la pérdida de ajuste de la junta entre las superficies de contacto del soporte del

rodamiento, y de la descomposición de la grasa que se disuelve y suelta aceite base.

Los rodamientos solo pueden lograr el máximo rendimiento con niveles de lubricación adecuados, por tanto, el método, así como los planes de lubricación deben ser supervisados y optimizados constantemente.

En un principio se debe utilizar la grasa o aceite recomendado por el fabricante, así como cantidades y frecuencias de engrase, sin embargo, con la herramienta de ultrasonido podría modificarse y optimizar los intervalos recomendados por el manual del fabricante, basándose en una estrategia de lubricación según condición, es decir, escuchando el rodamiento e identificar cuando es el momento más óptimo para lubricar, así como la cantidad justa de lubricante a aplicar.

Periódicamente se debe eliminar la grasa ya usada o purgarla a través de los drenes. Deben limpiarse completamente los alemites antes de inyectar grasa nueva. Si no se dispone de drenes será necesario desmontar la tapa frontal o posterior del alojamiento para eliminar la grasa ya usada y a continuación se deberá aplicar grasa nueva.

Para el caso de rodamientos lubricados con aceite se debe comprobar su nivel de aceite, a su vez debe observar que el orificio de aireación no este obstruido o a la intemperie sin protección; es prudente tomar una pequeña muestra del aceite y compararla con aceite nuevo, si la muestra tiene un aspecto turbio es prueba de que se ha mezclado con agua y debe sustituirse, por su parte si se encuentra espeso o tiene un color oscuro puede ser por la presencia de suciedad, o que esté ha comenzado a quemarse. En estos casos se deberá

sustituir el aceite completamente y de ser posible limpiar el rodamiento con aceite limpio.

Un método más fiable para determinar el estado de un aceite es el análisis fisicoquímico del mismo en un laboratorio certificado para ello, si el aceite se encuentra con contaminación puede ser necesario el cambio de los sellos o la instalación de un elemento filtrante.

Los sistemas automáticos de lubricación deben ser comprobados para asegurar que funcionen correctamente rellenándolos periódicamente de aceite o grasa y asegurándose que emitan la cantidad correcta de lubricante.

2.3.2. Inspecciones durante un paro

Cuando un equipo deja de funcionar, es una oportunidad de evaluar el estado de los rodamientos, sellos, juntas de protección, lubricante, eje y carcasas. Una inspección general a menudo puede ser realizada retirando tapas de la carcasa. Si un rodamiento da indicios de presentar algún tipo de daño, debería ser desmontado e inspeccionado a fondo.

Al inspeccionar un rodamiento montado es recomendable limpiar la superficie externa de la máquina, tomar muestras de lubricante para observar o analizar su estado enfocándose principalmente en la presencia de contaminantes, limpiar con un paño que no deje residuos la superficie externa de los rodamientos y buscar grietas, ralladuras, corrosión o algún síntoma de falla; por su parte para rodamientos con sellos se deberá revisar la condición de los mismos, en caso de ser necesario se deberá limpiar el rodamiento con un solvente especial para medir el juego radial interno y confirmar que se encuentre dentro de tolerancia.

La alineación de ejes y poleas, así como una inspección de la base sobre la que va montada la máquina y el exterior de la misma, se debe realizar también al parar una máquina, cualquier condición, como un alza o una base deteriorada, pueden afectar negativamente el rendimiento de la máquina, afectando directa o indirectamente a los rodamientos, por tanto, cuanto antes se identifique cualquier problema, también con mayor prontitud se ejecuta la acción correctiva. Es mucho menos costoso reemplazar rodamientos en horario de paro programado que durante la operación.

2.4. Síntomas de falla en rodamientos

Los síntomas de problemas en los rodamientos generalmente pueden ser reducidos a algunos cuantos, que se enumeran a continuación en la tabla 1.

Tabla I. Síntomas de falla en rodamientos

Síntoma	Problema	Posible causa
Exceso de calor	Problemas de lubricación	<ul style="list-style-type: none"> • Lubricante insuficiente. • Exceso de lubricante. • Tipo de lubricante inadecuado para la aplicación. • Sistema de lubricación erróneo.
	Condición de los sellos	<ul style="list-style-type: none"> • Ajuste con la carcasa muy ajustado. • Múltiples sellos debido al arreglo de montaje. • Desalineamiento entre alojamientos de los rodamientos. • Operación de velocidad elevada para los sellos. • Sellos lubricados incorrectamente. • Sellos orientados en dirección errónea.

Continuación de la tabla I.

	Ajuste incorrecto	<ul style="list-style-type: none"> • Mala elección del ajuste interno. • El material del eje se expande más que el acero del rodamiento. • Elevado diferencial de temperatura entre el eje y el alojamiento del rodamiento, donde el alojamiento se encuentra mucho más frío en el exterior que el eje. • Exceso de deformación en la curvatura del eje. • Alojamiento ovalado. • Ajuste excesivo de la interferencia del eje o elevada holgura del mismo. • El exceso de interferencia de la carcasa.
	Carga inadecuada del rodamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Rodamiento con demasiada carga debido a la modificación de un parámetro no propio para la aplicación de diseño del rodamiento. • Alineamiento paralelo y angular fuera de tolerancias. • Rodamiento instalado al revés • Condiciones de desbalance fuera de tolerancia. • Cargas de empuje excesivas. • Carga insuficiente. • Precarga excesiva.
Ruido excesivo	Contacto metal con metal	<ul style="list-style-type: none"> • Lubricación insuficiente. • Película de aceite muy delgada para las condiciones de operación. • Elementos rodantes deslizándose sobre las pistas en vez de rodar.

Continuación de la tabla I.

	Contaminación	<ul style="list-style-type: none"> • Abolladuras en pistas o elementos rodantes. • Laminaciones excesivas de sólidos contaminantes. • Ingreso de contaminantes. • Partículas sólidas dejadas en la carcasa desde la fabricación o montaje. • Contaminación de líquidos que reducen la viscosidad del lubricante.
	Ajustes demasiados holgados	<ul style="list-style-type: none"> • Anillo interior se arrastra sobre el eje. • Anillo exterior se arrastra sobre el alojamiento. • Tuerca de fijación del rodamiento floja en el eje o en el rodamiento. • Exceso de juego interno del rodamiento radial o axial.
	Daños superficiales	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste abrasivo por lubricación ineficaz. • Marcas en las pistas de rodadura debido a la vibración estática. • <i>Spalling</i> en pistas o elementos rodantes debido a la fatiga de material. • Daño en pistas de rodadura o elementos rodantes debido a contaminantes químicos líquidos. • <i>Spalling</i> en pistas o elementos rodantes por paso de corriente. • <i>Fluting</i> en pistas o elementos rodantes debido a paso de corriente.

Continuación de la tabla I.

	Rozamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Sellos mal instalados en el alojamiento del rodamiento. • Adaptador o manguito de desmontaje instalado incorrectamente. • Anillos espaciadores no apretados correctamente. • Cierre de las pestañas de arandela de sujeción.
Vibración excesiva	Contacto metal con metal	<ul style="list-style-type: none"> • Elementos rodantes deslizándose sobre la pista.
	Contaminación	<ul style="list-style-type: none"> • Contaminación del lubricante con sólidos. • Partículas sólidas presentes tras la manufactura o montaje del rodamiento y alojamiento, así como partículas presentes tras una falla previa del rodamiento.
	Perdida de ajuste	<ul style="list-style-type: none"> • Anillo interior se arrastra sobre el eje. • Anillo exterior se arrastra sobre el alojamiento.
	Daño superficial	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste abrasivo por lubricación ineficaz. • Marcas en las pistas de rodadura debido a la vibración estática. • <i>Spalling</i> en pistas o elementos rodantes debido a la fatiga de material. • Daño en pistas de rodadura o elementos rodantes debido a contaminantes químicos líquidos. • <i>Spalling</i> en pistas o elementos rodantes por paso de corriente. • <i>Fluting</i> en pistas o elementos rodantes debido a paso de corriente.

Continuación de la tabla I.

Excesivo juego del eje	Holgura	<ul style="list-style-type: none"> • Holgura de pista interna sobre el eje. • Excesiva holgura entre la pista externa y el alojamiento. • Rodamiento no ajustado correctamente sobre el eje o el alojamiento.
	Daños en la superficie	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste por lubricación ineficaz. • <i>Spalling</i> en pistas o rodamientos debido a la fatiga.
	Incorrecta tolerancia interna	<ul style="list-style-type: none"> • Rodamiento instalado con ajuste incorrecto. • Rodamiento suelto en el eje o alojamiento, debido al maquinado incorrecto con tolerancias incorrectas.
Resistencia al giro o eje atorado	Rodamiento precargado	<ul style="list-style-type: none"> • Mala elección del ajuste interno. • El material del eje se expande más que el acero del rodamiento. • Elevado diferencial de temperatura entre el eje y el alojamiento del rodamiento, donde el alojamiento se encuentra mucho más frío en el exterior que el eje. • Exceso de deformación en la curvatura del eje. • Ajuste excesivo de la interferencia entre el eje y el rodamiento o entre el rodamiento y el alojamiento. • Excesiva precarga debida a un montaje incorrecto.
	Arrastre de sellos	<ul style="list-style-type: none"> • Sellos demasiado apretados u otro material llena el sello. • Múltiples sellos en el rodamiento debido a su arreglo de montaje. • Desalineamiento de los alojamientos. • Sellos no lubricados adecuadamente.

Continuación de la tabla I.

	Diseño	<ul style="list-style-type: none">• Eje o alojamiento fuera de forma.• Alojamiento demasiado grande para los sellos.
--	--------	---

Fuente: elaboración propia.

2.5. Clasificación de los modelos de falla según ISO

Cada causa de falla muestra ciertas características y ciertos mecanismos de falla que pueden ser asociados a ciertos tipos de daño en el rodamiento, por tanto, al observar las fallas se puede tratar de definir la causa raíz de la misma. Debido a lo anterior y al gran número de fabricantes de rodamientos que existen, así como la abundancia de información de daños y fallos en rodamientos, nace la necesidad de estandarizar el conocimiento adquirido hasta el momento clasificando las fallas y terminología conocida; para optimizar dicha tarea la norma ISO 15243 fue publicada en 2004⁷.

Los modos de falla se dividen principalmente en seis, si bien hay otras razones que producen daños en rodamientos, como defectos de fabricación o diseño, estos se excluyen del alcance de la presente tesis.

2.5.1. Fatiga

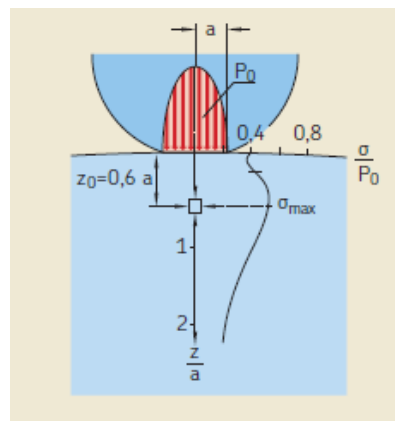
La mecánica de falla para la fatiga se considera como el proceso degenerativo de un material sometido a cargas cíclicas de magnitud menor de aquellas que pueden ocasionar una rotura inmediata del material mediante tracción, para el caso específico de rodamientos se puede definir de dos formas:

⁷ SKF GROUP. *Daños de rodamientos y análisis de fallas*. p.40.

Fatiga subsuperficial: cuando en un rodamiento los ciclos de estrés cambian y ocurren debajo de las superficies de contacto de las pistas de rodadura y los elementos rodantes.

Considerando que generalmente la pista interior de un rodamiento es la que rota con una carga radial actuando sobre ella, un punto particular de la pista entra a la zona de carga y continúa a través de la misma hasta alcanzar el punto máximo de estrés antes de salir de esta zona. Produciendo un continuo estrés de compresión y cortadura como se observa en la figura 17.

Figura 17. **Mecánica de falla para la fatiga subsuperficial**



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 42.

Dependiendo de la carga, temperatura y el número de ciclos de estrés durante un período de tiempo, hay una acumulación de tensiones residuales que hacen que el material cambie a una estructura de grano orientada al azar que resulta en la fractura de los planos cristalinos.

Estos planos subsuperficiales también llamados *microcracks* se desarrollan debajo de la superficie de la pista en la ubicación más débil de la zona de estrés máximo, típicamente a una profundidad entre 0,1 a 0,5 mm. La profundidad de estos *microracks* depende de la carga, material, limpieza, temperatura y la microestructura del acero, finalmente la grieta se propaga a la superficie produciendo *spalling*, tan pronto como se produce *spalling* el rodamiento ya se encuentra dañado, sin embargo, no significa que el rodamiento no pueda permanecer en servicio, no obstante el aumento gradual de este fenómeno aumenta el ruido y la vibración de la máquina, por ende las maquinas deben ser detenidas y reparadas antes del colapso, el período desde el inicio del daño hasta la falla depende del tipo de máquina y su operación.

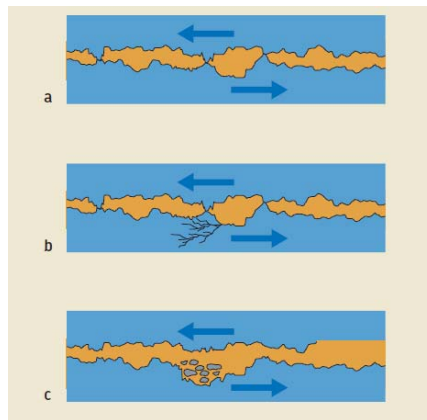
Fatiga superficial: se genera básicamente por el contacto entre los bordes ásperos de dos superficies separadas por una película de aceite, la cual por alguna circunstancia falla y se pierde, propiciando el contacto entre las superficies.

La lubricación inadecuada puede ser causada por un sin número de factores, la superficie puede dañarse por la contaminación del lubricante con partículas que producen una lubricación ineficiente, una película de lubricante inadecuada o incluso puede darse el caso que esta se rompa; esto también puede ocurrir si la cantidad o tipo de lubricante no es el apropiado para la aplicación, el contacto resultante metal con metal produce que la crestas que generan las rugosidades superficiales se corten unas con otras y junto al deslizamiento de las bolas sobre las pistas se crea un bruído sobre las mismas.

Otra causa frecuente de fatiga superficial es el uso de aditivo de extrema presión en el lubricante que puede tornarse agresivo especialmente a altas temperaturas acelerando el *microspalling*.

La fatiga superficial en general es la consecuencia del contacto entre las asperezas de dos superficies entrando en contacto directo bajo un régimen de lubricación marginal, produciendo a su vez fricción entre las partes llevando a una fatiga paulatinamente que dependerá de las condiciones de operación del equipo así como de las propiedades mecánicas de los materiales en contacto, lo que conlleva con el tiempo a que se produzcan desprendimientos de las asperezas produciendo partículas que generalmente tienen dimensiones de micras. En la figura 18. Se muestra la mecánica de falla para la fatiga superficial, en el inciso a se observa el régimen de lubricación marginal, que tras ciclos de carga y debido a las propiedades del material producen un aflojamiento o falla de la superficie como se observa en el inciso b generando las partículas de desprendimiento que se observan en el inciso c que más adelante veremos pueden ocasionarnos desgaste por abrasión.

Figura 18. **Mecánica de falla para la fatiga superficial**



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 44.

2.5.2. Desgaste

La mecánica de falla para el desgaste se puede definir como el daño superficial que sufren los materiales o la pérdida de material que ocasiona la disminución de dimensiones del componente y por ende pérdidas en la tolerancia de fabricación o ajuste, se puede definir de dos formas:

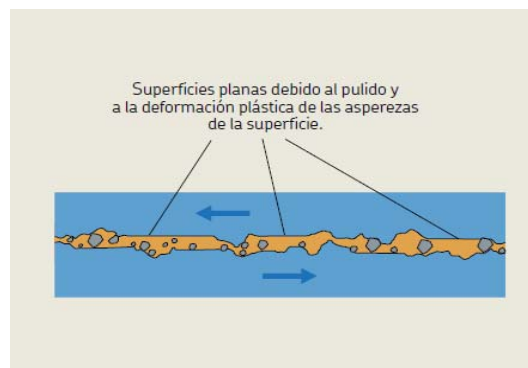
Desgaste abrasivo: es un desprendimiento de material progresivo en un rodamiento producido generalmente en el inicio de la etapa de rodaje produciendo un desgaste ligero, mostrando en su mayoría un patrón o marca característico, sin embargo, la mayor parte del tiempo el desgaste abrasivo ocurre debido a una lubricación inadecuada o por el ingreso de contaminantes sólidos como se observa en la figura 19, este tipo de desgaste se caracteriza generalmente por mostrar superficies opacas. El desgaste abrasivo es un proceso degenerativo que eventualmente destruye la microgeometría de un rodamiento ya que las partículas abrasivas reducen la eficiencia de lubricación, este tipo de desgaste puede desgastar rápidamente las pistas y los elementos rodantes así como los alojamientos de los elementos rodantes de la jaula, la cual es quizás la parte más crítica del rodamiento ya que es el componente con menor resistencia mecánica, debido a que las pistas y los elementos rodantes están endurecidos a aproximadamente 60 HRC, mientras que la mayoría de las jaulas están sin endurecer y pueden ser de materiales diferentes al acero.

Cabe resaltar que existe una variante especial de desgaste abrasivo conocido como desgaste pulido; si bien la superficie de las pistas de rodadura son brillantes no son altamente reflectivas como lo suelen ser las superficies pulidas, este tipo de superficies en los rodamientos se producen por una lubricación inadecuada causada por una delgada película de aceite y las partículas que se encuentran dentro de la misma actúan como agente pulidor, lo

cual actúa sobre los picos que producen la aspereza de las superficies produciendo así la extrema brillantez de las superficies, el nivel y ritmo de pulidez dependerá del tamaño de las partículas, su dureza y el tiempo de funcionamiento bajo estas condiciones.

Este nivel de desgaste abrasivo resulta de una combinación de factores como la viscosidad del aceite que puede ser demasiado bajo, un exceso de partículas abrasivas muy pequeñas en el aceite, pueden incluir una combinación de bajas velocidades, cargas pesadas y una insuficiente película de aceite, generalmente para evitar este tipo de daño se debe aumentar la viscosidad del lubricante y controlar la limpieza del mismo regularmente.

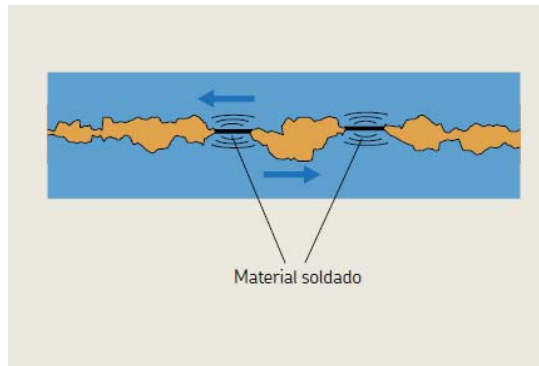
Figura 19. **Mecánica de falla del desgaste abrasivo**



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 47.

Desgaste adhesivo: es un tipo de daño relacionado a la lubricación que se produce entre dos superficies deslizantes que entran en contacto entre sí fusionándose una con otra como se muestra en la figura 20.

Figura 20. **Mecánica de falla del desgaste adhesivo**



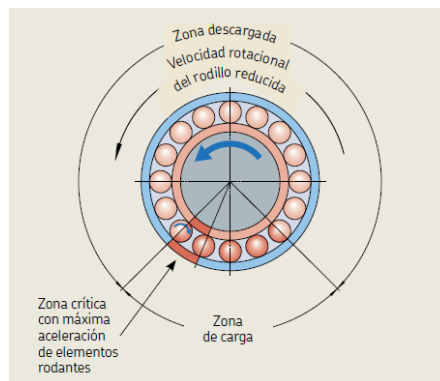
Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 48.

Se caracteriza por la transferencia de material de una superficie a otra y típicamente es acompañado por temperaturas altas producidas por la fricción, que en ocasiones puede templar o recocer las superficies de contacto de los componentes, a su vez el calor producido por la fricción produce concentraciones locales de estrés en algún punto de contacto donde pueden producirse grietas o desprendimientos en las mismas, esta condición no debe ser normalizada en condiciones de operación normales.

En la figura 21 se observa que el desgaste adhesivo se produce debido a una aceleración severa bajo ciertas condiciones, pudiendo ocurrir en las superficies de los elementos rodantes y las pistas de rodadura de rodamientos en operación a velocidades relativamente altas, esto debido a que fuera de la zona de carga, la rotación del elemento rodante es retrasada debido a que las pistas no conducen el elemento rodante, los cuales al entrar a la zona de carga se ven sometidos a una aceleración rápida repentinamente causando un deslizamiento que puede generar suficiente calor capaz de producir que las dos superficies de contacto se fundan llevando material de una superficie a otra, que

a su vez incrementa la fricción en la zona donde se produce el fenómeno. Durante este proceso también se produce un templado y endurecimiento del material que nos lleva a concentraciones locales de estrés y un alto riesgo de que se formen grietas, causando la falla prematura del rodamiento, las grietas pueden aparecer a 90° a la dirección de deslizamiento.

Figura 21. **Mecánica de adherencia al entrar a zona de carga**



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 48.

Este tipo de desgaste produce un tipo de superficie peligrosa ya que las superficies afectadas se tornan cada vez más ásperas, por ende, la rugosidad de la superficie aumenta disminuyendo a su vez el espesor de la película de aceite lo que aumenta el contacto metal con metal y el desgaste de los rodamientos convirtiéndose en un círculo vicioso. Los rodamientos grandes son bastante sensibles a este tipo de desgaste, debido a que el peso de los elementos rodantes se torna importante ya que se ralentizan fuera de la zona de carga, mientras que al reingresar a la zona de carga son acelerados instantáneamente a la velocidad de rotación y debido al peso del elemento rodante se produce un deslizamiento parcial.

En rodamientos de bolas, debido a los efectos giroscópicos, las bolas pueden cambiar su ángulo de contacto cuando están fuera de la zona de carga, pero son forzadas a su ángulo de contacto correcto al regresar a la zona de carga. Para solventar este problema se suele recurrir a aumentos de carga, la utilización de rodamientos más pequeños o con elementos rodantes más ligeros, aplicar recubrimientos protectores, utilizar una jaula diferente o la revisión del aceite o grasa utilizado en la aplicación.

2.5.3. Corrosión

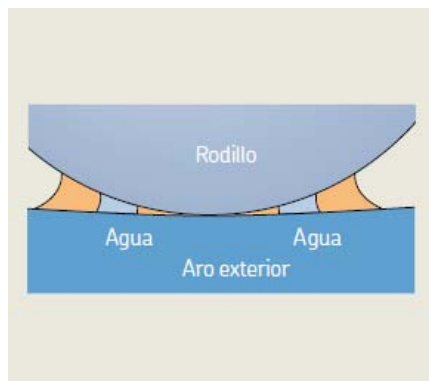
Los arreglos ineficientes de sellado en los rodamientos pueden permitir el ingreso al mismo de humedad, agua y contaminantes líquidos agresivos, ocasionando al entrar corrosión en la superficie de los componentes internos del rodamiento.

La corrosión es quizás la causa más común de falla prematura del rodamiento en la industria papelera y alimenticia, ya que los rodamientos en estas máquinas están expuestos al ingreso de agua y otros líquidos corrosivos que forman parte del proceso. Se definen dos modos de falla principales para la corrosión en rodamientos.

Corrosión por humedad: cuando un rodamiento está en reposo, el agua que se encuentre en el lubricante se acumulará en la parte inferior del mismo. La concentración de agua será mayor a una cierta distancia del contacto rodante como se alcanza a ver en la figura 22. La razón es debido a que el agua es más pesada que el aceite y se hundirá hasta que conforme una brecha adecuada entre el elemento rodante y el camino de rodadura, lo cual nos lleva a una corrosión profunda, llamada “grabado”. El grabado es incluso más probable que ocurra en aplicaciones donde se encuentren químicos agresivos y altas

temperaturas como en las secadoras de papel. El grabado suele llevar a desprendimientos prematuros ya que el material es sometido a un cambio estructural y la superficie en la zona de carga se reduce a tal punto que ocurre una sobrecarga.

Figura 22. **Fenómeno de acumulación de agua en rodamiento fuera de operación**



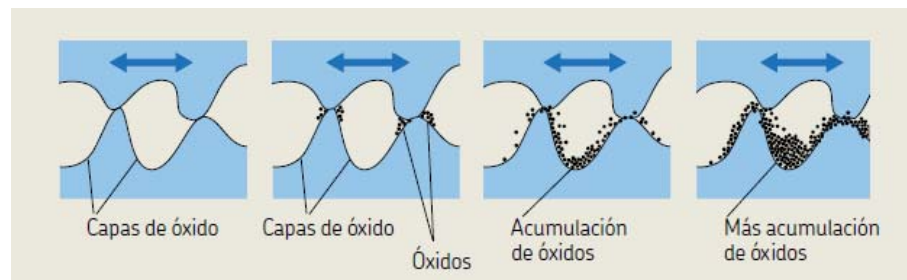
Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 50.

La mejor manera de evitar la corrosión es mantener el lubricante libre del agua y químicos agresivos, sellando adecuadamente el rodamiento según la aplicación, a su vez usar un lubricante con buenas propiedades inhibidoras del óxido también puede ayudar.

Corrosión por fricción: también conocida como corrosión por *fretting*, se produce cuando existe un movimiento relativo entre algún aro de pista del rodamiento con respecto al asiento con el eje o la carcasa del rodamiento, por ende la corrosión por fricción generalmente es causada por una pérdida de ajuste o tolerancias de ajuste inadecuadas al montar un rodamiento, produciendo un desprendimiento de partículas de la superficie de asiento y los aros del

rodamiento, estas partículas se oxidan rápidamente cuando se exponen al aire produciendo como resultado óxido de hierro tal como se ve en la figura 23. El óxido es más grande en volumen que el acero propiamente derivando como resultado que los aros no pueden ser apoyados de manera uniforme lo que puede tener un efecto perjudicial sobre la distribución de la carga en el rodamiento.

Figura 23. **Mecánica de corrosión por fricción**



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 51.

Las áreas corroídas también actúan como muescas. La corrosión por fricción aparece como áreas de óxido en la superficie exterior de la pista exterior o en el agujero de la pista interior. El camino de rodadura podría estar fuertemente marcado en una posición específica; en algunos casos la corrosión por fricción es un daño secundario debido al excesivo desprendimiento de las pistas.

Dependiendo de la reacción química la corrosión puede aparecer como:

- Color rojo (hematita, Fe_2O_3)
- Color negro (magnetita, Fe_3O_4)

El falso brinelling suele asociarse al fenómeno de corrosión por fricción debido a que suele ocurrir en un área de contacto debido a micromovimientos o resiliencia del contacto elástico bajo vibraciones cíclicas; dependiendo de la intensidad de las vibraciones, las condiciones de lubricación y carga, una combinación de corrosión y desgaste pueden ocurrir, formando hendiduras poco profundas en el camino de rodadura. En el caso de un rodamiento estacionario las depresiones aparecen en el paso del elemento rodante de la siguiente forma:

- Hendiduras esféricas para rodamientos de bolas.
- Hendiduras longitudinales para rodillos.

El falso brinelling en aplicaciones de lubricación mediante grasa se observa comúnmente los colores entre marrón y rojizo en las hendiduras, mientras que en aplicaciones donde se emplean aceites aparecen hendiduras muy brillantes similares a una superficie pulida.

En muchos casos, es posible discernir la herrumbre en el fondo de las hendiduras, esto debido a la oxidación de las partículas desprendidas, que tienen un área grande en relación a su volumen, como consecuencia de su exposición al aire. Generalmente hay mucho menos daño a los elementos rodantes.

La causa raíz de este fenómeno se encuentra en la mayoría de los casos cuando un equipo se encuentra parado o es transportado y hay otro equipo u otro componente cercano al mismo operando que genere niveles de vibración a ciertas frecuencias propensas a generar el fenómeno, depende a su vez de la cantidad de tiempo que el equipo se encuentre fuera de operación. En la figura 24, se observa un brinelling severo en la pista externa de un rodamiento de bolas de doble hilera autoalineable que se encontraba dentro de un equipo parado.

