



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

**TÉCNICAS DE APLICACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO
AGENTE INTEGRANTE DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

Raymond Steven García Pérez

Asesorado por el Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres

Guatemala, abril de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**TÉCNICAS DE APLICACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO
AGENTE INTEGRANTE DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

RAYMOND STEVEN GARCÍA PÉREZ

ASESORADO POR EL ING. BYRON GIOVANNI PALACIOS COLINDRES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, ABRIL DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
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. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
EXAMINADOR	Ing. Milton Alexander Fuentes Orozco
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:

TÉCNICAS DE APLICACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO AGENTE INTEGRANTE DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 7 de febrero de 2018.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above the printed name.

Raymond Steven García Pérez

Guatemala, 15 de marzo del 2019

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador del Área Complementaria
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Estimado Ingeniero:

Por este medio, envío a usted el trabajo de graduación desarrollado por el estudiante **RAYMOND STEVEN GARCÍA PÉREZ**, con registro académico **2010 20448** y CUI **1719 61870 0101**, con el título **"TÉCNICAS DE APLICACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO AGENTE INTEGRANTE DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO"**.

Por lo que, habiendo cumplido con los objetivos y los requisitos del referido trabajo, y habiéndose efectuado todas las observaciones técnicas, el suscrito lo da por **APROBADO**; solicitando darle el trámite correspondiente.

Sin otro en particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,



Byron Giovanni Palacios Colindres
Ingeniero Mecánico
Asesor del trabajo de graduación
Colegiado No. 5641

Ing. Byron G. Palacios C.
Colegiado No. 5641



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

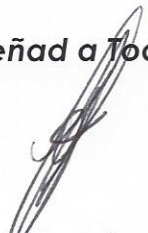
Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.079.2019

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: **TÉCNICAS DE APLICACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO AGENTE INTEGRANTE DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO** desarrollado por el estudiante **Raymond Steven García Pérez**, CUI **1719618700101** y Reg. Académico No. **201020448** recomienda su aprobación.

"Id y Enseñad a Todos"


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



Guatemala, marzo 2019



USAC

TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.097.2019

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: **TÉCNICAS DE APLICACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO AGENTE INTEGRANTE DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO** desarrollado por el estudiante **Raymond Steven García Pérez**, CUI **1719618700101** y Reg. Académico No. **201020448** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Julio César Campos Paiz
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, abril de 2019

/aej

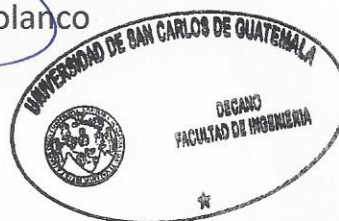


DTG. 199.2019

El Decano 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: **TÉCNICAS DE APLICACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES COMO AGENTE INTEGRANTE DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO**, presentado por el estudiante universitario: **Raymond Steven García Pérez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, abril de 2019

/gdech

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por bendecirme y brindarme todas las herramientas para culminar con éxito esta meta, a Él sea la gloria.
Mis padres	Rodolfo García y Verena Pérez, por su apoyo incondicional. Su amor será siempre mi inspiración.
Mis hermanos	Emmanuel y Kristel García, por ser mi motivación e inspiración.
Mi novia	Gabriela Grijalva, por incitar en mí la búsqueda de la excelencia.
Mi asesor	Ing. Byron Palacios, por ser una importante influencia en mi carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y brindarme educación superior de calidad.
Facultad de Ingeniería	Por las experiencias de aprendizaje y de vida que marcaron esta etapa.
Mis amigos de la Facultad	Crey Jiménez, Renato Pérez, Jorge Menendez, Ronald Castillo, Sergio Chupina, Daniel Cortez, Celwin Barrios, Hugo Hernandez, Carlos Recinos, Luis Estrada y Juan Gonzalez, por su apoyo y compañía.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IX
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN	XXV
OBJETIVOS	XXVII
INTRODUCCIÓN	XXIX
1. NECESIDAD DEL MANTENIMIENTO Y SUS TÉCNICAS DE ANÁLISIS	1
1.1. Historia y evolución del mantenimiento	2
1.2. Áreas de acción del mantenimiento	4
1.3. Análisis de criticidad	5
1.3.1. Descripción de la metodología de análisis de criticidad	8
1.3.2. Pasos del análisis de criticidad	10
1.3.2.1. Definir el nivel de análisis	10
1.3.2.2. Definir la criticidad	12
1.3.2.3. Cálculo del nivel de criticidad	15
1.3.3. Análisis y validación de los resultados	16
1.3.3.1. Definir el nivel de análisis	16
1.3.3.2. Determinar la criticidad	17
1.3.3.3. Sistema de seguimiento de control	17
1.4. Tipos y niveles de mantenimiento	18
1.4.1. Mantenimiento correctivo	20

1.4.1.1.	Ventajas, inconvenientes y aplicaciones del mantenimiento correctivo	21
1.4.2.	Mantenimiento preventivo	22
1.4.2.1.	Ventajas, inconvenientes y aplicaciones del mantenimiento preventivo	23
1.4.3.	Mantenimiento predictivo.....	23
1.4.3.1.	Ventajas, inconvenientes y aplicaciones del mantenimiento predictivo	24
1.4.4.	Técnicas de mantenimiento predictivo	25
1.4.4.1.	Parámetros para el control de estado ..	27
1.4.4.2.	Establecimiento de un sistema de mantenimiento predictivo	29
1.4.4.2.1.	Preparación inicial	30
1.4.4.2.2.	Implantación.....	31
1.4.4.2.3.	Revisión de resultados	31
1.4.4.3.	Técnicas de mantenimiento predictivo	32
1.4.4.3.1.	Inspección visual	32
1.4.4.3.2.	Líquidos penetrantes	32
1.4.4.3.3.	Partículas magnéticas ..	33
1.4.4.3.4.	Ultrasonido	33
1.4.4.3.5.	Análisis de lubricante	34
1.4.4.3.6.	Termografía	35
1.4.4.3.7.	Análisis de vibraciones.....	35

	1.4.4.3.8.	Ventajas y desventajas del mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones.....	36
2.	VIBRACIÓN		39
2.1.	Las máquinas y las vibraciones		39
2.1.1.	Causas de las vibraciones mecánicas		40
2.1.2.	Efectos de las vibraciones mecánicas.....		40
2.2.	Principios básicos para el análisis de vibraciones.....		41
2.2.1.	Movimiento armónico simple		42
	2.2.1.1.	Amplitud.....	43
		2.2.1.1.1.	Desplazamiento 44
		2.2.1.1.2.	Velocidad 45
		2.2.1.1.3.	Aceleración 46
		2.2.1.1.4.	Comparación de los parámetros de la amplitud 47
	2.2.1.2.	Frecuencia.....	50
	2.2.1.3.	Fase.....	51
2.2.2.	Componentes de una señal de vibración		53
	2.2.2.1.	Dominio de tiempo.....	54
	2.2.2.2.	Dominio de frecuencia.....	55
2.2.3.	La transformada de Fourier		58
2.2.4.	El análisis espectral		60

3.	PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LA TOMA DE DATOS EN MÁQUINAS.....	65
3.1.	Equipo de medición para la toma de datos	66
3.1.1.	Instrumentos de medición	66
3.1.1.1.	Manual.....	67
3.1.1.2.	Medidores manuales con capacidad de almacenamiento	68
3.1.1.3.	Analizadores portátiles de datos	69
3.1.2.	Transductores de vibración	71
3.1.2.1.	Sensor de no contacto	71
3.1.2.2.	Transductores de velocidad	73
3.1.2.3.	Acelerómetros	76
3.1.3.	Selección de transductores	77
3.1.3.1.	Modo de medición	78
3.1.3.2.	Tipo de cojinete	78
3.1.3.3.	Velocidad de la máquina o frecuencias dominantes a ser medidas	79
3.1.3.4.	Temperatura en el punto de montaje...	79
3.1.3.5.	Longitud del cable, fuerza de la señal	80
3.1.3.6.	Requerimientos de instalación	80
3.1.3.7.	Masa relativa, rotor a carcasa.....	80
3.1.3.8.	Limitaciones y antecedentes de la máquina.....	81
3.1.3.9.	Problemas inusuales de instalación.....	81
3.1.3.10.	Experiencia del usuario	81
3.2.	Diseño de la documentación necesaria.....	82
3.2.1.	Conocimiento de la máquina.....	82

3.2.2.	Configuración de la maquinaria.....	83
3.2.3.	Recopilación de la información dinámica	84
3.3.	Toma de datos	84
3.4.	Normas empleadas para la medición de la criticidad de la vibración	87
3.4.1.	Carta de Rathbone	88
3.4.2.	Norma ISO 2372 de 1974.....	91
3.4.3.	Norma ISO 10816 de 1995.....	92
3.4.3.1.	Clasificación de acuerdo al tipo de maquina.....	94
3.4.3.2.	Clasificación según la flexibilidad del soporte.....	95
3.4.4.	Normas para certificación en análisis de vibraciones mecánicas	96
4.	INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS MÁQUINAS	99
4.1.	Tendencias	99
4.1.1.	El espectro de referencia.....	101
4.1.2.	Firmas de vibración promediadas	102
4.1.3.	Frecuencias forzadas	103
4.2.	Análisis de la gravedad de los cambios de condiciones.....	104
4.3.	Diagnóstico de problemas.....	105
4.3.1.	Desalineación	107
4.3.1.1.	Desalineación angular	108
4.3.1.2.	Desalineación paralela	109
4.3.1.3.	Desalineación de rodamiento inclinado sobre el eje.....	110
4.3.2.	Desbalanceo	111

4.3.2.1.	Desbalanceo estático	112
4.3.2.2.	Desbalanceo de par de fuerzas	113
4.3.2.3.	Desbalanceo dinámico	114
4.3.2.4.	Desbalanceo de rotor en voladizo.....	115
4.3.2.5.	Rotor excéntrico	116
4.3.2.6.	Eje doblado.....	117
4.3.3.	Soltura mecánica.....	118
4.3.3.1.	Soltura estructural	119
4.3.3.2.	Soltura de pedestal o chumacera	119
4.3.3.3.	Soltura de eje	120
4.3.3.4.	Fricción del rotor.....	121
4.3.4.	Fallas en rodamientos	122
4.3.4.1.	Falla en pista interna.....	125
4.3.4.2.	Falla en pista externa.....	126
4.3.4.3.	Falla en elementos rodantes.....	127
4.3.4.4.	Deterioro de jaula.....	128
4.3.5.	Fallas en chumacera	128
4.3.5.1.	Problemas por desgaste	129
4.3.5.2.	Inestabilidad por remolino de aceite ..	130
4.3.5.3.	Inestabilidad por latigazo de aceite....	131
4.3.6.	Fallas en engranajes	132
4.3.6.1.	Desgaste del diente.....	133
4.3.6.2.	Carga del diente	134
4.3.6.3.	Excentricidad del engranaje y juego entre dientes.....	135
4.3.6.4.	Desalineación del engranaje.....	136
4.3.6.5.	Diente agrietado o roto.....	137
4.3.7.	Problemas en transmisión de correas.....	138

4.3.7.1.	Desgaste, aflojamiento o descuadre de las correas	139
4.3.7.2.	Desalineación de la correa o polea....	140
4.3.7.3.	Poleas excéntricas	142
4.3.7.4.	Resonancia de correas	143
4.3.8.	Fuerzas hidráulicas y aerodinámicas	144
4.3.8.1.	Paso de alabes.....	145
4.3.8.2.	Turbulencia del flujo	146
4.3.8.3.	Cavitación.....	146
CONCLUSIONES		149
RECOMENDACIONES.....		151
BIBLIOGRAFÍA.....		153
APÉNDICES		157

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Niveles de análisis para evaluar criticidad.....	11
2.	Tipos de mantenimiento	18
3.	Diagrama de decisión para efectuar mantenimiento.....	19
4.	Curva P – F.....	26
5.	Sistema masa - resorte.....	43
6.	Amplitud descrita por el desplazamiento.....	44
7.	Amplitud descrita como velocidad	45
8.	Amplitud descrita como aceleración.....	46
9.	Comparación de parámetros de amplitud, 1	48
10.	Comparación de parámetros de amplitud, 2	49
11.	Frecuencia	51
12.	Sistema con desfase de 180°.....	52
13.	Sistema con desfase de 90°.....	53
14.	Componentes de un movimiento armónico simple	55
15.	Gráfico de una señal de vibración en tres dimensiones.....	56
16.	Gráfico de una señal de vibración en el dominio del tiempo.....	56
17.	Espectro de vibración	57
18.	Ondas compuestas, formada a partir de ondas simples	58
19.	Descomposición de una onda en el dominio de la frecuencia	59
20.	Frecuencias de un espectro y nomenclatura	63
21.	Procedimiento para realizar análisis de vibraciones	65
22.	Instrumento de medición manual.....	67
23.	Medidor manual con capacidad de almacenamiento	69

24.	Analizador portátil de datos	70
25.	Funcionamiento de un sensor de no contacto	72
26.	Transductor de velocidad	74
27.	Transductor piezoeléctrico	76
28.	Colocación del sensor en dirección vertical	86
29.	Colocación del sensor en dirección horizontal	86
30.	Colocación del sensor en dirección axial	86
31.	Carta de Rathbone	90
32.	Espectro de referencia.....	101
33.	Curva de tendencias.....	104
34.	Formas de desalineación	108
35.	Espectro y relación de fase en desalineación angular	109
36.	Espectro típico y relación de fase en desalineación paralela	110
37.	Espectro típico y relación de fase en desalineación de rodamientos inclinados sobre el eje	111
38.	Espectro tipo y relación de fase en desbalanceo estático	113
39.	Espectro típico y relación de fase en desbalanceo de par de fuerzas	114
40.	Espectro típico y relación de fase en desbalanceo dinámico	115
41.	Espectro típico y relación de fase en desbalance de rotor en voladizo.....	116
42.	Espectro típico y relación de fase en rotor excéntrico	117
43.	Espectro típico y relación de fase en eje doblado.....	118
44.	Espectro típico y relación de fase en soldadura estructural.....	119
45.	Espectro típico y relación de fase en soldadura de pedestal o chumacera	120
46.	Espectro típico y relación de fase en soldadura de eje	121
47.	Espectro típico de la fricción del rotor	122
48.	Espectro típico de las 4 etapas de falla en rodamientos.....	124

49.	Falla en pista interna y espectro típico de vibración	125
50.	Falla en pista externa y espectro típico de vibración	126
51.	Falla en elementos rodantes y espectro típico de vibración	127
52.	Falla en deterioro de jaula y espectro típico de vibración	128
53.	Espectro típico de problemas por desgaste	129
54.	Espectro típico de inestabilidad por remolino de aceite	130
55.	Espectro típico de inestabilidad por latigazo de aceite	131
56.	Espectro normal.....	133
57.	Desgaste del diente y su espectro típico de vibración	134
58.	Espectro típico de carga del diente	135
59.	Espectro típico de excentricidad del engranaje y juego entre dientes	136
60.	Espectro típico de desalineación del engranaje.....	137
61.	Espectro típico de diente agrietado o roto.....	138
62.	Fuente del problema y espectro típico de vibración en desgaste, aflojamiento o descuadre de las correas.....	140
63.	Fuente del problema y espectro típico de vibración en desalineación de correas o poleas.....	141
64.	Fuente del problema y espectro típico de vibración en poleas excéntricas.....	142
65.	Fuente del problema y espectro típico de vibración en resonancia de correas	143
66.	Espectro típico de vibración de paso de alabes.....	145
67.	Espectro típico de vibración de turbulencia del flujo	146
68.	Espectro típico de vibración de cavitación	147

TABLAS

I.	Generaciones de mantenimiento.....	3
II.	Matriz de criticidad	9

III.	Criterios para estimar la frecuencia.....	12
IV.	Categoría de los impactos	14
V.	Matriz de criticidad	16
VI.	Niveles de intensidad para efectuar mantenimiento	20
VII.	Equipos dinámicos.....	28
VIII.	Equipo estático	28
IX.	Equipo electrónico	29
X.	Equipo eléctrico	29
XI.	Transductores de vibración más utilizados.	71
XII.	Categorías de las maquinas a partir de su velocidad	91
XIII.	Severidad de vibraciones según norma ISO 2372.....	92
XIV.	Partes estándar de la norma ISO 10816.....	93
XV.	División de las máquinas en grupos.....	94
XVI.	Severidad de vibración según norma ISO 10816	96

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
H	Altura del eje de una máquina
ACR	Análisis de causa raíz
AC	Análisis de criticidad
HFD	Banda a alta frecuencia
CPM	Ciclos por minuto
4X	Cuatro veces la velocidad de giro de la máquina a analizar
DI	Daños en las instalaciones
2X	Dos veces la velocidad de giro de la máquina a analizar
F	Fallo funcional
P	Fallo potencial
GMF	Frecuencia de engrane
BPD	Frecuencia de paso de alabes
FFC	Frecuencia fundamental de las correas
°	Grados
Hz	Hertz
IP	Impacto en la producción
KHz	Kilohertzio
KW	Kilovatio
MCC	Mantenimiento centrado en confiabilidad
±	Más menos
MW	Megavatio

m	Metro
m/s²	Metros sobre segundo al cuadrado
mm	Milímetro
mm/s	Milímetro sobre segundo
mV/mm	Milivoltio sobre milímetro
λ	Número de fallas por año
g's	Número de veces la aceleración de la gravedad
gSE	Número de veces la aceleración de la gravedad filtrada para altas frecuencias
OB&IB	Pista externa y pista interna de un cojinete
%	Porcentaje
Q	Quetzales
SI	Sistema internacional de medidas
TPFE	Tiempo promedio entre fallas de años
TPPR	Tiempo promedio para reparar
3X	Tres veces la velocidad de giro de la máquina a analizar
G	Unidad de aceleración
1X	Velocidad de giro de la máquina a analizar

GLOSARIO

Alabes	Paleta curva de una turbo máquina o máquina de fluido rotodinámica. Los álabes desvían el flujo de corriente, bien para la transformación entre energía cinética y energía de presión, o bien para intercambiar cantidad de movimiento del fluido con un momento de fuerza en el eje.
Amplitud	Medida de la variación máxima del desplazamiento u otra magnitud física que varía periódica o cuasi periódicamente en el tiempo. Es la distancia entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio o medio.
Anomalía	Cambio o desviación respecto de lo que es normal, regular, natural o previsible.
Averías	Daño, rotura o fallo que impide o perjudica el funcionamiento del mecanismo de una máquina, una red de distribución u otra cosa.
<i>Babbitt</i>	Metal de cojinete, es una de las distintas aleaciones utilizadas para la superficie de apoyo en un cojinete de fricción.