Figura 24. **Pista externa afectada por falso brinelling**



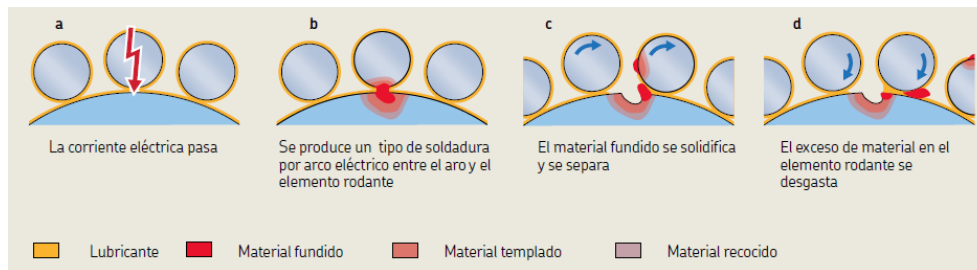
Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 52.

2.5.4. Erosión eléctrica

Este tipo de fallas suele suceder principalmente en equipos que portan variador de frecuencia, el patrón de falla que suele dejar este tipo de falla se le conoce como fluting, la erosión eléctrica suele presentarse de dos formas que son:

Erosión por excesivo paso de corriente: sucede cuando una corriente eléctrica pasa de una pista a otra pasando por los elementos rodantes, ocasionando un daño como se muestra en la figura 25. Al pasar corriente por las superficies de contacto entre pistas y elementos rodantes, el proceso que se genera es similar a la soldadura por arco eléctrico ya que se cuenta con una alta densidad de corriente sobre una superficie de contacto pequeña, además que las superficies extremadamente pulidas de los elementos rodantes y los caminos de rodadura también contribuyen al desarrollo de dicho arco.

Figura 25. **Mecánica de falla producida por el paso de corriente sobre un rodamiento**



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 53.

El material ubicado en la zona de contacto por donde pasa la corriente es calentado a temperaturas dentro del rango de templado o incluso a valores capaces de generar la fusión entre los materiales, esto propicia la formación de áreas descoloradas variando en tamaño donde el material se ha templado, endurecido o fusionado. Derivado de ello en estas zonas es propensa la formación de muescas o cráteres en las pistas de rodadura, debido a la fusión que se puede generar entre la superficie de un elemento rodante y el camino de rodadura, a su vez el continuo paso de los elementos rodantes sobre las superficies endurecidas también propicia que estas tarde o temprano cedan.

Erosión por fuga de corriente: en la etapa inicial las superficies de las pistas se encuentran dañadas por cráteres poco profundos que están muy cerca entre sí, estos a su vez son de menor diámetro en comparación con los ocasionados por el daño ocasionado por el paso de un exceso de corriente. Este fenómeno sucede incluso si la intensidad de la corriente es comparativamente baja. Un patrón similar a un rallado y relativamente uniforme se puede desarrollar a lo largo del tiempo a partir de los microcráteres. Al igual que la erosión ocasionada por el paso de corriente excesiva, la zona superficial donde se produce el daño tiende

a endurecerse con respecto al área que rodea ocasionando la fatiga de material en el punto. El patrón aparece en las pistas de rodadura como se ve en la figura 26; para rodamientos de rodillos también se observa un patrón en el elemento rodante como se observa en la figura 27, mientras que, en los rodamientos de bolas, estas suelen decolorarse u opacarse sobre la totalidad de su superficie.

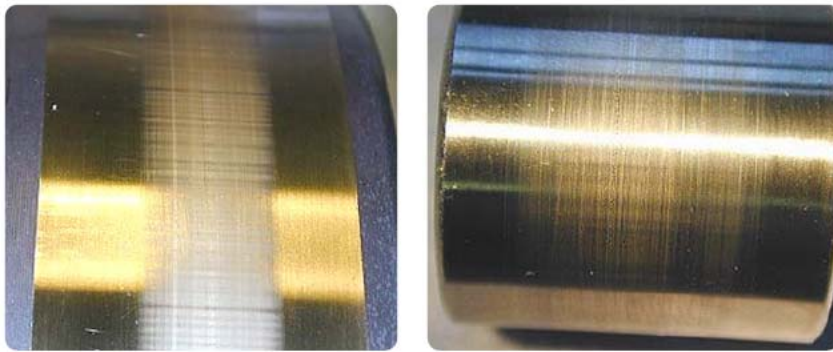
La extensión del daño depende de los siguientes factores: intensidad de corriente, duración, carga de rodamientos, velocidad y lubricante. La grasa puede carbonizarse paulatinamente perdiendo su capacidad para formar la película de lubricante llevando a la superficie a fatigarse iniciando el descascarillado de la superficie de la pista.

Figura 26. **Falla en pista externa causada por el fenómeno de paso de corriente por erosión**



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 54.

Figura 27. **Falla en pista interna y rodillo causada por el paso de corriente**



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 55.

2.5.5. Deformación plástica

Ocurre cuando se excede el límite de fluencia del material, ocasionando deformaciones plásticas permanentes sobre los componentes del rodamiento debido a golpes o sobrecargas generalmente. Suele presentarse de dos formas que son:

Deformación por sobrecarga: puede ser causada por una sobrecarga estática, cargas de choque o un manejo del rodamiento inadecuado al instalarlo. La figura 28 muestra un caso donde una jaula fue golpeada directamente durante el montaje, causando que se deformara, si este rodamiento se pusiera en funcionamiento, se produciría un ruido elevado al igual que altos niveles de vibración.

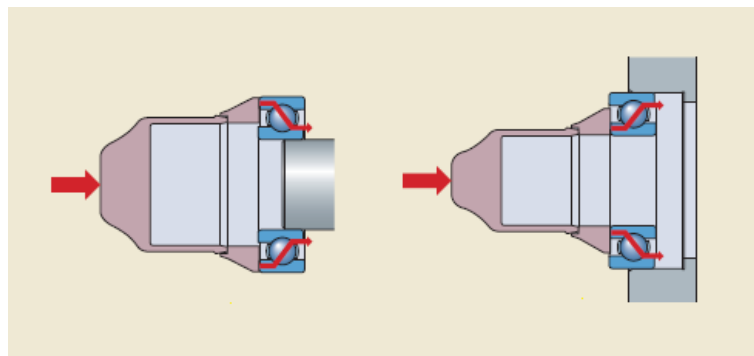
Figura 28. **Deformación en jaula de rodamiento debido a mala manipulación del rodamiento durante el montaje**



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 56.

Los caminos de rodadura y los elementos rodantes pueden abollarse si se aplica la fuerza de montaje a través de los elementos rodantes como se ve en la figura 29, las abolladuras también pueden surgir si el rodamiento está sujeto a una carga anormal mientras está estacionario.

Figura 29. **Distribución de fuerza a través de elementos rodantes durante un mal montaje**



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 56.

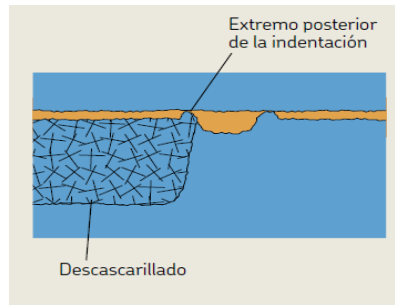
La solución es utilizar siempre un método correcto de montaje y herramientas adecuadas para el mismo, el manejo del rodamiento es crítico durante la fabricación, transporte, almacenaje y montaje.

Indentaciones por material contaminado en el lubricante: los contaminantes sólidos pueden introducirse en un rodamiento a través de los sellos o durante la aplicación del lubricante, también pueden ser resultado del desgaste o daño de un componente adyacente como puede ser un engranaje, por ejemplo.

Cuando una partícula contaminante se encuentra sobre el elemento rodante, es presionada sobre las pistas causando una indentación, las partículas que generan estas indentaciones no necesitan ser tan duras, ya que incluso partículas más blandas, pero suficientemente grandes pueden ser perjudiciales para la salud del rodamiento.

Al producirse una indentación o hendidura se inicia el proceso de fatiga en las zonas donde el material queda con bordes, cuando esta alcanza un cierto nivel se produce un desprendimiento o descascarillado prematuro en el extremo posterior de la zona afectada, la cual empieza como una grieta superficial como se observa en la figura 30.

Figura 30. **Mecánica de falla en zonas adyacentes a indentaciones**



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 58.

La teoría de vida de SKF hace posible calcular la reducción de vida causada por las indentaciones producidas por la contaminación, los datos operativos más importantes requeridos para el cálculo son los siguientes: tipo de rodamiento y tamaño, velocidad de rotación, carga del rodamiento, relación de viscosidad y tamaño, dureza y concentración de la partículas contaminantes, por ende la limpieza del lubricante durante la aplicación o lubricación de rodamientos así como el manejo adecuado durante el montaje son factores importantes para la prevención de indentaciones producidas por partículas de contaminación.

2.5.6. Agrietamiento y fractura

Fractura forzada: se produce cuando las concentraciones de estrés superar la resistencia a la tracción del material. Sobrecargas y sobre estrés aplicando en zonas locales son dos causas comunes que pueden ocasionar una fractura forzada.

La figura 31 muestra un tratamiento rudo sobre un rodamiento al momento de montarlo, este es montado en frío con un martillo y un cincel; al golpear una pista directamente se puede causar finas grietas que se desarrollaran en grietas

considerables al iniciar a girar rápidamente el rodamiento ocasionando la fractura de la zona eventualmente.

Figura 31. Fractura en pista interna de un rodamiento debido a una manipulación incorrecta durante su montaje



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 59.

Por otra parte, un apriete excesivo en un asiento cónico puede ocasionar que una pista interna se fracture como la mostrada en la figura 32. Las tensiones que sufre la pista surgen como resultado de un excesivo apriete, que ocasiona que se rompa en servicio. Las pistas endurecidas con estructuras cristalinas de martensita, son más sensibles a esto que los endurecidos con estructura cristalina de bainita. El mismo resultado puede ocurrir cuando los rodamientos se calientan y se montan en ejes con dimensiones mayores a las permitidas por sus tolerancias de ajuste.

Figura 32. Fractura de pista interna de un rodamiento resultante de un calado excesivo



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 59.

Fractura por fatiga: comienza cuando la resistencia a la fatiga de un material es excedida por ciclos de esfuerzos por flexión, la flexión repetida causa una grieta que poco a poco se propaga a lo largo de un anillo o jaula hasta alcanzar la falla por fractura.

La figura 33 muestra el ejemplo de una grieta producida en la pista externa de un rodamiento de rodillos a rotula, el cual fue montado en una carcasa con insuficiente soporte en la zona de carga, como resultado de ello, la pista exterior del rodamiento fue sometido a la tensión por flexión cíclica hasta que alcanzo la falla.

Figura 33. Fractura de pista externa por esfuerzos excesivos y soporte deficiente en zona de carga

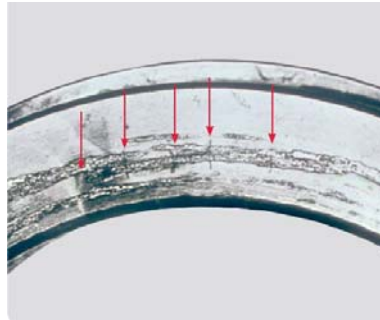


Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 60.

Agrietamiento térmico: sucede cuando dos superficies se deslizan una con otra creando calor por fricción, si el deslizamiento es substancial el calor puede generar grietas que generalmente se encuentran en ángulos rectos a la dirección de deslizamiento.

Un ejemplo típico se muestra en la figura 34, donde una pista interna que rota se encuentra con un ajuste holgado y sometido a una carga axial, debido a la fluencia hubo un movimiento deslizante entre la cara lateral del rodamiento y el espaciador que resulto debido al calor en grietas transversales abriéndose paso por la pista.

Figura 34. **Grietas térmicas transversales en pista interna de un rodamiento**



Fuente: SKF GROUP. *Daño de rodamientos y análisis de falla*. p. 61.

2.6. Etapas de falla en rodamientos

Previamente definimos los diferentes tipos de rodamiento que existen, así como los modos de falla que pueden ocurrir en ellos. Ahora veremos cómo evolucionan estas fallas y cómo podemos identificarlas en los espectros para realizar un buen diagnóstico de la condición.

Cabe resaltar que como se vio previamente todo rodamiento bajo condiciones normales de funcionamiento falla por desgaste o fatiga del material, al encontrar un rodamiento que fallo según los modos de falla anteriores es conveniente realizar un análisis de la causa raíz del problema para eliminarlo en el próximo rodamiento a instalar y monitorear.

Cada elemento del rodamiento posee una frecuencia característica cuando el mismo se encuentra en modo de falla, esta frecuencia va ligada a sus características dimensionales y dinámicas, cuando un rodamiento empieza a fallar se incrementan los valores de vibración de los generadores síncronos

propios de la frecuencia de falla al igual que los niveles de emisión acústica. Las frecuencias características de fallas, no son más que una forma de donde proviene la señal de vibración capturada, es decir, donde se encuentra localizada la falla en el interior de un rodamiento.

Como se vio previamente todos los rodamientos son constituidos por cuatro elementos fundamentales: pista interna, pista externa, elemento rodante y jaula o canastilla, cada uno de estos elementos posee su propia frecuencia de excitación asignada que puede ser calculada.

Tabla II. **Cálculo de frecuencias de falla de rodamientos**

Nomenclatura	Localización de la falla	Expresión matemática
BPFO = <i>Ball pass frequency of the outer race</i>	Frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista externa.	$BPFO = \frac{rpm * N}{2} * \left(1 - \frac{d\beta}{dm}\right) \approx 0.4 * rpm * N$
BPMI = <i>Ball pass frequency of the inner race</i>	Frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista interna.	$BPMI = \frac{rpm * N}{2} * \left(1 + \frac{d\beta}{dm}\right) \approx 0.6 * rpm * N$
BSF = <i>Ball spin frequency</i>	Frecuencia de giro de los elementos rodantes.	$BSF = \frac{rpm * dm}{2 * d} * \left(1 - \left(\frac{d}{dm}\right)^2 * \cos^2 \beta\right)$
FTF = <i>Fundamental train frequency</i>	Frecuencia de rotación de la jaula	$FTF = \frac{rpm}{2} * \left(1 - \frac{d\beta}{dm}\right) \approx 0.4 * rpm$

Fuente: elaboración propia.

Donde:

- rpm = frecuencia de rotación del eje
- d = diámetros de los elementos rodantes
- dm = diámetro entre los centros de los elementos rodantes
- N = número de elementos rodantes
- β = ángulo de contacto

Las frecuencias de falla calculadas no suelen ser exactas, presentan variación que dependen del espacio del rodamiento y algunas otras condiciones operativas de la máquina, las fórmulas previamente definidas se basan en la cinemática de los componentes del rodamiento sobre los 360° de acción, es decir a través de un giro del eje. A su vez la experiencia demuestra que los elementos rodantes tienden a arrastrarse fuera de la zona de carga y giran dentro de la misma, produciendo que las frecuencias calculadas difieran de las frecuencias medidas. Por ende, se consideran que las frecuencias calculadas siguen perteneciendo a un componente con una variación de entre 5 y 10 % de la frecuencia calculada.

Actualmente la mayoría de proveedores de software de vibración, así como algunos fabricantes de rodamientos ofrecen una base de datos donde se encuentran los factores ya calculados, a la espera únicamente de multiplicar por las revoluciones a las que gira el rodamiento en el equipo instalado para definir las frecuencias de falla correctas, por ende le solucionan al usuario final la investigación y el cálculo de los parámetros necesarios para determinar las frecuencias de falla.

Sin embargo, los valores definidos previamente no siempre se conocen o algún rodamiento no se encuentra en las bases de datos mencionadas previamente, en estos casos pueden emplearse algunas normas generales que

tienden a aproximar o dar una idea de la frecuencia de falla correcta de un rodamiento conociendo únicamente la velocidad de giro del equipo o el número de elementos rodantes.

La jaula FTF gira alrededor del anillo interior a una velocidad que es menor a la velocidad de rotación de la flecha, generalmente se considera que gira aproximadamente a 0,46X.

Por su parte el número de elementos rodantes definido como N previamente deberá ser igual a la sumatoria de la BPFO y BPFI; podemos definir las siguientes ecuaciones aproximadas:

$$BPFO + BPFI = N$$

$$BSF \approx 0,5 * \left(\frac{N}{2} - \frac{1,2}{N} \right)$$

$$FTF \approx 0,5 - \frac{1,2}{N}$$

$$BPFO \approx \frac{N}{2} - 1,2$$

$$BPFI \approx \frac{N}{2} + 1,2$$

Los rodamientos en general tienden a presentar una evolución de las fallas con mucha similitud entre sí, quizás con ciertas variantes con respecto al tipo de elemento rodante o al tamaño del mismo, sin embargo todas las fallas empiezan con una etapa incipiente donde se pueden apreciar excitaciones de las frecuencias de falla a una muy alta frecuencia, a medida que la falla avanza a lo largo del tiempo se empieza a apreciar modulación en torno a las frecuencias características del rodamiento y es aquí donde inicia el arduo proceso de monitoreo, evaluación y diagnóstico correcto de las fallas para encontrar el momento óptimo para el cambio del rodamiento, a continuación se dividirá el

proceso de fallo en el rodamiento en cuatro etapas diferentes, realizando la observación que en algunas bibliografías contabilizan entre seis y nueve etapas de fallo, sin embargo el comportamiento de la evolución de la falla es el mismo en todos los casos.

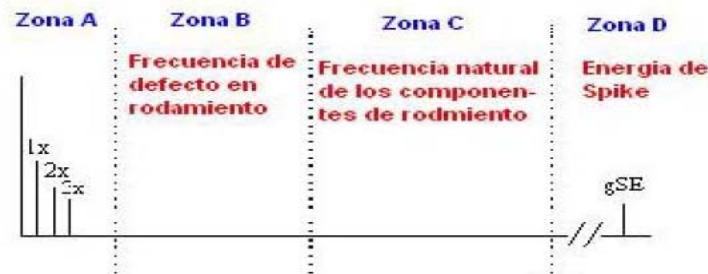
2.6.1. Primera etapa

“Las indicaciones más tempranas de la existencia de un problema en los rodamientos aparecen en el rango de frecuencias ultrasónicas entre los 250 kHz y 350 kHz”⁸, generalmente denotando problemas de lubricación siendo ideal el empleo del monitoreo con el método de ultrasonido. Por su parte al incrementarse el deterioro, se observan componentes de alta frecuencia comúnmente en valores entre 20 kHz y 60 kHz producto de la generación de ondas de esfuerzo que tienden a excitar frecuencias naturales del sistema como el soporte, las pistas de rodaduras o el sensor utilizado, generalmente se observan componentes de muy baja amplitud despreciables en comparación con otras componentes de menor frecuencia que tienden a dominar el espectro siendo por lo general inherentes a la operación normal del equipo, en esta etapa la temperatura no se incrementa y las grietas propias de la falla sobre el rodamiento aun no son visibles, usualmente estas se producen debajo de la superficie de las pistas encontrándose entre 0,1 a 0,125 mm de la superficie, por ende en esta etapa aun no es necesario el cambio de rodamiento, el inicio de esta etapa de falla puede mitigarse o controlarse con lubricación por lo general, sin embargo cuando el rodamiento inicia el decremento de su eficiencia operativa debido a que alcanza su vida útil y la fatiga empieza a presentarse, la falla es inherente y queda únicamente controlar su desarrollo a través del resto de las etapas de falla, métodos como el ultrasonido midiendo $db\mu V$, *spike energy* o pico de energía gSE,

⁸ Technical Associates of Charlotte, P.C. *Tabla I – Tabla ilustrada de diagnóstico de vibraciones*. p.3.

high frequency demodulation HFD y *shock pulse* o impulsos de choque son ideales para su observación, sin embargo métodos como la aceleración envolvente y el peakvue también pueden ser empleados. Cabe destacar que en esta etapa el valor de la medición dependerá de la ubicación en la que se adquiere la misma y la velocidad de la máquina. En esta etapa se estima que al rodamiento le queda del 10 al 20 % de su tiempo de vida.

Figura 35. **Primera etapa de falla en un rodamiento en la zona D**



Fuente: ALVAREZ RAMIREZ, Alex Jorge. *Técnicas de diagnósticos de daños incipientes en rodamientos*. p. 8.

2.6.2. Segunda etapa

En esta etapa al ir empeorando el agrietamiento en la pista de rodadura, se comienzan a extender hacia la superficie causando daños microscópicos en la misma, a su vez aparecen excitadas las frecuencias naturales de los rodamientos, estas frecuencias se encuentra entre los 500 Hz y 2 kHz, los *spike energy* o picos de energía aumentan en alta frecuencia, en este punto se recomienda prestar atención ya que el rodamiento comienza a experimentar desgaste; lubricando el rodamiento se puede mitigar la falla sin embargo esta acción no va a arreglar el problema, el remplazo del rodamiento es necesario para solventar la correcta operación del mismo.

Al final de la segunda etapa suelen aparecer bandas laterales a frecuencia de giro del equipo 1X o frecuencia de jaula a los costados de las frecuencias naturales, lo que muestra que existen señales modulando.

En esta etapa las técnicas de envolvente será más exitosas en rastrear la falla que durante la etapa uno, la onda de tiempo vista en unidades de aceleración mostrara señales del defecto, las técnicas de *peakvue*, *shock pulse* y *spike energy* pueden ser usadas con éxito, sin embargo deberán ser configuradas correctamente así como el acelerómetro que también deberá ser montado correctamente; idealmente se debe roscar el mismo ya que bajo este montaje suele tener una mejor estabilidad en la toma de dato, por ende también la tendencia y los valores numéricos arrojados por estas técnicas pueden ser más precisos, contribuyendo a la toma de decisiones valorando únicamente el valor numérico. En esta etapa se estima que al rodamiento le queda de 5 a 10 % de su vida útil.

Figura 36. Segunda etapa de falla en un rodamiento en la zona C



Fuente: ALVAREZ RAMIREZ, Alex Jorge. *Técnicas de diagnósticos de daños incipientes en rodamientos*. p. 8.

2.6.3. Tercera etapa

Esta etapa se presenta tras un desgaste progresivo, las grietas presentes empeoraran, generando rebabas, agujeros, desprendimientos de material u otros defectos superficiales característicos de fallas en rodamientos, derivado de ello aparecen las frecuencias de falla del rodamiento excitadas, y mientras más armónicos o mayor amplitud posea cada una de estas, más desgaste presentará el componente afectado. El desgaste en esta etapa ya es visible a simple vista y suele ser perceptible para el personal de mantenimiento, en esta etapa se pueden observar las frecuencias de daño por debajo de los 500 Hz, a su vez puede escucharse un ruido anormal procedente del rodamiento.

Estas fallas generan una señal intensa en el espectro de vibraciones de velocidad o aceleración, al aparecer estas frecuencias en los espectros previamente señalados podemos asegurar que el daño ya es crítico, a medida que el daño aumenta se incrementa la magnitud de los armónicos de las frecuencias de fallo, las bandas laterales y aumentan los valores de aceleración a alta frecuencia, el seguimiento de la evolución de estas fallas nos permite planificar su cambio con suficiente antelación.

Como se comentó previamente el espectro de velocidad puede ser utilizado para detectar la falla, así como la onda de tiempo de velocidad o aceleración, a su vez las técnicas de alta frecuencia como la envolvente, *peakvue*, *shock pulse* y *spike energy* también pueden emplearse al igual que en la etapa dos, tomando en cuenta las observaciones de montaje comentadas en la misma. En esta etapa se estima que al rodamiento le queda de 1 a 5 % de su vida útil.

Figura 37. Tercera etapa de falla en un rodamiento en la zona B



Fuente: ALVAREZ RAMIREZ, Alex Jorge. *Técnicas de diagnósticos de daños incipientes en rodamientos*. p. 9.

2.6.4. Cuarta etapa

En esta etapa los elementos rodantes pueden deformarse y las jaulas desintegrarse, por ende la vida del rodamiento se encuentra en su fase final, la amplitud de la frecuencia correspondiente a la velocidad de giro, es decir, 1X se puede ver afectada incrementando su amplitud, a su vez puede observarse el aumento de numerosas armónicas de la velocidad de giro, síntoma característico de holgura mecánica o roce entre partes, el aumento de la temperatura es otro factor que nos indica que estamos en esta etapa. Las frecuencias características de daño del rodamiento y las frecuencias naturales de los componentes comienzan a desaparecer o disminuir y son remplazadas con un ruido de piso, es decir vibración aleatoria de banda ancha y alta frecuencia, además el ruido de piso de alta frecuencia y el *spike energy* suele disminuir lo cual puede confundirse con un una mejora en la condición del rodamiento para analistas inexpertos que caen en la ilusión que este ha mejorado, fenómeno que está muy lejos de la realidad, sin embargo, justo antes de la falla el *spike energy* y el HFD crecen a amplitudes consideradas excesivas. Si se detecta algún rodamiento que presenta

este comportamiento se debe detener el equipo inmediatamente para evitar una falla catastrófica y sustituir el rodamiento dañado.

Las técnicas de alta frecuencia se vuelven menos efectivas mientras la condición empeora ya que como vimos previamente las frecuencias altas desaparecen, en la onda en el tiempo se observa ruido aleatorio seguramente sin impactos claros en la misma, por ende, se vuelve menos útil, por último el espectro de velocidad mostrara las frecuencias de falla de forma clara. En esta etapa se estima que al rodamiento le queda menos del 1 % de vida útil.

Figura 38. **Tercera etapa de falla en un rodamiento en la zona A**



Fuente: ALVAREZ RAMIREZ, Alex Jorge. *Técnicas de diagnósticos de daños incipientes en rodamientos*. p. 10.

2.7. Cuando cambiar un rodamiento

La cantidad de tiempo desde la detección temprana de daño en un rodamiento hasta que esta situación es considerada riesgoso puede ser bastante considerable.

Tras la definición previa de las cuatro etapas de falla del rodamiento pareciera que todo se encuentra bien definido para tomar la decisión de cuando

sustituir un rodamiento con facilidad, la teoría nos dice que al observar un rodamiento que se encuentra bajo las características de la etapa tres, se debe programar su cambio, sin embargo esto está muy lejos de la realidad ya que como muchas otras áreas de la ingeniería la teoría no es igual a la práctica, esto es debido a que para tomar la decisión del cambio del componente hay que tomar en cuenta otros factores ajenos al fallo propiamente. Por ejemplo el costo de producción por el paro del equipo, el costo de mantenimiento del equipo, los paros programados más cercanos, incumplimientos contractuales debidos al paro que pueden generar sanciones, la pérdida de calidad del producto final, situaciones que atentan con la salud y seguridad ocupacional de planta o incluso con el medio ambiente entre otros factores, dichas variables deben ser analizadas y tomadas en cuenta en muchas ocasiones para tomar la mejor decisión para el paro y sustitución del componente.

Es aquí donde la criticidad del equipo juega un papel importante en la toma de decisiones y la coordinación entre las diversas áreas operativas de una planta entran en juego, ya que la decisión debería ser tomada en conjunto entre las diversas áreas operativas, asumiendo los riesgos y consecuencias que puede traer consigo el cambio inmediato del rodamiento así como la prolongación de su funcionamiento.

Por tanto muchas acciones pueden ir ligadas a la prolongación de la vida del rodamiento disminuyendo los intervalos de lubricación o la disminución de carga del equipo así como la disminución de los intervalos de toma de datos para el monitoreo, por ejemplo si se detectara un rodamiento con falla incipiente es prudente acortar los intervalos de toma de datos, esto quiere decir que si el rodamiento se monitorea una vez cada tres meses, una disminución en la toma de muestra a cada mes o cada quincena debe ser programada, todo ello dependiendo del deterioro observado y la criticidad del equipo.