Bobina	Componente pasivo de un circuito eléctrico que, debido al fenómeno de la autoinducción, almacena energía en forma de campo magnético.
<i>Bottom limit</i>	Límite inferior.
Calibración	Operación que, bajo condiciones específicas, establece una relación entre los valores y las incertidumbres de medida provistas por estándares e indicaciones correspondientes con las incertidumbres de medida asociadas.
Calorifugación	Elementos de aislamiento térmico de las instalaciones o de los equipos cuya temperatura de funcionamiento es superior a la del ambiente.
Chaflanada	Operación mediante la cual se hace un corte o rebaje en una arista de un cuerpo sólido. Pueden ser realizados en los cantos exteriores, en los extremos de un eje.
Chumaceras	Combinación de un rodamiento radial de bolas y sellos en un alojamiento de hierro colado de alto grado o de acero prensado con una muesca en que descansa y gira cualquier eje de maquinaria.
Cigüeñal	Eje con codos y contrapesos presente en ciertas máquinas que, aplicando el principio del mecanismo

de biela-manivela, transforma el movimiento rectilíneo alternativo en circular uniforme y viceversa.

Cojinete

Pieza o su conjunto sobre la que se soporta y gira el árbol transmisor de momento giratorio de una máquina.

Compilar

Traducción de un programa que ha sido escrito en un lenguaje de programación a un lenguaje común, usualmente lenguaje de máquina, aunque también puede ser traducido a un código intermedio o a un texto.

Confiabilidad

Grado en que una prueba, un experimento o un instrumento de medición entrega los mismos resultados cada vez.

Defecto

Imperfección o falta que tiene alguien o algo en alguna parte o de una cualidad o característica.

Desalineación

Problemas más frecuentes de vibraciones en máquinas rotativas y se debe a la dificultad que presenta la alineación de dos rotores con sus respectivos apoyos.

Desbalanceo

Condición de una parte rotativa, donde el centro de masa no está situado en el centro de rotación.

Desfase	Diferencia de fase entre dos sitios, dos instantes o dos ondas.
Desgaste	Erosión de material sufrida por una superficie sólida por acción de otra superficie.
Desviación estándar	Medida de dispersión para variables de razón y de intervalo. Se define como la raíz cuadrada de la varianza de la variable.
Deterioro	Empeoramiento del estado, calidad o valor de un equipo.
Diagnóstico	Examen de un hecho o de una situación para realizar un análisis o para buscar una solución a sus problemas o dificultades.
<i>Driver</i>	Controlador de dispositivo o manejador de dispositivo, es el elemento software utilizado en diversos sistemas operativos.
Efectividad	Equilibrio entre eficacia y eficiencia, es decir, se es efectivo si se es eficaz y eficiente.
Eficacia	Capacidad para obrar o para conseguir un resultado determinado.
Eficiencia	Capacidad para lograr un fin empleando los mejores medios posibles.

Empoderamiento	Acción de estimulación a los empleados a participar plenamente en la organización mediante la delegación de poder o autoridad a los subordinados de modo que puedan actuar con más libertad para desempeñar sus puestos.
Endoscopios	Herramienta compuesta por un conducto flexible y un componente óptico que permite inspeccionar el funcionamiento interior de máquinas e instalaciones para reconocer puntos problemáticos o conflictivos de un modo muy sencillo y rápido para tomar las medidas preventivas oportunas, sin necesidad de desmontar el equipo.
Engranaje	Mecanismo formado por dos ruedas dentadas, de las cuales la mayor se denomina corona y el menor piñón. Utilizado para transmitir potencia mecánica de un componente a otro.
Estroboscopio	Instrumento que permite visualizar un objeto que está girando como si estuviera inmóvil o girando muy lentamente. Este principio es usado para el estudio de objetos en rotación o vibración, como las partes de máquinas y las cuerdas vibratorias.
Extensometría	Técnica experimental para la medición de esfuerzos y deformaciones basándose en el cambio de la resistencia eléctrica de un material al ser sometido a tensiones.

Ferromagnético	Fenómeno físico en el que se produce ordenamiento magnético de todos los momentos magnéticos de una muestra, en la misma dirección y sentido.
FFT	<i>Fast Fourier transform</i> (transformada rápida de Fourier).
Fiabilidad	Probabilidad de que un equipo o sistema funcione o desarrolle una cierta función, bajo condiciones fijadas y durante un período determinado.
Fisuras	Aberturas que afectan solamente a la superficie del elemento o a su acabado superficial.
FMECA	<i>Failure mode, effects and criticality analysis</i> (análisis de criticidad de modo de falla y efectos).
Grietas	Aberturas que afectan a todo el espesor de un elemento.
Hardware	Conjunto de elementos físicos o materiales que constituyen una computadora o un sistema informático.
Holguras	Diferencia que existe entre las dimensiones de dos piezas en el lugar donde se acoplan.
Incipiente	Que empieza a manifestarse.

Magnetostricción	Propiedad de los materiales magnéticos que hace que estos cambien de forma al encontrarse en presencia de un campo magnético. Las vibraciones en forma de sonido son causadas por la frecuencia de las fluctuaciones del campo.
Mantenibilidad	Propiedad de un sistema que representa la cantidad de esfuerzo requerida para conservar su funcionamiento normal o para restituirlo una vez se ha presentado un evento de falla.
Monitoreo	Proceso mediante el cual se reúne, observa, estudia y emplea información para luego poder realizar un seguimiento de un programa o hecho particular.
<i>Normal position</i>	Posición normal.
Optimización	Buscar la mejor manera de realizar una actividad.
<i>Outsourcing</i>	Subcontratación, proceso económico empresarial en el que una sociedad mercantil transfiere los recursos y las responsabilidades referentes al cumplimiento de ciertas tareas a una sociedad externa.
Paliativo	Que sirve para atenuar o suavizar los efectos de una cosa negativa, como un dolor, un sufrimiento o un castigo.
<i>Peak-to peak</i>	Pico a pico.

Piezoelectricidad	Conjunto de fenómenos eléctricos que se manifiestan en algunos cuerpos sometidos a presión u otra acción mecánica.
Pistón	Pieza de una bomba o del cilindro de un motor que se mueve hacia arriba o hacia abajo impulsando un fluido o bien recibiendo el impulso de él.
Polarización	Alineación de los dipolos aplicando un campo eléctrico.
RCM	<i>Reliability centred maintenance</i> (mantenimiento centrado en fiabilidad).
RMS	<i>Root mean square</i> , es la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores de la onda.
Rodamientos	Cojinete, elemento que sirve como apoyo a un eje y sobre el cual este gira.
Rotor	Pieza de una máquina electromagnética o de una turbina que gira dentro de un elemento fijo.
Rozamiento	Fuerzas producidas entre cuerpos en contacto, y que por su naturaleza oponen resistencia a cualquier tipo de movimiento de uno respecto al otro.
Sensores	Dispositivo diseñado para recibir información de una magnitud del exterior y transformarla en otra

magnitud, normalmente eléctricos, capaces de cuantificar y manipular.

Software	Conjunto de programas y rutinas que permiten a la computadora realizar determinadas tareas.
<i>Stocks</i>	Cantidad de bienes o productos que dispone una organización o un individuo en un determinado momento para el cumplimiento de ciertos objetivos.
Termografía	Arte de transformar una imagen de infrarrojos en una imagen radiométrica que permita leer los valores de temperatura.
<i>Top limit</i>	Límite superior.
Torsiómetros	Equipo para uso con la máquina de prueba de torsión.
Turbina	Máquina que consiste en una rueda en el interior de un tambor provista de paletas curvas sobre las cuales actúa la presión de un fluido haciendo que esta gire.
Umbral	Cantidad mínima necesaria para que un fenómeno sea perceptible.

RESUMEN

El análisis de vibraciones es una herramienta clave empleada en el mantenimiento predictivo de las máquinas rotativas que permite realizar un diagnóstico del estado de los componentes de estos equipos e identificar el origen de sus problemas sin interrumpir su funcionamiento dentro de una planta.

Se describen los conceptos básicos de mantenimiento basado en condiciones y los fundamentos de vibración de la maquinaria. Se dará a conocer como configurar un sistema de monitoreo de condiciones, utilizando bases de datos y alarmas basadas en normas internacionales, que describa las técnicas de análisis de vibraciones y analice los problemas comunes de la maquinaria.

Las técnicas basadas en la aplicación de tecnología como el análisis de vibraciones permiten intervenciones más oportunas, precisas y planeadas para la realización de acciones preventivas y correctivas. Los datos que se obtienen en un programa de análisis de vibraciones permiten aumentar la capacidad de producción y efectividad de los equipos con un enfoque proactivo.

Con el análisis se puede detectar desalineación, desbalanceo, problemas de sujeción, excesos de tolerancia, problemas de aspas en bombas, problemas eléctricos en motores, fallas en los trenes de engranajes y muchas otras condiciones de falla en la maquinaria.

OBJETIVOS

General

Proponer técnicas de aplicación para el análisis de vibraciones como agente integrante del mantenimiento predictivo.

Específicos

1. Describir la necesidad de proponer mantenimiento en maquinaria basado en técnicas de análisis.
2. Identificar las variables claves que proporcionan información indispensable para el análisis de los datos que intervienen en la vibración de las máquinas.
3. Describir procedimientos efectivos que faciliten la toma de mediciones en las máquinas.
4. Interpretar los datos obtenidos en el análisis de vibraciones en búsqueda de fallas prematuras en las máquinas.

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento predictivo se basa en el monitoreo periódico o continuo de maquinaria, utilizando para ello herramientas tecnológicas con las que se miden parámetros tales como la vibración, la temperatura, el estado del lubricante, entre otros. Con la finalidad de determinar el estado actual de la maquinaria, para programar las reparaciones necesarias oportunamente. El mantenimiento predictivo se aplicará solamente a las máquinas que requieren mayor atención, el monitoreo de condiciones se realiza gran parte del tiempo mientras el equipo está operando, para evitar paros innecesarios.

El mantenimiento predictivo se orientará en el análisis de vibraciones ya que es una de las herramientas tecnológicas más desarrollada y de mayor aplicación en el monitoreo de condiciones. En el análisis de vibraciones se recolectan datos a través de dispositivos electrónicos y software que permiten tanto la realización de tendencias como el análisis de los datos recolectados.

Para conocer el estado de una máquina se establecerán límites denominados alarmas. Cuando una de las máquinas excede los límites de vibración, se realiza un diagnóstico para determinar la severidad del problema y definir si se requiere una acción de reacondicionamiento. Para determinar el límite de las alarmas se deberá tener en cuenta que deben ser lo suficientemente altos con el fin minimizar alarmas superfluas y lo suficientemente conservador para que no se pase por alto una posible irregularidad del estado de la máquina.

En el caso de que una medición exceda el límite de su alarma, será analizada para determinar si el problema fue detectado de manera anticipada en su etapa de falla, esto permitirá programar de manera efectiva y eficiente el reacondicionamiento de la máquina. Al finalizar el reacondicionamiento se realizará nuevamente el análisis de vibraciones para crear una nueva referencia con la que podrá compararse el funcionamiento de la máquina y se garantizará el resultado del reacondicionamiento.

1. NECESIDAD DEL MANTENIMIENTO Y SUS TÉCNICAS DE ANÁLISIS

El mantenimiento es la función empresarial cuyo propósito consiste en conservar las máquinas y el equipo en un adecuado estado de operación; labor que incluye servicio, pruebas, inspección, ajustes, reemplazo, reinstalación, calibración, reparación y reconstrucción. Principalmente, se basa en el desarrollo de conceptos, criterios y técnicas requeridas para la mantenibilidad, que proporciona una guía de políticas para la toma de decisiones que contribuyan al mejoramiento continuo de sistemas productivos de bienes y servicios. Una de las formas de contribuir a dicho mejoramiento es asegurando la disponibilidad y confiabilidad de las operaciones.

El mantenimiento se define como un conjunto de actividades desarrolladas con el fin de asegurar que cualquier activo continúe desempeñando las funciones deseadas o de diseño.

Son misiones del mantenimiento:

- Vigilancia permanente o periódica de máquinas
- Acciones preventivas
- Acciones correctivas
- Reemplazo de máquinas

Los objetivos del mantenimiento son:

- Aumentar la disponibilidad de los equipos hasta el nivel deseado por el usuario o la entidad que lo requiera.
- Reducir los costos al mínimo con el nivel máximo de disponibilidad necesaria.
- Mejorar la fiabilidad de máquinas e instalaciones.
- Maximizar la vida de las máquinas, equipos e instalaciones.
- Reducir la aparición de fallos.
- Evitar paros inútiles de las máquinas.
- Aumentar la seguridad del personal y evitar accidentes.

1.1. Historia y evolución del mantenimiento

Conforme el concepto de mantenimiento fue asociado exclusivamente con el término reparación, este fue considerado como un mal necesario, incapaz de agregar valor a los procesos de la compañía. Sin embargo, hoy en día, cuando el mantenimiento agrupa metodologías de prevención y predicción, se considera como un factor clave de la competitividad a través del aseguramiento de la confiabilidad.

Pueden distinguirse cuatro generaciones en la evolución del concepto de mantenimiento:

- Primera generación: desde la Revolución Industrial hasta después de la Segunda Guerra Mundial, aunque todavía impera en muchas industrias. El mantenimiento se ocupa solamente de arreglar las averías.

- Segunda generación: entre la Segunda Guerra Mundial y finales de los años 70 se descubre la relación entre edad de los equipos y probabilidad de fallo. Se comienza a hacer sustituciones preventivas.
- Tercera generación: surge a principios de los años 80. Se empiezan a realizar estudios de causa-efecto para conocer el origen de los problemas, detectando síntomas incipientes para actuar antes de que las consecuencias sean inadmisibles. Se comienza a hacer partícipe a producción en las tareas de detección de fallos.
- Cuarta generación: surge a principios de los años 90. El mantenimiento se contempla como una parte del concepto de calidad total. Mediante una adecuada gestión del mantenimiento es posible aumentar la disponibilidad al tiempo que se reducen los costos. Se identifica el mantenimiento como fuente de beneficios, frente al antiguo concepto de mantenimiento como mal necesario.

En la tabla I se presentan los puntos clave de cada generación del concepto de mantenimiento

Tabla I. **Generaciones de mantenimiento**

Primera generación hasta 1945	• Reparación de equipos cuando fallan. • Todos los equipos se desgastan. • Requiere de todas las habilidades de reparación.
Segunda generación 1945 – 1980	• Equipos con mayor disponibilidad y mayor duración. • Mantenimientos mayores planeados y programados. • Sistemas de planificación y control de trabajo.
Tercera generación 1980 – 1990	• Incremento en la seguridad. • Mejor calidad del producto. • Diseño basado en confiabilidad y mantenibilidad. • Estudio de riesgos. • Sistemas expertos.

Continuación de la tabla I.

Cuarta generación 1990 – actualidad	• Monitorea por condiciones. • Estudios de riesgos. • Análisis de modo de falla y sus efectos. • Trabajo en equipo y empoderamiento. • Uso de técnicas especializadas. • Modelamiento de confiabilidad y optimización. • <i>Outsourcing</i>.
--	--

Fuente: elaboración propia.

1.2. Áreas de acción del mantenimiento

Según el contexto, se atribuye al mantenimiento la responsabilidad de las siguientes tareas:

- Realización de mejoras técnicas.
- Participación en el diseño y montaje de nuevas instalaciones.
- Restructuración de equipos.
- Aprovisionamiento de herramienta, repuestos y *outsourcing*.
- Promover la mejora continua y la formación del personal técnico.
- Mantener la seguridad industrial de las instalaciones a un nivel de riesgo aceptable.

Para que las tareas descritas anteriormente puedan realizarse se debe establecer:

- Política de mantenimiento que se llevará a cabo
- Tipo de mantenimiento a realizar
- Nivel de mantenimiento preventivo a realizar

- Recurso humano necesario y su estructuración
- Nivel y tipo de *outsourcing*
- Política de *stocks* de repuestos

1.3. Análisis de criticidad

Para dominar el lenguaje de la metodología de análisis de criticidad, AC, se deben conocer los siguientes términos y conceptos.

El análisis de criticidad es una metodología que permite establecer jerarquías entre:

- Instalaciones
- Sistemas
- Equipos
- Elementos de un equipo

De acuerdo con el impacto total del negocio, obtenido del producto de la frecuencia de fallas por la severidad de su ocurrencia, sumándole sus efectos en la población, daños al personal, impacto ambiental, pérdida de producción y daños en la instalación.

Además, apoya la toma de decisiones para administrar esfuerzos en la gestión de mantenimiento, ejecución de proyectos de mejora, rediseños con base en el impacto en la confiabilidad actual y en los riesgos.

- Activo: término contable para cualquier recurso que tiene un valor, un ciclo de vida y genera un flujo de caja. Puede ser humano, físico y financiero.

- Acción o recomendación: es la asignación para ejecutar una tarea o serie de tareas para resolver una causa identificada en la investigación de una falla o problema.
- Afectación: es la limitación y condiciones que se imponen por la aplicación de una ley al uso de un bien particular o empresarial.
- Análisis de criticidad de modo de falla y efectos (FMECA, *failure mode, effects and criticality analysis*): es un método que permite cuantificar las consecuencias o impacto de las fallas de los componentes de un sistema, y la frecuencia con que se presentan para establecer tareas de mantenimiento en aquellas áreas que están generando mayor repercusión en la funcionalidad, confiabilidad, mantenibilidad, riesgos y costos totales, con el fin de mitigarlas o eliminarlas por completo.
- Causa de falla: circunstancias asociadas con el diseño, manufactura, instalación, uso y mantenimiento que hayan conducido a una falla.
- Confiabilidad operacional: es la capacidad de un activo, representado por sus procesos, tecnología y gente, para cumplir sus funciones o el propósito que se espera de este, dentro de sus límites de diseño y bajo un contexto operacional determinado.
- Consecuencia: resultado de un evento. Puede existir una o más consecuencias de un evento, las cuales sean expresadas cualitativa o cuantitativamente. Por ello, los modelos para el cálculo deben considerar los impactos en seguridad, higiene, ambiente, producción, costos de reparación e imagen de la empresa.

- Consecuencia de una falla: se define en función a los aspectos que son de mayor importancia para el operador, como el de seguridad, el ambiental y el económico.
- Contexto operacional: conjunto de factores relacionados con el entorno; incluyen el tipo de operación, impacto ambiental, estándares de calidad, niveles de seguridad y existencia de redundancias.
- Criticidad: es un indicador proporcional al riesgo que permite establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, y permite direccionar el esfuerzo y los recursos a las áreas donde es más importante o necesario mejorar la confiabilidad y administrar el riesgo.
- Defecto: causa inmediata de una falla, desalineación, mal ajuste, fallas ocultas en sistemas de seguridad, entre otros.
- Efecto de falla: describe lo que ocurre cuando acontece cada modo de falla.
- Falla: terminación de la habilidad de un ítem para ejecutar una función requerida.
- Falla funcional: es cuando el ítem no cumple con su función de acuerdo con el parámetro que el usuario requiere.
- Jerarquización: ordenamiento de tareas de acuerdo con su prioridad.

- Modo de falla: es la forma por la cual una falla es observada. Describe de forma general como ocurre y su impacto en la operación del equipo. Efecto por el cual una falla es observada en un ítem fallado. Hechos que pueden haber causado cada estado de falla.
- Mecanismo de falla: proceso físico, químico u otro que ha conducido un deterioro hasta llegar a la falla.
- Prioridad: la importancia relativa de una tarea en relación con otras tareas.
- Riesgo: este término de naturaleza probabilística está definido como la 'probabilidad de tener una pérdida'. Comúnmente se expresa en unidades monetaria. Matemáticamente se expresa como.

$$R(t) = P(t) \times C$$

Donde:

- $R(t)$ es el riesgo en función del tiempo
- $P(t)$ es la probabilidad de ocurrencia de un evento en función del tiempo
- C sus consecuencias

1.3.1. Descripción de la metodología de análisis de criticidad

Para determinar la criticidad de una unidad o equipo se utiliza una matriz de frecuencia por consecuencia de la falla.

La tabla II, en un eje se representa la frecuencia de fallas y en otro los impactos o consecuencias en los cuales incurrirá la unidad o equipo en estudio si le ocurre una falla.

Tabla II. **Matriz de criticidad**

Categoría de frecuencia	5	M	M	A	A	A	En la matriz de criticidad se identifican los niveles de criticidad	
	4	M	M	A	A	A		
	3	B	M	M	A	A		
	2	B	B	M	M	A	B	Criticidad baja
	1	B	B	B	M	A	M	Criticidad media
	Categoría de consecuencias	1	2	3	4	5	A	Criticidad alta

Fuente: elaboración propia.

La matriz tiene un código de colores que permite identificar la menor o mayor intensidad de riesgo relacionado con el valor de criticidad de la instalación, sistema o equipo bajo análisis.

La criticidad se determina cuantitativamente, multiplicando la probabilidad o frecuencia de ocurrencia de una falla por la suma de las consecuencias de esta, estableciendo rasgos de valores para homologar los criterios de evaluación.

$$\text{Criticidad} = \text{frecuencia} \times \text{consecuencia}$$

1.3.2. Pasos del análisis de criticidad

Para realizar el análisis de criticidad se debe seguir los siguientes pasos:

- Definir el nivel de análisis
- Definir la criticidad
- Cálculo del nivel de criticidad
- Análisis y validación de los resultados
- Definir el nivel de análisis
- Determinar la criticidad
- Sistema de seguimiento de control

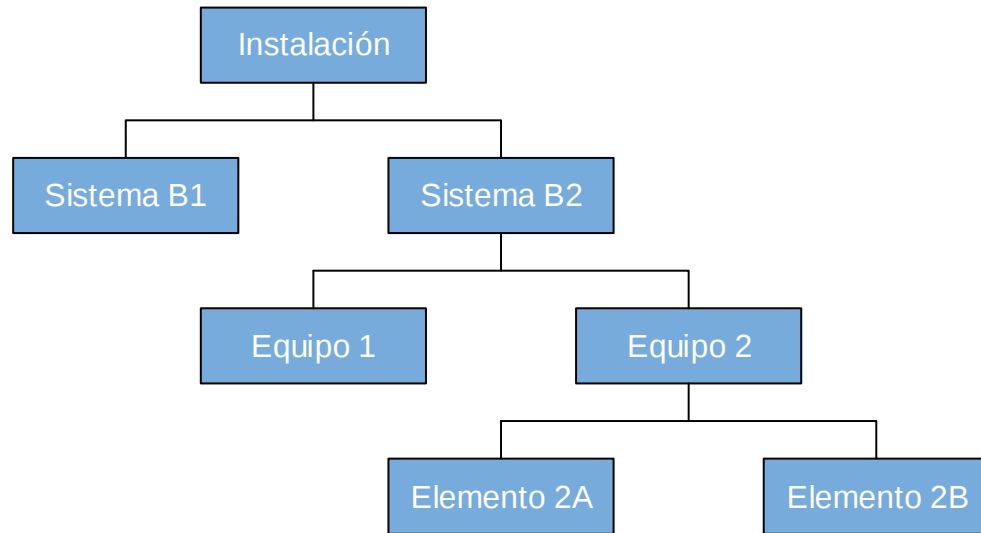
1.3.2.1. Definir el nivel de análisis

Se deberán definir los niveles en donde se efectuará el análisis:

- Instalación
- Sistema
- Equipo
- Elemento

En la figura 1 se representa un diagrama de nivel de acuerdo con los requerimientos o necesidades de jerarquización de activos.

Figura 1. **Niveles de análisis para evaluar criticidad**



Fuente: elaboración propia.

Para la realización del análisis se requiere de la siguiente información:

- Tipo de instalación
- Diferentes tipos de sistemas y equipos
- Ubicación y servicio
- Filosofía de operación de las instalaciones y equipo
- Diagrama de flujo de procesos
- Registros disponibles de eventos no deseados o fallas funcionales
- Frecuencia en la que ocurren los eventos no deseados
- Registro de los impactos en producción
- Registros de los impactos en la seguridad de los procesos

1.3.2.2. Definir la criticidad

Utilizando criterios y rangos preestablecidos se realiza la estimación de la frecuencia de la falla y el impacto total o la consecuencia de esta.

Para cada equipo existe más de un modo de falla, el de mayor impacto en el sistema o proceso será el más representativo. La frecuencia de ocurrencia de la falla se determina por el número de veces que ocurre la falla por año, en caso de no contar con esta información debe utilizarse una base de datos genérica y si esta no está disponible deberá basarse en la opinión de un experto. La tabla III muestra los criterios para estimar la frecuencia.

Tabla III. Criterios para estimar la frecuencia

Categoría	Tiempo promedio entre fallas en años TPFE	Numero de fallas por año	Interpretación
5	$TPFE < 1$	$\lambda > 1$	Probabilidad de que ocurra varias fallas en u año.
4	$0 \leq TPFE < 10$	$0,1 < \lambda \leq 1$	Probabilidad que ocurran varias fallas en 10 años, pero poco probable que ocurra en 1 año.
3	$10 \leq TPFE < 100$	$0,01 < \lambda \leq 0,1$	Probabilidad que ocurran varias fallas en 100 años, pero poco probable que ocurra en 10 años.
2	$100 \leq TPFE < 1000$	$0,001 < \lambda \leq 0,01$	Probabilidad que ocurran varias fallas en 1 000 años, pero poco probable que ocurra en 100 años.
1	$TPFE \geq 1000$	$0,001 \leq \lambda$	Poca probabilidad que ocurran fallas en 1 000 años.

Fuente: elaboración propia.

Para la estimación de las consecuencias o impactos de la falla, se emplean los siguientes criterios:

- Daños al personal
- Impacto a la población
- Impacto al ambiente
- Impacto en la producción
- Daños a las instalaciones

Los daños al personal, el impacto a la población y al ambiente se categorizarán considerando los criterios que se indican en la tabla IV.

Los impactos en la producción (IP) cuantifican las consecuencias que los eventos no deseados generan sobre el negocio. Este criterio se evaluará considerando los siguientes factores:

- Tiempo promedio para reparar (TPPR)
- Producción diferida
- Costos de producción

$$IP = \text{costo de reparación} \times \text{TPPR} \times \text{costo unitario de producto}$$

El valor resultante permitirá categorizar el IP de acuerdo con los criterios de la tabla IV, categoría de los impactos.

Los impactos asociados a daños de las instalaciones (DI) se evaluarán considerando los siguientes factores:

- Equipos afectados
- Costos de reparación
- Costos de reposición de equipo

DI = costos de reparación + costos de reposición de equipos

El valor resultante permitirá categorizar el DI de acuerdo con los criterios de la tabla IV, categoría de los impactos.

De la tabla IV, el valor de la columna categoría se asignará a las consecuencias y este se empleará para realizar el cálculo del nivel de criticidad. El impacto o la consecuencia total de una falla se determina sumando los valores de las categorías correspondientes a cada columna o criterio multiplicado por el valor de la categoría obtenida de la tabla que determina la frecuencia de ocurrencia de falla.

Tabla IV. **Categoría de los impactos**

Categoría	Daños al personal	Efectos en la población	Impacto ambiental	Pérdida de producción (Q.)	Daños a las instalaciones (Q.)
5	Muerte o incapacidad total o permanente, daños severos o enfermedades en uno o más miembros de la empresa.	Muerte o incapacidad total o permanente, daños severos o enfermedades en uno o más miembros de la comunidad.	Daños irreversibles al ambiente y que violen regulaciones y leyes ambientales	Mayor de 400 000	Mayor de 400 000
4	Incapacidad parcial, permanente, heridas severas o enfermedades en uno o más miembros de la empresa	Incapacidad parcial, permanente, daños o enfermedades en al menos un miembro de la población	Daños irreversibles al ambiente pero que violan regulaciones y leyes ambientales	De 120 000 a 400 000	De 120 000 a 400 000

Continuación de la tabla IV.

3	Daños o enfermedades severas de varias personas de la instalación. Requiere suspensión laboral.	Puede resultar en la hospitalización de al menos 3 personas	Daños ambientales regables sin violación de leyes y regularizaciones, la restauración puede ser acumulada.	De 50 000 a 120 000	De 50 000 a 120 000
2	El personal de la planta requiere tratamiento médico o primeros auxilios.	Puede resultar en heridas o enfermedades que requieran tratamiento médico o primeros auxilios.	Mínimo daños ambientales sin violación de leyes y regulaciones	De 5 000 a 50 000	De 5 000 a 50 000
1	Sin impacto en el personal de la planta	Sin efecto en la población	Sin daños ambientales ni violación de leyes y regulaciones	Hasta 5 000	Hasta 5 000

Fuente: elaboración propia.

1.3.2.3. Cálculo del nivel de criticidad

Para determinar el nivel de criticidad de una instalación, sistema, equipo o elemento se debe emplear la fórmula.

$$\text{Criticidad} = \text{frecuencia} \times \text{consecuencia}$$

Para las variables se utilizan los valores preestablecidos como categorías de las tablas III y IV, respectivamente.

Una vez obtenido el valor, se busca en la tabla V la matriz de criticidad, para determinar el nivel de acuerdo con los valores y la jerarquización establecida.

Tabla V. Matriz de criticidad

Frecuencia	5	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125
	4	20	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60	64	68	72	76	80	84	88	92	96	100
	3	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	69	72	75
	2	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48	50
	1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
Impacto																						
Criticidad alta							A	Color rojo			50 ≤ Criticidad ≤ 125											
Criticidad media							B	Color amarillo			30 ≤ Criticidad ≤ 49											
Criticidad baja							C	Color verde			5 ≤ Criticidad ≤ 29											

Fuente: elaboración propia.

1.3.3. Análisis y validación de los resultados

Los resultados deberán ser analizados con la finalidad de definir acciones para minimizar los impactos asociados a las fallas identificadas. Este análisis permitirá validar los resultados obtenidos, con la finalidad de detectar las causas posibles de desviación que amerite la reevaluación de la criticidad.

1.3.3.1. Definir el nivel de análisis

Los resultados obtenidos de la frecuencia de ocurrencia por el impacto permiten jerarquizar los problemas, componentes, equipos, sistemas o procesos basado en la criticidad. La valoración del nivel de criticidad permitirá orientar los recursos y esfuerzos a las áreas que más lo ameriten, así como administrar las acciones de mitigación del riesgo en elementos subsistemas, considerando su impacto en el proceso.

1.3.3.2. Determinar la criticidad

Permite completar la metodología, sin formar parte de esta. Cuando en la evaluación de un activo obtenemos frecuencias de ocurrencias altas, las acciones recomendadas para llevar la criticidad a un valor más tolerable deben orientarse a reducir la frecuencia de ocurrencia del evento. Si el valor de criticidad se debe a valores altos en alguna de las categorías de consecuencias, las acciones deben orientarse a mitigar los impactos que el evento puede generar.

Dentro de las acciones o actividades que se recomiendan, se pueden incluir la aplicación de otras metodologías de confiabilidad, por ejemplo:

- Mediante el análisis de causa raíz (ACR), identificar los eventos y recomendar acciones para reducirlos.
- Mitigar los efectos y consecuencias de los modos de falla y frecuencia de las fallas por medio de las aplicaciones de mantenimiento centrado en confiabilidad.

1.3.3.3. Sistema de seguimiento de control

Después de la selección de las acciones de mejora en las frecuencias de ocurrencia de los eventos y mitigación de impactos se debe crear y establecer el control para garantizar el monitoreo de la ejecución de las acciones seleccionadas y el cumplimiento de las recomendaciones consecuentes de AC.

Los objetivos de seguimiento y control son:

- Asegurar la continuidad en el tiempo de la aplicación de los planes de acción resultantes de la aplicación de la metodología análisis de criticidad.
- Promover la cultura del dato en todos los niveles de la empresa.
- Monitorear los cambios o mejoras que pueden derivarse de la aplicación de las acciones generadas como resultados de los análisis para determinar se requiere un nuevo análisis.

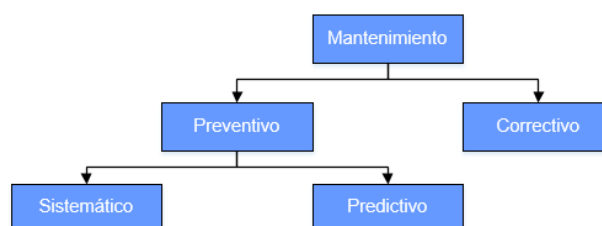
1.4. Tipos y niveles de mantenimiento

Tradicionalmente, se han distinguido tres tipos de mantenimiento, que se diferencian entre sí por el carácter de las tareas que incluyen, estos son:

- Mantenimiento correctivo
- Mantenimiento preventivo
- Mantenimiento predictivo

En la figura 2, se presentan los distintos tipos de mantenimiento.

Figura 2. Tipos de mantenimiento



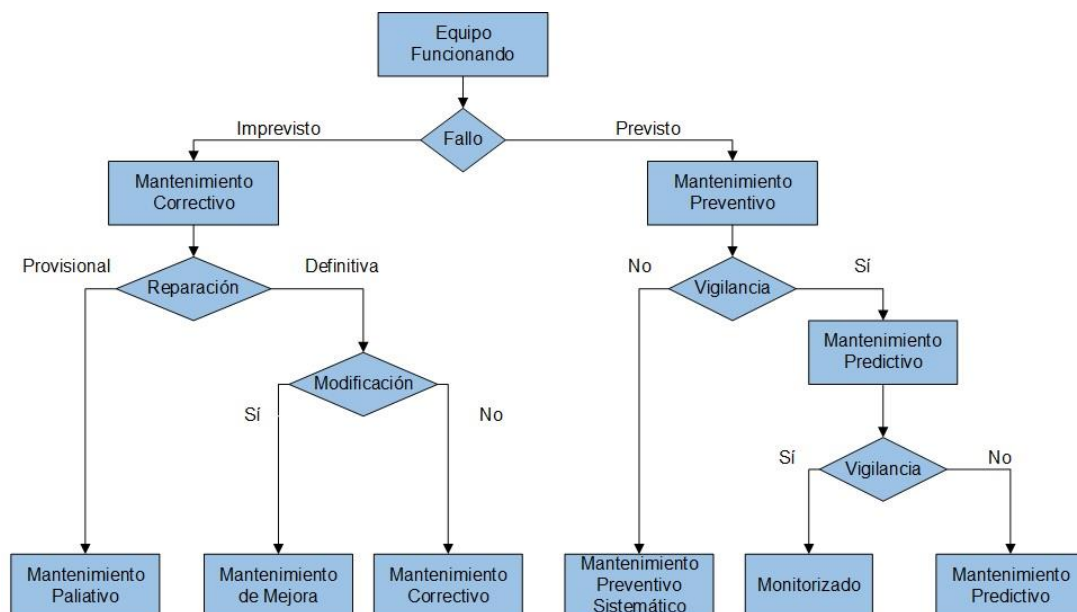
Fuente: elaboración propia.