El analista de vibraciones que monitorea el rodamiento no puede asegurar ni garantizar cuánto tiempo más pueda operar un componente, ya que esto dependerá de muchos factores ajenos al mismo. La misión de este debe ser informar las condiciones que denotan severidad, la prudencia del cambio solicitado y el diagnóstico oportuno, certero y bien comunicado a todas las partes involucradas para que en conjunto tomar la mejor decisión. A pesar de todo lo comentado previamente existen ciertas características observables en los espectros que pueden darnos mejores criterios a la hora de tomar la decisión correcta. A continuación, se enumerarán ciertas características que deben ser evaluadas para una correcta toma de decisión:

- A mayores velocidades la falla puede tomar unos pocos segundos en desarrollarse, mientras que en bajas velocidades pueden tomar meses.
- Cargas a las que está sometido el rodamiento.
- Costos operativos asociados a la producción y mantenimiento.
- Si se cuenta con un mantenimiento programado en el corto plazo es vital coordinar su cambio durante el mismo, ya que puede ser que el rodamiento no logre llegar al siguiente paro.
- Criticidad del equipo.

Cabe destacar que la amplitud de la señal varía en función del tamaño del defecto, así como de la localización del mismo, también está ligada a la posición del sensor, la rigidez de la carcasa y el rodamiento, así como la condición de balanceo y alineación de la máquina, por ende, una máquina con desbalance creará un impacto mayor que una con un balance adecuado.

A su vez ciertos comportamientos observables en los espectros también nos arrojan información importante:

Una BPFO es generalmente la falla más común encontrada en un rodamiento con daño, los armónicos y la amplitud de estos suelen indicarnos la severidad de la evolución de la falla, sin embargo, se debe tomar en cuenta que este tipo de falla es la que más suele tardar en generar una falla catastrófica, es decir, una BPFO suele esperar más que el resto de fallas, esto debido a que es el componente del rodamiento más robusto y que generalmente tiende a no tener un desplazamiento rotacional, lo cual nos da un régimen de desgaste relativamente uniforme ya que el punto donde se ubica la falla se encuentra siempre en el mismo punto, la parte crítica bajo este criterio es que una falla en la zona de carga será mucho peor que una en la zona fuera de carga, sin embargo esto no puede ser determinado con simpleza al analizar la falla, por tanto la falla debe monitorearse observando aumento de armónicos y amplitudes de los mismos, esperando que sucedan otros factores que denoten la necesidad del cambio del rodamiento como es el caso de la modulación o bandas laterales a frecuencia de giro del equipo o $1X$.

La BSF suele dar también cierta holgura de tiempo para tomar acciones sobre el cambio del rodamiento, esto debido a que los elementos rodantes suelen ser fabricados bajo aceros con regímenes especiales de dureza, por tanto suelen dar más tiempo para planificar el cambio debido a la resistencia del material, sin embargo hay que tomar en cuenta que un elemento rodante dañado dañara en el corto plazo el resto de componentes del rodamiento produciendo modulación o bandas laterales a la frecuencia de FTF o BPFI, las cuales al aparecer como bandas laterales indican severidad por ende el rodamiento deberá ser cambiado a la brevedad posible. Cabe resaltar que es común encontrar frecuencias dominantes con armónicos a $2XBSF$; la excitación de la BSF también suele aparecer cuando la precarga sobre el rodamiento no es la debida, pobre lubricación, rodamientos cargados y ajustes deficientes.

Una BPFi suele ser una falla con mayor severidad, al observar este tipo de falla es recomendable el cambio del rodamiento a la brevedad posible, esto debido a que esta falla se traslada junto con la rotación del eje entrando y saliendo continuamente de la zona de carga, lo cual produce mayor fatiga sobre la falla produciendo un deterioro rápido de la misma, a su vez igual que la BPFo deben monitorearse el aumento de armónicos y amplitudes de los mismos, bajo este tipo de falla suele observarse modulación a la FTF lo cual indica severidad, por tanto al aparecer este fenómeno de modulación se debe cambiar el rodamiento de inmediato.

Modulación o excitación de la FTF suele ser la falla más crítica, ya que el componente correspondiente a la jaula suele ser el más débil del rodamiento, a su vez en ocasiones el material con el que está fabricada la jaula es de un material con menos dureza y resistencia que el resto de componentes, siempre al observar esta frecuencia con armónicos excitados u observar bandas laterales a esta frecuencia sobre la frecuencia excitada de otro componente del rodamiento deberá buscarse el paro inmediato del equipo para el cambio, ya que la resonancia a la que puede entrar la jaula facilitaría el estrés sobre la misma produciendo una fatiga más acelerada y el fallo catastrófico del rodamiento al perder el elemento que da soporte al resto de elementos rodantes. La aparición de la FTF suele suceder cuando el régimen de lubricación del rodamiento es deficiente, al lubricar el mismo esta puede desaparecer, sin embargo, mantener un rodamiento mal lubricado trabajando con esta frecuencia de falla excitada puede ser sumamente dañino para el rodamiento, ya que facilita la fatiga del componente.

Se considera como regla general que un cambio del 20 % de la amplitud de los valores de los armónicos característicos de las fallas entre una medición y otra muestran indicios de deterioro significativo, derivado de ello estos cambios

deben ser evaluados y tomados en cuenta a la hora de diagnosticar la evolución de la severidad en la falla.

Es aquí donde los paros programados juegan un papel importante, ya que si se cuenta con un mantenimiento programado en el corto plazo es vital coordinar el remplazo de un rodamiento con daño, sin embargo en muchos otros casos este no será el caso y es aquí donde la demanda de la producción toma un papel importante pudiendo no ser una opción por temas operativos el cambio inmediato del componente, por ende la decisión de dejar operar el rodamiento debe ser tomada; a su vez la criticidad del equipo marca una pauta importante ya que en ciertas empresas con regímenes de criticidad bien establecidos puede tomarse la decisión de parar el equipo para cambio del componente únicamente porque así está establecido, o todo lo contrario podría tomarse la decisión de dejar operar el equipo hasta la falla ya que el costo de producción mientras el equipo está parado es más alto que la falla que este pueda ocasionar.

Si el daño en un rodamiento no es detectado a tiempo y por ende no se reemplaza a tiempo, puede producirse una falla catastrófica en el equipo, llegando incluso a afectar componentes complementarios que no están ligados directamente al rodamiento como tal, a su vez tras una falla catastrófica suele ser imposible o difícil de poder determinar la causa raíz de la falla inicial.

Para responder a la pregunta de cuando sustituir un rodamiento, se debe mantener un monitoreo continuo de la condición del rodamiento con una asertiva evaluación de la falla y su evolución tomando en cuenta a su vez los criterios operativos, costos, de calidad, seguridad, ambientales y demás que pueden tomar partido en esta decisión.

3. MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN TEMPRANA DE DAÑOS EN RODAMIENTOS

En la actualidad hay diversos métodos para la detección temprana de daño en rodamientos, la mayoría de los fabricantes de equipo de vibración poseen su propio método de procesamiento de señal o técnica de daño incipiente generalmente utilizando filtros predeterminados, para lograr detectar los picos de baja amplitud y alta frecuencia característicos de las frecuencias de falla del rodamiento, para poder diagnosticar la salud de los mismo. A su vez nos podemos valer de otras herramientas predictivas para detectar daños tempranamente como el ultrasonido y el análisis de la firma de corriente, sin embargo, a continuación, nos centraremos en algunos métodos utilizados en la industria actualmente para lograr captar datos que nos propicien información de la condición del rodamiento

3.1. Comprobación de estado

Se define como comprobación del estado de un rodamiento a aquellas actividades realizadas para verificar que el rodamiento inspeccionado se encuentra en buenas condiciones, como son las inspecciones rutinarias denotadas como VOSO, donde se puede medir parámetros globales que nos pueden arrojar una idea de la condición del rodamiento como puede ser la medición de vibración global, medición de temperatura y ruidos anormales durante operación, por su parte también cabe resaltar las inspecciones visuales de los rodamiento durante un paro valiéndonos de herramientas que aumenten la capacidad del ojo humano como lupas para evaluar así de mejor forma la condición del rodamiento.

Las actividades previamente definidas puede que arrojen indicios de daño en el rodamiento, sin embargo inspeccionar los rodamientos bajo estas técnicas se torna complejo e ineficiente, y en caso de encontrar un problema, generalmente este se encuentra en su última etapa de vida útil, reduciendo la posibilidad de poder atender la falla de forma planificada tal como lo prevé la estrategia de mantenimiento predictivo, a su vez el no contar con un parámetro preciso de la evolución de la falla impacta drásticamente en diagnosticar la severidad del problema.

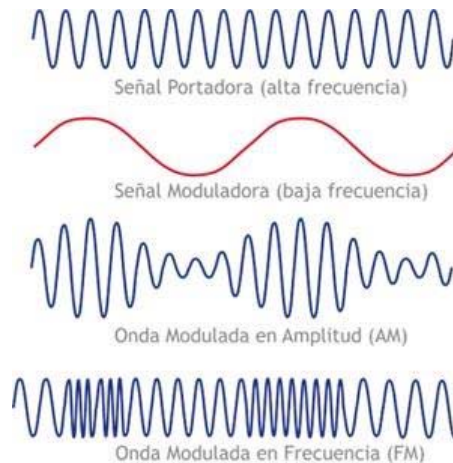
Por tanto, los métodos tradicionales de comprobación de estado de un rodamiento se consideran poco confiables.

3.2. Señales moduladas

Las señales de onda a través del tiempo pueden variar a lo largo de la misma en frecuencia tanto como en amplitud, en el análisis de vibraciones de maquinaria rotativa, este fenómeno es común, principalmente para el caso de cierto tipo de fallas que suelen producir este efecto modulador en la onda. Los daños sobre los componentes de un rodamiento suelen producir este fenómeno al entrar y salir constantemente de la zona de carga.

La modulación no es más que la variación de un parámetro de una señal conocida como portadora generalmente por la acción de otra señal conocida como moduladora, la modulación puede ser en amplitud, frecuencia o en ambas a la vez.

Figura 39. Tipos de modulación en onda de tiempo



Fuente: Analfatecnicos. *Manual para radialistas*.

<https://www.analfatecnicos.net/pregunta.php?id=15> Consulta: agosto 2018.

En la modulación de amplitud se hace fluctuar la amplitud de una señal portadora en respuesta a una señal moduladora, mientras que al variar la frecuencia de una señal portadora con una moduladora se provoca la aparición de nuevos componentes en el espectro de frecuencia que se denominan bandas laterales. Las frecuencias de las bandas laterales son igual a la frecuencia de la cargadora más y menos la frecuencia moduladora. La modulación siempre es un proceso no lineal que crea nuevas frecuencias que no existen en las funciones forzadas.

“Identificar y aislar este tipo de señales es como trabajan la mayoría de las técnicas utilizadas para la detección de daños incipientes en los rodamientos”⁹, valiéndose del análisis de la forma de onda, evaluando el espectro de frecuencia

⁹ ALVAREZ RAMIREZ, ALEX J. *Técnicas de diagnósticos de daños incipientes en rodamientos*. p.30.

donde se pueden detectar, analizar y evaluar las bandas laterales o puede realizarse una demodulación en algún rango de frecuencia de interés para detectar los impactos característicos de falla en rodamientos.

3.3. Tecnología SEE

“La tecnología SEE es un método desarrollado por SKF bajo este nombre comercial, que aprovecha las emisiones acústicas de alta frecuencia dentro del rango de los 150 kHz y 500 kHz para la detección temprana de daño en rodamientos”¹⁰.

El método SEE es sensible en lo que concierne al inicio del contacto metal con metal propio de una película de lubricante deficiente, presencia de corrosión, contaminación del lubricante, fricción entre componentes, movimientos de los elementos rodantes contra los puntos con daño, entre otros.

Según se muestra en la figura 40, para la medición de la condición de un rodamiento aplicando este método se debe buscar colocar el sensor SEE lo más cercano posible a la fuente generadora de la señal de interés, generalmente se busca colocar el sensor lo más cerca posible a la zona de carga, además se debe asegurar una transmisión confiable de la señal de la fuente al sensor lubricando el contacto del sensor con la superficie de medición. Las señales de la emisión acústica son fuertemente direccionales, lo que permite identificar incluso fuentes de señal SEE muy cercanas por ejemplo dos rodamientos adyacentes. El método no es sensible a las vibraciones mecánicas estándar.

¹⁰ SKF RELIABILITY SYSTEMS. *Vibration diagnostic guide*. p.9.

Figura 40. **Método de monitorización de tecnología SEE**



Fuente: SKF GROUP. *Manual SKF de mantenimiento de rodamientos*. p. 49.

La importancia del lugar donde se deben tomar los datos recae en la importancia de la repetibilidad que se busca en cuanto a formar tendencias valiosas que puedan apoyarnos en evaluar la condición del rodamiento.

Cabe resaltar que, si los valores de SEE aumentan gradualmente por encima de los valores considerados normales, generalmente no hay necesidad de reemplazar inmediatamente el rodamiento. La detección de SEE proporciona una advertencia previa con suficiente antelación para realizar correcciones operacionales o de lubricación logrando así extender su vida útil.

Si los valores de SEE aumentan y las acciones consideradas como correcciones no provocan ningún cambio en los valores de medición, es decir los valores no varían o la tendencia sigue al alza, se deberá supervisar el rodamiento más de cerca, una buena práctica sería acortar los intervalos de medición y realizar la supervisión de múltiples parámetros como mediciones de temperatura, toma y análisis de espectros de velocidad, aceleración y envolvente, para analizar

de una mejor forma el problema y predecir lo mejor posible el momento adecuado para la acción correctiva.

3.4. Análisis de zoom real

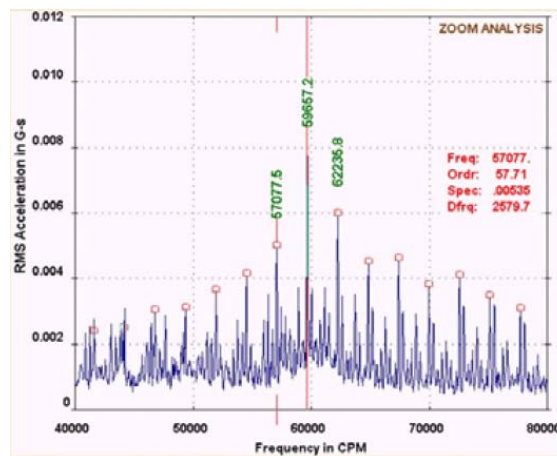
Con este método a través de filtros digitales “se adquiere la señal con un ancho de banda estrecho sobre una frecuencia resonante previamente identificada”¹¹, como puede ser la frecuencia de resonancia del soporte o las pistas del rodamiento, obteniendo un espectro con buena resolución permitiendo identificar con facilidad las frecuencias moduladoras propias de daño en rodamientos que se encuentran rodeando la frecuencia excitada, para ello se necesita contar con un espectro con ancho de banda lo suficientemente amplio para captar los primeros indicios de fallas incipientes. La utilización de una frecuencia resonante suele ser el principio para las técnicas de demodulado que utilizan diversos fabricantes de equipos, ya que se aprovechan de la frecuencia de resonancia del sensor y en esta zona realizan el demodulado de la señal para poder observar las frecuencias de falla en rodamiento, el concepto para realizar esto, es debido a que las frecuencias de falla en rodamiento suelen presentarse en altas frecuencias presentando una amplitud muy baja; al aprovecharse de la zona de resonancia del sensor, estas frecuencias de baja amplitud tienden a magnificarse pudiendo así ser más sencillas de observar.

Es importante aclarar que la mayoría de los softwares utilizados para el análisis de vibraciones permiten realizar un zoom que consiste en la expansión del eje de la frecuencia, sin embargo, este zoom no tiene relación alguna con el método del zoom real, ya que el zoom realizado en software aumenta únicamente

¹¹ ESTUPIÑAN Edgar; SAAVEDRA, Pedro. *Técnicas de diagnóstico para el análisis de vibraciones de rodamientos*. p.3.

la resolución frecuencial en torno a una banda de frecuencia sobre la que se requiere afinar el análisis.

Figura 41. **Análisis de zoom real para observar bandas laterales**



Fuente: ALVAREZ RAMIREZ, Alex Jorge. *Técnicas de diagnósticos de daños incipientes en rodamientos*. p. 30.

3.5. Peakvue

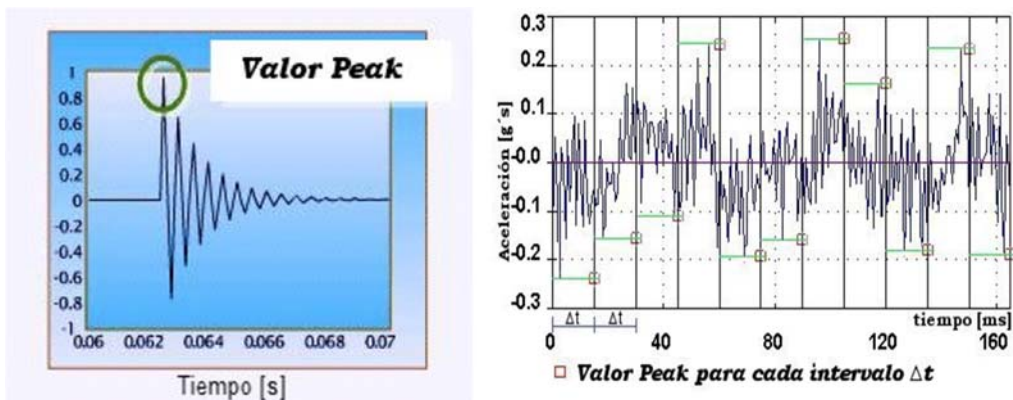
Es una técnica de análisis para señales generadas a alta frecuencia, desarrollado por la compañía Emerson US, para sus dispositivos de análisis de vibraciones, con el objetivo de estudiar el comportamiento de elementos cuyas fallas se aprecian en altas frecuencias y bajas amplitudes. “Esta técnica capta el valor pico de los impactos que se producen en una onda de tiempo; detecta esfuerzos debido principalmente al contacto metal con metal propio de una etapa inicial de falla en rodamiento”¹², engranajes o problemas de lubricación, y luego

¹² ESTUPIÑAN Edgar; SAAVEDRA, Pedro. *Técnicas de diagnóstico para el análisis de vibraciones de rodamientos*. p.3.

por medio de un análisis espectral se obtiene la frecuencia de repetición de los impactos.

Este método utiliza filtros digitales de paso alto y paso bajo para aislar las zonas resonantes al igual que el método de demodulación, sin embargo, se diferencia del proceso de demodulación en la etapa final de procesamiento, donde no emplea el método de envolvente, sino que utilizando una frecuencia de muestreo alta entorno a los 100 kHz, captando el valor pico para cada intervalo del tiempo de muestreo¹³.

Figura 42. **Captura de datos con técnica de peakvue**



Fuente: ESTUPIÑAN, Edgar; SAVEDRA, Pedro. *Técnicas de diagnósticos para el análisis de rodamientos de rodamientos. Departamento de ingeniería mecánica, Universidad de Concepción.* p. 3.

3.6. Ceptrum

Esta técnica de análisis es especialmente recomendada para el análisis de engranajes, no obstante, ya que el procedimiento para análisis de rodamientos es similar, la técnica arroja buenos resultados.

¹³ ESTUPIÑAN Edgar; SAAVEDRA, Pedro. *Técnicas de diagnóstico para el análisis de vibraciones de rodamientos.* p.4.

El ceptrum consiste en tomar un espectro de un espectro, es decir, en el análisis de ceptrum se trata a un espectro como si fuera una forma de onda, y se hace otro espectro a partir del primero, el ceptrum identifica familias de armónicas mediante una función matemática que calcula la FFT inversa del logaritmo de la FFT de la señal temporal original. Primero se capta la señal temporal a la cual se le calcula la FFT, luego se amplifica y filtra la señal para mejorar los datos obtenidos, tras ello, a esta nueva señal se le aplica el logaritmo natural de la amplitud del espectro y nuevamente se filtra la señal, tras ello se calcula la inversa de la FFT sobre esta señal logarítmica nueva.

En la última etapa se mejora la señal con el fin de entregar el espectro que se utiliza para el análisis. En virtud de la conversión logarítmica, se otorga mayor peso a los componentes de bajo nivel, y esto es ventajoso cuando es primordial la existencia de la periodicidad que debe confirmarse y su espaciado de frecuencia determinado con precisión.

El eje horizontal del ceptrum está relacionado con el tiempo, pero no es tiempo en el sentido convencional. Se le podría llamar tiempo periódico, de igual forma se mide en segundos. El aspecto útil del ceptrum es que extrae patrones periódicos, esos patrones que se repiten en un espectro de la misma manera que un espectro extrae patrones periódicos de una forma de onda. Muchas veces un espectro de una máquina rotativa estará muy complejo y contendrá varios grupos de armónicos de partes rotativos y quizás varios grupos de bandas laterales de varias modulaciones.

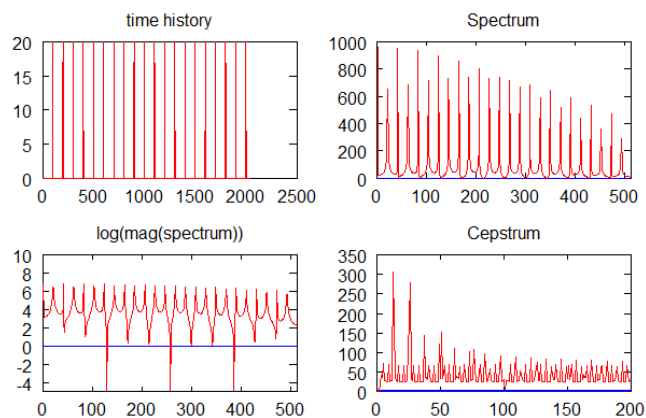
Esta técnica es menos sensible a pequeños cambios en la posición del acelerómetro, se puede modificar la pendiente global del espectro, sin embargo, no afectan a su estructura periódica. A su vez da una representación más estable de los problemas de modulación ya que realiza un promedio de toda la actividad

de las bandas laterales ya que reduce una familia de bandas laterales a una sola línea, por ende, se torna más sencillo el monitoreo del estado de funcionamiento de un rodamiento o engranaje.

Esta herramienta es empleada por muchos softwares de análisis de vibración para simplificar el estudio por parte del analista, debido a que su alcance más importante es identificar familias de armónicos de frecuencias excitadas en un análisis a alta frecuencia principalmente; las familias de armónicos identificadas arrojan una preciada información acerca de las posibles fallas internas de un rodamiento.

Solo la experiencia nos dirá en qué punto la modulación es severa, sin embargo, la técnica de ceptrum es más sensible a los cambios en el espectro que no son inmediatamente obvios al ojo, lo cual facilita al analista observar la evolución del comportamiento de la falla.

Figura 43. **Pasos para la formación del ceptrum**



Fuente: Wikiwand. *Formacion del ceptrum*. <https://www.wikiwand.com/en/Cepstrum> Consulta: agosto 2018.

3.7. HFD

Este es otro método desarrollado por la compañía SKF, es un método de procesamiento de señal para la detección de alta frecuencia conocido como HFD, por sus siglas en inglés, proporciona una alerta temprana de problemas en los rodamientos, principalmente útil para la detección de problemas de lubricación o etapas temprana de daño en rodamientos.

“El HFD muestra un valor general numérico para la vibración de alta frecuencia generada por pequeños defectos que ocurren dentro de un paso de banda de alta frecuencia entre 5 kHz a 60 kHz”¹⁴. La frecuencia de resonancia del sensor de detección está dentro del paso de banda aproximadamente en 25 kHz, y se utiliza para amplificar la señal de bajo nivel generada por el impacto de pequeños defectos. Debido a su rango de alta frecuencia, la medición HFD se realiza con un acelerómetro y muestra su valor en g. La medición de HFD se puede realizar como valor pico o rms.

3.8. Factor de cresta

El factor de cresta más que una técnica es una cuantificación de la severidad de los impactos presentes en una onda de tiempo. El factor de cresta se calcula con el valor pico y el valor RMS de una señal, queda definido de la siguiente forma}.

Factor de cresta = valor pico/valor RMS

¹⁴ SKF RELIABILITY SYSTEMS. *Vibration diagnostic guide*. p.9.

Lo importante del factor de cresta es cómo reacciona a las señales inestables del rodamiento, esto lo hace muy útil para estimar la severidad de fallas en rodamientos o en engranajes, provee una indicación de la condición interna del rodamiento respecto a la lubricación. El factor de cresta nos ayuda a diferenciar entre un rodamiento que necesita grasa y uno que debe ser remplazado.

Para la correcta utilización del factor de cresta es necesario contar con datos suficientes para la generación de tendencias, ya que este valor tiende a aumentar a través del tiempo conforme el daño en el rodamiento incrementa, sin embargo, en un momento en el tiempo este valor deja de aumentar y comienza a decrecer, lo cual puede confundir al analista pensando que el problema desapareció, siendo totalmente lo contrario; lo que indica esto es que la degradación del componente ya se acercó lo suficiente a los valores picos de la onda por ende al realizar el cálculo del factor de cresta este será menor.

Otro problema del factor de cresta es que al relacionar los impactos, no discierne entre los impactos propios de daño en rodamiento y algún otro impacto o turbulencia que puede generar otro componente aumentando considerablemente el valor pico de la onda y dando un valor de factor de cresta que no representa la condición del rodamiento, por ejemplo al producirse cavitación en bombas los picos generados por la alta energía del fenómeno pueden entregar un valor considerado elevado de factor de cresta, sin embargo este valor no representa la condición del rodamiento ya que este puede encontrarse en buen estado y el valor representa la energía generada por la cavitación.

4. ACELERACIÓN ENVOLVENTE

La aceleración envolvente, también conocida como demodulación, es un método de procesamiento de señal de mucha utilidad en el ámbito de las vibraciones mecánicas para la detección de problemas en rodamientos en las etapas tempranas del daño.

El propósito del siguiente capítulo es explicar cómo se deriva la aceleración envolvente y mostrar su utilidad en el diagnóstico temprano de defectos en los rodamientos.

4.1. Introducción a la aceleración envolvente

Usualmente se utiliza un espectro de velocidad para el análisis de defectos en maquinaria rotativa, el análisis de los rodamientos utilizando estos espectros se torna sumamente complejo como se vio previamente, ya que las amplitudes de la vibración propias de los componentes que constituyen a los rodamientos suelen ser sumamente bajas al compararse con otros componentes o fenómenos que ocasionan vibración como es el caso de desalineamientos, desbalanceo, holguras mecánicas entre otros, a causa de esto es casi imposible detectar una falla incipiente o inicial de un rodamiento valiéndose de un espectro de velocidad. Es por ello que surge la necesidad de una técnica capaz de discernir entre el ruido generado por la vibración de otros componentes y la propia de los componentes del rodamiento.

Una de las formas de determinar una falla incipiente consiste en determinar la envolvente de la señal vibratoria, basándonos en el hecho que determinados

fenómenos físicos ocasionan modulación de amplitud o frecuencia como se vio previamente, algunos fenómenos que ocasionan modulación pueden ser el roce o fricción, resonancias estructurales excitadas por impactos periódicos y componentes mecánicos como engranajes, alabes, rodamientos entre otros.

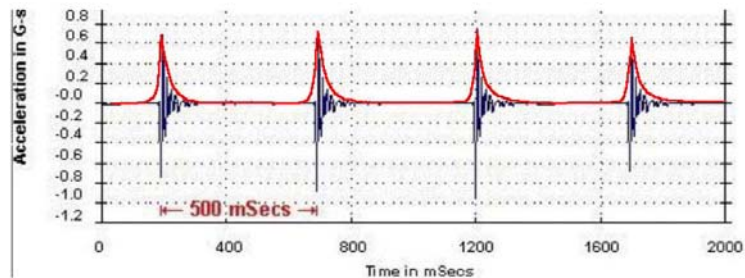
Para el caso de los rodamientos los principales problemas que pueden observarse utilizando esta técnica son:

- Lubricación inadecuada.
- Cargas excesivas en el rodamiento.
- Incorrecta manipulación o montaje.
- Daño en componentes del rodamiento.

4.2. Pasos para derivar la aceleración envolvente

Para el caso de un rodamiento, cada vez que algún componente dañado, ya sea con una marca o picadura entra en contacto con algún otro componente mecánico, se genera un choque metal con metal, generando una onda conocida como onda de esfuerzo. La repetición de estos impactos coincide con la frecuencia de la falla del componente del rodamiento, el proceso de demodulación modula los picos que produce una onda de esfuerzo, mediante una representación de su envolvente de amplitud, tal como se muestra en la figura 44, por ende, se busca determinar la frecuencia de repetición de los distintos picos ya que esta nos indicara la frecuencia de falla. La nueva forma de onda, muestra las frecuencias de fallas mediante una representación espectral de la señal pasada por el detector de envolvente o demodulador.

Figura 44. **Onda de esfuerzo con una representación en color rojo de la onda mediante la técnica de envolvente**



Fuente: GATICA HERNÁNDEZ, Néstor Fabián; JIMÉNEZ ROSENDE, Pablo Hernán. *Técnica de la demodulación en el diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias. Escuela de ingeniería acústica. Universidad Austral de Chile. p. 28.*

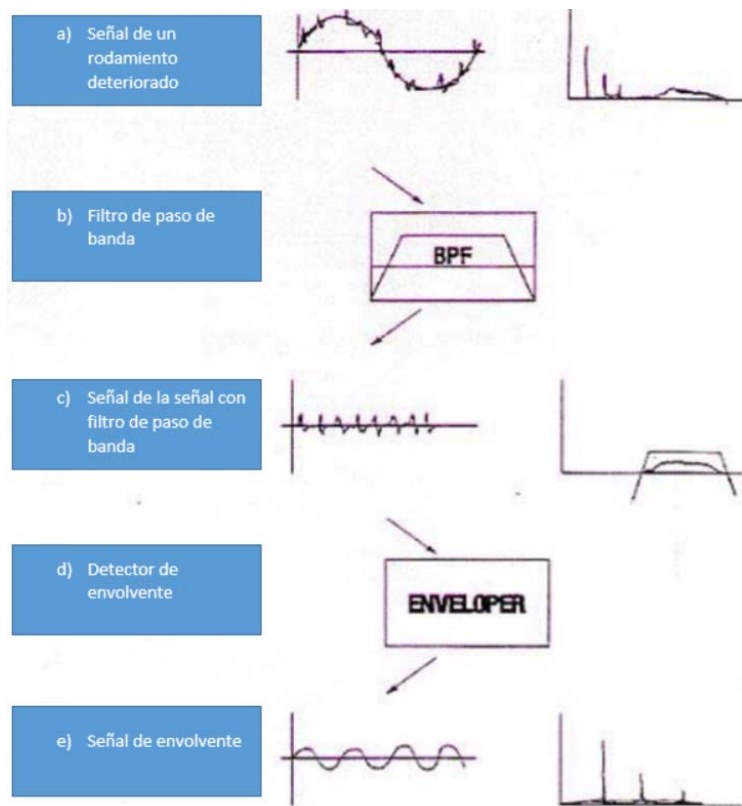
El procesamiento de la señal envolvente es un proceso de dos etapas; el primer proceso implica el filtro de paso de banda de la señal en el dominio del tiempo utilizando un filtro de paso de banda que se debe centrar en la región de energía de alta frecuencia donde se encuentran las primeras instancias de falla en el rodamiento como se observa en la figura 45.b.

En la figura 45.c se muestra la salida filtrada en el dominio del tiempo de la señal original mostrada en la figura 45.a, donde también se muestra el dominio de frecuencia para ayudar a la comprensión del proceso. El proceso de filtrado resulta en una serie de picos de energía, que son los impactos producidos durante la rotación de los componentes del rodamiento.

La segunda etapa del proceso es pasar esta señal de tiempo filtrada a través de un demodulador para extraer la tasa de repetición de los picos. El demodulador es un circuito electrónico que modula o rectifica la señal. El resultado de pasar la señal a través del detector de envolvente se muestra en la

figura 45.e, lo que se extrae es la tasa de repetición de los impactos, ya que al extraer el espectro FFT de esta nueva onda, estas mostrarán las características de las frecuencias del rodamiento y sus armónicas.

Figura 45. **Pasos para la obtención de una señal y espectro de envolvente**



Fuente: elaboración propia.

4.3. Forma de onda

Al existir un defecto pequeño en un rodamiento, los impactos producidos por los elementos rodantes en el defecto causan que los componentes o la caja

del rodamiento resuenen similar a una campana. Este ruido generado ocurre a una frecuencia mucho más alta que las frecuencias fundamentales del rodamiento las cuales varían basadas en el material, en la rigidez del sistema y la masa o la carga, por ende no hay una frecuencia específica que buscar sino una gama de frecuencias excitadas que ocurren típicamente entre 2 y 10 kHz, sin embargo la frecuencia exacta no es tan importante como el hecho de que estén presentes, ya que con el simple hecho de haber frecuencias excitadas en este rango se debe de investigar la razones del porqué.

Se necesita una buena comprensión de la máquina y un enfoque lógico para la resolución de problemas para ayudar a dirigir la acción de reparación.

Al observar el espectro de aceleración de una onda pura, se combinan los elementos de las bajas y altas frecuencias, sin embargo como es de esperarse las amplitudes de los picos a alta frecuencia son mayores que en el espectro de velocidad, pudiendo observar armónicos y ruido de piso que en el espectro de velocidad que por sí solo no se logra percibir, si bien esto es cierto, las frecuencias de los componentes de resonancia del rodamiento que como ya hemos visto se presentan en altas frecuencias, no suelen verse a simple vista a menos que el daño sea considerablemente grave, por ende colocar el filtro de paso de banda entre las frecuencias que alberga el ruido observado en alta frecuencia en un espectro de aceleración puede contribuir a dilucidar de mejor forma si existen componentes que indiquen un daño en el rodamiento, como se puede ver en la figura 46, hay mucha alta frecuencia en la señal que justifica los millares de pequeños picos que generan el ruido de piso en el espectro de aceleración envolvente.

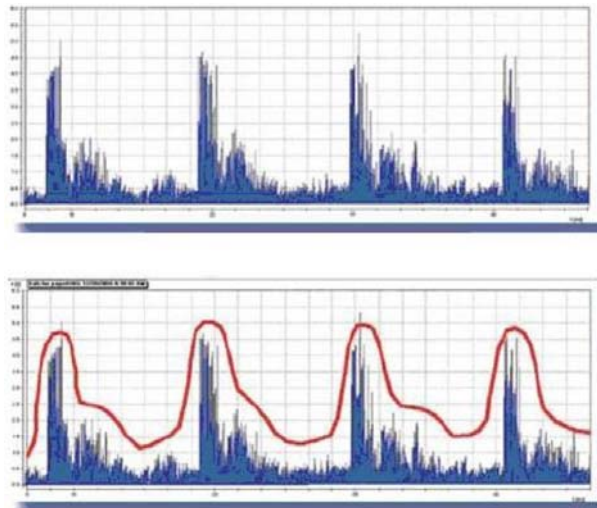
Figura 46. **Representación de forma de onda en alta frecuencia**



Fuente: LEE, Greg. *Aceleración envolvente*. <http://grupoiims.blogspot.com/2012/09/aceleracion-envolvente.html> Consulta agosto 2018.

Para identificar las frecuencias de la fuente de los impactos que causa el sonido que se repite en el rodamiento, dos procesos son requeridos como se observó previamente. Al rectificar la señal, la porción negativa de la señal es invertida a la porción positiva. Esto es demostrado en la figura 47 donde la forma de ondas rectificadas entonces es envuelta colocando una huella o línea sobre la forma general de la forma de onda rectificadas. Esta línea envolvente ahora es utilizada como una nueva señal, por ende, ahora los picos y valles de la forma de onda empatan con las frecuencias de los componentes del rodamiento en caso de existir falla, pudiendo así observar comportamientos que nos indican el tipo de falla que se presenta.

Figura 47. **Representación del envolvimiento realizado sobre la onda del tiempo rectificada durante el procesamiento de la señal envolvente**

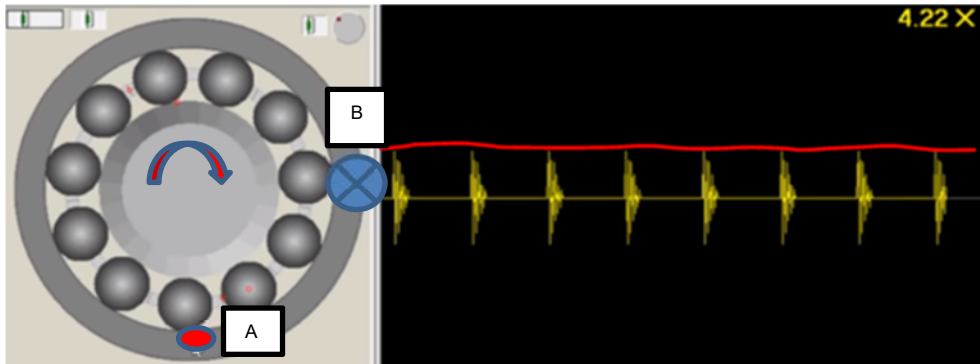


Fuente: LEE, Greg. *Aceleración envolvente*. <http://grupoiims.blogspot.com/2012/09/aceleracion-envolvente.html> Consulta agosto 2018.

A continuación, se muestra el comportamiento que suele observarse de la onda de tiempo para diferentes tipos de frecuencias de falla.

Falla en pista externa: para este caso cada vez que un elemento rodante impacta con el defecto en la pista externa, indicado con el punto A, el cual se encontrara en la misma posición una vez la pista externa no gire, por ende también se encontrara siempre en la misma zona de carga del rodamiento; se generara una onda de esfuerzo o impacto, para este caso al instalar un sensor en el punto B, le llegara siempre una señal con una magnitud constante, ya que el daño se encontrara siempre en la misma zona de carga, por tanto al observar este comportamiento en una onda rectificada de envolvente podríamos indicar que existe un defecto en la pista externa.

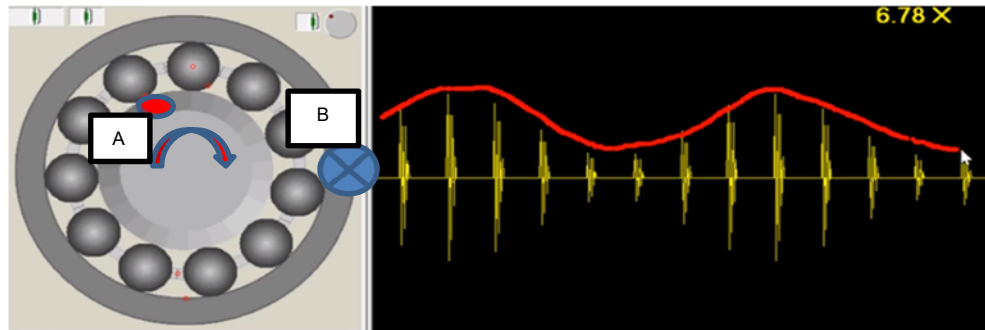
Figura 48. **Forma de onda de un rodamiento con daño en pista externa**



Fuente: elaboración propia.

Falla en pista interna: Para este caso cada vez que un elemento rodante impacta con el defecto en la pista interna indicado con el punto A, el cual se encontrara cambiando de posición debido a la rotación propia en este caso de la pista interna, se encuentra entrando y saliendo de la zona de carga, se genera una onda de esfuerzo o impacto que para este caso, al instalar un sensor en el punto B, le llegara siempre una señal variable, ya que conforme el defecto se acerca al mismo la magnitud de la señal aumentara y mientras se aleja del sensor esta disminuirá, a su vez la entrada y salida de la zona de carga también afectara en la magnitud de la señal ocasionando modulación en la misma, esta es la razón por la que los defectos en pista interna tienden a ir acompañados de modulación a velocidad de giro del rodamiento, estas bandas laterales son una indicación segura de desgaste en el rodamiento que va avanzando, por tanto al observar este comportamiento en una onda rectificadora de envolvente podríamos indicar que existe un defecto en la pista interna.

Figura 49. **Forma de onda de un rodamiento con daño en pista interna**



Fuente: elaboración propia.

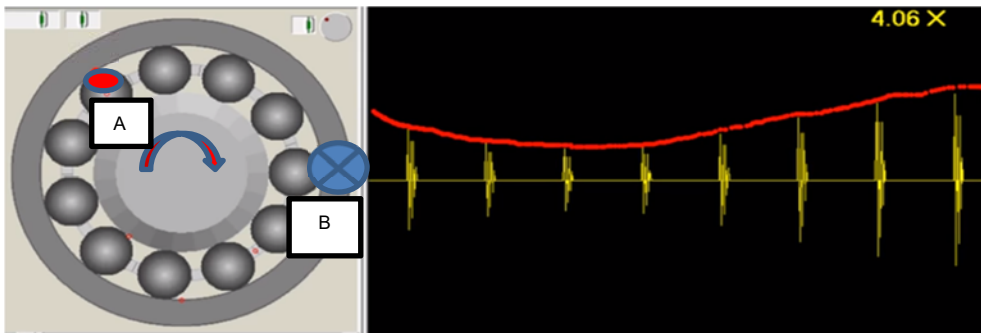
A veces, si un rotor está fuertemente desbalanceado un defecto de rodamiento en pista interna no producirá modulación de amplitud o bandas laterales. Esto se debe a que la fuerza centrífuga causada por el desbalanceo mantiene el anillo interior cargado en el mismo lugar en su periferia todo el tiempo.

Elemento rodante: para este caso cada vez que un elemento rodante impacte con el defecto en el punto A, lo hará dos veces, es decir, impactará en la pista interna al igual que en la pista externa, a su vez al igual que el daño en pista interna el defecto se encontrara cambiando de posición, para este caso al instalar un sensor en posición B, le llegará siempre una señal variable, ya que conforme se acerca al mismo la magnitud aumentará y mientras se aleja del sensor esta disminuirá, lo mismo sucederá al entrar y salir de la zona de carga ocasionando modulación en la señal, con la diferencia que la modulación será de baja frecuencia, entrando y saliendo del área de carga al ritmo de la frecuencia de jaula, ya que migra alrededor del rodamiento junto con ella, por ello los defectos en elementos rodantes tienen a ir acompañados de modulación a frecuencia de jaula, por tanto al observar este comportamiento en una onda

rectificada de envolvente podríamos indicar que existe un defecto en algún elemento rodante.

El hecho que el defecto del elemento rodante impacte en la pista interna y externa suele ocasionar que la frecuencia excitada sea la de $2XBSF$ y sus armónicos, por ello algunos fabricantes de analizadores de vibraciones la incluyen como parte de las frecuencias de falla en el rodamiento en sus softwares de análisis.

Figura 50. **Forma de onda habitual de un rodamiento con daño en elemento rodante**



Fuente: elaboración propia.

Es importante resaltar lo siguiente: como se observa en las imágenes previas las frecuencias de falla de $4,22X$, $6,78X$ y $4,06X$ respectivamente, nos indican que durante una vuelta completa del rodamiento, para el caso del daño en pista externa tendremos $4,22$ impactos mientras que para el caso de la pista interna tendremos $6,78$ impactos a su vez para el caso del elemento rodante tendremos $4,06$ impactos o bien $8,12$ en caso que se excite la $2XBSF$. Estos valores corresponden a los factores calculados según la geometría del rodamiento, por tanto, serán diferentes para cada tipo de rodamiento.

El daño en pista externa suele ser el menos preocupante, ya que este componente es el más robusto del rodamiento, por ende, posee mayor resistencia mecánica como se vio previamente, a su vez se observa que el factor que acompaña a la frecuencia de falla es de menor valor a comparación de los defectos de pista interna y elemento rodante por tanto posee menos ciclos de impacto durante cada giro del equipo teniendo menor fatiga que los otros elementos. Por otra parte la cantidad de tiempo que puede esperarnos este tipo de daño depende mucho de la ubicación del mismo, es decir, si el daño se encuentra en la zona de carga este durara menos que si se encuentra fuera de la misma, a su vez también podemos observar porque un daño en pista interna suele ser más grave ya que como se puede ver se tiene mayor recurrencia de impactos en este tipo de daño así como se encuentra saliendo y entrando continuamente a la zona de carga aumentando así la fatiga del componente. Por su parte el daño en elemento rodante si bien no es tan recurrente como el de pista interna, posee la peculiaridad que tiende a excitar la frecuencia de jaula, la cual suele entrar en resonancia y puede llegar a ser afectada a su vez por la fatiga, y al ser el componente del rodamiento con menor resistencia mecánica, suele ser sumamente crítico la aparición de esta frecuencia.

4.4. Aplicación del filtro de paso de banda

Los diversos fabricantes de analizadores de vibraciones tienen diversos métodos y filtros predefinidos para colocar el filtro del paso de banda, sin embargo, la clave es utilizar el filtro correcto para que las frecuencias de falla sean fácilmente adquiridas, mientras las otras frecuencias, especialmente las de baja frecuencia, que para este caso no son de interés, sean filtradas de la señal. La aplicación de los filtros de paso alto y bajo elimina la mayor parte de las otras vibraciones de la forma de onda.

Las frecuencias características de un rodamiento pueden ser calculadas a partir de las fórmulas estándar si se conoce la geometría del rodamiento, a su vez si se conoce el número de elementos rodantes, las frecuencias características pueden ser estimadas, sin lugar a duda la velocidad de giro del rodamiento debe ser conocida, ya que de esto dependerán las frecuencias de excitación exactas del rodamiento. La mayoría de los fabricantes de rodamientos tienen los ratios característicos de las frecuencias de falla.

El mejor método para determinar el filtro de paso de banda adecuado es experimentar con el rodamiento a monitorear. Un espectro de aceleración entre 0 y 20 kHz debe ser colectado, prestando atención a las zonas con presencia de *haystacks* o regiones donde se encuentren altos niveles de energía.

Algunos usuarios van aún más lejos, ya que realizan ensayos de resonancia estructural, para evaluar que filtro utilizar para obtener resultados óptimos. En la práctica el filtro de envolvente más utilizado es el 0,5 kHz a 10 kHz.

Al seleccionar el número de líneas y número de promedios a utilizar para el espectro, se suele optar por 400 líneas, sin embargo, los espectros de envolvente pueden volverse muy complejo con bandas laterales a la velocidad de giro o la frecuencia de la jaula, las cuales comúnmente pueden coincidir con las frecuencias del sistema o pueden quedar escondidas por un espectro de baja resolución, ocasionando confusión y malos análisis, por tanto a menudo es aconsejable utilizar no menos de 800 o 1 600 líneas para aumentar la resolución del espectro de frecuencias para hacer un diagnóstico correcto y significativo. En general, cuatro o cinco promedios de proceso son seleccionados al recoger espectros de envolvente.

Se sugiere que un cierto número de armónicos del defecto sean monitoreados, típicamente tres o cuatro, es decir, que es fundamental, algunos armónicos más. En general, el defecto de la pista interna es normalmente el más grande, se suele encontrar en cualquier lugar entre seis y diez veces la velocidad de giro del equipo, por lo tanto, el rango de frecuencia elegido, debe permitir al usuario ver entre dieciocho y treinta órdenes de velocidad del eje.

Los filtros se imponen de acuerdo a múltiples factores, como son el tipo de máquina, la velocidad a la que esta gira y el tipo de soporte que aloja al rodamiento. La tabla III proporciona las diferentes selecciones de filtro basadas en velocidades de rotación para el equipo microlog de SKF.

Tabla III. **Filtros de paso de banda predeterminados por SKF**

FILTRO	FILTRO PASO DE BANDA	RANGO DE VELOCIDAD	RANGO DE ANÁLISIS
1	5 – 100 Hz	0-50 RPM	0 – 10 Hz
2	50 – 1 000 Hz	25 – 500 RPM	0 – 100 Hz
3	500 – 10 000 Hz	250 – 5 000 RPM	0 – 1 000 Hz
4	5 000 – 40 000 Hz	2 500 o más RPM	0 – 10 000 HZ

Fuente: elaboración propia.

4.5. Creación y configuración de parámetros para la adquisición de datos de aceleración envolvente con software microlog

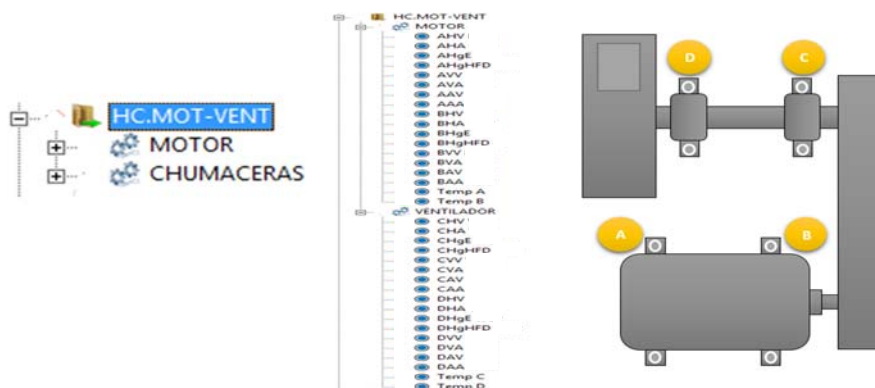
Al conocer los parámetros necesarios para obtener espectros de aceleración envolvente se debe de configurar la herramienta en el software de monitoreo, que para el presente caso se conoce como aptitude analyst de SKF.

Para la configuración se deben considerar 3 aspectos básicos e importantes.

- Elegir el tipo de maquina a la que se le aplicara la técnica.
- Denominar una nomenclatura para cada punto de interés.
- Configurar el o los puntos de aceleración envolvente correctamente para obtener datos fidedignos.

Para el presente ejemplo se utiliza como nomenclatura el código HC.MOT-VENT, que nos indica la ubicación en planta del equipo y el tipo de máquina a monitorear; para este caso el equipo a monitorear sería un ventilador accionado por un motor eléctrico en el área de proceso de molienda. Para el presente equipo tendremos para evaluar a cuatro rodamientos, es decir, dos para el motor y dos para el ventilador. En el diagrama adjunto se muestra la nomenclatura utilizada para determinar la posición en la toma de datos de cada punto, por su parte en la figura 51 se muestra como se observa la jerarquía en la aplicación de aptitude.

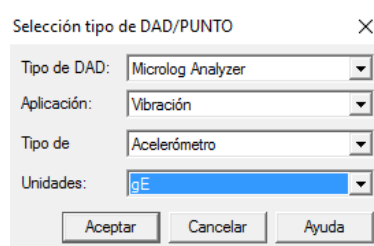
Figura 51. **Jerarquía de datos en aptitude analyst**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Para crear un punto nuevo de aceleración envolvente se debe dar “click” derecho sobre el equipo en el que se desea crear el punto, tras ello nos saldrá una ventana como se muestra en la figura 52; para nuestro caso debemos de configurar en la primer pestaña, el equipo con el que se realizara la medición, por tanto seleccionaremos el equipo “microlog analyzer”, el cual representa el analizador de vibraciones que utilizaremos para la toma de datos, luego en la segunda pestaña debemos indicar el tipo de medición que se tomara, es decir, velocidad, aceleración, envolvente o HFD; en este caso será un punto de vibración, mientras que en la tercera pestaña se debe colocar el tipo de sensor a utilizar, para nuestro caso un acelerómetro y por último en la pestaña cuatro se debe colocar la unidad del tipo de medición que se desea obtener, que en este caso es la de aceleración envolvente la cual se encuentra definida por su unidad de medición como gE. Tras realizar esta configuración se debe de presionar el botón aceptar.

Figura 52. Creación de un punto nuevo en aptitude analyst



Selección tipo de DAD/PUNTO

Tipo de DAD: Microlog Analyzer

Aplicación: Vibración

Tipo de: Acelerómetro

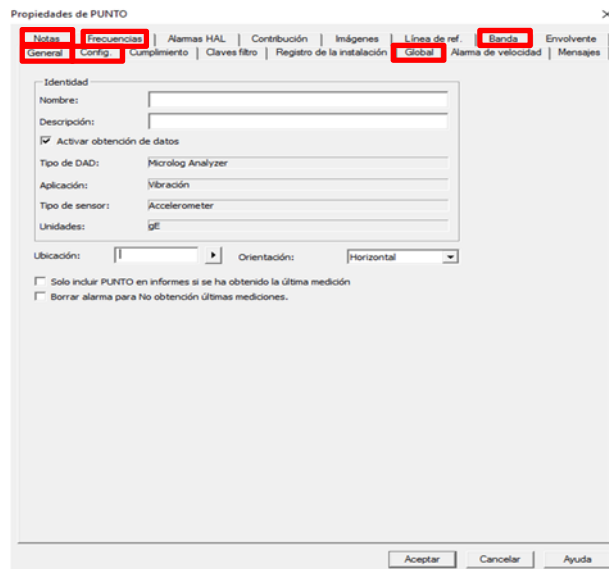
Unidades: gE

Aceptar Cancelar Ayuda

Fuente: elaboración propia, empleando la creación de puntos en software aptitude analyst.

Tras ello nos saldrá la ventana “propiedades de PUNTO” como se indicada en la figura 53, donde configuraremos las siguientes pestañas: general, config, global, notas, frecuencias y banda.

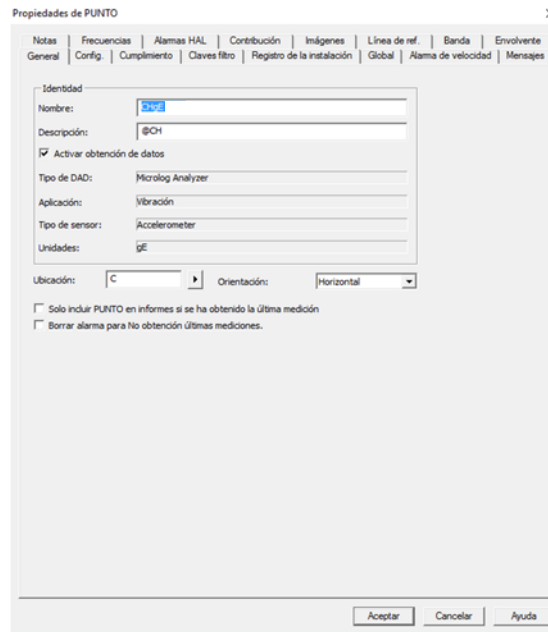
Figura 53. Configuración de propiedades de punto



Fuente: elaboración propia, empleando la creación de puntos en software aptitude analyst.

Para el caso de la pestaña “General” indicada en la figura 54 se debe configurar el nombre del punto y la ubicación de la toma del mismo, que para este caso nos valemos de la nomenclatura previamente seleccionada indicada en el diagrama de la figura 51; para nuestro caso lo indicaremos de la siguiente forma CHgE, lo cual nos indica que el punto le corresponde al rodamiento lado acople del ventilador en la dirección horizontal, indicándonos un valor de aceleración envolvente.

Figura 54. Configuración de pestaña general



Fuente: elaboración propia, empleando la creación de puntos en software aptitude analyst.

En la pestaña “Config.” de la figura 55, se debe configurar las propiedades para la adquisición de la medición, es decir, los parámetros para la adquisición de la señal y su análisis posterior adecuado.

Para las casillas “escala máxima” y “entrada mv/EU” los datos a ingresar corresponden al tipo de sensor con el que se tomara la medición, para la casilla de “detección” se coloca el tipo de medición en la que se quiere obtener el valor es decir pico a pico, pico o rms; para nuestro caso utilizaremos pico a pico ya que es lo recomendado por SKF para la configuración de alarmas. Tras ello procedemos a configurar el filtro de paso de banda a aplicar al demodulado, para nuestro caso nos basamos en la tabla III seleccionando el filtro 3 de 500 a 10 000 Hz que es lo mismo de 30 kcpm a 600 kcpm tomando como criterio la velocidad de giro del ventilador que es de 1 706 rpm.

Para la casilla “tipo de frec.” seleccionaremos intervalo fijo, en la casilla “Guardar datos” colocaremos FFT y hora, con ello podremos obtener para el análisis la onda de tiempo y el espectro de frecuencias. En la casilla “Frec. Inicial” y “Frec. Final” colocaremos el rango de análisis del espectro obtenido, para nuestro caso lo obtendremos también de la tabla para el filtro 3 de 0 a 1 000 Hz que es lo mismo de 0 a 60 000 kcpm. Para la casilla “Pulso/rev” se coloca 1 con la finalidad de obtener un pulso por cada giro del equipo, en caso de configurar un tacómetro. Para las casillas “Líneas”, “Ventana”, “Medias” y “Media” colocaremos los parámetros para obtener una buena resolución del espectro cuyo cálculo no ahondaremos en el presente trabajo. Por último en la casilla “Autocaptura” colocamos siempre, indicándole al equipo que guarde un valor cada vez se proceda a realizar una medición, mientras que en la pestaña “Velocidad” colocaremos la velocidad a la que gira el equipo.