Se observa que el mantenimiento preventivo posee dos modalidades con intención de reducir la probabilidad de fallo:

- Mantenimiento preventivo sistemático: efectuado a intervalos regulares de tiempo, según un programa establecido y teniendo en cuenta la criticidad de cada máquina y la existencia o no de reserva.
- Mantenimiento predictivo: que se refiere a las técnicas de detección precoz de síntomas para ordenar la intervención antes de la aparición del fallo.

En la figura 3 se muestra un diagrama de decisión sobre el tipo de mantenimiento a aplicar, según el caso.

Figura 3. **Diagrama de decisión para efectuar mantenimiento**



Fuente: elaboración propia.

Los distintos niveles de intensidad aplicables en mantenimiento se resumen en la tabla VI.

Tabla VI. **Niveles de intensidad para efectuar mantenimiento**

Nivel	Contenido	Personal	Medios
1	Ajustes previstos en órganos accesibles. Cambios de elementos accesibles y fáciles de efectuar.	Operador	Equipo ligero
2	Arreglos por cambios estándar. Operaciones menores de preventivo.	Técnico	Equipo ligero Repuestos necesarios en <i>stock</i>
3	Identificación y diagnóstico de averías. Reparación por cambio de componentes. Reparaciones mecánicas menores.	Técnico especializado	Equipo Aparatos de medidas Banco de ensayos
4	Trabajos importantes de mantenimiento correctivo y preventivo.	Equipo dirigido por técnico especializado	Equipo específico Material de ensayos Control
5	Grandes reparaciones y renovaciones.	Equipo completo	Máquinas herramienta específica de fabricación

Fuente: elaboración propia.

1.4.1. Mantenimiento correctivo

Comprende el mantenimiento que se realiza con el fin de corregir los defectos que se han presentado en el equipo. Puede mencionarse entonces que no existe mantenimiento como tal, solo reacondicionamiento de los equipos. En este tipo de mantenimiento la probabilidad de que se produzca un accidente se incrementa, puesto que se desconoce completamente el estado de la instalación.

El mantenimiento correctivo puede clasificarse en:

- No planificado: es el mantenimiento de emergencia. Debe efectuarse con urgencia, por una avería imprevista a reparar lo más pronto posible o por una condición imperativa que hay que satisfacer.
- Planificado: se sabe con antelación lo que debe hacerse, de modo que cuando se pare el equipo para efectuar la reparación, se disponga del personal, el repuesto y los documentos técnicos necesarios para realizarla correctamente.

1.4.1.1. Ventajas, inconvenientes y aplicaciones del mantenimiento correctivo

- Ventajas
 - No se requiere gran infraestructura técnica ni elevada capacidad de análisis.
 - Máximo aprovechamiento de la vida útil de los equipos.
- Inconvenientes
 - Las averías se presentan de forma imprevista lo que origina trastornos a la producción.
 - Riesgo de fallos de elementos difíciles de adquirir, lo que implica la necesidad de un *stock* de repuestos importante.

- Baja calidad del mantenimiento como consecuencia del poco tiempo disponible para reparar.
- Aplicaciones
 - Cuando el costo total de las paradas ocasionadas sea menor que el costo total de las acciones preventivas.
 - Sistemas secundarios cuya avería no afectan de forma importante a la producción.
 - Estadísticamente resulta ser el aplicado en mayor proporción en la mayoría de las industrias.

1.4.2. Mantenimiento preventivo

Es el mantenimiento que se realiza con el fin de prevenir la ocurrencia de fallas o la degradación del funcionamiento de un elemento, consiste en sustituir componentes cuya vida teórica está a punto de terminar, manteniendo en un nivel determinado a los equipos.

Se conoce como mantenimiento preventivo directo o periódico; sus actividades están controladas por el tiempo y se basa en la confiabilidad de los equipos.

1.4.2.1. Ventajas, inconvenientes y aplicaciones del mantenimiento preventivo

- Ventajas
 - Reducción de paradas imprevistas en equipos
 - Relación entre probabilidad de fallos y duración de vida
- Inconvenientes
 - No se aprovecha la vida útil del equipo.
 - Aumenta el gasto en mantenimiento si no se realiza con la frecuencia conveniente.
 - Disminuye la disponibilidad si no se elige convenientemente las acciones preventivas.
- Aplicaciones
 - Equipos de naturaleza mecánica o electromecánica sometidos a desgaste seguro.
 - Equipos cuya relación fallo-duración es conocida.

1.4.3. Mantenimiento predictivo

Este mantenimiento está basado en la inspección para determinar el estado y operatividad de los equipos, mediante el conocimiento de variables;

esto se realiza en intervalos regulares para prevenir las fallas y evitar sus consecuencias.

Para este mantenimiento es necesario identificar variables físicas tales como, temperatura, presión, vibración, cuyas variaciones están iniciando en las máquinas y pueden causar daño al equipo. Es el mantenimiento más avanzado, requiere de conocimientos analíticos, técnicos y necesita de equipos tecnológicos sofisticados.

1.4.3.1. Ventajas, inconvenientes y aplicaciones del mantenimiento predictivo

- Ventajas
 - Determinación óptima del tiempo para realizar el mantenimiento preventivo.
 - Funcionamiento normal de equipos e instalaciones.
 - Mejora el conocimiento y el control del estado de los equipos.
- Inconvenientes
 - Requiere personal calificado e instrumentación de análisis costosa.
 - No es viable la monitorización de todos los parámetros funcionales significativos, por lo que pueden presentarse averías no detectadas por el programa de vigilancia.

- Pueden presentarse averías en intervalos de tiempo comprendidos entre dos medidas consecutivas.
- Aplicaciones
 - Maquinaria rotativa
 - Motores eléctricos
 - Equipo estático e instrumentación

1.4.4. Técnicas de mantenimiento predictivo

Se llama mantenimiento predictivo a la superación de un umbral predeterminado y significativo del estado de deterioro de un bien.

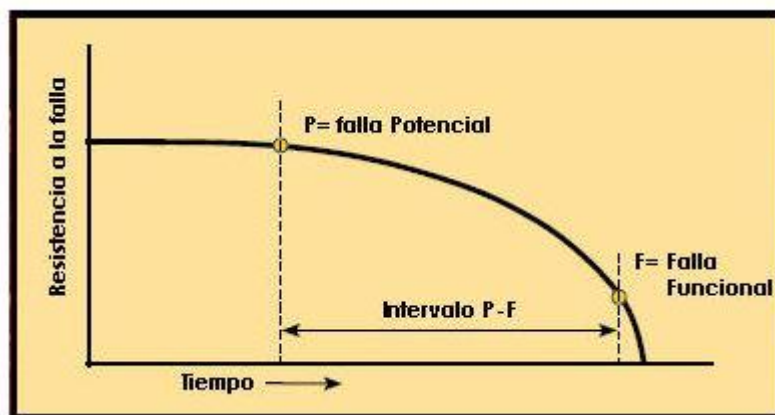
Se trata de un conjunto de técnicas que, debidamente seleccionadas, permiten el seguimiento y examen de ciertos parámetros característicos del equipo en estudio, que manifiestan algún tipo de modificación al aparecer una anomalía en el mismo.

La mayoría de los fallos en máquinas aparecen de forma incipiente, en un grado en que es posible su detección antes que el mismo se convierta en un hecho consumado con repercusiones irreversibles. Se precisa para ello establecer un seguimiento de aquellos parámetros que pueden alertar del comienzo de un deterioro y establecer para cada uno de ellos los niveles de alarmas normales e inadmisibles, de tal forma que su detección permita la actuación pertinente.

En la figura 4, se muestra una curva P-F que demuestra cómo un fallo comienza y continúa deteriorándose hasta un punto en el que puede ser

detectado, en el punto P de fallo potencial. A partir de allí, si no se detecta y no se toman las medidas oportunas, el deterioro continúa hasta alcanzar el punto F de fallo funcional.

Figura 4. **Curva P – F**



Fuente: Curva P-F. *Resistencia a la falla*. https://reliabilityweb.com/assets/uploads/art/RCA/empujando_1.JPG. Consulta: 9 de septiembre de 2017.

El seguimiento y control de los parámetros puede realizarse mediante vigilancia periódica; es importante establecer una frecuencia que permita detectar el deterioro en un momento entre P y F, y que no sea demasiado tarde para reaccionar.

Así mismo, puede realizarse mediante monitorización continua lo que evita el inconveniente anterior, pero no siempre es factible ya que es más costoso. De manera que finalmente los parámetros a controlar y la forma dependen de los siguientes factores económicos:

- Importancia de la máquina en el proceso productivo

- Instrumentación necesaria para el control

1.4.4.1. Parámetros para el control de estado

Los parámetros de control con los que se monitorea el estado de un equipo son las magnitudes físicas susceptibles que experimentarán algún tipo de modificación repetitiva en su valor, cuando varía el estado funcional de la máquina.

Los parámetros que se utilizan para este fin deben cumplir con las siguientes condiciones:

- Sensibilidad a un defecto concreto.
- Modificación como consecuencia de la aparición de alguna anomalía.
- Repetirse siempre de la misma forma.

Las técnicas utilizadas en el mantenimiento predictivo pueden clasificarse en dos grupos básicos:

- Técnicas directas: en las que se inspeccionan directamente los elementos sujetos a fallo, entre ellas cabe mencionar la inspección visual, inspección por líquidos penetrantes, por partículas magnéticas, el empleo de ultrasonidos, análisis de materiales, e inspección radiográfica.
- Técnicas indirectas: mediante la medición y el análisis de algún parámetro funcional relevante. Entre ellos el más usado es el análisis de vibraciones, aunque también existen numerosos parámetros que cada vez son más utilizados juntamente con el análisis de vibraciones, como

puede ser el análisis de lubricantes, de ruidos, de impulsos de choque, medida de presión, de temperatura, entre otros.

En las tablas VII, VIII, IX y X, se resumen las técnicas y los parámetros utilizados actualmente para el control de estados para distintos tipos de equipos.

Tabla VII. Equipos dinámicos

Parámetro indicador	Técnicas
Inspección visual	Uso de endoscopios, mirillas, videos
Vibraciones	Análisis espectral y de tendencias
Presión, caudal, temperatura	Seguimiento de evolución
Ruido	Análisis del espectro
Degradación y contaminación de lubricantes	Análisis físico – químicos, ferrografía
Estado de rodamientos	Impulsos de choque
Estado de alineación	Laser de monitorización
Control de esfuerzos, par y potencia	Extensometría, torsiómetros
Velocidades críticas	Amortiguación dinámica

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Equipo estático

Parámetro indicador	Técnicas
Observación visual	Testigos, endoscopios
Corrosión	Testigos, rayos X, ultrasonido
Fisuración	Líquidos penetrantes, partículas magnéticas, rayos X, ultrasonido,
Estado de carga	Extensometría, células de carga
Desgaste	Ultrasonido, corrientes inducidas, flujo magnético
Fugas	Ultrasonido, ruidos, control atmosfera por medio de gases

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Equipo electrónico**

Parámetro indicador	Técnica
Función o respuesta	Medidas eléctricas, simulación
Calentamiento	Avisos sonoros, termografía

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Equipo eléctrico**

Parámetro indicador	Técnica
Equilibrio de fase	Medida de tensión e intensidad
Consumo anómalo	Medida de intensidad y potencia
Estado de devanados, excentricidad, desequilibrio	Espectros de corriente y vibración
Severidad de servicio	Control y recuento de arranque y maniobra
Resistencia de aislamiento	Medida de resistencia, índice de polarización
Contaminación de devanados	Corriente de absorción y fugas
Temperatura de devanados	Medida de temperatura, termografía
Estado de escobillas	Termografía, análisis estroboscópico
Fallos de aislamiento	Factor de pérdida dieléctrica. Análisis de descarga parcial

Fuente: elaboración propia.

1.4.4.2. Establecimiento de un sistema de mantenimiento predictivo

El fundamento del mantenimiento predictivo es la medida y valoración periódica de una serie de variables de estado, lo que implica el manejo de una gran cantidad de datos que requieren medios:

- Físicos o hardware
- Procesamiento de datos o software
- Humano

Los medios físicos son los instrumentos de medida, captura y registro de datos. Los programas de gestión informáticos manejan los datos captados elaborando informes y gráficos de evolución. Finalmente, los medios humanos incluyen el personal que hace las medidas rutinarias, que deben ser profesionales calificados con conocimiento específico del equipo a tratar, capaces de desarrollar análisis y diagnóstico de averías.

Para la implantación exitosa del mantenimiento predictivo deben seguirse los siguientes pasos:

- Preparación inicial
- Implantación
- Revisión de resultados

1.4.4.2.1. Preparación inicial

La preparación inicial supone realizar las siguientes tareas:

- Definición de las máquinas.
- Identificación de las características y calificación de importancia en el proceso productivo.
- Determinar los parámetros y técnicas de medición.

Para cada máquina crítica en particular se determinan los parámetros y las técnicas más adecuados a utilizar para llevar a cabo el control. Para cada máquina se cargan los siguientes datos:

- Frecuencia de toma de datos
- Alcances de las medidas de cada parámetro
- Definición de ruta
- Definición de alarmas, para cada parámetro
- Formación del personal

1.4.4.2.2. Implantación

Una vez realizada toda la preparación, se realizan las mediciones periódicas acordadas, con las rutas y frecuencias previstas, lo que implica:

- Mediciones periódicas
- Registro y volcado de datos en el sistema
- Valoración de niveles que indiquen un comportamiento anómalo
- Análisis y diagnóstico de anomalías

1.4.4.2.3. Revisión de resultados

Una vez implantado el sistema se deberá llevar a cabo periódicamente un análisis de resultados que contará con lo siguiente:

- Historial de medidas rutinarias y averías.
- Análisis de resultados y dispersión de datos.
- Cambio de parámetros o niveles de alarma, así como de las frecuencias de medición, si es necesario.

1.4.4.3. Técnicas de mantenimiento predictivo

A continuación, se describen brevemente algunas de las principales técnicas utilizadas en el mantenimiento predictivo, las cuales son:

- Inspección visual
- Líquidos penetrantes
- Partículas magnéticas
- Ultrasonido
- Análisis de lubricantes
- Termografía
- Análisis de vibraciones

1.4.4.3.1. Inspección visual

Abarca desde la simple inspección visual directa de la máquina hasta la utilización de complicados sistemas de observación: microscopios, endoscopios y lámparas estroboscópicas.

Se pueden detectar fallos que se manifiestan físicamente mediante grietas, fisuras, desgaste, soltura de elementos de fijación, cambios de color, entre otros. Se aplica a zonas que se pueden observar directamente y en la actualidad algunas máquinas se diseñan con el objetivo de observar partes inaccesibles sin necesidad de desmontar.

1.4.4.3.2. Líquidos penetrantes

Inspección no destructiva utilizada para encontrar fisuras superficiales o fallos internos del material que presentan alguna apertura en la superficie.

La prueba consiste en la aplicación de una pintura especial sobre una superficie que previamente ha sido limpiada. Se deja en reposo cierto tiempo con el fin de que penetre bien en todos los posibles defectos. A continuación, se elimina la pintura mediante limpieza superficial. Finalmente, se trata de nuevo la superficie con un líquido absorbente que extrae los restos de pintura atrapada en poros o grietas superficiales, revelando la presencia y forma de tales defectos.

1.4.4.3.3. Partículas magnéticas

Ensayo no destructivo que permite descubrir fisuras superficiales, así como no superficiales.

Se basa en la magnetización de un material ferromagnético. Para ello se limpia la superficie a examinar, se somete a un campo magnético uniforme y finalmente, se esparcen partículas magnéticas de pequeña dimensión. Por efecto del campo magnético estas partículas se orientan siguiendo las líneas de flujo magnético existentes. Los defectos se ponen de manifiesto por las discontinuidades que crean en la distribución de las partículas.

1.4.4.3.4. Ultrasonido

Los ultrasonidos son ondas a frecuencia más alta que el umbral superior de audibilidad humana, en torno a los 20 KHz. Es el método más común para detectar grietas y otras discontinuidades en materiales gruesos, donde la inspección por rayos X se muestra insuficiente al ser absorbidos.

El ultrasonido se genera y detecta mediante fenómenos de piezoelectricidad y magneto estricción. Son ondas elásticas de la misma

naturaleza que el sonido con frecuencias que alcanzan los 109 Hz. Su propagación en los materiales sigue casi las leyes de la óptica geométrica.

Midiendo el tiempo que transcurre entre la emisión de la señal y la recepción de su eco se puede determinar la distancia del defecto, ya que la velocidad de propagación del ultrasonido en el material es conocida.

Tiene la ventaja adicional de que además de indicar la existencia de grietas en el material, permite estimar su tamaño lo que facilita llevar un seguimiento del estado y evolución del defecto.