Figura 55. Configuración para la adquisición del punto

Propiedades de PUNTO

Alarma de velocidad | Mensajes | Notas | Frecuencias | Alarmas HAL
Contribución | Imágenes | Línea de ref. | Banda | Envolvente
General | Config. | Cumplimiento | Claves filtro | Registro de la instalación | Global

Escala máxima: 25 gE Detección: Pico a Pico
Entrada mV/EU: 100 Activar ICP
Gama filtro entrada: 30K a 600K CPM

Tipo de frec.: Intervalo fijo Líneas: 3200
Guardar datos: FFT y hora Ventana: Hanning
Frec. inicial: 0 kCPM Autocaptura: Siempre
Frec. final: 60 kCPM Velocidad: 1706 RPM
Corte frec. baja: 150 CPM Medias: 4
Pulsos/Rev: 1 Media: Media

Factor lineal: 0 Unids. de vel. lineal:

Ref. etiq. velocidad
PUNTO: Ning. Selecc
Relación: 1

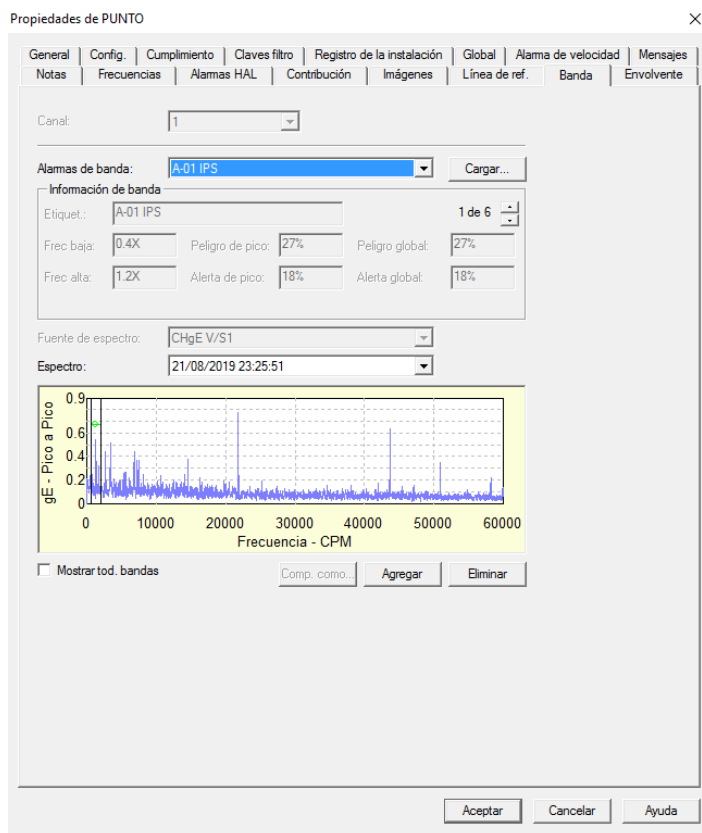
Aceptar Cancelar Ayuda

Fuente: elaboración propia, empleando la creación de puntos en software aptitude analyst.

En la pestaña de “Banda” de la figura 56, se agregan bandas de frecuencia preconfiguradas para ayudar al análisis del espectro, lo que se busca con estas bandas es observar las amplitudes máximas permitidas a lo largo de una banda de frecuencias. Esto con la finalidad de poder analizar mejor todas las zonas o rangos de frecuencia del espectro dejando a un lado un valor global y enfocándonos en la severidad de los picos propiamente del espectro. Para la correcta configuración de las alarmas de banda se debe realizar idealmente utilizando análisis estadístico de datos de cada una de las bandas con un conjunto de equipos similares bajo condiciones de carga similares, se debe calcular el promedio para toda la familia; luego se debe calcular la desviación

estándar para esa banda, tras ello se calcula la alarma para esa banda agregando dos o tres desviaciones estándar al valor medio según se desee, sin embargo, para nuestro caso nos valdremos de la sugerencias propuestas para bandas por la *technical associates of Charlotte* para el cálculo de alarmas de banda de velocidad en ventiladores como se muestra en la figura 57, haciendo la salvedad que es únicamente con fines de ejemplo.

Figura 56. Configuración de bandas de frecuencia



Fuente: elaboración propia, empleando la creación de puntos en software aptitude analyst.

Figura 57. Referencia para el cálculo de frecuencias de banda

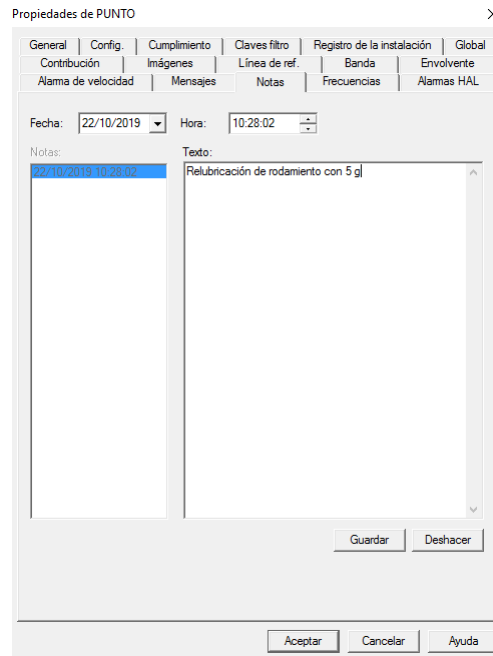
G. CENTRIFUGAL COMPRESSORS, BLOWERS AND PUMPS TYPE 1. DRIVEN CENTRIFUGAL COMPONENT WITH KNOWN NUMBER OF VANES (OR BLADES) AND ROLLING ELEMENT BEARINGS - Set $F_{max} = 50X \text{ RPM}$ (See Notes a thru e).						
BAND LOWER FREQ.	0.4 X RPM	1.2 X RPM	2.2 X RPM	BPF - 1.2 X RPM	BPF + 1.2 X RPM	50% F_{max}
BAND HIGHER FREQ.	1.2 X RPM	2.2 X RPM	(BPF - 1.2 X RPM)	BPF + 1.2 X RPM	50% F_{max}	100% F_{max}
BAND ALARM	90% OA ALARM	30% OA ALARM	35% OA ALARM	60% OA ALARM	35% OA ALARM	20% OA ALARM
DESCRIPTION OF BAND COVERAGE	(Subsynchronous thru 1 X RPM)	(1.5 - 2.0 X RPM)	(2.5 X - Funda. Bearing Defect Frequencies)	(BPF ± 1 X Sidebands)	(Lower Harmonic Bearing Freqs. & BPF Harmonics)	(Higher Harmonic Bearing Freqs. & Brg. Natl. Freqs.)
			NTE .120 in/sec.	NTE .240 in/sec.	NTE .120 in/sec.	NTE .070 in/sec.

NOTES: a. Specify separate set of spectral alarm bands for Drive C (as shown in Case A or B for motor, gearbox, etc.) where BPF is not involved.
 b. "BPF" = Blade Pass Frequency = No. of blades (or Vanes) X RPM. If bearing is a tapered roller bearing or spherical roller bearing, set $F_{max} = 60X \text{ RPM}$ unless speed < 1,700 RPM.
 c. If Speed = 1400-1700 RPM, set $F_{max} = 60X \text{ RPM}$. If 1100-1399 RPM, set $F_{max} = 70X \text{ RPM}$. If 600-1099 RPM, set $F_{max} = 90 X \text{ RPM}$. If 600-799 RPM, set $F_{max} = 100X \text{ RPM}$.

Fuente: BERRY, James. *Proven method for specifying both spectral alarm bands as well as narrowband alarm envelopes using today's condition monitoring software systems.* p. 31.

En la pestaña de notas podemos colocarle un comentario a la medición de alguna fecha en específico, cabe resaltar que es importante colocar toda nota relevante en cada medición importante realizada, por ejemplo la carga o velocidad en la que se encontraba el equipo durante la medición para el caso de equipos de velocidad variable, si hubo un cambio de rodamientos, cambio de grasa, lubricación, alineamiento, entre otras actividades realizadas previo a la medición, esto con la finalidad que todos los analistas tengan en mente lo que se ha ido realizando en el equipo y como pudieron haber cambiado los valores con base a la labor realizada.

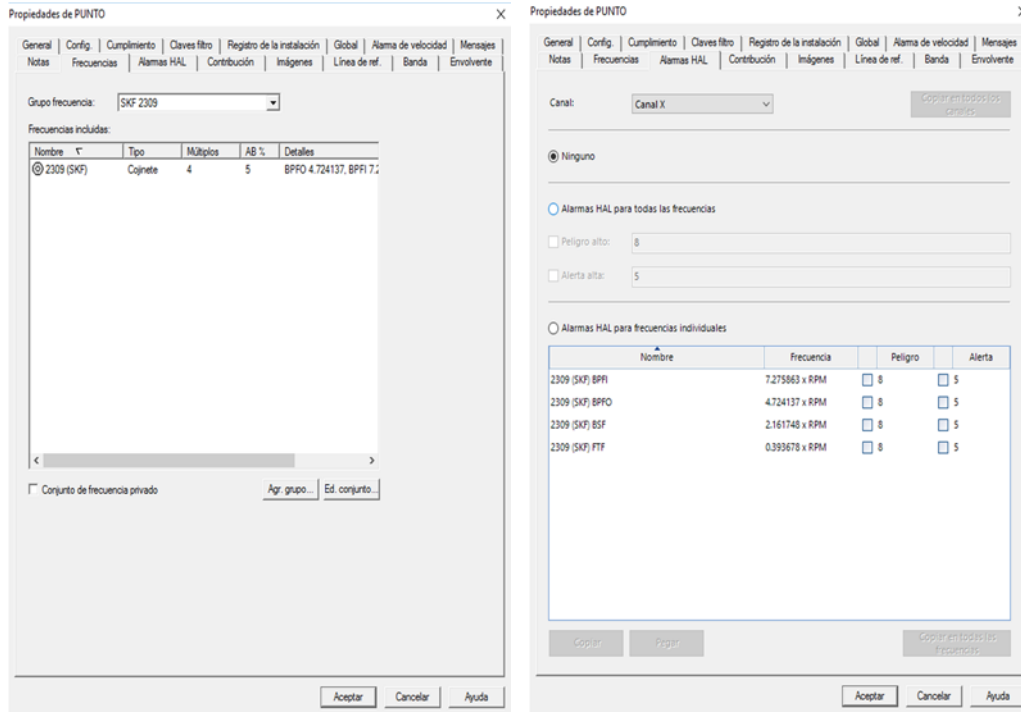
Figura 58. Creación de notas



Fuente: elaboración propia, empleando la creación de puntos en software aptitude analyst.

En la pestaña “Frecuencias” se coloca el tipo de rodamiento que posee el punto, en nuestro caso el software aptitude cuenta con una base de datos de rodamientos extensa, por ende únicamente se procede a buscar el tipo de rodamiento que posee el punto en la base de datos que para nuestro caso es un SKF 2309 como se muestra en la figura 59; tras ello obtendremos los factores propios de las fallas del rodamiento y tras agregar un valor de velocidad de giro del equipo podremos obtener las frecuencias de falla del rodamiento. Cabe señalar que, en caso de no encontrar el rodamiento en la base de datos existente, podemos crear manualmente el rodamiento si conocemos los valores de los factores de falla o podemos calcularlos si conocemos la geometría del rodamiento.

Figura 59. **Asignación del grupo de frecuencias de falla del rodamiento**



Fuente: elaboración propia, empleando la creación de puntos en software aptitude analyst.

4.6. Configuración de los límites de alarma

La técnica de la aceleración envolvente ha sido utilizada como una medida de garantía de calidad en las fábricas de rodamientos SKF desde principios de 1970. Para apoyar el objetivo de SKF de proporcionar los rodamientos más confiable, la aceleración envolvente es la medida primaria para identificar las primeras etapas de la degradación del rodamiento en los laboratorios de investigación y desarrollo de SKF, durante el ciclo de vida, estrés, fatiga y fallas inducidas en las pruebas de fallas realizadas en el centro de investigación en ingeniería de SKF.

Un programa de monitoreo de condición debe ser capaz de proporcionar una advertencia que los niveles del piso están aumentando, los picos de frecuencias de falla aparecen o aumentan y que nuevos picos están comenzando a aparecer en el espectro, en orden de percatarse del deterioro del rodamiento tempranamente.

El método más simple de realizar esto automáticamente, es usando las alarmas de banda estrecha, con esta técnica se detectarán cambios en las amplitudes del piso, picos de frecuencia de falla y los nuevos picos que aparezcan, sin embargo, para la configuración de estas bandas se necesita contar con una cantidad de datos considerables, lo cual se convierte en poco práctico cuando se inicia a monitorear un rodamiento de un equipo nuevo o sin historial, como es el caso del presente trabajo.

Los criterios recomendados aquí deben utilizarse para determinar la alarma inicial únicamente al principio del monitoreo de un rodamiento. Una vez una línea base sólida de buen funcionamiento se establece, se adquieren suficiente cantidad de datos y se adquiere experiencia de alta confiabilidad, se deberán de calcular las alarmas estadísticamente punto por punto; el analista prudente deberá abandonar estos umbrales de referencia que definiremos en favor de una tendencia calculada basada en cambios estadísticos.

Los modelos matemáticos utilizados para establecer umbrales de alarma de aceleración envolvente para monitoreo de rodamientos fueron establecidos mediante análisis estadístico de bases de datos existentes, proporcionando niveles de confianza para los resultados obtenidos del 90 %.

El estudio de la base de datos concluyó que los factores críticos para establecer las alarmas de aceleración envolvente son el diámetro del rodamiento

y la velocidad de rotación del eje, con cierto tipo de ancho de banda de análisis y una f_{max} como entrada especificada por el usuario.

Una vez determinados estos factores críticos, se desarrollaron ecuaciones y se aplicaron a los datos existentes para validación, basándose en el extenso monitoreo del estado de los rodamientos de SKF y su experiencia de evaluación.

Sin incluir deducciones matemáticas detalladas, se obtuvieron las ecuaciones para el cálculo de niveles de peligro y advertencia.

$$L_p = 0,000017 * d^{0.55} * f_{max}^{0.43} * N$$

$$L_a = 0,000006 * d^{0.55} * f_{max}^{0.43} * N$$

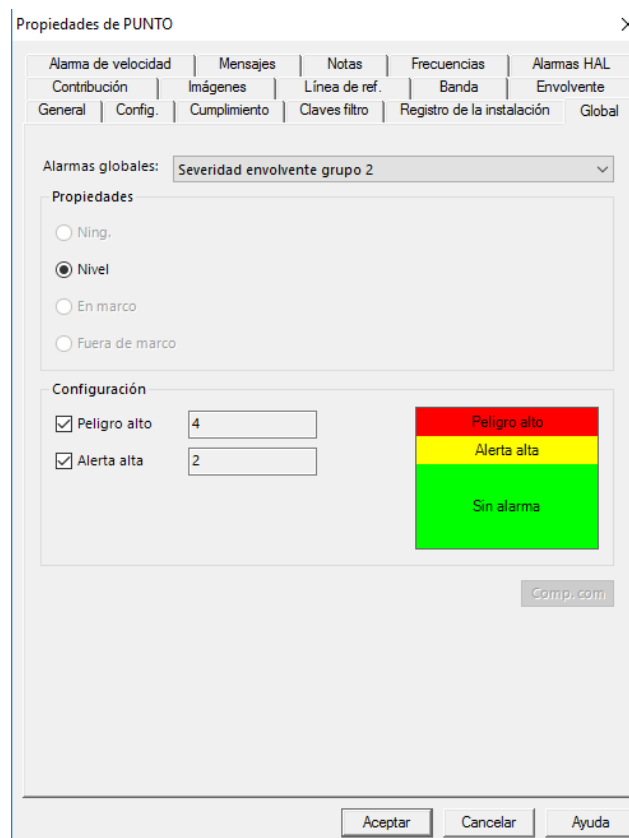
Donde:

- L_p = Nivel de peligro
- L_a = Nivel de alerta
- d = Diámetro interno del rodamiento en mm
- f_{max} = Frecuencia máxima en Hz para el ancho de banda del espectro a calcular.
- N = Velocidad de giro en rpm

Estas dos ecuaciones se derivan de maquinaria de alta y baja velocidad, para representar la maquinaria de mayor velocidad, los datos se tomaron de bombas y motores que funcionan a 3 600 rpm; mientras que para la maquinaria de menor velocidad se representó con rollos de máquinas de papel a 400 rpm.

Para su configuración en aptitude, procedemos a ir a la pestaña “Global” como se muestra en la figura 60, donde colocaremos los valores de peligro y alarma en gE.

Figura 60. **Configuración de alarmas de aceleración envolvente**



Fuente: elaboración propia, empleando la creación de puntos en software aptitude analyst.

4.7. Aspectos a tomar en cuenta

La configuración del punto de medición es sin lugar a duda una de las tareas más críticas al realizar una medición de aceleración envolvente, ya que al tomar mal el dato puede haber problema con el posterior análisis realizado; a su vez se

debe buscar la repetibilidad en los datos adquiridos para una correcta comparación, es decir, se debe tratar de tomar los datos siempre en los mismos puntos y bajo las mismas condiciones de carga para obtener una tendencia que resulte valiosa.

Se debe realizar una correcta configuración del rango de frecuencias a evaluar, debido a que puede que no se logre captar las frecuencias de falla de interés con suficiente antelación, o bajo una etapa de daño que brinde suficiente tiempo para anticiparse a la falla, principalmente con rodamientos que giran a baja velocidad.

Cabe señalar que la comparación entre los métodos para obtener los espectros demodulados entre los diversos fabricantes de equipos de vibraciones no puede ser comparados entre si ya que cada fabricante obtiene los datos de una forma específica, siendo comparables únicamente entre sí.

Se debe evaluar los valores de aceleración envolvente entre los mismos rangos de frecuencia siempre y en las mismas condiciones de cálculo de las unidades, es decir, pico a pico, pico o rms.

No es inusual para un cojinete defectuoso detectado con la técnica de envolvente que trabaje 3 a 4 meses, o incluso hasta un año antes de que falle; el seguimiento a los cambios tendenciales del valor así como los cambios de amplitudes en los armónicos son fundamentales, cabe resaltar que en lugar de dejarse llevar por el valor global hay que ver la cantidad de picos o armónicos de frecuencias de falla excitados así como la magnitud de los mismos, valiéndonos de las bandas estrechas configuradas en la figura 56, podríamos obtener una visión rápida de la condición del rodamiento. Por su parte se deben observar los cambios de amplitudes y aparición de nuevos picos o armónicos de frecuencia a

través del tiempo, así como el incremento del ruido de piso ya que los cambios en estos parámetros pueden denotar un aumento considerable en el deterioro del rodamiento.

Complementar con ultrasonido las mediciones realizadas es una buena práctica y buen complemento a las mediciones de aceleración envolvente, ya que la técnica de ultrasonido se considera la primera herramienta útil para el diagnóstico del estado de un rodamiento, según la curva P-F, brindándonos un mejor panorama en el rango del mantenimiento proactivo, permitiéndonos lubricar adecuadamente rodamientos, a su vez nos brinda una referencia sencilla y muy valiosa como es el sonido o audio del comportamiento interno de un rodamiento pudiendo ser más referencial que las mediciones de aceleración envolvente, un oído bien entrenado puede detectar deficiencias de lubricación de un rodamiento o un daño en el mismo.

Al proceder a realizar una lubricación se debe ver si los valores bajan, ya que en caso contrario esto puede ser un indicativo que el rodamiento ya se encuentra dañado, sin embargo, como se comentó previamente la técnica de ultrasonido suele arrojar mejores resultados para este caso.

Los valores de aceleración envolvente suelen utilizarse como una medida de disparo para actividades de mantenimiento bien sea en el dominio proactivo realizando una lubricación, cambio de lubricante, balanceo y alineamiento entre otros; o en el ámbito correctivo procediendo a planificar el cambio de un rodamiento defectuoso.

5. CASOS DE ESTUDIO

Para el presente estudio se analizarán únicamente los valores de aceleración envolvente a tres equipos diferentes, bajo condiciones de operación diferentes, los 3 equipos detallan los datos obtenidos durante su puesta en marcha y posterior monitoreo, se comentan los análisis realizados en los espectros y valores obtenidos con la finalidad de detallar las recomendaciones propuestas para la corrección o mejora de los valores de aceleración envolvente buscando garantizar la confiabilidad en la operación de los equipos.

5.1. Caso No.1

En el presente caso se analiza el conjunto formado por un motor y ventilador extractor de gases de un filtro de desempolvo, el análisis se realiza sobre cada componente observando cómo se deben ver espectros y tendencias que denoten una condición de operación buena de un rodamiento para el caso del motor, mientras que para el caso del ventilador se muestra el análisis que nos lleva a diagnosticar un daño en los rodamientos que conlleva a un posterior cambio de los mismos.

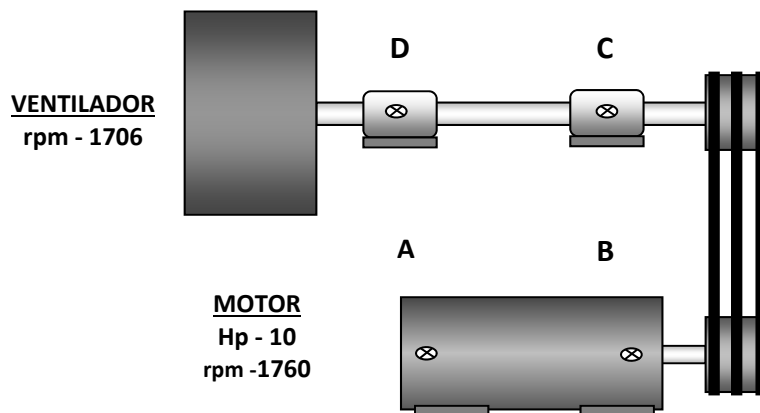
Para el análisis de vibraciones, las mediciones efectuadas fueron: vibración global en unidades de velocidad mm/s rms, aceleración en g, y aceleración envolvente en gE con espectros de frecuencia. En la tabla IV se recopilan los datos relevantes para el análisis de vibraciones, mientras que en la figura 61 se presenta un esquema del montaje del equipo, detallando los puntos escogidos para coleccionar los datos de vibración. Los valores analizados corresponden al rango de fechas del 14 de junio al 12 de diciembre del 2018.

Tabla IV. **Datos de equipo ventilador de desempolvo**

Descripción	Ventilador de filtro de desempolvo	Analizador	SKF Microlog Analyzer GX
Transmisión	Mediante fajas	Sensor	CMCC2 200 SKF
Potencia del motor	10 hp	Filtro de paso de banda	3
Velocidad del motor	1760 rpm	Unidad de medición	gE
Rodamientos del motor	A = Opuesto: SKF 6 208 B = Carga: SKF 6 208	Alarma de alerta gE	2
Velocidad del ventilador	1 706 rpm	Alarma de peligro gE	5
Rodamientos del ventilador	C = Carga: SKF 2 309 K/C3 D = Opuesto: SKF 2 309 K/C3	Límite de vibración según ISO 10816-3	4,5 mm/s rms

Fuente: elaboración propia.

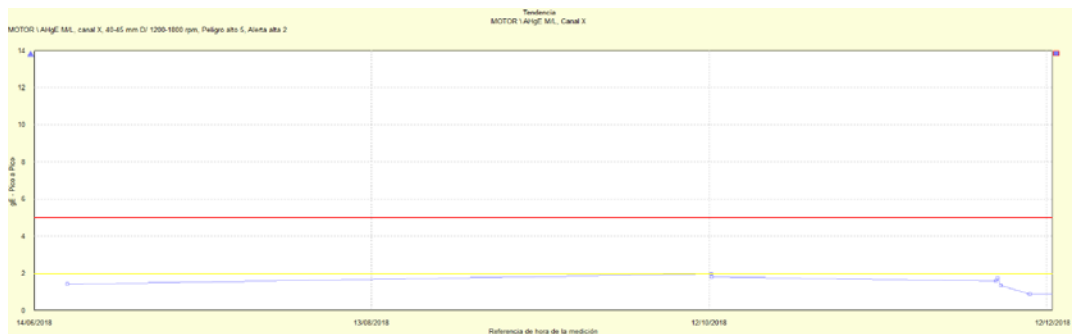
Figura 61. **Diagrama de montaje del equipo**



Fuente: elaboración propia.

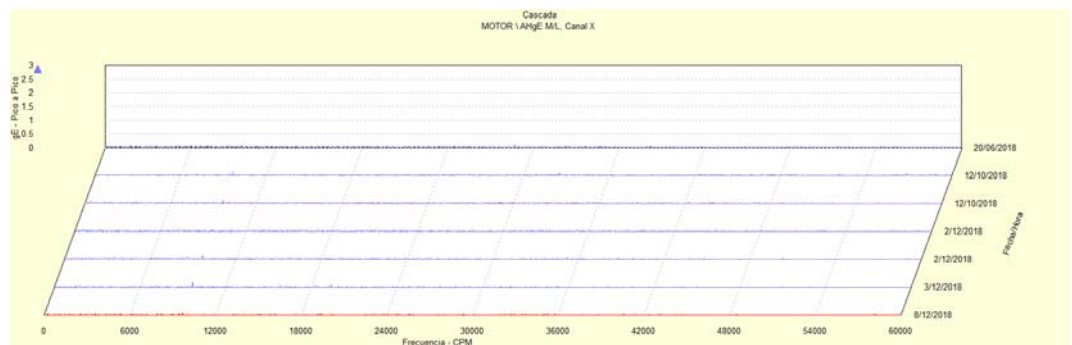
Los valores de aceleración envolvente para el motor en su punto A se observan estables en tendencia y con valores considerados aceptables según las alarmas predefinidas, ver figura 62, a su vez los espectros no muestran levantamiento de piso notorio ni frecuencias de falla aparentes por el momento según el gráfico de cascada en la figura 63, por ende, se puede concluir que el rodamiento se encuentran aún en buen estado y pueden seguir operando sin restricciones.

Figura 62. Tendencia en gE del punto A caso No.1



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

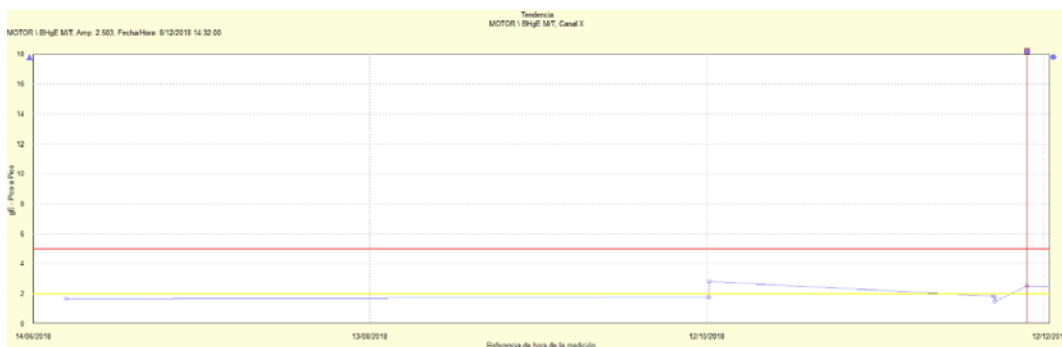
Figura 63. Espectro de cascada en gE punto A caso No.1



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

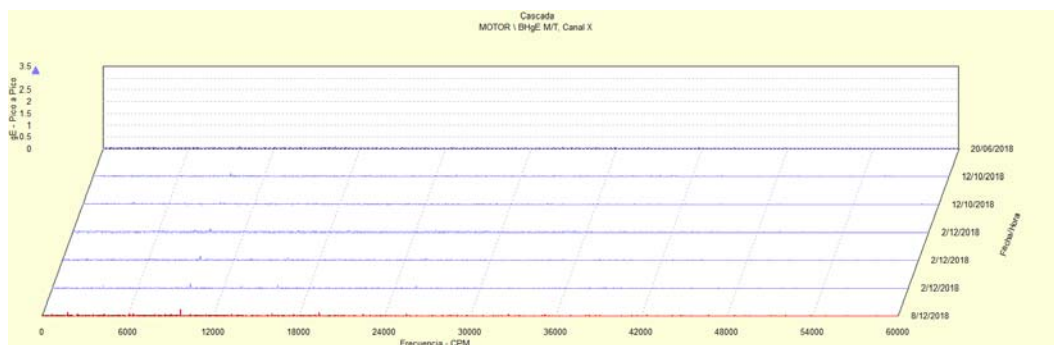
Los valores de aceleración envolvente para el motor en su punto B se observan estables en tendencia y con valores considerados aceptables según las alarmas predefinidas, ver figura 64, a su vez los espectros no muestran levantamiento de piso notorio ni frecuencias de falla aparentes por el momento según el gráfico de cascada en la figura 65, por ende se puede concluir que el rodamiento se encuentra aún en buen estado y puede seguir operando sin restricciones a pesar de estar un tanto por encima del nivel de alerta configurado.