También, se utiliza esta técnica para identificar fugas localizadas en procesos tales como sistemas de vapor, aire o gas por detección de los componentes ultrasónicos presentes en el flujo altamente turbulentos que se generan en fugas.

1.4.4.3.5. Análisis de lubricante

El aceite lubricante es determinante en el buen funcionamiento de cualquier máquina. Al disminuir o desaparecer la lubricación, se produce una disminución de la película de lubricante interpuesto entre los elementos mecánicos dotados de movimiento relativo entre sí. Lo que provoca desgaste, aumento de las fuerzas de rozamiento, aumento de temperatura, que provoca dilataciones e incluso fusión de materiales y bloqueos de piezas móviles.

Por tanto, el nivel de lubricante puede ser un parámetro de control funcional. Pero incluso manteniendo un nivel correcto el aceite en servicio está sujeto a una degradación de sus propiedades lubricantes y a contaminación, tanto externas como interna. El control de estado mediante análisis

fisicoquímicos de muestras de aceite en servicio y el análisis de partículas de desgaste contenidas en el aceite pueden alertar de fallos incipientes en los órganos lubricados.

1.4.4.3.6. Termografía

La termografía es una técnica que utiliza la fotografía de rayos infrarrojos para detectar zonas calientes en dispositivos electromecánicos. Mediante la termografía se crean imágenes térmicas cartográficas que pueden ayudar a localizar fuentes de calor anómalas.

Se utiliza para el control de líneas eléctricas, cuadros eléctricos, motores, máquinas y equipos de proceso en los que se detectan zonas calientes anómalas, por defectos del propio material, por defecto de aislamiento o calorifugación. Para ello es preciso hacer un seguimiento que nos permita comparar periódicamente la imagen térmica actual con la normal de referencia.

1.4.4.3.7. Análisis de vibraciones

Todas las máquinas en uso presentan un cierto nivel de vibraciones como consecuencia de holguras, pequeños desequilibrios, rozamientos, entre otros. El nivel vibratorio se incrementa si existe algún defecto como desalineación, desequilibrio mecánico, holguras inadecuadas y cojinetes defectuosos.

Por tal motivo, el nivel vibratorio puede ser usado como parámetro de control funcional para el mantenimiento predictivo de máquinas, estableciendo un nivel de alerta normal y otro inadmisibles a partir del cual la fatiga generada por los esfuerzos alternantes provoca el fallo inminente de los órganos afectados.

Se usa la medida del nivel vibratorio como indicador de la severidad del fallo y el análisis espectral para el diagnóstico del tipo de fallo.

1.4.4.3.8. Ventajas y desventajas del mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones

El análisis de vibraciones como agente integrante del mantenimiento predictivo permite:

- Programar el reacondicionamiento de equipos en un momento oportuno.
- Planificar los requerimientos necesarios: personal, herramientas y repuestos.
- Reducir al mínimo los daños de consideración a la máquina como resultado de los esfuerzos tras una falla.
- Reducir los tiempos de reacondicionamiento de las máquinas incrementando así su tiempo de producción.
- Ahorro considerable en los costos de mantenimiento debido a la reducción del tiempo de parada, el conocimiento de los repuestos, herramientas y personal, a utilizarse en la reparación.

Las desventajas que conlleva la aplicación de esta técnica predictiva son:

- Se requiere de personal calificado el cual se encargará de adquirir, analizar, procesar y tomar las decisiones. Se necesita una inversión inicial considerable para la formación del personal.
- Los equipos que toman y procesan las mediciones de vibración en la maquinaria tienen un costo elevado.

2. VIBRACIÓN

Vibración es el cambio de posición en el tiempo de las partes de una máquina hacia un lado y otro con respecto a su posición de reposo.

Es la oscilación o el movimiento repetitivo de un objeto alrededor de una posición de equilibrio. Este tipo de vibración se llama vibración de cuerpo entero, lo que quiere decir que todas las partes del cuerpo se mueven juntas en la misma dirección en cualquier momento.

2.1. Las máquinas y las vibraciones

Una máquina ideal no produce vibración porque toda la energía es utilizada en el trabajo que realiza. En la práctica, la vibración se produce debido a la transmisión normal de fuerzas cíclicas a través de los componentes de la máquina, los cuales reaccionan unos contra otros y transmiten la energía a través de la estructura.

Una máquina bien diseñada producirá bajos niveles de vibración, sin embargo, pueden generarse cambios en las propiedades dinámicas de las máquinas: el desgaste, las deformaciones, la desalineación y el desbalanceo. Estos factores producen un incremento en la energía de vibración a través de la máquina generando en los soportes cargas dinámicas adicionales considerables.

2.1.1. Causas de las vibraciones mecánicas

Uno de los fenómenos más comunes en una máquina rotativa es el desbalance dinámico, este tipo de vibración mecánica produce fuerzas centrípetas que cambian de dirección en el espacio, conforme gira la máquina.

El desalineamiento puede provocar vibraciones en los elementos rotativos de las máquinas. Esto sucede cuando no existe paralelismo entre un eje y sus chumaceras, lo que provoca un aumento en la magnitud de vibración de los apoyos o calentamiento.

La soltura puede llegar a producir vibraciones en máquinas. Esto ocurre cuando existen desajustes en los elementos de transmisión: fajas, cadenas, ruedas dentadas y acoples.

En las chumaceras se presentan vibraciones debido a que estos elementos son los que soportan la carga de los ejes, están propensos a fallar por desgaste, calentamiento o, por consecuencia, de desalineación y desbalances en los ejes.

2.1.2. Efectos de las vibraciones mecánicas

Las vibraciones mecánicas tienen efectos contraproducentes en los equipos, el personal y en las estructuras que soportan las máquinas. Una vibración excesiva, puede ocasionar:

- Baja capacidad del personal de operación para realizar eficientemente sus actividades, lo que retarda la producción generando pérdidas económicas.

- Riesgo de accidente para el personal que labora cerca de los equipos operando bajo condiciones de vibraciones altas.
- Reducción de la vida útil de los equipos en forma considerable, lo que hace menos rentable la producción.
- La existencia de vibraciones indica que la máquina no opera en óptimas condiciones, por lo que el consumo de energía se incrementa e incurre en pérdidas.

Para resolver y corregir los problemas que ocasionan las vibraciones mecánicas, se han diseñado diferentes técnicas que estudian el comportamiento de las vibraciones. Con el uso de análisis de vibraciones se logra determinar con precisión las condiciones a la que está sometida una máquina.

2.2. Principios básicos para el análisis de vibraciones

El análisis de vibraciones requiere de toda la información necesaria del equipo que se desea monitorear. La información útil para el análisis es:

- Tipos de rodamientos
- Velocidades de giro
- Condiciones de apoyo
- Potencia del equipo
- Condiciones de carga

En la actualidad, el análisis de vibraciones se realiza a través de dispositivos electrónicos. Los fundamentos básicos en los que se basa el análisis de vibraciones son:

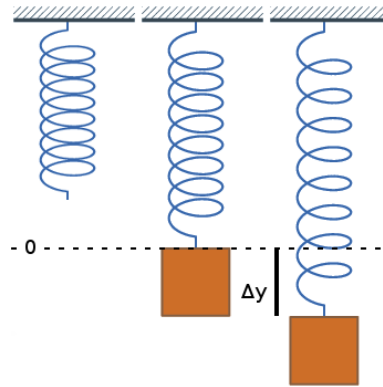
- Movimiento armónico simple
- Transformadas de Fourier

2.2.1. Movimiento armónico simple

El movimiento más simple en una dirección es el de una masa controlada por un resorte único. Este sistema mecánico se llama sistema masa – resorte con un grado único de libertad. Si se desplaza la masa, hasta una cierta distancia del punto de equilibrio, y después se suelta, el resorte la regresará al equilibrio. Entonces, la masa tendrá energía cinética y rebasará la posición de descanso y desviará el resorte en la dirección opuesta. Perderá velocidad hasta pararse en el otro extremo de su desplazamiento donde el resorte volverá a empezar el regreso hacia su punto de equilibrio.

El mismo proceso se repetirá con la energía transfiriéndose entre la masa y el resorte, desde la energía cinética en la masa hasta la energía potencial en el resorte, y regresando. La figura 5 muestra un sistema masa resorte.

Figura 5. **Sistema masa - resorte**



Fuente: INIGO. *Resortes*. <https://inigo.sendino.org/academico/images/e/ea/Resortes.png>.

Consulta: 9 de septiembre de 2017.

El uso de la medición de vibración como una herramienta requiere la comprensión de sus características:

- Amplitud
- Frecuencia
- Fase

2.2.1.1. Amplitud

Amplitud es solamente otra palabra para cantidad. La amplitud de vibración puede ser descrita de tres maneras:

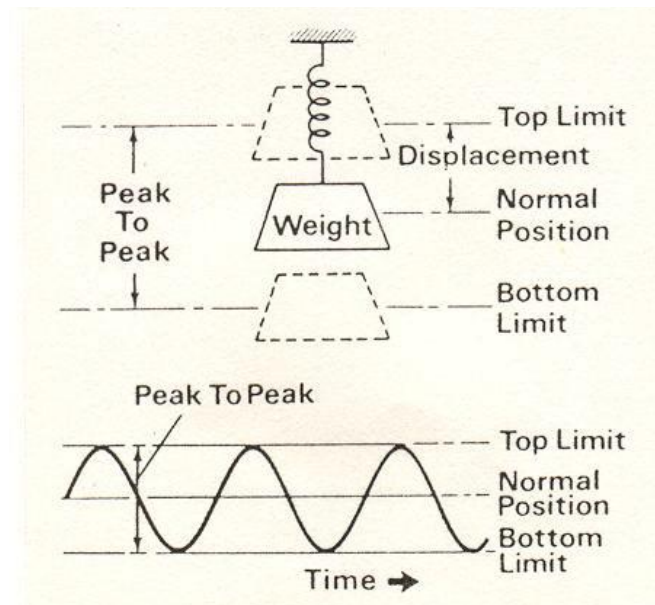
- Desplazamiento
- Velocidad
- Aceleración

2.2.1.1.1. Desplazamiento

Desplazamiento es la distancia que viaja un objeto. La distancia que la masa de la figura 6, mueve hacia arriba y hacia abajo cuando vibra, es también un desplazamiento. Si la masa se mueve arriba y abajo, se está describiendo su desplazamiento *peak-to-peak* que representa la distancia que viaja desde su posición límite superior hasta su posición límite inferior; su representación gráfica en el tiempo corresponde a una vibración armónica. La unidad en que normalmente es medido el desplazamiento en el SI es:

- $1 \times 10^{-3} \text{ m} = 1 \text{ mm}$

Figura 6. **Amplitud descrita por el desplazamiento**



Fuente: Asociación Colombiana de Ingenieros. *Cundinamarca*. <https://aciem.org/home/>.

Consulta: 11 de octubre de 2017.

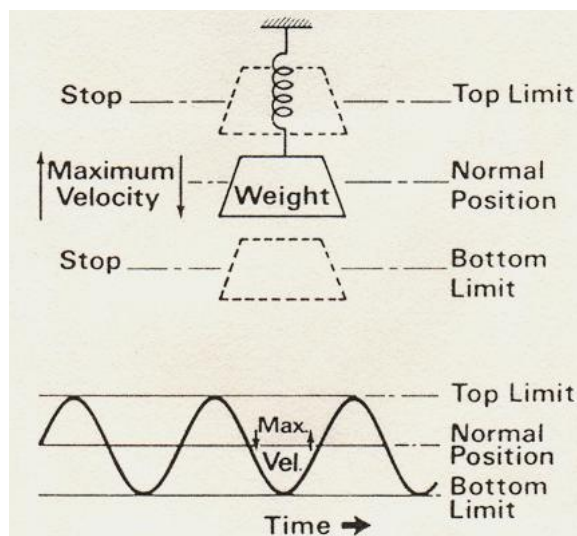
2.2.1.1.2. Velocidad

La segunda manera en que la amplitud de vibración puede ser medida, es en velocidad de vibración. La velocidad es la razón de cambio del desplazamiento con respecto al tiempo y es el mejor indicador de la energía destructiva total.

En la figura 7, la velocidad máxima del objeto se tiene cuando pasa por su posición de referencia, *normal position*. Cuando el objeto alcanza sus límites superior e inferior, su velocidad es cero. Las unidades en que normalmente es medida la velocidad en SI es:

- $1 \times 10^{-3} \text{ m/s} = 1 \text{ mm/s}$

Figura 7. Amplitud descrita como velocidad



Fuente: Asociación Colombiana de Ingenieros. *Cundinamarca*. <https://aciem.org/home/>.

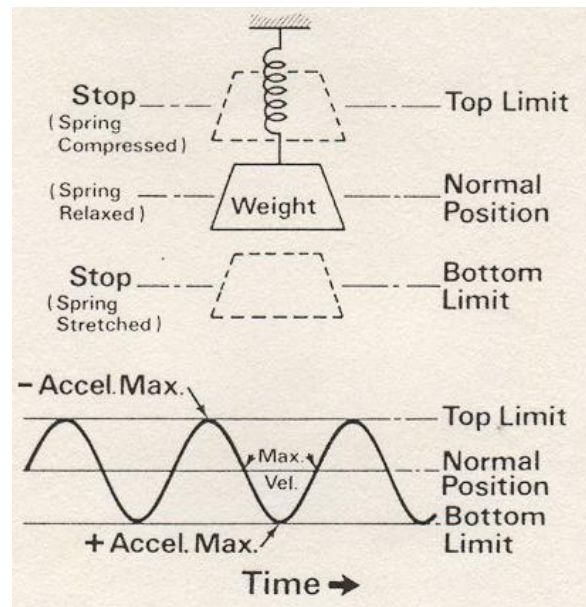
Consulta: 11 de octubre de 2017.

2.2.1.1.3. Aceleración

La tercera manera de medir la amplitud de la vibración es la aceleración. La aceleración es definida como la razón de cambio de la velocidad con respecto al tiempo.

En la figura 8 se observa que la aceleración no es constante, sino que varía a través del ciclo en forma senoidal. Cuando el objeto pasa por su posición de referencia, *normal position*, su aceleración es cero; mientras que en los extremos de su recorrido la aceleración es máxima y es donde ocurren físicamente los máximos esfuerzos dentro de la máquina.

Figura 8. **Amplitud descrita como aceleración**



Fuente: Asociación Colombiana de Ingenieros. *Cundinamarca*. <https://aciem.org/home/>.

Consulta: 11 de octubre de 2017.

En la figura 8 se observa que la forma y el período de vibración se mantienen, sea en desplazamiento, velocidad o aceleración; sin embargo, la velocidad se adelanta al desplazamiento por un ángulo de fase de 90 grados y la aceleración se adelanta a la velocidad por un ángulo de fase de 90 grados.

Normalmente, el valor resultante se expresa en g's, número de veces la aceleración de la gravedad, aunque se suele añadir SE para indicar que se trata de una señal filtrada para altas frecuencia. La unidad utilizada para describir la aceleración de la vibración, en el SI es:

- $1 \text{ gSE} = 9,81 \text{ m/s}^2$

2.2.1.1.4. Comparación de los parámetros de la amplitud

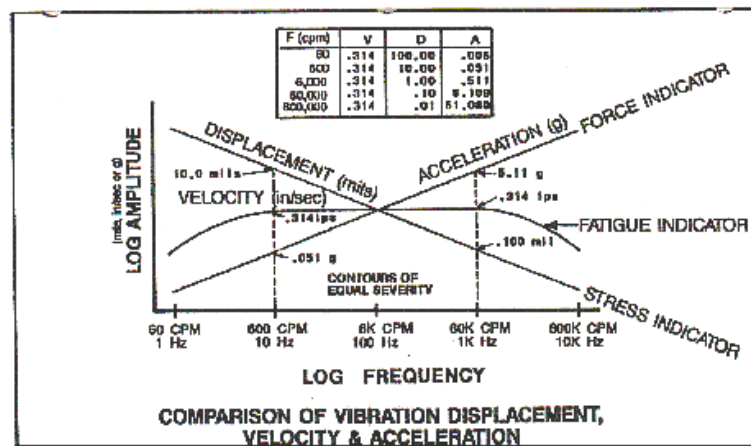
Dos puntos importantes deben ser entendidos cuando se establecen alarmas espectrales para máquinas:

- Se debe conocer qué frecuencias generan problemas como: desgaste en rodamientos, desgaste en cojinetes, problemas de engrane, problemas eléctricos, desbalanceo, desalineación entre otros.
- Se debe saber que parámetro de vibración: desplazamiento, velocidad o aceleración, detectará mejor aquellos problemas que se verán en una máquina en particular.

La figura 9 muestra que mientras el desplazamiento hace un buen trabajo en mediciones de baja frecuencia, sobre todo por debajo de 10 Hz, para

problemas detectados a mayores frecuencias su respuesta es inadecuada, tales como problemas de rodamientos y engranajes.

Figura 9. **Comparación de parámetros de amplitud, 1**



Fuente: Asociación Colombiana de Ingenieros. *Cundinamarca*. <https://aciem.org/home/>.

Consulta: 11 de octubre de 2017.

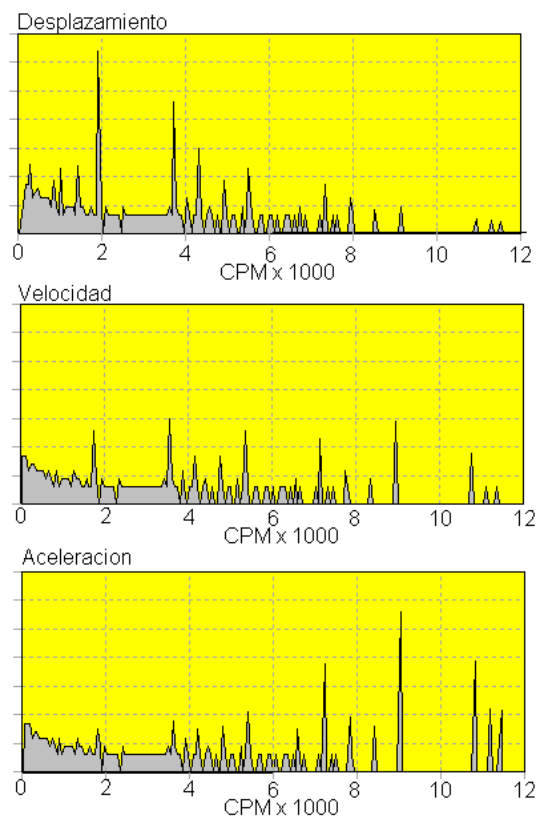
Aunque el desplazamiento sería el mejor indicador de desbalanceo o desalineación en una máquina girando a 5 Hz, si el interés primario fuera la condición de sus engranajes, la velocidad nuevamente sería el mejor parámetro por emplear. Este es comúnmente el caso en máquinas grandes y de muy baja velocidad. El mejor indicador de problemas que son generados por frecuencias forzantes en regiones de alta frecuencia, particularmente por encima de 5 000 Hz, es la aceleración.

Sin embargo, los espectros en velocidad han probado ser los mejores indicadores en la mayoría de los problemas, 80 % a 90 %, relacionados con maquinaria rotativa. En la figura 9, puede apreciarse que, para severidades similares, la velocidad es el único parámetro que se mantiene constante entre

10 Hz y 1 000 Hz. El mantenerse constante determina que la velocidad es un directo indicador de la severidad de la vibración en dicho rango en donde se presentan la gran mayoría de problemas relacionados con maquinaria rotativa industrial convencional.

La figura 10 muestra tres curvas de desplazamiento, velocidad y aceleración; que proporcionan la misma información, pero la eficacia de cada una varia.

Figura 10. **Comparación de parámetros de amplitud, 2**



Fuente: WAM. *introducción a maquinas vibratorias*. https://wamgroup.es/es-ES/WAMES/SDetail/S13363/SOL_VBM/Maquinas-vibratorias. Consulta: 11 de octubre de 2017.

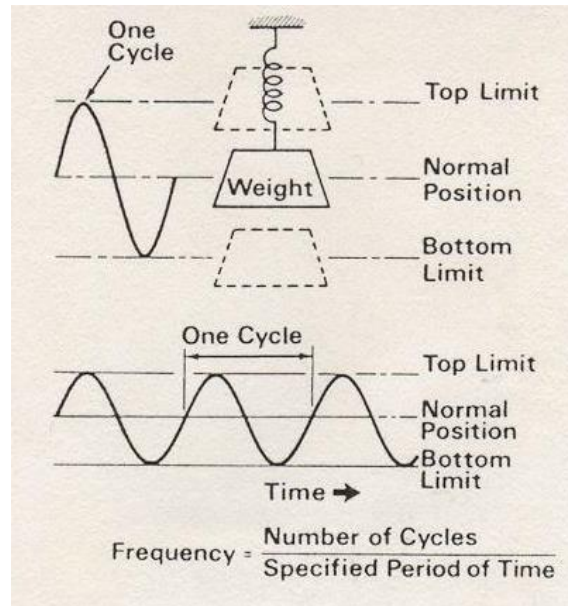
En la figura 10 se observa que la curva de desplazamiento es más difícil de leer en las frecuencias más altas. La curva de velocidad es la más uniforme en nivel sobre frecuencia. Eso es típico para la mayoría de la maquinaria rotativa, pero en algunos casos, las curvas de desplazamiento y aceleración serán las más uniformes. Es recomendable seleccionar las unidades de tal manera que se obtenga la curva la más plana. Proporcionando la mayor cantidad de información visual al observador. El parámetro de vibración que se usa más comúnmente en trabajos de diagnóstico de maquinaria es la velocidad.

2.2.1.2. Frecuencia

Se define como el número de ciclos por unidad de tiempo, usualmente descrita como ciclos por segundo, Hz. o ciclos por minuto, CPM. Este es un concepto muy importante y será usado extensivamente en el análisis de vibraciones

En la figura 11 se define un ciclo de vibración, como el movimiento del objeto oscilante de su posición de referencia, *normal position*, al límite superior de la trayectoria, *top limit*, al límite inferior, *bottom limit*, y de regreso a su posición de referencia.

Figura 11. **Frecuencia**



Fuente: Asociación Colombiana de Ingenieros. *Cundinamarca*. <https://aciem.org/home/>.

Consulta: 11 de octubre de 2017.

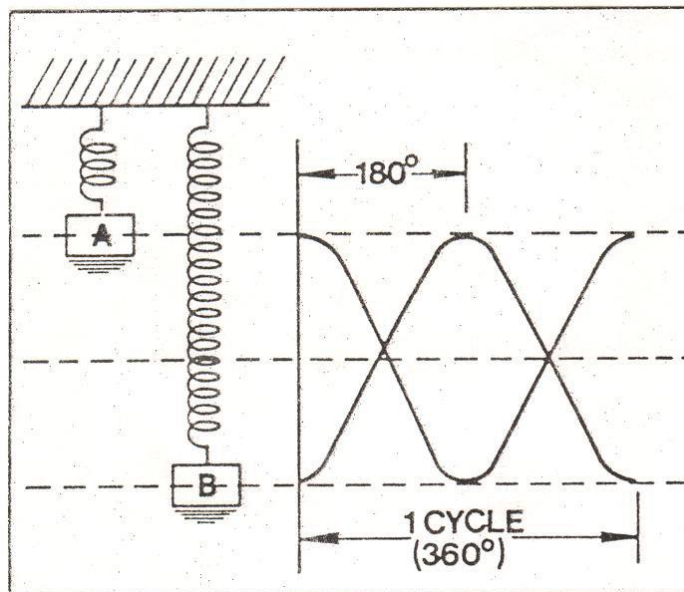
2.2.1.3. **Fase**

Se define fase como la posición de una pieza que vibra en un instante dado con relación a un punto fijo o a otra pieza que vibra.

Las medidas tomadas de fase constituyen un modo conveniente de comparar un movimiento vibracional con otro, o de determinar cómo vibra una pieza con respecto a otra. En la figura 12, las dos masas se encuentran vibrando a la misma frecuencia y desplazamiento, pero la masa A se halla al límite superior del movimiento mientras que la masa B está al límite inferior. Trazando un ciclo completo del movimiento de dichas masas y empezando por

el mismo momento, vemos que los puntos de desplazamiento pico están separados por 180 grados.

Figura 12. **Sistema con desfase de 180°**



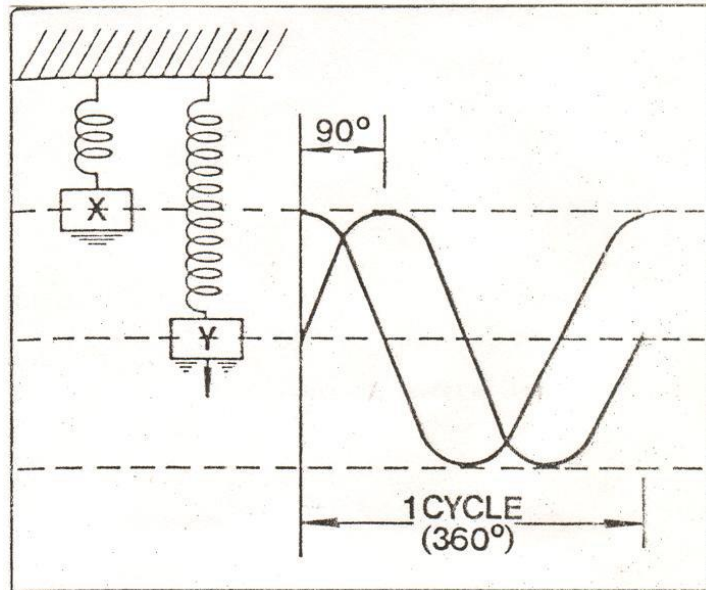
Fuente: Asociación Colombiana de Ingenieros. *Cundinamarca*. <https://aciem.org/home/>.

Consulta: 11 de octubre de 2017.

Los movimientos de las dos masas están desfasados en 180 grados, o sea que su vibración está desfasada 180 grados.

En la figura 13, la masa X se halla en el límite superior de su trayectoria, mientras que la masa Y se halla en la posición de referencia. Estas dos masas están vibrando con un desfase de 90 grados. Las lecturas de fase se expresan normalmente en grados, de 0 a 360 grados, siendo un ciclo completo de vibración igual a 360 grados.

Figura 13. Sistema con desfase de 90°



Fuente: Asociación Colombiana de Ingenieros. *Cundinamarca*. <https://aciem.org/home/>.

Consulta: 11 de octubre de 2017.

2.2.2. Componentes de una señal de vibración

En una máquina, las señales de vibración son la suma de las aportaciones de diferentes señales generadas por su respectiva fuente de excitación, las cuales se presentan como una sola señal. El análisis de vibraciones busca separar el conjunto de señales en sus componentes más importantes. Existen dos formas de visualizar las señales de vibraciones en un equipo en general:

- Dominio de tiempo
- Dominio de frecuencia

2.2.2.1. Dominio de tiempo

Visualización útil para el análisis de señales impulsivas, tal es el caso de las señales originadas en cojinetes, defectos en los engranajes y para las relaciones de fases de las señales.

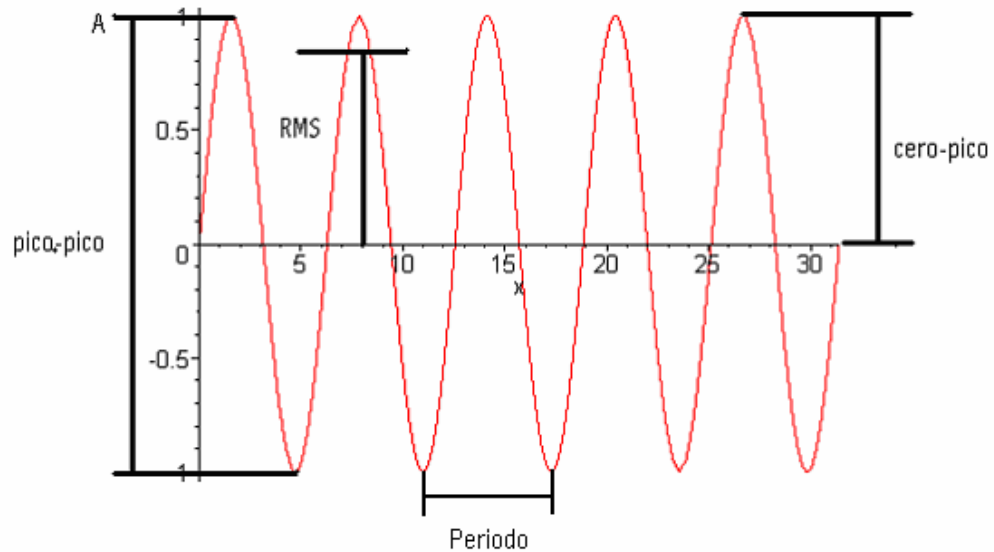
Esta visualización podría presentar problemas cuando existe más de un componente en una señal de vibración; ya que su presentación gráfica amplitud respecto al tiempo no permite observar las dos señales por separado, en cambio muestra la superposición de ambas.

Las variables utilizadas para definir la señal de vibración en un dominio de tiempo son:

- Pico o cero-pico: es el valor máximo de la amplitud en dirección positiva.
- Pico-pico: es la distancia que hay entre un pico positivo y un pico negativo. Su equivalente es 2 veces la amplitud.
- RMS: es el valor efectivo de una señal de vibración. Se toma como la medida de la potencia de la vibración.
- Tiempo de observación: tiempo de duración de la medición de una señal. Es el número de muestras, multiplicado por el periodo de una señal muestreada.

En la figura 14 se ilustran los componentes de un movimiento armónico simple en función del dominio del tiempo.

Figura 14. **Componentes de un movimiento armónico simple**



Fuente: CASTELLANOS, Melvin. *Programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipos críticos de la industria azucarera*. p. 18.

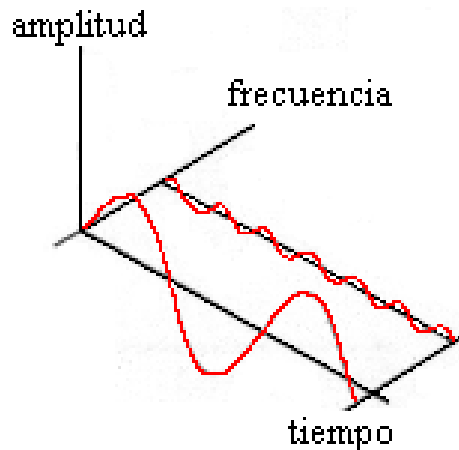
2.2.2.2. Dominio de frecuencia

Es la representación en tres dimensiones de una señal de vibración. Los ejes de análisis son:

- Amplitud
- Tiempo
- Frecuencia

A través de esta visualización, se pueden observar diferentes señales a diferentes frecuencias en un mismo gráfico en tres dimensiones. La figura 15 ilustra una visualización de dominio de frecuencia.

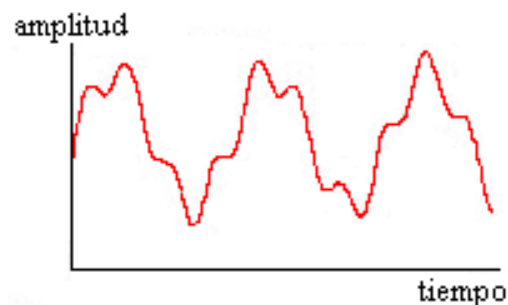
Figura 15. **Gráfico de una señal de vibración en tres dimensiones**



Fuente: CASTELLANOS, Melvin. *Programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipos críticos de la industria azucarera*. p. 19.

Para un gráfico de dos dimensiones, amplitud con respecto al tiempo, no se pueden observar los dos componentes de la señal de vibración, debido a que las superpone y solo se visualiza la unión de ambas componentes. En la figura 16, se ilustra el fenómeno.

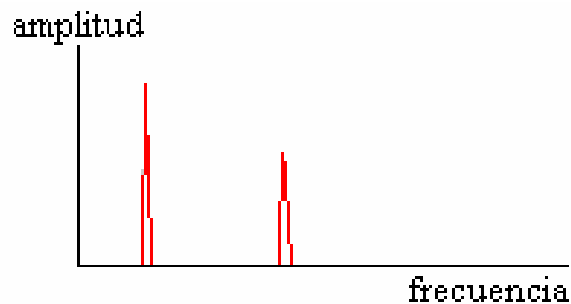
Figura 16. **Gráfico de una señal de vibración en el dominio del tiempo**



Fuente: CASTELLANOS, Melvin. *Programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipos críticos de la industria azucarera*. p. 19.

En un gráfico de dos dimensiones, amplitud con respecto a la frecuencia, se muestran solo los picos máximos, de las componentes de la señal de vibración. Esta representación se ilustra en la figura 17 y se le denomina espectro de vibración.

Figura 17. **Espectro de vibración**



Fuente: CASTELLANOS, Melvin. *Programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipos críticos de la industria azucarera*. p. 19.

El gráfico del espectro de vibraciones es la visualización más representativa e importante, porque a través de ella se pueden observar tanto la magnitud de cada componente de vibración, como la frecuencia a la que ocurre.

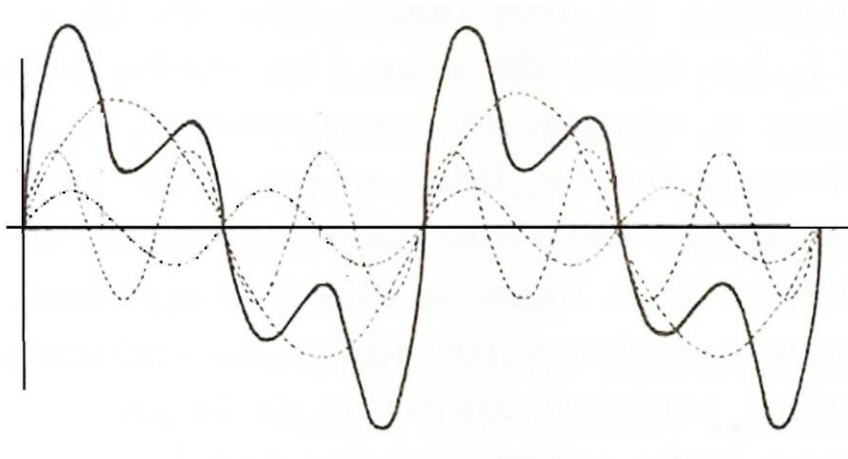
A través del análisis del espectro de vibración, se pueden realizar diagnósticos más precisos en máquinas; esto debido a que se puede analizar cada componente de la señal que genera vibraciones. Cada componente puede llegar a generar diferente tipo de vibración a diferente frecuencia.

2.2.3. La transformada de Fourier

La vibración es siempre una suma de ondas, una señal compuesta es una sumatoria de varias señales senoidales que comprenden cada uno de los componentes que se encuentran en la máquina, más todos los golpeteos y vibraciones aleatorias correspondientes a otras máquinas vecinas. El resultado es una señal vibratoria como se ilustra en la figura 18.