Figura 64. **Tendencia en gE del punto B caso No.1**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Figura 65. **Espectro de cascada en gE punto B caso No.1**

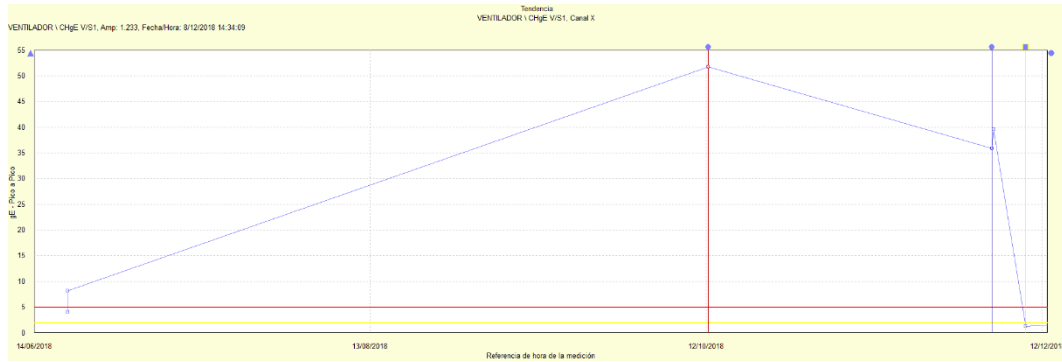


Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Para el caso de los valores de aceleración envolvente del ventilador en su punto C se observa un aumento abrupto en la tendencia de los mismos en la tercera medición realizada el 12 de octubre como se observa en la figura 66 marcado con el cursor rojo, llegando a valores muy por encima del nivel de peligro configurado de 5 gE, alcanzando un valor máximo de 56,7 gE, tras lo observado se procede a aplicar lubricante al rodamiento; tras ello se procede a realizar nuevamente otra medición el 02 de diciembre como se observa en la imagen marcado con el cursor azul, observando un valor de 35,9 gE considerado elevado aún; por lo que se procede a aplicar nuevamente lubricante ese mismo día y se mide tras 6 horas de operación continua del equipo, tras este periodo de tiempo se toma nuevamente una medición observando un leve aumento del mismo a 39,4 gE. Por tanto, se observa como el rodamiento no responde como se esperaba a la lubricación realizada, se procede a solicitar el cambio del rodamiento.

Posteriormente tras el cambio del rodamiento se procede a tomar una medición el 08 de diciembre, donde se observa como el valor disminuyo considerablemente hasta un valor aceptable de 1,23 gE según las alarmas predefinidas mostrado con el cursor amarillo.

Figura 66. **Tendencia de aceleración envolvente en gE punto C caso No.1**

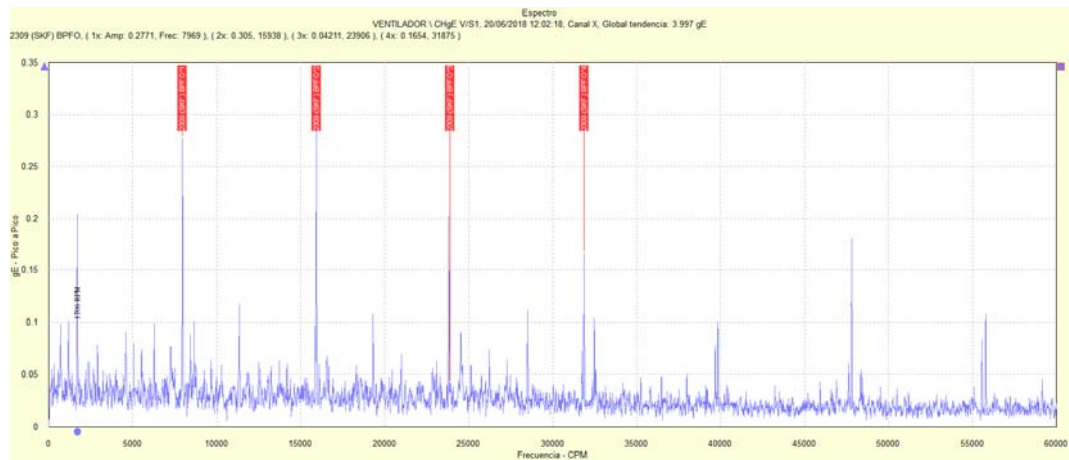


Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

A continuación, se procede a detallar el análisis realizado sobre los espectros.

El 20 de junio se realiza la primera medición del equipo en el punto C, observando un valor global de 3,99 gE; en el espectro de la figura 67, donde se observa la BPFO excitada con armónicas y leve levantamiento de piso espectral denotando posibles deficiencias en la lubricación del componente, sin embargo la amplitud de los picos se mantiene por debajo del umbral de 0,5 gE, por tanto se procedió únicamente a lubricar el rodamiento sin obtener una respuesta adecuada a la misma, por ende se consideró que el rodamiento se encontraba en una etapa temprana de daño, sin embargo aún no se consideraba una falla severa, por tanto se dejó operar el rodamiento durante más tiempo.

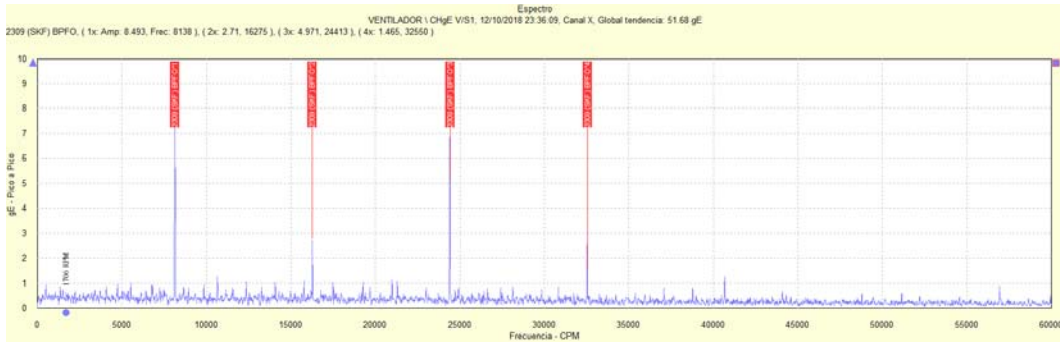
Figura 67. **Espectro de aceleración envolvente en gE 20 de junio del 2018 punto C caso No.1**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Del 20 de junio al 12 de octubre se observa un aumento en el valor global a 51,6 gE, a su vez también se observa aumento en el ruido espectral, la amplitud de la BPFO y sus armónicas, en este caso la amplitud de los picos excitados que predominan en el espectro supera los 2 gE, como se observa en la figura 68, en esta ocasión debido a que no se podía dar paro al equipo para intervenirlo y proceder al cambio del rodamiento, y sabiendo que la pista externa de un rodamiento es el componente que soporta mayores esfuerzos, se procede únicamente a lubricar el rodamiento y programar otra medición posteriormente, transcurridos 2 meses.

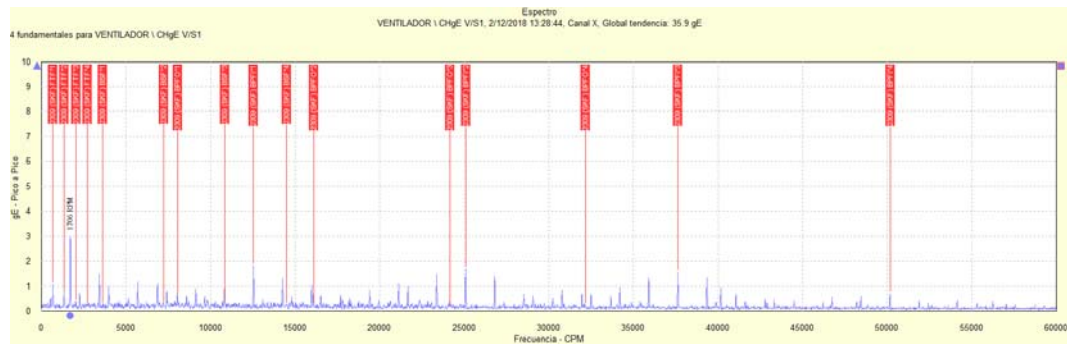
Figura 68. **Espectro de aceleración envolvente en gE 12 de octubre del 2018 punto C caso No.1**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

El 2 de diciembre se toma otra medición observando una disminución de los valores globales a 35,9 gE como se muestra en la figura 69, a su vez se observó una disminución en la amplitud de la BPFO y sus armónicas, así como el ruido de piso del espectro, sin embargo, aún se perciben las frecuencias de falla antes mencionadas y se observan con mayor claridad la BPFI y FTF excitadas, con acompañamiento de bandas laterales a 1X del ventilador sobre la BPFI.

Figura 69. **Espectro de aceleración envolvente en gE 2 de diciembre del 2018 punto C caso No.1**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

La aparición de tres frecuencias de falla del rodamiento con armónicos, así como las bandas laterales sobre la BPF1 y la amplitud de varios armónicos alcanzando o superando el umbral de 1 gE, denota severidad en la condición del rodamiento.

Sin embargo, se vuelve a solicitar engrasar el rodamiento, pero en esta ocasión el valor aumenta ligeramente a 39,5 gE, sin cambios relevantes en la desaparición de frecuencias de falla o disminución del ruido de piso comentado previamente, dando mayores indicios de la existencia de un fallo severo en el rodamiento.

Tras observar lo antes mencionado en el espectro de aceleración envolvente, se procede a validar la severidad del daño en el rodamiento con los espectros de velocidad y aceleración mostrados en las figuras 70 y 72 respectivamente, siendo un criterio contundente de severidad la aparición de frecuencias de falla y bandas laterales en el espectro de velocidad sin importar sus amplitudes, así como el aumento en la amplitud de 1X. Por su parte los picos

que sobrepasen 1 g en su amplitud en el espectro de aceleración también son considerados severos, ya que se consideran valores de amplitud altos para provenir de un rodamiento.

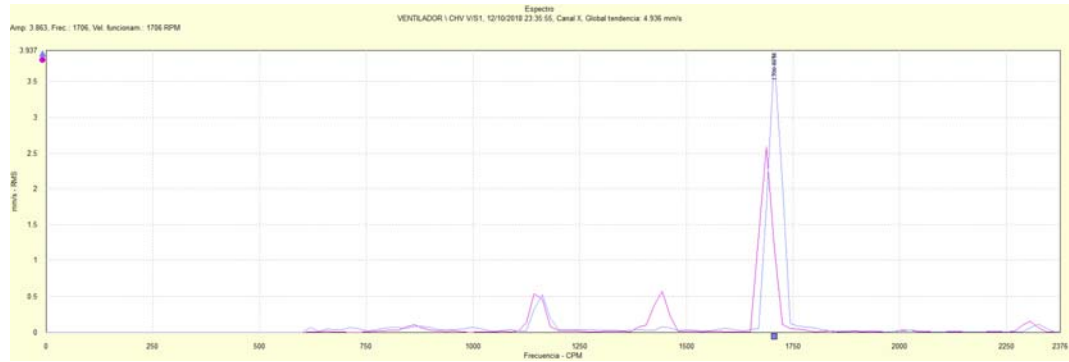
En el espectro de la imagen, se logra observa excitada las BPFO con armónicos, así como bandas laterales a la FTF, por ultimo puede observarse el aumento del valor de la componente 1X en la figura 72 con respecto a la medición previa.

Figura 70. **Espectro de velocidad en mm/s rms 12 de octubre del 2018 punto C caso No.1**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

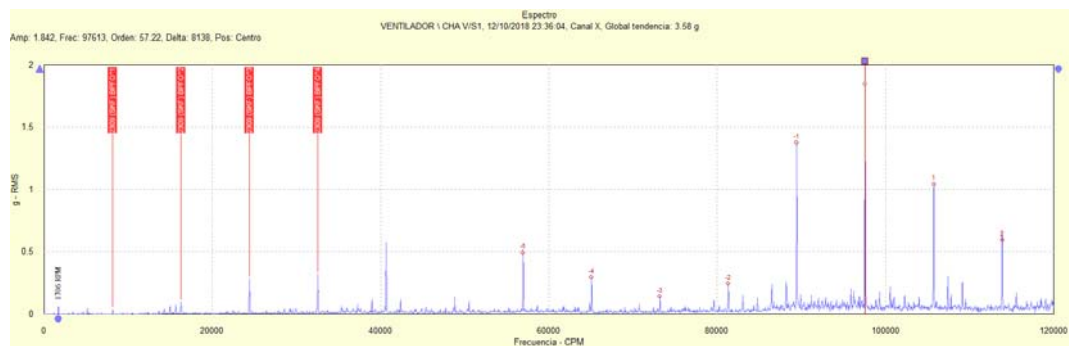
Figura 71. **Aumento de la componente 1X entre las ultimas 2 mediciones de vibración previo al cambio del rodamiento**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Por su parte, para el caso del espectro de aceleración observado en la figura 72, se observan los mismos fenómenos, sin embargo, en este caso se perciben aún más armónicos de la BPFO en la zona de alta frecuencia entre 60 000 y 120 000 CPM que superan la amplitud de 1 g.

Figura 72. **Espectro de aceleración en g rms 12 de octubre del 2018 punto C caso No.1**

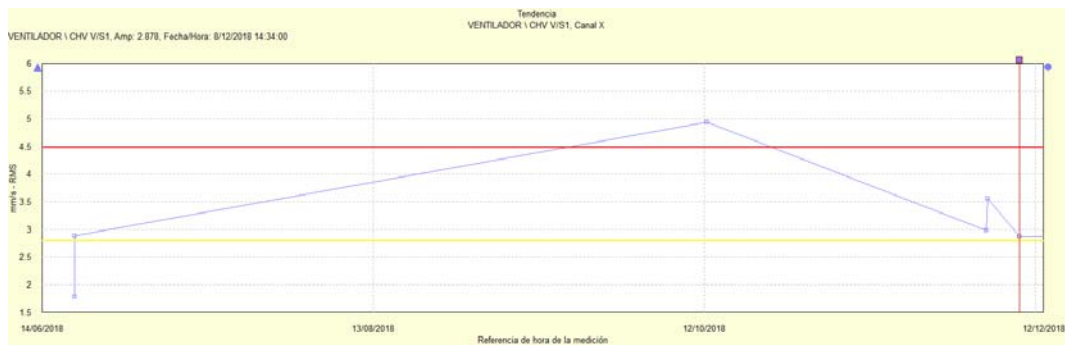


Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Tras lo observado previamente se procede a solicitar el cambio del rodamiento.

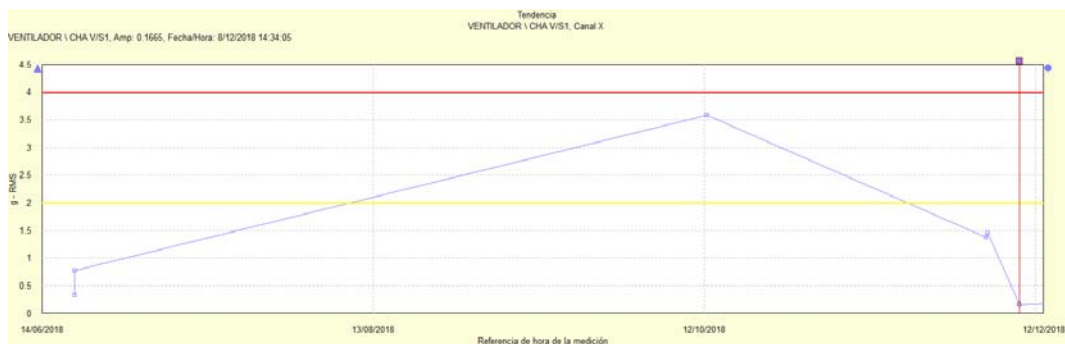
Tras el cambio del rodamiento se observa el descenso de los valores de vibración en velocidad y aceleración, como se observa en las tendencias de las figuras 73 y 74 respectivamente, marcados con cursor rojo.

Figura 73. Tendencia en mm/s rms del punto C caso No.1



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

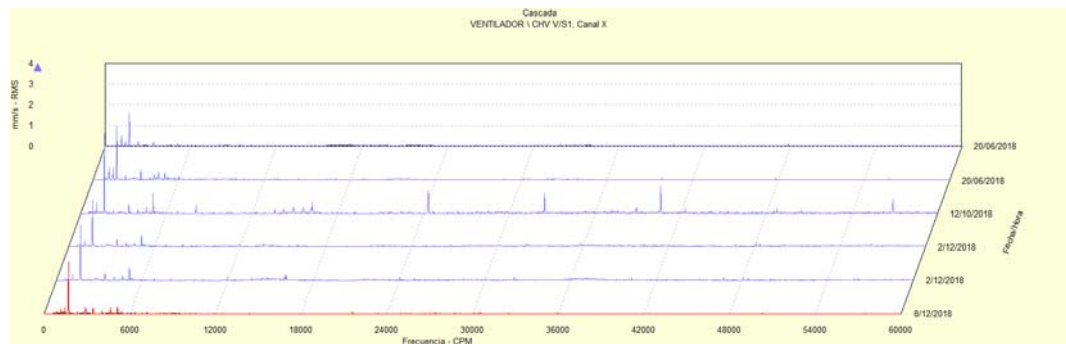
Figura 74. Tendencia en g rms del punto C caso No.1



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

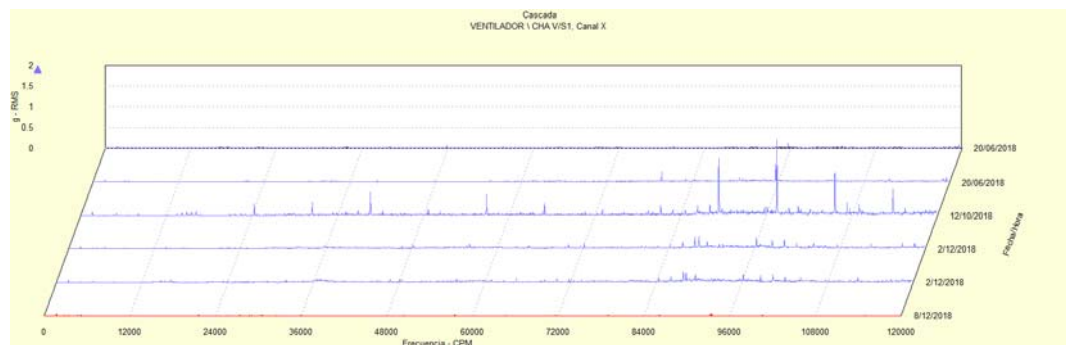
A su vez en los espectros de cascada de las figuras 75 y 76, correspondientes a los espectros de velocidad y aceleración respectivamente, se observa como aparecen y aumentan las amplitudes de los armónicos asociados a las frecuencias de falla del rodamiento y a su vez desaparecen tras el cambio del mismo para la medición del 8 de diciembre del 2018.

Figura 75. Espectro de cascada en mm/s rms punto C caso No.1



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Figura 76. Espectro de cascada en g punto C caso No.1

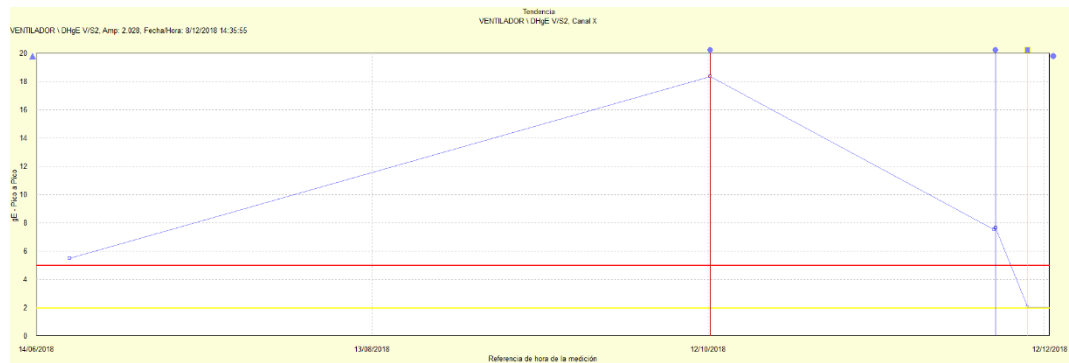


Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Al igual que el punto C, en el punto D se observa un aumento en la tendencia en la tercera medición realizada el 12 de octubre como se observa en la figura 77 marcado con el cursor rojo, llegando a valores muy por encima del nivel de peligro configurado de 5 gE, alcanzando un punto máximo en 18,4 gE, lo cual conlleva también a aplicar lubricante al rodamiento, tras ello se procede a realizar nuevamente otra medición el 02 de diciembre marcado con el cursor azul, observando una disminución considerable del valor a 7,5 gE considerado elevado aún; al igual que el punto C se procede a aplicarle lubricante al rodamiento el mismo día y se mide tras 6 horas de operación continua del equipo, tras este periodo de tiempo se toma nuevamente una medición sin observar cambios relevantes ya que el valor se encuentra en 7,6 gE, al observar que el rodamiento no responde como se esperaba a la lubricación realizada, derivado de la solicitud para el cambio del rodamiento en el punto C, se aprovecha el desarme del equipo y se solicita el cambio del rodamiento en el punto D.

Posteriormente tras el cambio del rodamiento se procede a tomar una medición el 08 de diciembre, donde se observa como el valor disminuyo considerablemente hasta un valor aceptable de 2 gE mostrado con el cursor amarillo.

Figura 77. Tendencia de aceleración envolvente en gE punto D caso No.1

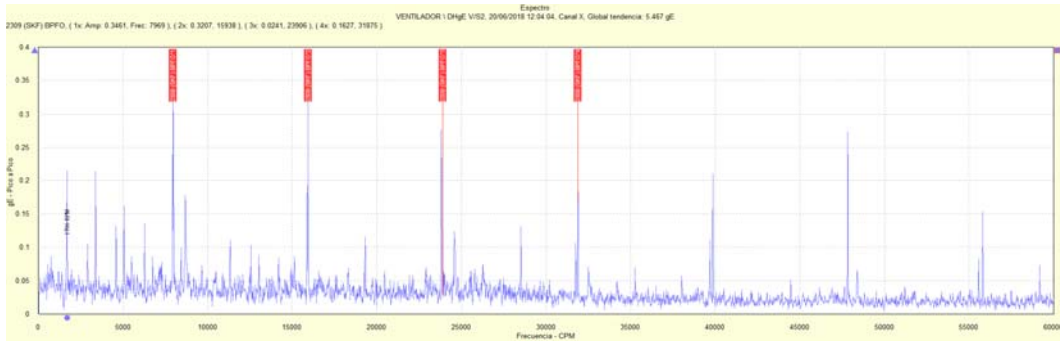


Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

A continuación, se procede a detallar el análisis realizado sobre los espectros.

El 20 de junio se realiza la primera medición del equipo observando un valor global de 5,4 gE; en el espectro de la figura 78, donde se observa la BPFO excitada con armónicas y leve levantamiento de piso espectral denotando posibles deficiencias en la lubricación del componente, sin embargo la amplitud de los picos se mantiene por debajo del umbral de 0,5 gE, se procedió únicamente a lubricar el rodamiento sin obtener una respuesta adecuada a la misma, por ende se consideró que el rodamiento se encontraba en una etapa temprana de daño, sin embargo aún no se percibe severidad, por tanto se dejó operar el rodamiento durante más tiempo.

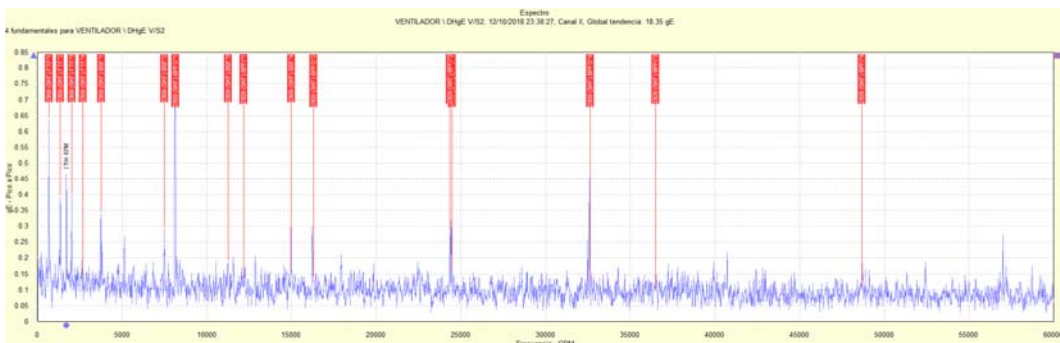
Figura 78. **Espectro de aceleración envolvente en gE 20 de junio del 2018 punto D caso No.1**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Del 20 de junio al 12 de octubre se observa un aumento considerable de la BPFO, así como la aparición de la FTF y ruido de piso en el espectro, en este caso la amplitud de los picos excitados que predominan en el espectro aun no alcanza el umbral de 1 gE, como se observa en la figura 79, por tanto únicamente se lubrica el rodamiento y se programar otra medición dentro de 2 meses.

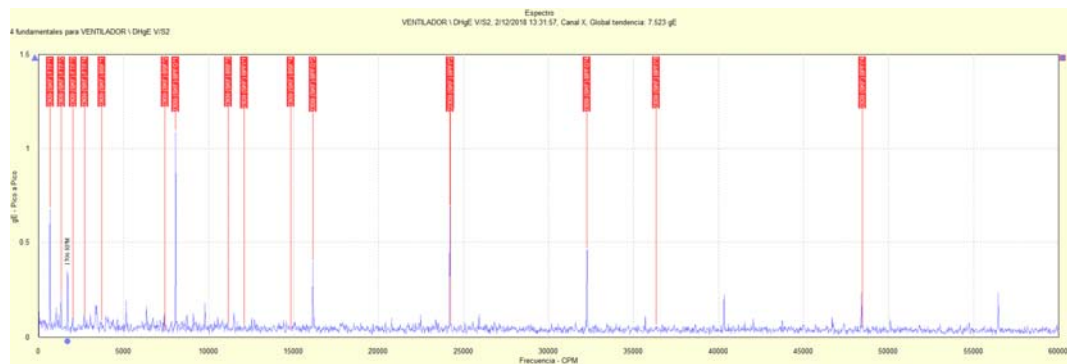
Figura 79. **Espectro de aceleración envolvente en gE 12 de octubre del 2018 punto D caso No.1**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

El 2 de diciembre continuando con el monitoreo de ambos puntos, se toma otra medición en el punto D observando una disminución de los valores globales a 7,5 gE con respecto a la medición de octubre como se muestra en la figura 80, observando una disminución del ruido de piso en el espectro denotando una mejora en la película de lubricación del rodamiento, sin embargo se observa un incremento en las amplitudes de la BPFO y sus armónicas, mientras la FTF continua excitada sin cambio aparente en los valores de amplitud.