Cuando se quiere analizar una señal compuesta en el dominio del tiempo, a veces resulta un poco tedioso puesto que, si la máquina contiene muchos componentes, todos estarán involucrados en la señal, por lo que su estudio puede resultar casi imposible.

Figura 18. **Ondas compuestas, formada a partir de ondas simples**



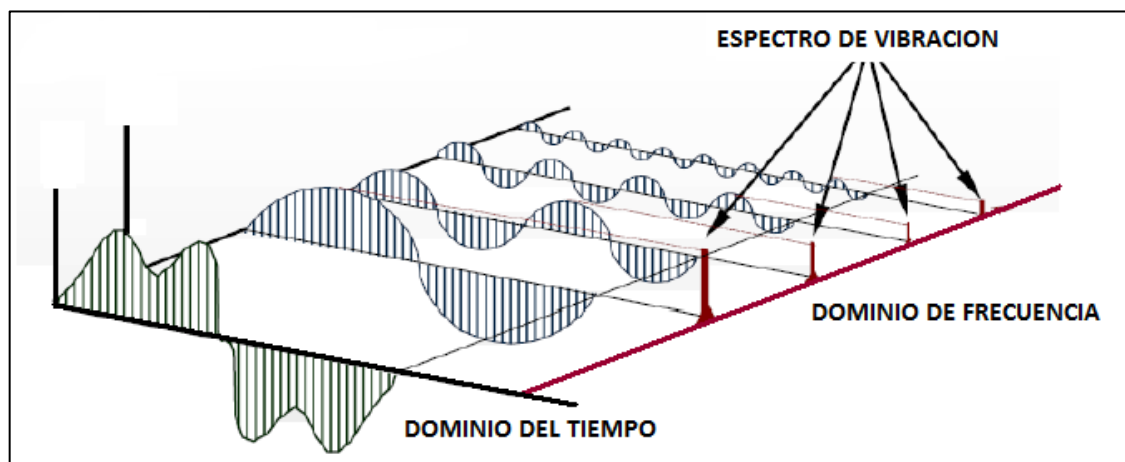
Fuente: ESTÉVEZ, Antonio. *Estudio de un sistema de mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones implantado en instalaciones de bombeo y generación*. p. 24.

Para analizar una señal compuesta e identificar que le está ocurriendo a cada componente de las máquinas, el matemático Jean Baptiste Fourier

demostró cómo descomponer una onda compleja en función del tiempo mediante series de curvas senoidales con unos valores característicos de frecuencia y amplitud. Esto dio pie a la creación de gráficas llamadas espectros, en los cuales se representa ondas vibratorias en el dominio de la frecuencia. Es bien sabido que cada componente de la máquina vibrará con una frecuencia característica, por tanto, al descomponer la señal temporal en el dominio de la frecuencia aparecerán picos de vibración con una amplitud característica de su onda temporal de forma individual, pues vibra a una frecuencia determinada.

En la figura 19 se observan picos de vibración que reciben el nombre de espectros de vibración. Esta es la gráfica de amplitud vs frecuencia, llamada espectro, donde se representan las frecuencias de cada excitación y la amplitud que produce, siendo la herramienta más usada en el análisis de vibraciones.

Figura 19. **Descomposición de una onda en el dominio de la frecuencia**



Fuente: ESTÉVEZ, Antonio. *Estudio de un sistema de mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones implantado en instalaciones de bombeo y generación*. p. 25.

La función que realiza el analista de vibraciones es la de medir la señal de vibración de la máquina mediante unos equipos llamados colectores de datos los cuales trabajan con la transformada rápida de Fourier, FFT, descomponiendo la onda temporal medida en ondas simples senoidales en el dominio de la frecuencia; representa de forma individual los diferentes espectros de vibración para cada frecuencia determinada; el resultado es el objeto de estudio para verificar si existe algún fallo o indicio del mismo.

2.2.4. El análisis espectral

El análisis espectral se define como la transformación de una señal en el dominio del tiempo hacia una representación en el dominio de la frecuencia, consiguiéndose gracias a la FFT.

Conocer la velocidad de giro de las máquinas es fundamental para establecer un buen análisis vibratorio, pues a raíz de esta velocidad se relaciona los picos de vibración obtenidos en el espectro, pudiendo ver tras el estudio de este cual es la causa incipiente que producirá un fallo.

La mayoría de las componentes de señal de ruido y vibración están directamente relacionadas con la velocidad de la máquina, por tanto, tras aplicar la FFT se pueden analizar por separado cada uno de los posibles problemas de una máquina con tan solo conocer sus características constructivas y su velocidad de giro.

Esta velocidad se representa en el eje X del espectro y recibe el nombre de velocidad de sincronismo, cuyas unidades serán en CPM o Hz; pueden pasar de una unidad a otra dividiendo o multiplicando por 60, así 3 000 CPM equivalen a 50 Hz. La forma más habitual de expresar la velocidad y las

frecuencias en el espectro es mediante el número de orden, siendo la velocidad de la máquina el 1X.

Los números de orden no son más que múltiplos de los CPM de la máquina. En un espectro normalizado en órdenes, cada uno de los armónicos de la señal está en la misma ubicación en la gráfica sin tomar en cuenta la velocidad de giro. Esto es recomendable en el caso de que se quieran comparar varias mediciones en la misma máquina tomadas en momentos diferentes, y donde la velocidad ha cambiado en cada una de las mediciones, es lo que se conoce como máquina de velocidad variable.

Si se quiere medir sobre una máquina de velocidad variable, no es recomendable usar espectros en modo frecuencia, puesto que cuando se analizan tendencias las amplitudes no coincidirán unas con otras. Para estos casos es aconsejable el análisis de orden que muestra el número de eventos que sucede por revolución, de manera que no importa la velocidad del eje.

Otras frecuencias que aparecen en el espectro son las llamadas frecuencias armónicas, siendo múltiplos enteros de esta. Por ejemplo, si la frecuencia de giro de la máquina fuera de 1 500 CPM, y en el espectro aparecen picos de vibración a 3 000, 4 500, 6 000 CPM, estas son velocidades armónicas pues se dan a 2X, 3X y 4X veces la frecuencia de giro. La desalineación y el desequilibrio son fallos típicos que presentan este patrón de velocidades armónicas.

La región del espectro que se encuentra por debajo de la velocidad de giro recibe el nombre de zona subsíncrona, y si se obtienen picos de vibración en esta zona, se dice entonces que el espectro contiene frecuencias

subarmónicas. Cuando en el espectro aparecen estas frecuencias, suele ser síntomas de problemas mecánicos, identificándose la presencia de holguras.

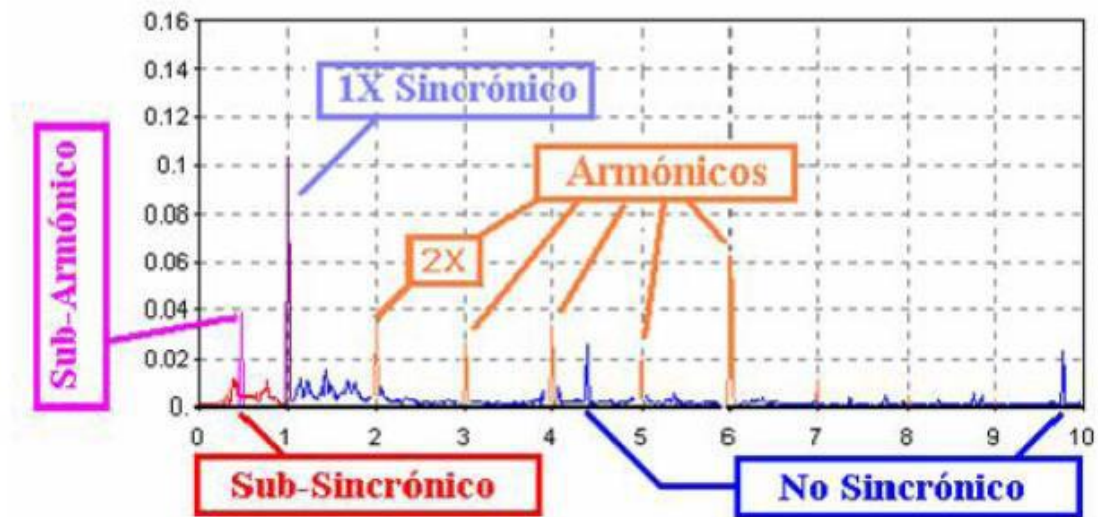
Además, en un grupo de bombeo, las frecuencias subsíncronas podrían ser el indicio de problemas hidráulicos, como es el caso de inestabilidad en los rodamientos e inestabilidad hidráulica originada por un mal diseño en la geometría de la impulsión de la bomba. A veces, la frecuencia natural del rotor se encuentra en un rango de frecuencias de 0,7 a 0,85X pudiendo originar resonancia, si se excita dicha frecuencia natural.

La frecuencia natural de un sistema es aquella frecuencia que tiene una tendencia o facilidad para vibrar. Todo sistema posee una o varias frecuencias naturales de forma que al ser excitadas se producirá un aumento importante de vibración llamada resonancia. La frecuencia natural es una característica intrínseca del sistema en cuestión, puesto que depende de la rigidez y masa del sistema.

Por último, en un espectro aparecen frecuencias llamadas no síncronas, que son aquellas que no son múltiplos enteros de la velocidad de giro. Por ejemplo, una frecuencia no síncrona pudiese ser la presencia de un pico de vibración a 5 250 CPM si la frecuencia de giro es de 1 500 CPM, lo que correspondería a un 3,5X. La aparición de estas frecuencias evidencia problemas en rodamientos, puesto que giran a una velocidad distinta a la de sincronismo. También existen armónicos de frecuencias no síncronas. Por ejemplo, si se tiene una frecuencia a 3,6X y otra a 7,2X, entonces esta última es un armónico de la primera.

En la figura 20 se representa un espectro donde se muestran cada tipo de frecuencia descrita anteriormente.

Figura 20. Frecuencias de un espectro y nomenclatura



Fuente: ESTÉVEZ, Antonio. *Estudio de un sistema de mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones implantado en instalaciones de bombeo y generación*. p. 27.

Es importante conocer la velocidad de giro de la máquina, puesto que en función de esta se analizarán las frecuencias armónicas, subsíncronas y las no síncronas, pudiendo entonces identificar que componente está siendo afectado, evaluando así las posibilidades de falla en función de la severidad de amplitud de vibración presentada.

Cuando se analiza un espectro, con el objetivo de visualizar un indicio de fallo, es conveniente comparar los resultados obtenidos respecto a un espectro anterior de la misma máquina el cual garantizará que la máquina estaba en perfectas condiciones, pudiendo analizar más fácilmente la severidad del daño.

Con base en esta comparación se tomarán las medidas necesarias para la corrección del fallo, es lo que se conoce como tendencia del funcionamiento de

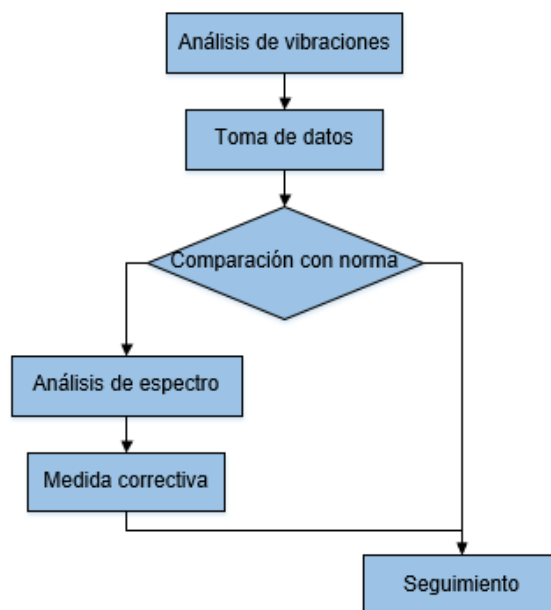
la máquina. También, existen normas que indican la severidad de la amplitud de vibración que se da a una frecuencia determinada y con base en esta se decide si la máquina está en perfecto estado o, por el contrario, habría que actuar sobre ella.

3. PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LA TOMA DE DATOS EN MÁQUINAS

Para realizar el análisis de vibraciones en las máquinas, se utilizan equipos de medición digital. Para realizar dichos análisis, es necesario tomar las lecturas de la magnitud de las vibraciones, la frecuencia, la velocidad y la aceleración. Con estas lecturas se podrá realizar el estudio de los espectros, y así determinar el estado del equipo.

A continuación, se presentará un flujograma del proceso de análisis de vibraciones en máquinas.

Figura 21. Procedimiento para realizar análisis de vibraciones



Fuente: elaboración propia.

3.1. Equipo de medición para la toma de datos

Después de comprender que es vibración, porqué se la debe medir y cuáles son sus características básicas; se hace necesario saber cómo medirla, que instrumentación se debe emplear y cuáles son sus características, capacidades y diferencias.

La instrumentación requerida para medir vibración puede ser clasificada básicamente en:

- Instrumentos de medición
- Transductores

3.1.1. Instrumentos de medición

Cada tipo de instrumento de medición tiene una función específica, sirven a diferentes propósitos y tienen diferentes funciones. Las diferencias entre cada categoría y sus características son fácilmente definidas.

Los instrumentos utilizados para la recolección de datos para el análisis de vibración pueden ser:

- Manual
- Medidores manuales con capacidad de almacenamiento
- Analizadores portátiles de datos

3.1.1.1. Manual

Un medidor de vibración manual es un instrumento económico y sencillo de usar que debería formar parte de cualquier programa de análisis de vibraciones.

Los medidores de mano una vez entran en contacto con la maquinaria que vibra, suministran una lectura de los datos de vibración. Los niveles de vibración son evaluados en el sitio para los estados normales o anormales de vibración de la maquinaria. Los típicos medidores manuales de vibración funcionan con baterías y utilizan un acelerómetro debido a su amplio rango y su construcción fuerte. Los medidores de vibración deben ser tan pequeños y livianos como sea posible, y deben estar fuertemente empacados para una máxima resistencia al abuso. Las ventajas de los medidores manuales de vibración son su bajo precio, conveniencia y flexibilidad.

Los medidores manuales cuentan con una capacidad limitada de análisis y deben ser usados como suplementos de un programa en vez de como una herramienta. La figura 22 muestra un equipo de mano para la toma de datos.

Figura 22. **Instrumento de medición manual**



Fuente: Amazon. *Equipo de mano para la toma de datos*. https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/I/41jRa0x3VOL._SX342_.jpg. Consulta: 9 de septiembre de 2017.

3.1.1.2. Medidores manuales con capacidad de almacenamiento

Aparato utilizado para la recolección de datos que permite al usuario registrar indicadores de parámetros importantes de operación y almacenar los datos generales de la vibración. Los instrumentos manuales combinan un tamaño compacto con la habilidad de almacenamiento de datos; suministra un punto de partida para un programa de mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones.

Las mediciones se descargan en los instrumentos. Luego, el usuario recorre una ruta a través de la planta, recogiendo los datos sobre la vibración y los procesos. A medida que se toma cada una de las mediciones, sus resultados quedan automáticamente registrados en el instrumento usado para la recolección. Una vez finalizada la ruta, la información de las medidas se carga a un software de análisis de base de datos para la posterior creación de informes, tendencias a largo plazo y análisis. En la figura 23 se presenta el medidor descrito.

Figura 23. **Medidor manual con capacidad de almacenamiento**



Fuente: Binary. *Medidor manual*. http://www.skf.com/binary/76-19707/Microlog%20GX%20CMXA%2075_tcm_12-19707.png. Consulta: 9 de septiembre de 2017.

3.1.1.3. Analizadores portátiles de datos

Los analizadores portátiles de datos realizan todas las funciones necesarias para seguir un programa de monitoreo del estado de vibración, con base en el desempeño histórico de la máquina y las recomendaciones de la industria; los datos sobre vibración se obtienen periódicamente a fin de detectar los cambios en la salud o el estado de la máquina.

Los analizadores portátiles de datos recolectan y registran los datos de vibración de la maquinaria y muestran espectros de frecuencia FFT de alta resolución, así como formas de onda de dominio de tiempo en una pantalla.

Las mediciones de vibración que son recogidas pueden ser analizadas en el sitio o descargadas a un programa para la administración de bases de datos para su análisis y la realización de tendencias a largo plazo.

El usuario lleva el recolector de datos hasta cada uno de los puntos de medición, y las mediciones de vibración se realizan con una sonda que se anexa en forma temporal o desde sensores anexos a la maquinaria de manera permanente. Otras mediciones tales como la presión del proceso, la temperatura y el flujo se pueden medir desde los instrumentos y luego cargar a través del teclado del recolector de datos. Las observaciones visuales como fugas y aceite sucio también se pueden cargar a través del mismo teclado.

Las mediciones de la maquinaria aparecen en la pantalla de información del recolector portátil de datos y pueden ser analizadas en el campo, o finalizada la ruta el usuario puede conectar el recolector de datos a la computadora y transferir las mediciones y observaciones al software de manejo de la base de datos para su análisis. A continuación, se presenta el medidor descrito.

Figura 24. **Analizador portátil de datos**



Fuente: Binary. *Medidor manual*. http://www.skf.com/binary/76-19707/Microlog%20GX%20CMXA%2075_tcm_12-19707.png. Consulta: 9 de septiembre de 2017.

3.1.2. Transductores de vibración

Un transductor de vibración es un elemento que convierte una señal mecánica en una señal eléctrica. Los transductores de vibración disponibles se clasifican en:

- Sensor de no contacto
- Transductor de velocidad
- Acelerómetro

Estos tres tipos de transductores son los utilizados normalmente para medir la vibración. En la tabla XI se describe cada uno de estos transductores en términos de su principio de operación, su aplicación y sus limitaciones.