Figura 80. **Espectro de aceleración envolvente en gE 2 de diciembre del 2018 punto D caso No.1**



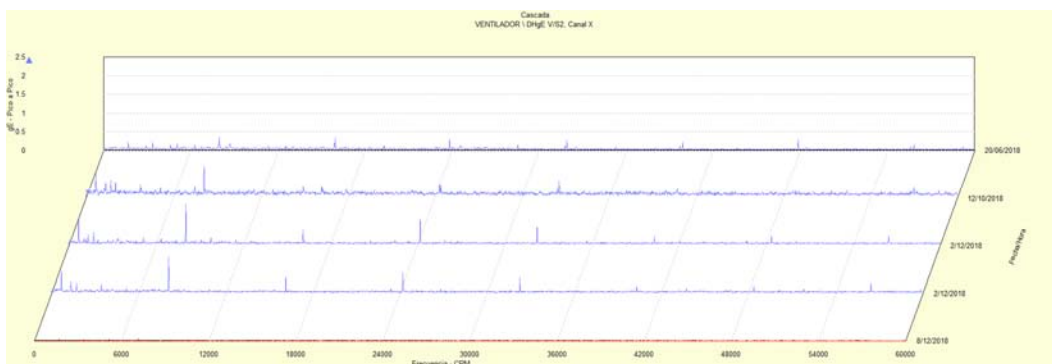
Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

A pesar de que el valor global se encuentra más bajo que la medición realizada previamente en octubre, el aumento en las amplitudes de los armónicos de la BPFO nos indica un leve agravamiento de la condición del rodamiento, se observa que la amplitud de varios armónicos alcanza o supera el umbral de 1 gE, sin embargo la pista externa de un rodamiento es el componente que soporta mayores esfuerzos, por ende se procede únicamente a lubricar el rodamiento nuevamente en esta fecha. En esta ocasión el valor no muestra cambios relevantes quedándose en 7,6 gE.

Tras la solicitud del cambio de rodamiento en el punto C y observando que el rodamiento del punto D presenta indicios de falla temprana se aprovechara el desarme del equipo para cambiar ambos rodamientos.

En la figura 81 se observa el gráfico de cascada para los valores de aceleración envolvente en el punto D, donde se observa como aparecen y aumentan las amplitudes de los armónicos asociados a las frecuencias de falla del rodamiento y a su vez desaparecen tras el cambio del mismo.

Figura 81. **Espectro de cascada en gE punto D caso No.1**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Tras el análisis realizado se realizan las siguientes recomendaciones:

- Verificar las rutinas de lubricación del equipo.
- Verificar la frecuencia de las rutinas de monitoreo del equipo.

5.2. Caso No.2

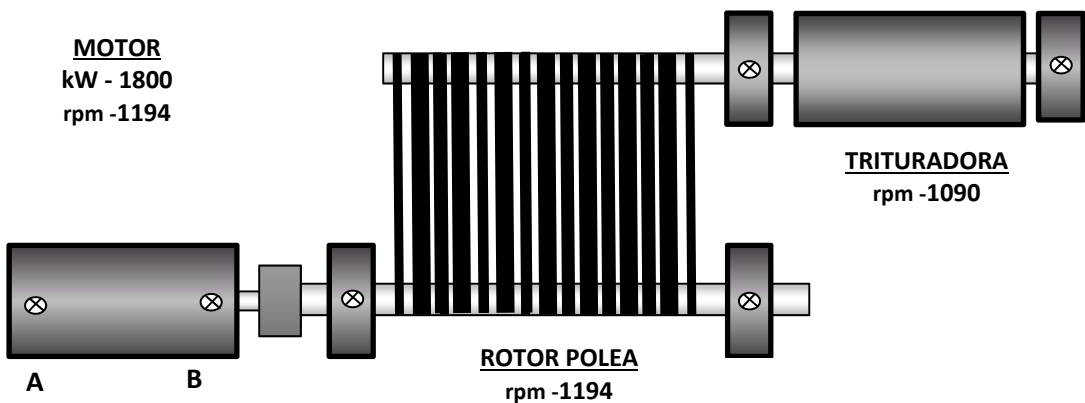
Para el presente caso se realiza un análisis en el motor de accionamiento de una trituradora de material rocoso. Las variables analizadas son la aceleración envolvente en gE y aceleración en g con sus respectivos espectros de frecuencia y tendencias. En la tabla V se recopilan los datos relevantes para el análisis de vibraciones, mientras que en la figura 82 se presenta un esquema del montaje del equipo, indicando los puntos escogidos para coleccionar los datos de vibración. Las mediciones mostradas, fueron realizadas entre 02 de febrero del 2018 al 30 de enero del 2019, cubriendo las etapas de arranque inicial, operación con carga, mantenimiento del motor para cambio de rodamientos y puesta en marcha tras mantenimiento.

Tabla V. **Datos de equipo motor de trituradora**

Descripción	Motor de accionamiento de trituradora	Filtro de paso de banda	3
Transmisión	Acople directo	Unidad de medición	gE
Potencia del motor	1 800 kW	Alarma de alerta gE	2,5
Velocidad del motor	1194 rpm	Alarma de peligro gE	7
Rodamientos del motor	Carga: SKF 6 338M-C3 Opuesto: SKF 6 334M-C3	Límite de vibración según ISO 10816-3	11 mm/s rms
Analizador	SKF Microlog Analyzer GX		
Sensor	CMCC2 200 SKF		

Fuente: elaboración propia.

Figura 82. Diagrama de montaje del equipo



Fuente: elaboración propia.

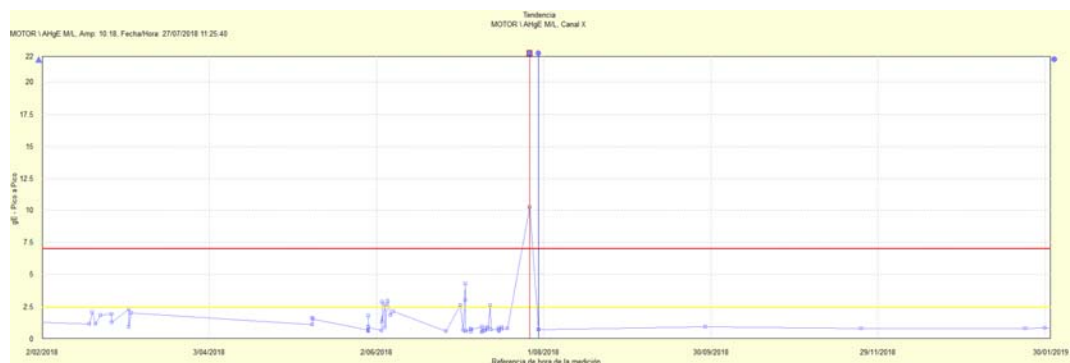
El presente análisis surge de la necesidad del cambio de lubricante en el motor, derivado a que estuvo almacenado por un tiempo mayor a 5 años, si bien el almacenaje y mantenimiento fue realizado de forma adecuada según las recomendaciones del fabricante para equipo parado, el fabricante recomienda el cambio del lubricante después de 5 años sin operación del equipo. Sin embargo, no fue posible realizar el cambio de grasa previo a la puesta en marcha del equipo.

La recomendación del fabricante se debe a que la grasa pierde sus propiedades durante este lapso de tiempo, siendo muy probable que el aceite base se separe del elemento espesante, provocando una lubricación deficiente en operación.

En las figuras 83 y 84 se observa una tendencia relativamente estable de los valores de aceleración envolvente y aceleración respectivamente, para el

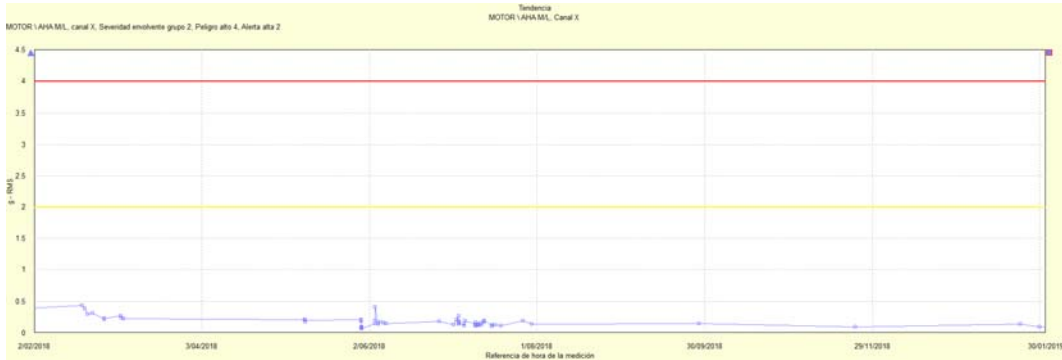
motor en el punto A durante todo el período analizado. En el caso de la tendencia de aceleración envolvente de la figura 83 se observa un alza puntual a 10,2 gE por encima del valor de alarma en la medición del 27 de julio del 2018 marcada con el cursor rojo, cabe destacar que esta medición fue realizada posterior al cambio del rodamiento; en este caso en particular el aumento se atribuye a una deficiencia de lubricación puntual, ya que en la medición del 30 de Julio marcada con el cursor azul, muestra un valor de 0,73 gE, es decir, vuelve a estabilizar y tras un mayor tiempo de estabilización se observa que la tendencia continua en condición normal.

Figura 83. Tendencia de aceleración envolvente en gE punto A caso No.2



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Figura 84. Tendencia de aceleración en g rms del punto A caso No.2

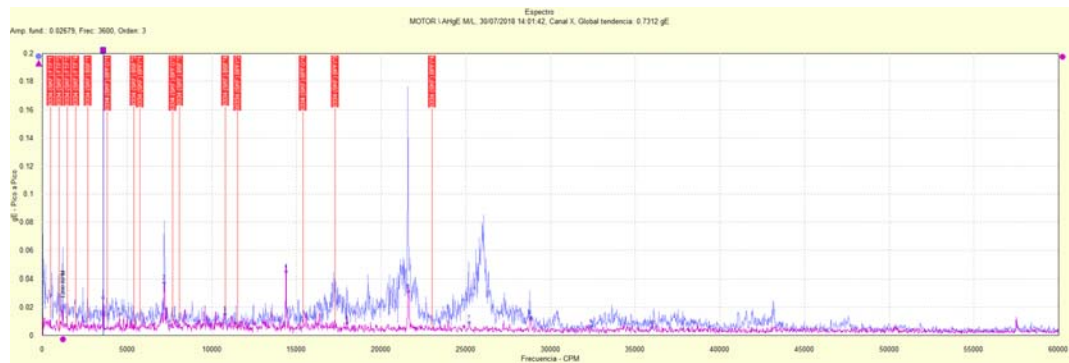


Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

A continuación, se procede a comentar el análisis realizado sobre los espectros.

En la figura 85, se observan dos espectros de aceleración envolvente, en color azul el espectro correspondiente al 20 de febrero del 2018 previo al cambio del rodamiento con un valor de 2 gE, mientras que en color fucsia se muestra el espectro correspondiente al 30 de julio del 2018 tras el cambio de rodamiento con un valor de 0,73 gE, se observa en ambos un leve levantamiento de piso espectral y picos dominantes a FL. A su vez cabe destacar que el ruido espectral disminuye levemente tras el cambio de rodamientos mientras la FL persiste. Sin embargo, en ninguno de los dos casos se logran ver frecuencias de falla excitadas o problemas correspondientes a la película de lubricante del rodamiento.

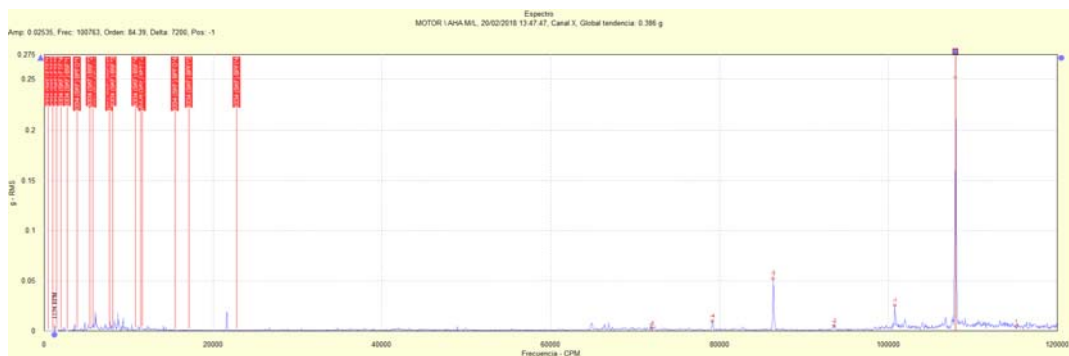
Figura 85. **Espectros superpuestos de aceleración envolvente en gE del 20 de febrero y 30 de julio del 2018 punto A caso No.2**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

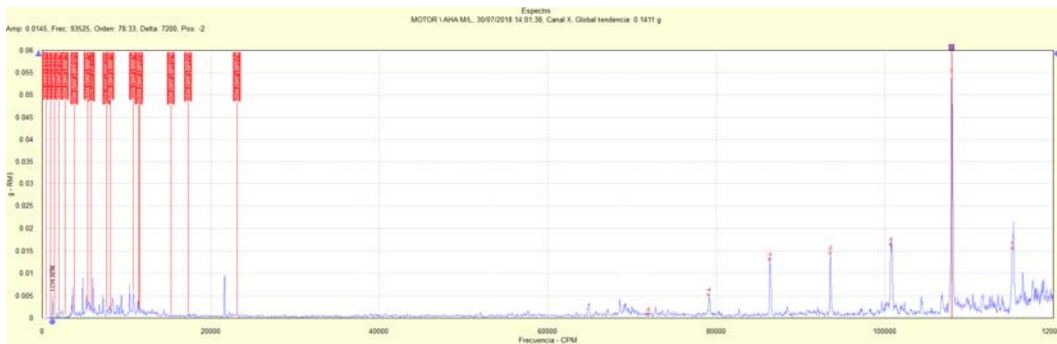
Para el caso de los espectros de aceleración mostrados en las figuras 86 y 87, antes y después del cambio de rodamientos respectivamente, se observa únicamente ruido en alta frecuencia con modulación a 2XFL, sin frecuencias de falla del rodamiento excitadas.

Figura 86. **Espectro de aceleración en g 20 de febrero del 2018 punto A caso No.2**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Figura 87. Espectro de aceleración en g 30 de julio del 2018 punto A caso No.2



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

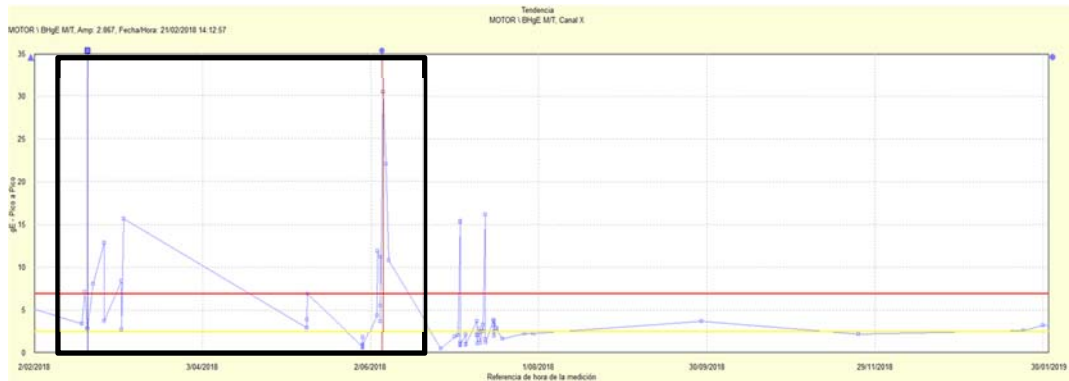
La excitación de frecuencias asociadas a FL y 2XFL, es atribuible a problemas o ruidos eléctricos del rotor o devanado del motor, para el presente caso no es una variable de interés que denote problema en la condición del rodamiento, ya que este ruido observado es considerado normal para el presente caso.

Por ende, se puede concluir que el rodamiento en este punto se encontraba en buen estado antes del cambio de rodamientos y tras el cambio continua con una tendencia adecuada, por tanto puede seguir operando sin restricciones, mientras que los valores observados en esta ventana de tiempo son considerados aceptables según las alarmas predefinidas.

Para el caso del rodamiento en el punto B, durante febrero y principios de junio del 2018 enmarcado en el cuadro negro en la figura 88 se observa una tendencia inestable en los valores de aceleración envolvente, oscilando entre 3 y 31 gE continuamente sobre pasando las alarmas de alerta y peligro durante el periodo de puesta en marcha y operación con carga, a su vez también se observa

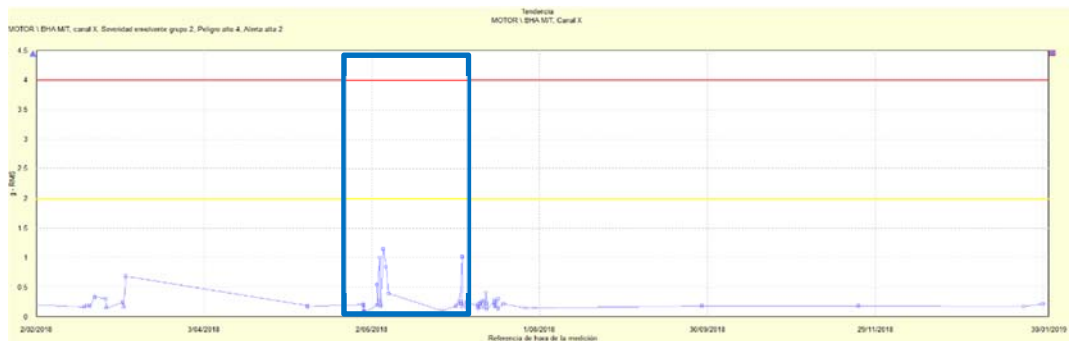
una ligera inestabilidad en los valores de aceleración enmarcado en el cuadro azul de la figura 89 que concuerdan con las oscilaciones de los valores de aceleración envolvente, sin embargo para este caso los valores no sobrepasan los valores de alerta y peligro configurados.

Figura 88. Tendencia de aceleración envolvente en gE punto B caso No.2



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Figura 89. Tendencia de aceleración en g del punto B caso No.2

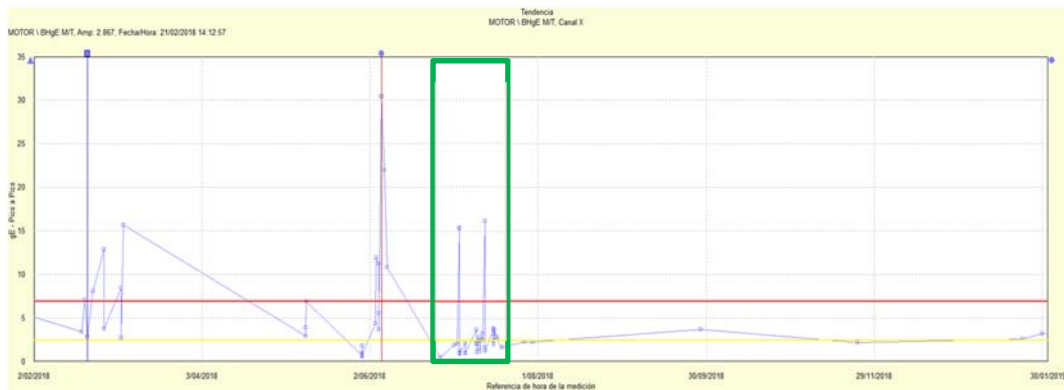


Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

El comportamiento de inestabilidad observado en los valores de aceleración envolvente nos da una indicio de problemas en la formación de la película de aceite, lo cual sugiere una deficiente formación de la misma, ya que el valor debe ser lo más estable posible entre mediciones sin importar la magnitud del mismo, por su parte cabe destacar que durante el periodo de tiempo de inestabilidad descrito previamente, se estuvieron realizando lubricaciones de manera continua bajo condición por ultrasonido y monitoreando los valores de aceleración envolvente en búsqueda de estabilizar los mismos, lo cual no fue exitoso; tras lo observado podemos determinar que el rodamiento presenta un régimen de lubricación deficiente sin alguna frecuencia de falla excitada, que permite su operar mas no garantiza su fiabilidad, tomando en cuenta que la lubricación deficiente ocasionara un daño en el rodamiento a posterior, impidiendo que el rodamiento cumpla con la totalidad de sus ciclo de vida útil.

En búsqueda de la confiabilidad del equipo, siguiendo la sugerencia del fabricante del cambio de grasa y que se cuenta con una ventana de tiempo para mantenimiento, se procede a realizar el cambio de rodamientos y grasa en ambos puntos en el motor. Tras ello se observa una leve inestabilidad en los valores durante su posterior puesta en marcha entre junio y julio del 2018, dicho período de tiempo se enmarca en el cuadro verde en la figura 90 y tras las lubricaciones realizadas por condición mediante ultrasonido durante este periodo de tiempo, se logran estabilizar los valores en una zona por encima de los valores de alarma configurados inicialmente, por tanto podemos tomar como línea base los nuevos valores estables de aceleración envolvente y evaluar reconfigurar los valores de alarma configurados.

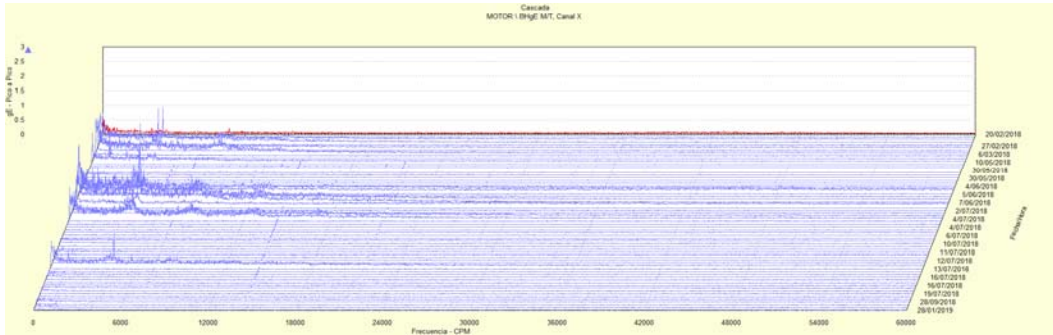
Figura 90. **Tendencia de aceleración envolvente en gE punto B caso No.2**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

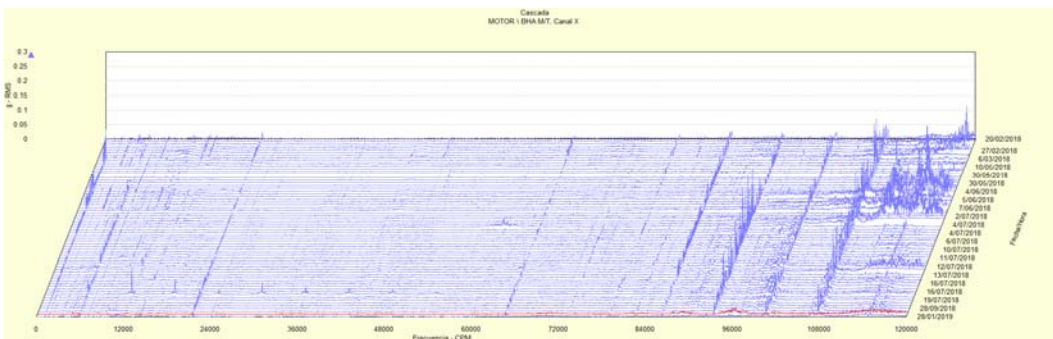
Aunado a la revisión de las tendencias realizadas previamente se complementa el diagnóstico de la condición de los rodamientos con el correspondiente análisis de los espectros de frecuencia para una mejor toma de decisión. En las figuras 91 y 92, se observa los espectros de cascada para los valores de aceleración envolvente y aceleración respectivamente. Para el caso de aceleración envolvente se observa el continuo cambio de la condición del piso espectral previo al cambio de rodamiento, posterior al mismo se observa como el ruido espectral disminuye considerablemente denotando una correcta formación de la película de aceite, para el caso del espectro de cascada de aceleración también se logra observar un mayor ruido espectral en alta frecuencia denotando lubricación deficiente acompañado de modulación a 2XFL, lo cual concuerda con el ruido eléctrico observado en los espectros del punto A, considerado normal como se observó previamente, tras el cambio de rodamiento se observa la disminución de este ruido de piso espectral y continúan excitadas las frecuencias asociadas a 2XFL.

Figura 91. **Espectro de cascada en gE punto B caso No.2**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Figura 92. **Espectro de cascada en g punto B caso No.2**

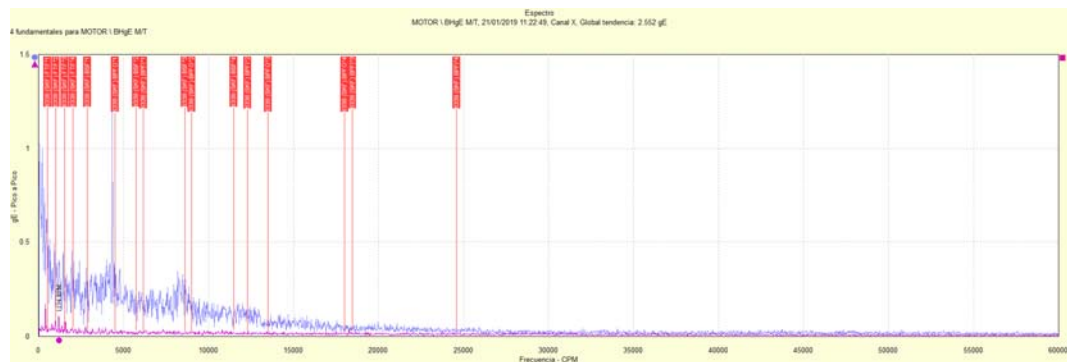


Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

En la figura 93, se observan dos espectros de aceleración envolvente, en color azul el espectro correspondiente al 20 de febrero 2018 previo al cambio del rodamiento con un valor de 12,8 gE, mientras que en color fucsia se muestra el espectro correspondiente al 21 de Enero del 2019 tras el cambio de rodamiento y posterior estabilización de los valores con un valor de 2,5 gE, observando el cambio considerable en la amplitud del ruido de piso, antes y después del cambio de rodamiento; como se puede observar no se perciben frecuencias de falla

excitadas antes del cambio así como después del mismo, lo cual sugería que el rodamiento cambiado pudo haber seguido operando, sin embargo debido a las consideraciones planteadas previamente se tomó la decisión del cambio de rodamientos realizándolo de manera programada y sin afectar las consignas de producción del equipo.

Figura 93. Espectros superpuestos de aceleración envolvente en gE del 20 de febrero del 2018 y 21 enero del 2019 del punto B caso No.2



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Tras el análisis realizado se realizan las siguientes recomendaciones:

- Realizar un protocolo de engrase bajo condición del motor tras un mantenimiento.
- Optimizar las rutinas de lubricación del equipo.
- Evaluar reconfigurar los valores de alarma y peligro de aceleración envolvente.
- Verificar la frecuencia de las rutinas de monitoreo del equipo.

A continuación, se muestra en la figura 94 como se encontró la condición de la grasa en el punto A tras el desarme, como se logra apreciar el color de la grasa no es el adecuado, ya que debe ser más claro como el mostrado en la figura 97, donde se observa el rodamiento engrasado con grasa nueva.

Figura 94. **Condición de la grasa punto A tras el desarme**



Fuente: elaboración propia, Taller de mantenimiento planta SG.

Por su parte en la figura 95, se observa el rodamiento del punto B, donde se logra apreciar una deficiencia en la cantidad de lubricante en este rodamiento, a su vez el color tampoco se observa como el de la figura 98; mientras que en la figura 96, se muestra la parte interna del motor en el punto B, donde se logra observar como el aceite base de la grasa ya se había separado del espesante, ocasionando una deficiente formación de la película de aceite para la correcta lubricación del punto lo cual pudo observarse mediante la oscilación de los valores de aceleración envolvente durante las mediciones.

Figura 95. **Condición de la grasa punto B tras el desarme**



Fuente: elaboración propia, Taller de mantenimiento planta SG.

Figura 96. **Desprendimiento del aceite base en el punto B tras el desarme**



Fuente: elaboración propia, Taller de mantenimiento planta SG.

En la figura 97 se observa el rodamiento del punto A nuevo, montado en el rotor y engrasado según especificaciones de manual para su puesta en el motor nuevamente, mientras que en la figura 98 se observa el rodamiento en el punto B de igual forma engrasado según especificaciones del manual. Como se observa el color de la grasa nueva en ambos casos es considerablemente

diferente con respecto al color mostrado por la grasa en las figuras 94 y 95, el cual puede atribuirse a una degradación de la grasa.

Figura 97. Condición de la grasa punto A previo al montaje del rodamiento nuevo



Fuente: elaboración propia, Taller de mantenimiento planta SG.

Figura 98. Condición de la grasa punto B previo al montaje del rodamiento nuevo



Fuente: elaboración propia, Taller de mantenimiento planta SG.

5.3. Caso No.3

En el presente caso se analiza los rodamientos de un ventilador extractor de aire de proceso, el análisis se realiza específicamente sobre ambos rodamientos del ventilador, observando como se comporta el valor de aceleración envolvente y los espectros correspondientes durante un proceso de lubricación.

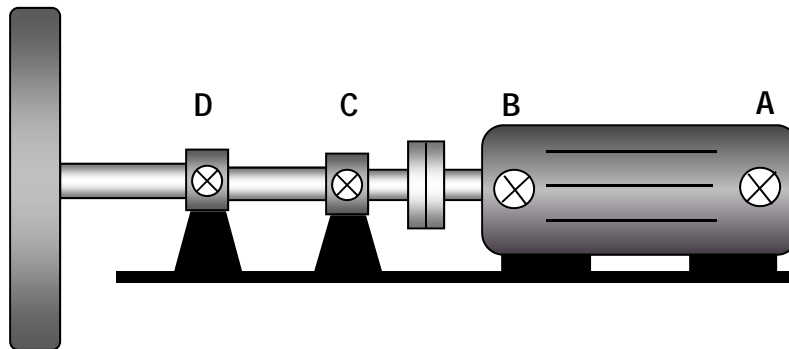
Para el análisis de vibraciones, las mediciones efectuadas fueron: vibración global en unidades de aceleración en g y aceleración envolvente en gE con espectros de frecuencia. En la tabla VI se recopilan los datos relevantes para el análisis de vibraciones, mientras que en la figura 99 se presenta un esquema del montaje del equipo, indicando los puntos escogidos para coleccionar los datos de vibración. Los valores analizados corresponden al rango de fechas del 14 de julio al 05 de diciembre del 2018.

Tabla VI. **Datos de equipo motor de ventilador**

Descripción	Ventilador extractor de aire	Sensor	CMCC2200 SKF
Transmisión	Acople directo	Filtro de envolvente	3
Potencia Motor	300 hp	Unidad de medición	gE
Velocidad del motor	1 785 rpm	Alarma de alerta	2,6 gE
Velocidad del ventilador	1 785 rpm	Alarma de peligro	7,5 gE
Rodamientos del ventilador	C = Carga: SKF 23 220 CCK D = Opuesto: SKF 23 220 CCK	Límite de vibración según ISO 10816-3	4,5 mm/s rms
Analizador	SKF Microlog Analyzer GX		

Fuente: elaboración propia.

Figura 99. **Diagrama de montaje del equipo**

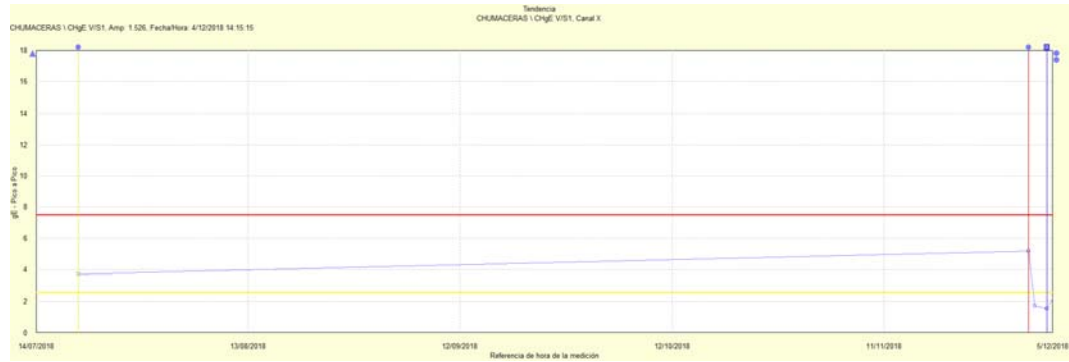


Fuente: elaboración propia.

La medición inicial durante la puesta en marcha del equipo en el punto C, realizada el 27 de julio, arrojó un valor de 3,7 gE marcado con el cursor amarillo como se muestra en la figura 100, en la siguiente medición realizada el 02 de diciembre, se observa un ligero aumento en la tendencia a 5,2 gE marcado con el cursor rojo, se decide lubricar el rodamiento observando un descenso de la tendencia hasta un valor de 1,5 gE el 04 de diciembre tras dos días de estabilización.

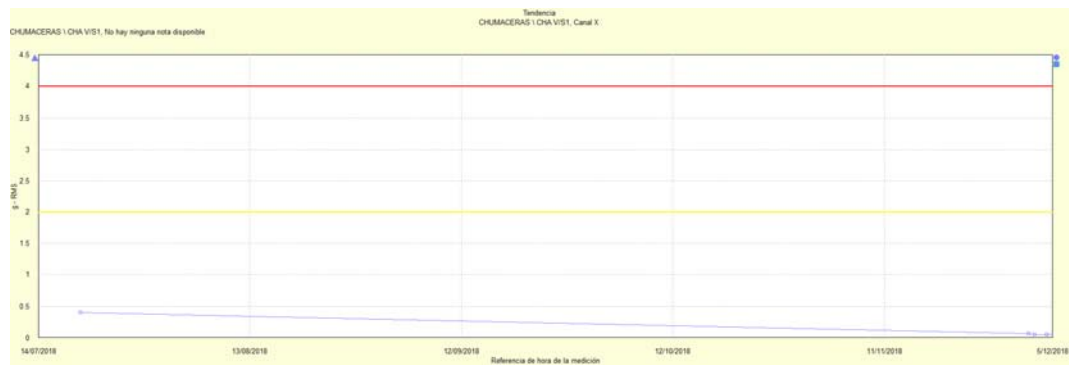
Por su parte la tendencia de los valores de aceleración en g de la figura 101, no muestra valores relevantes, estando todos por debajo de los 0,5 g; a su vez tampoco se perciben aumentos relevantes en las tendencias, lo cual nos indica que el rodamiento se encuentra en buenas condiciones sin problemas aparentes de daño en el rodamiento.

Figura 100. **Tendencia de aceleración envolvente en gE punto C caso No.3**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Figura 101. **Tendencia de aceleración en g rms del punto C caso No.3**

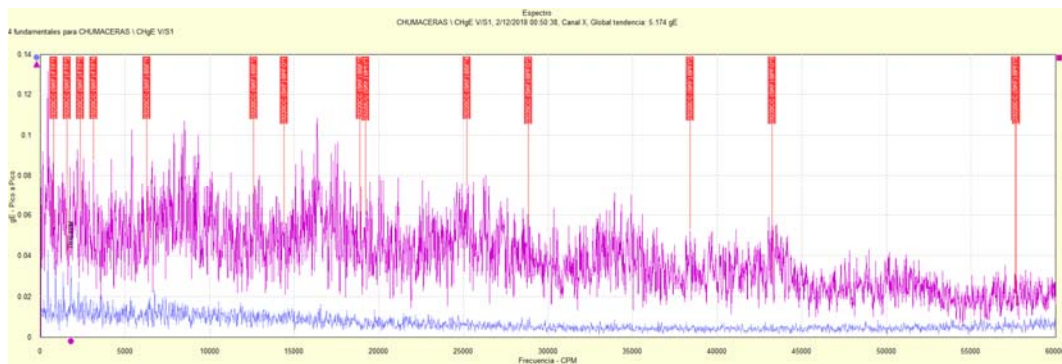


Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst..

A continuación, se procede a comentar el análisis realizado sobre los espectros.

En la figura 102 se observan dos espectros de aceleración envolvente, en color fucsia se muestra el espectro correspondiente al 02 de diciembre previo a la lubricación con un valor de 5,2 gE, el cual muestra levantamiento de piso espectral, lo cual sugiere una lubricación deficiente, mientras en color azul el espectro correspondiente al 04 de diciembre posterior a la lubricación realizada con un valor de 1,5 gE. Por tanto se puede observar que la lubricación realizada fue efectiva para el rodamiento.

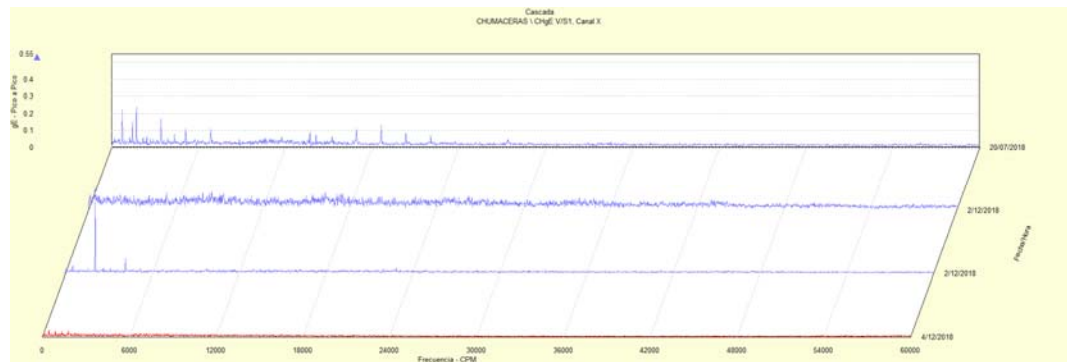
Figura 102. **Espectros superpuestos de aceleración envolvente en gE del 2 de diciembre y 4 diciembre del 2018 del punto C caso No.3**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

En el espectro de cascada de la figura 103, se observa como desaparece el ruido de piso espectral asociado a lubricación deficiente, así como los picos excitados, lo cual se logra debido a que tras lubricar se vuelve a formar una adecuada película de aceite y se evita la fricción ocasionada por una lubricación deficiente.

Figura 103. **Espectro de cascada en gE punto C caso No.3**

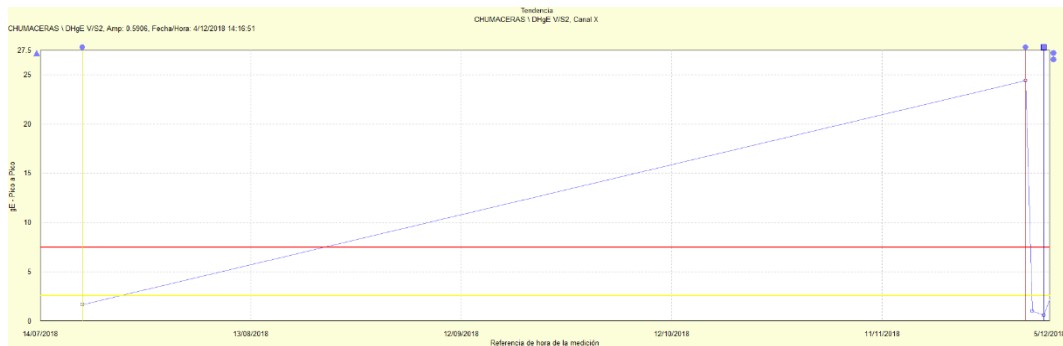


Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Por su parte para el caso del punto D, la medición durante la puesta en marcha del equipo realizada el 27 de julio, arrojo un valor de 1,6 gE marcado con el cursor amarillo como se muestra en la figura 104, en la siguiente medición realizada el 02 de diciembre, se observa un aumento considerable en la tendencia hasta un valor de 24,4 gE marcado con el cursor rojo, por tanto se decide también lubricar el rodamiento observando un descenso de la tendencia hasta un valor de 0,59 gE el 04 de Diciembre tras dos días de estabilización.

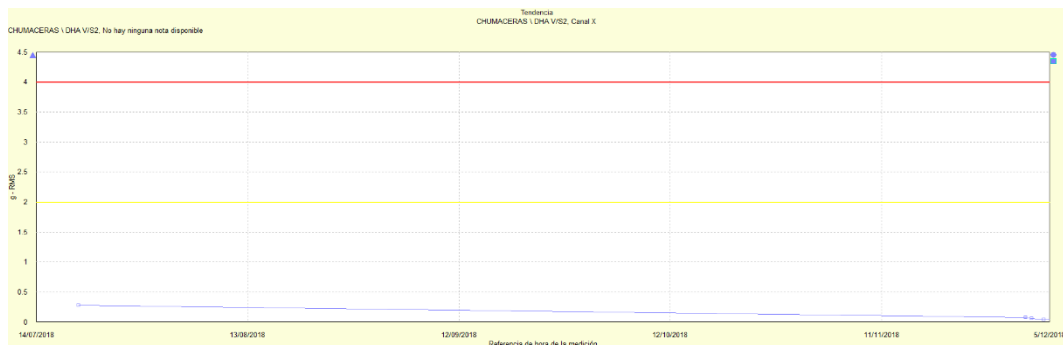
Por su parte la tendencia de los valores de aceleración en g de la figura 105, tampoco muestran valores relevantes, estando todos por debajo de los 0,5 g, lo cual nos indica que el rodamiento se encuentra en buenas condiciones sin problemas aparentes de daño en el rodamiento.

Figura 104. **Tendencia de aceleración envolvente en gE punto D caso No.3**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Figura 105. **Tendencia de aceleración en g rms del punto D caso No.3**

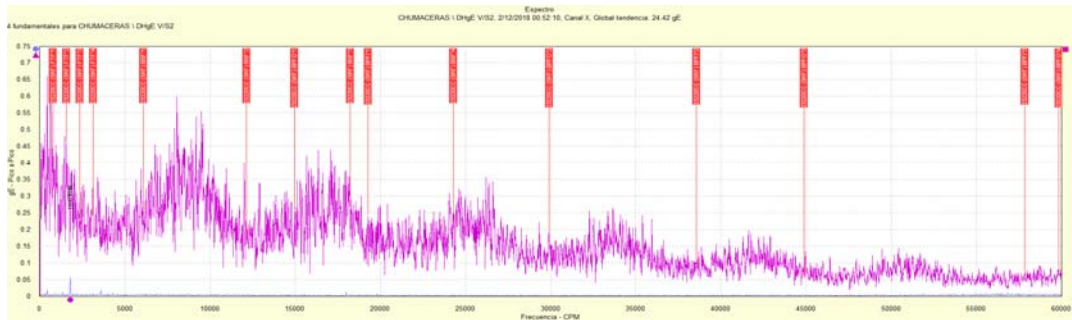


Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

En la figura 106, se observan dos espectros de aceleración envolvente, en color fucsia se muestra el espectro correspondiente al 02 de diciembre previo a la lubricación con un valor de 24,4 gE, el cual muestra levantamiento de piso espectral considerable, lo cual sugiere un pobre en el régimen de lubricación, mientras en color azul el espectro correspondiente al 04 de diciembre posterior a

la lubricación realizada con un valor de 0,59 gE. Por tanto se puede observar que la lubricación realizada fue efectiva para el rodamiento.

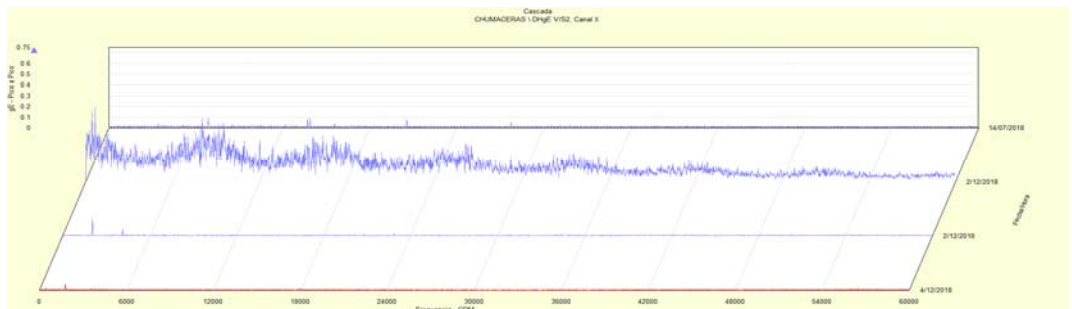
Figura 106. **Espectros superpuestos de aceleración envolvente en gE del 2 de diciembre y 4 diciembre del 2018 del punto D caso No.3**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

Por último, se observa el espectro de cascada de la figura 107, donde desaparece el ruido de piso asociado a lubricación deficiente, tras la lubricar se vuelve a formar una adecuada película de aceite y se evita la fricción ocasionada por una lubricación deficiente.

Figura 107. **Espectro de cascada en gE punto D caso No.3**



Fuente: elaboración propia, empleando base de datos planta SG en software aptitude analyst.

CONCLUSIONES

1. El análisis de vibraciones es una herramienta fundamental para el mantenimiento basado en condición, es eficaz dentro de un rango considerable de la curva P-F para la detección anticipada de fallas en general; para el caso de rodamientos la aceleración envolvente ha demostrado ser una técnica de procesamiento de señal sumamente útil para evaluar la condición de un rodamiento, brindando la posibilidad de ejecutar acciones proactivas de mantenimiento como lubricaciones por condición de los equipos o programar cambios de rodamiento en paradas programadas, disminuyendo así los paros no programados.
2. Según la normativa ISO existen 6 formas en las que se pueden clasificar los daños en los rodamientos; debemos enmarcar las fallas observadas en alguna de las clasificaciones definidas, para tratar de mitigar las mismas al montar nuevos rodamientos tras un remplazo por la detección de una falla. Las etapas de falla quedan englobadas en 4, donde cada una representa una criticidad mayor conforme va avanzando la falla dándonos indicios del momento más oportuno para realizar el cambio de un rodamiento.
3. Existen múltiples herramientas para la detección de daños en rodamientos, algunas dependen del fabricante del analizador de vibraciones con el que se recopila y lleva a cabo el análisis de vibraciones y otras son metodologías prácticas que nos brindan un panorama general de la condición de un rodamiento.

4. La herramienta de aceleración envolvente brindada por SKF, nos facilita la configuración de filtros predefinidos que monitorean los rangos de frecuencia donde se suelen encontrar la mayoría de indicios de las fallas en los rodamientos, según la etapa de degradación en la que se encuentren, basándonos en su velocidad de operación; a su vez la metodología para la configuración de alarmas iniciales nos brinda la posibilidad de configurar alarmas de alerta y peligro de equipos durante su puesta en marcha.

5. El análisis de tendencias y espectros de aceleración envolvente demuestra ser una herramienta sumamente útil para el diagnóstico de la condición de los rodamientos, detectando daños en los mismos y problemas en la lubricación, para una mejor toma de decisión en cuanto a que tarea de mantenimiento ejecutar con la suficiente antelación para evitar fallas y en los rodamientos.

RECOMENDACIONES

1. Evitar basarse únicamente por el valor global de aceleración envolvente gE, se deberá tomar en cuenta también si existen frecuencias de falla en el espectro de frecuencia, así como la amplitud de dichas frecuencias para una mejor toma de decisión, recordar que amplitudes arriba de 1 gE y la aparición de frecuencias de falla en espectros de velocidad son consideradas indicios de severidad.
2. Tomar decisiones para el cambio de un rodamiento en conjunto con las diversas disciplinas de mantenimiento y el área productiva, para determinar el mejor momento para realizar el cambio con el menor impacto económico posible.
3. Evitar comparaciones entre las diversas herramientas para el monitoreo de condición de rodamientos; los valores de condición del rodamiento como la aceleración envolvente medida en gE y el peakvue entre otros, no son comparables entre sí; al momento de cambiar de técnica para el monitoreo de rodamientos se deberá establecer una nueva línea base para definir valore de alarma y peligro nuevos.
4. Configurar las alarmas estadísticamente, tomando como referencia equipos con operación similar.

BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ RAMÍREZ, Alex Jorge. *Técnicas de diagnósticos de daños incipientes en rodamientos*. Chile: Tesis Ingeniero Ejecución en Mecánica universidad de Magallanes, 2005. 121 p.
2. ESTUPIÑAN Edgar; SAAVEDRA, Pedro. *Técnicas de diagnóstico para el análisis de vibraciones de rodamientos*. [en línea]. <http://www.mantenimientoplanificado.com/art%C3%ADculos%20PREDICTIVO_archivos/galileo.dim.edec.cl%20lmv/articulo_rodamientos_CHILE1.pdf>. [Consulta: 3 de junio de 2018].
3. KRUGER, William. *Detectando fallas en rodamientos utilizando métodos de pruebas eléctricos y mecánicos de vibración*. Estados Unidos: ALL-Test Pro, 2010. 14 p.
4. LEE, Greg. *Aceleración envolvente*. [en línea]. <<https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/aceleracionenvolvente>> [Consulta: 18 de Mayo del 2018].
5. MAIS, Jason y BRADY, Scott. *Introduction guide to vibration monitoring*. United States of America: SKF Reliability Systems, 2002. 33 p.
6. MOBLEY, R. Keith. *Maintenance fundamentals*. 2a ed. United States of America: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. 418 p.

7. MOUBRAY, Jhon. *Mantenimiento centrado en confiabilidad*. Edición en español. Estados Unidos: Edward Brothers Lillington, 2004. 425 p.
8. OVALLE VILLARROEL, Julio. *Análisis Envolvente*. Estados Unido: SKF Mining, Processing & Cement, 2018. 36 p.
9. SKF. *Vibration diagnostic guide*. United States of America: SKF Reliability Systems, 2000. 27 p.
10. _____. *Bearing damage and failure analysis*. United States of America: SKF group, 2014. 101 p.
11. WEI, Jim. *Recommended initial alarm criteria for bearing condition assessment using enveloped acceleration measurements*. United States of America: SKF Reliability Systems, 2003. 27 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Factores para cálculo de frecuencias de falla rodamiento SKF 6208 utilizados por el motor del caso No.1

General Cojinetes Otr.

Fabricante: SKF

Buscar cojinete: 6208 Buscar

Cojinetes incluidos en el conjunto: 6208 (SKF)

Cojinetes disponibles (Modelo #): 6208

Excluir >> Incluir <<

Fundamentales de 6208

BPFO:	3.5775	BSF:	2.336524
BPF1:	5.4225	FTF:	0.3975

Agregar... Editar... Eliminar

Aceptar Cancelar Ayuda

Fuente: elaboración propia, empleando base de datos de rodamientos en software aptitude analyst.

Apéndice 2. **Factores para cálculo de frecuencias de falla rodamiento SKF 2309 utilizados por el ventilador del caso no.1**

General Cojinetes Otr.

Fabricante: SKF

Buscar cojinete: 2309

Cojinetes incluidos en el conjunto: 2309 (SKF)

Cojinetes disponibles (Modelo #): 2309

Fundamentales de 2309

BPFO:	4.724137	BSF:	2.161748
BPF1:	7.275863	FTF:	0.393678

Fuente: elaboración propia, empleando base de datos de rodamientos en software aptitude analyst.

Apéndice 3. **Factores para cálculo de frecuencias de falla rodamiento SKF 6334 utilizados por el motor lado opuesto del caso No.2**

General Cojinetes Otr.

Fabricante: SKF

Buscar cojinete: 6334

Cojinetes incluidos en el conjunto: Cojinetes disponibles (Modelo #):

6334 (SKF)	6334
------------	------

Fundamentales de 6334

BPFO:	3.161358	BSF:	2.279979
BPF1:	4.838642	FTF:	0.39517

Fuente: elaboración propia, empleando base de datos de rodamientos en software aptitude analyst.

Apéndice 4. **Factores para cálculo de frecuencias de falla rodamiento SKF 6338 utilizados por el motor lado carga del caso No.2**

General Cojinetes Otr.

Fabricante: SKF

Buscar cojinete: 6338 Buscar

Cojinetes incluidos en el conjunto: 6338 (SKF)

Cojinetes disponibles (Modelo #): 6338

Excluir >> Incluir <<

Fundamentales de 6338

BPFO:	3.81476	BSF:	2.456997
BPF1:	5.18524	FTF:	0.423862

Agregar... Editar... Eliminar

Aceptar Cancelar Ayuda

Fuente: elaboración propia, empleando base de datos de rodamientos en software aptitude analyst.

Apéndice 5. **Factores para cálculo de frecuencias de falla rodamiento SKF 23220 CC utilizados por el ventilador del caso no.3**

The screenshot shows a software window with three tabs: 'General', 'Cojinetes', and 'Otr.'. The 'Cojinetes' tab is active. It features a 'Fabricante:' dropdown menu set to 'SKF' and a 'Buscar cojinete:' text box containing '23220' with a 'Buscar' button. Below these are two list boxes: 'Cojinetes incluidos en el conjunto:' (empty) and 'Cojinetes disponibles (Modelo #):' containing '23220', '23220C', and '23220CC' (selected). Between the lists are 'Excluir >>' and 'Incluir <<' buttons. A table titled 'Fundamentales de 23220CC' displays the following data:

Fundamentales de 23220CC			
BPFO:	8.180895	BSF:	3.452135
BPFI:	10.819105	FTF:	0.430574

At the bottom of the window are buttons for 'Agregar...', 'Editar...', 'Eliminar', 'Aceptar', 'Cancelar', and 'Ayuda'.

Fuente: elaboración propia, empleando base de datos de rodamientos en software aptitude analyst.

Apéndice 6. **Cálculo de alarma y peligro para rodamientos en ge
caso no.1**

Motor: rodamiento SKF 6208 para el lado opuesto y lado carga. El diámetro del rodamiento es de 40 mm, el rango de frecuencia del espectro será de 1 000 Hz y gira a una velocidad de 1 760 rpm.

$$L_p = 0,000017 * 40^{0.55} * 1\ 000^{0.43} * 1\ 760 = 4,44 \text{ gE, se aproximara a } 4,5 \text{ gE}$$

$$L_a = 0,000006 * 40^{0.55} * 1\ 000^{0.43} * 1\ 760 = 1,57 \text{ gE, se aproximará a } 2 \text{ gE}$$

Ventilador: rodamiento SKF 2309 el lado opuesto y lado carga poseen el mismo tipo de rodamiento. El diámetro del rodamiento es de 45 mm, el rango de frecuencia del espectro será de 1 000 Hz y gira a una velocidad de 1 706 rpm

$$L_p = 0,000017 * 45^{0.55} * 1\ 000^{0.43} * 1706 = 4,59 \text{ gE, se aproximará a } 5 \text{ gE}$$

$$L_a = 0,000006 * 45^{0.55} * 1\ 000^{0.43} * 1706 = 1,62 \text{ gE, se aproximara a } 2 \text{ gE}$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7 **Cálculo de alarma y peligro para rodamientos en ge
caso no.2**

Motor: rodamiento SKF 6334 M-C3 para el lado opuesto y SKF 6338 M-C2 para el lado carga. El diámetro del rodamiento lado opuesto es de 170 mm y del lado carga es de 190 mm, el rango de frecuencia del espectro será de 1 000 Hz y gira a una velocidad de 1 194 rpm.

Cálculos lado opuesto:

$$L_p = 0,000017 * 170^{0.55} * 1\ 000^{0.43} * 1\ 194 = 6,67 \text{ gE, se aproximara a } 7 \text{ gE}$$

$$L_a = 0,000006 * 170^{0.55} * 1\ 000^{0.43} * 1\ 194 = 2,35 \text{ gE, se aproximara a } 2,5 \text{ gE}$$

Cálculos lado carga:

$$L_p = 0,000017 * 190^{0.55} * 1\ 000^{0.43} * 1\ 194 = 7,1 \text{ gE, se aproximara a } 7 \text{ gE}$$

$$L_a = 0,000006 * 190^{0.55} * 1\ 000^{0.43} * 1\ 194 = 2,5 \text{ gE}$$

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Cálculo de alarma y peligro para rodamientos en ge
caso no.3**

Ventilador: rodamiento SKF 23220 CCK para el lado opuesto y lado carga.
El diámetro del rodamiento es de 100 mm, el rango de frecuencia del espectro será de 1 000 Hz y gira a una velocidad de 1 785 rpm.

$$L_p = 0,000017 * 100^{0.55} * 1\ 000^{0.43} * 1\ 785 = 7,45 \text{ gE, se aproximara a } 7,5 \text{ gE}$$

$$L_a = 0,000006 * 100^{0.55} * 1\ 000^{0.43} * 1\ 785 = 2,63 \text{ gE, se aproximara a } 2,6 \text{ gE}$$

Fuente: elaboración propia.