Tabla XI. **Transductores de vibración más utilizados**

Tipo	Sensible
Sensor de no contacto	Desplazamiento
Sensor de velocidad	Velocidad
Acelerómetro	Aceleración

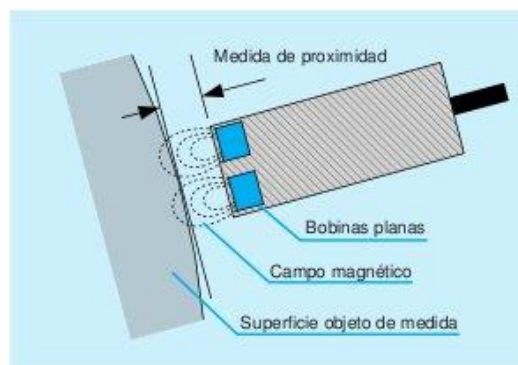
Fuente: elaboración propia.

3.1.2.1. Sensor de no contacto

Conocido también como transductor de corriente de Eddy, es un elemento utilizado normalmente para bajas frecuencias, los sensores de no contactos realizan mediciones del desplazamiento radial o axial de ejes. Se instalan en las cubiertas de rodamientos o a su lado y detectan el desplazamiento del eje en relación con su posición de anclaje.

El principio de operación de este tipo de sensor es simple. El *driver* produce una señal que alimenta una bobina en la punta de la sonda, la cual genera un campo magnético alrededor de ella. Cuando un material conductor se acerca a la punta de la sonda, se producen corrientes sobre la superficie del material y la potencia es absorbida por interferencia del campo magnético. Entre más cercano esté el objeto, más potencia es absorbida. Luego, el *driver* mide el cambio en la fuerza del campo magnético y la convierte en una salida estándar calibrada. Esta salida normalmente es de 200 mV/mm de vibración o cambio de distancia pico a pico entre el objeto medido y la punta de la sonda. En la figura 25 se muestra el funcionamiento del sensor de no contacto.

Figura 25. **Funcionamiento de un sensor de no contacto**



Fuente: Curso vibraciones. *Desplazamiento*. http://www.sinais.es/Recursos/Curso_vibraciones/sensores/transductores_desplazamiento.html. Consulta: 9 de septiembre de 2017.

El sensor de no contacto posee las siguientes ventajas:

- El sistema es preciso.
- Puede medir vibraciones con exactitud de 1 000 Hz, o tan lentas como 0 Hz.

- Mide tanto la componente continua como la alterna de una señal vibratoria.
- Es de fácil calibración.

Las limitaciones que se asociación con un sensor de no contacto son las siguientes:

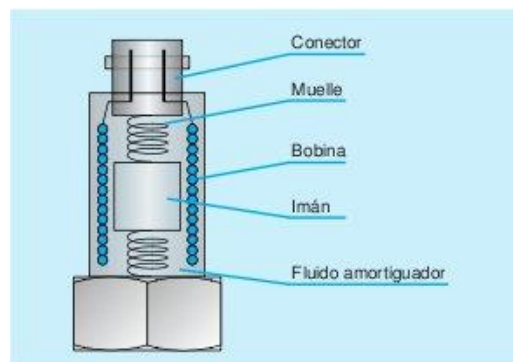
- Instalación complicada, ya que exige maquinados especiales para la fijación de la sonda.
- La zona alrededor de la punta de la sonda debe ser chaflanada o barrenada a dos veces su diámetro.
- Cualquier variable que pueda afectar la cantidad de potencia absorbida por el objeto puede ser falsamente percibida como vibración.
- La vibración medida resulta ser la vibración del eje, relativa a su carcasa. Si la carcasa no está en capacidad de amortiguar la vibración del eje, la medición obtenida tiende a cero.
- Requiere fuente de energía externa.

3.1.2.2. Transductores de velocidad

El sensor de no contacto mide desplazamiento o distancia. Sin embargo, esa distancia puede ser atravesada a diferentes velocidades. El transductor de velocidad es llamado así porque su salida es proporcional a la velocidad de vibración.

El sistema consta de una bobina de alambre fino soportada por resortes de baja rigidez. Un inductor permanente se hace solidario con la caja del sensor y genera un campo magnético alrededor de la bobina suspendida. Cuando el transductor es colocado contra un componente vibrante, el inductor permanente vibra junto con el componente mientras que la bobina de alambre soportada por resortes de baja rigidez permanece estacionaria en el espacio. Bajo estas condiciones, el movimiento relativo entre el campo magnético y el conductor enrollado es el mismo movimiento relativo del componente vibrante con respecto a un punto en el espacio; y el voltaje inducido en la bobina es directamente proporcional a este movimiento. A mayor movimiento, el voltaje inducido será mayor. La figura 26 muestra un transductor de velocidad.

Figura 26. **Transductor de velocidad**



Fuente: Curso vibraciones. *Desplazamiento*. http://www.sinais.es/Recursos/Curso_vibraciones/sensores/transductores_desplazamiento.html. Consulta: 9 de septiembre de 2017.

La señal dinámica generada identifica la vibración de la máquina solo en la dirección del eje longitudinal del sensor, en el punto que se colocó. Para tener una mejor información de vibración del punto que se está midiendo, se deben tomar lecturas en dirección horizontal, vertical y axial al eje rotante. El

transductor deberá colocarse sobre las chumaceras de cojinetes o en los puntos más cercanos a ellas.

Las ventajas del transductor de velocidad son:

- Muy fácil de instalar temporal o permanentemente sobre la carcasa de una máquina.
- No requiere de fuente externa de energía.
- Genera una señal muy confiable y fuerte en el rango de frecuencia donde es posible encontrar un alto porcentaje de problemas asociados a la vibración de maquinaria rotativa de uso común en la industria.

Las limitaciones incluyen:

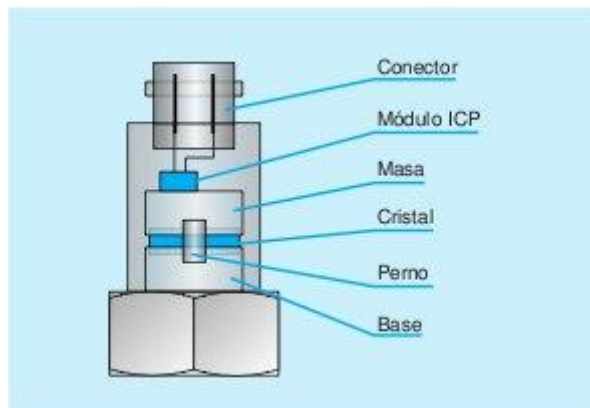
- A causa de que la unidad debe vencer fuerzas internas de amortiguación y está sujeta a limitaciones de fuerzas dinámicas, es con normalidad seguro solamente dentro de un rango de frecuencia de 10 - 2KHz.
- Los transductores de velocidad están limitados en su posición de montaje. No pueden ser instalados hacia abajo.
- Tiende a amplificar más la vibración en sentido transversal y no están diseñado para soportar grandes cargas transversales.
- Como su funcionamiento se basa en componentes móviles es de esperar un deterioro más acelerado que los otros transductores.

- El fabricante entrega el transductor calibrado, cualquier descalibración de este obliga al usuario a la reposición del instrumento.

3.1.2.3. Acelerómetros

El tercer tipo de transductor normalmente usado para medir vibración es el acelerómetro. El principio de operación de un acelerómetro está basado en las propiedades de los cristales piezoeléctricos. El cristal genera una carga eléctrica cuando es deformado o cuando una fuerza mecánica es aplicada a él. Inspeccionando la construcción de un acelerómetro típico se encontrará un cristal piezoeléctrico montado dentro del cuerpo del acelerómetro y una masa sísmica, como se observa en la figura 27. Cuando el transductor vibra, las fuerzas gravitacionales sobre la masa deforman el cristal produciendo una carga de energía eléctrica. Esta energía es proporcional a la aceleración de la vibración absoluta de la carcasa.

Figura 27. Transductor piezoeléctrico



Fuente: Curso vibraciones. *Desplazamiento*. http://www.sinais.es/Recursos/Curso_vibraciones/sensores/transductores_desplazamiento.html. Consulta: 9 de septiembre de 2017.

Las ventajas del acelerómetro son:

- Muy fácil de instalar temporal o permanentemente sobre la carcasa de una máquina.
- Su señal es nítida y exacta en un amplio rango de frecuencias, entre 2 y 10KHz, dependiendo del tipo de montaje empleado. Para menores frecuencias se puede emplear un acelerómetro especial de baja frecuencia y para mayores frecuencias se puede emplear un acelerómetro especial de alta frecuencia.
- Transductores mucho más pequeños y livianos que los sísmicos.
- Muy confiable funcionalmente porque no tiene partes móviles.

Las limitaciones son:

- La señal generada por el transductor es muy susceptible a una deficiente sujeción del transductor, sobre todo cuando se está frente a una condición de alta amplitud y alta frecuencia.
- El fabricante entrega el transductor calibrado, cualquier des calibración de este obliga al usuario a la reposición del instrumento.

3.1.3. Selección de transductores

El fracaso de beneficiarse de un programa de vibraciones puede ser trazado por fallas o datos incorrectos causados por una selección inapropiada del transductor de vibración. El transductor de vibración debe transformar

confiablemente la vibración de una máquina en una señal eléctrica que pueda ser leída por un analizador de vibraciones o un sistema de monitoreo. Si la señal eléctrica generada no es representativa de una vibración real, el más sofisticado medidor o analizador disponible entregará falsa o incorrecta información.

El acercamiento lógico de ingeniería para la selección de transductores reduce un problema complejo a su más mínima expresión. Primero se debe escoger los parámetros vibracionales determinantes en nuestro propósito, luego se seleccionará el transductor que mejor se aplica a dichos parámetros. Los diez parámetros básicos de vibración que deben ser evaluados como mínimo, son listados a continuación:

3.1.3.1. Modo de medición

Para medir la aceleración de una vibración, el acelerómetro es la mejor selección. Para medir la velocidad de una vibración un sensor sísmico puede ser usado. Un acelerómetro puede ser usado para medir velocidad si se integra la señal una vez y para medir desplazamiento si se integra dos veces. Una sonda de no contacto es usada para medir desplazamiento directamente.

También, puede ser medido el desplazamiento si se integra una vez la señal del sensor sísmico.

3.1.3.2. Tipo de cojinete

Este parámetro tiene un efecto significativo en la selección del transductor. En general, los ejes vibran con desplazamientos relativamente grandes en los cojinetes de fricción, pero debido al efecto de amortiguación del aceite y el

cojinete, la fuerza transmitida desde el eje a la carcasa puede ser baja. Por lo tanto, las vibraciones del eje pueden ser fuertemente amortiguadas y las lecturas de vibración de un sensor sísmico o un acelerómetro montados en la carcasa de la máquina no reproducen confiablemente la verdadera señal dinámica del rotor. En este caso se prefiere un sensor de no contacto.

Contrariamente, con un cojinete antifricción las tolerancias son tan estrechas que hay una directa transmisión de fuerzas desde el rotor hacia la carcasa y la transferencia de vibración es muy alta. La mayoría de las fuerzas en el eje son transmitidas a la carcasa y las mediciones hechas con un acelerómetro o un sensor de velocidad son generalmente satisfactorias.

3.1.3.3. Velocidad de la máquina o frecuencias dominantes a ser medidas

Este parámetro sirve básicamente para indicar la limitante del sensor sísmico y su insensibilidad a vibraciones de baja y muy alta frecuencia. Varios problemas dentro de una máquina pueden generar frecuencias de vibración desde 0,5 a 50 veces la velocidad de rotación.

3.1.3.4. Temperatura en el punto de montaje

Existen límites de temperatura para cada uno de los sensores, siendo el acelerómetro el sensor con mayor capacidad de trabajar en condiciones de alta temperatura como las que se dan en motores a diésel o gasolina y las bombas transportadoras de crudo.

3.1.3.5. Longitud del cable, fuerza de la señal

Los tres tipos de transductores requieren un buen grado de torcedura, blindaje y cable. Todos los tipos de transductores generan relativamente bajas señales de corriente alterna. La instalación apropiada del cable es crítica para un sistema medidor de vibración. Si el cableado se hace cerca o paralelo a cables de alto voltaje o corriente, se pueden inducir señales falsas dentro del sistema.

3.1.3.6. Requerimientos de instalación

Se pueden también seleccionar los sensores de acuerdo con la facilidad con que estos pueden ser instalados y posteriormente la facilidad con la que se recogen los datos. Este parámetro debe ser analizado de acuerdo con la maquinaria a la cual se le realizarán las mediciones y a las instalaciones en donde se encuentra esta maquinaria.

3.1.3.7. Masa relativa, rotor a carcasa

Cuando la masa de la carcasa de la máquina es mucho más grande que la masa del rotor, por ejemplo, un compresor centrífugo multietapas, la fuerza del rotor no es suficiente para causar vibración significativa en la carcasa, entonces, un sensor de no contacto es preferible. Con una máquina de carcasa liviana, la carcasa tiende a seguir la vibración del eje, entonces, un sensor sísmico o un acelerómetro son adecuados.

3.1.3.8. Limitaciones y antecedentes de la máquina

Existen casos en los que a pesar de que se selecciona un determinado transductor, este no puede ser instalado en la máquina o presenta dificultades para realizar las mediciones, casos en los cuales se deberá estudiar a la máquina antes de realizar cualquier selección.

3.1.3.9. Problemas inusuales de instalación

Los factores ambientales pueden afectar la selección del transductor:

- ¿Está la máquina localizada en un lugar inusual como una plataforma muy flexible?
- ¿Está la máquina sujeta a muchos arranques y paradas?
- ¿El transductor estará expuesto a ambientes químicos, corrosivos u otras sustancias inusuales?
- ¿Necesitan los transductores estar protegidos contra daños físicos?

Estas son preguntas importantes aplicadas a la selección de transductores.

3.1.3.10. Experiencia del usuario

Un factor a menudo ignorado es la experiencia acumulada con cierto tipo de transductor. Si una planta y su equipo humano han experimentado exitosamente en la instalación y uso de un determinado sensor, habría que

evaluar muy cuidadosamente la situación antes de seleccionar un nuevo transductor.

3.2. Diseño de la documentación necesaria

Inicialmente se debe diferenciar claramente entre dos tipos de información que es preciso recopilar, antes de llevar a cabo con éxito un análisis de vibraciones de maquinaria rotativa:

- Información funcional, operacional e histórica de la máquina
- Información dinámica

3.2.1. Conocimiento de la máquina

Cuando existe un excesivo incremento de la vibración, se puede obtener muy buena información si se revisa el historial de la máquina. Máquinas que han sido adicionadas a una estructura pueden fácilmente cambiar su frecuencia natural y causar resonancia. Cambios en condiciones normales de operación, como velocidad, carga, temperatura o presión, pueden producir cambios significativos en la vibración de la máquina.

Cuando la vibración de una máquina se incrementa, podría deberse al desgaste o deterioro de la condición mecánica de la máquina; cambios que han sido hechos a la máquina, su estructura o sus condiciones operacionales.

Es necesario tener un concepto claro y preciso, de las características funcionales de la máquina y de sus características físicas de diseño.

Dicho conocimiento determinará la eficiencia y exactitud del diagnóstico. Las características físicas de diseño se asocian con frecuencias de vibración que podrían representar un problema.

Algunas de estas características son:

- Velocidad de rotación
- Tipo de chumacera
- Número de dientes en engranajes
- Número de bolas o rodillos en rodamientos
- Número de aletas

Estas características deben ser en lo posible recopiladas y almacenadas para cada máquina ya que basado en ellas se puede determinar el procedimiento de obtención de la información dinámica apropiada y hacer mucho más eficiente y exacto su respectivo análisis.

3.2.2. Configuración de la maquinaria

Cualquier software dedicado al mantenimiento predictivo por vibraciones trabaja con base en la información almacenada de cada una de las máquinas que conforman el programa de mantenimiento.

Toda base de datos para análisis de vibraciones se basa fundamentalmente en archivos que recopilan las características de la maquinaria, se desea que el sistema compile, almacene y muestre en pantalla la información dinámica. Se debe crear un archivo por cada posición de transductor y por cada variable a medir dentro de la rutina.

Una vez creada la base de datos y configurados los archivos dentro del software, los archivos se transfieren al hardware para la correspondiente recopilación de información dinámica en cada una de las máquinas.

3.2.3. Recopilación de la información dinámica

Consiste en medir directamente de la máquina la señal de su vibración y grabarla en la memoria del hardware. La información debe ser colectada en las tres direcciones espaciales de cada uno de los rodamientos o cojinetes que soporten el rotor.

Las máquinas que deben monitorearse con mayor énfasis son aquellas en las que el proceso es fundamental para la productividad de la planta y las que tienen una historia negativa de mantenimiento.

Gran parte de las máquinas debe monitorearse mensualmente, algunas máquinas menos importantes cada tres meses. Una prueba semanal es normal para máquinas críticas. Es importante adaptar el programa de mediciones a las máquinas y a su estado.

3.3. Toma de datos

Cuando los datos se toman en un equipo analizador de vibraciones, se obtiene: un espectro de amplitud de la vibración respecto a la frecuencia, en donde la amplitud de la vibración puede estar en:

- Unidades de velocidad (mm/s.)
- Unidades de aceleración (G)
- Frecuencia en ciclos por minuto (CPM)

El lugar o ubicación en el cual se toman las mediciones de vibración se denomina punto. Estos puntos se ubican en la carcasa de los rodamientos, elementos de transmisión de potencia y en la estructura de un elemento rotatorio. Se seleccionan los puntos por medio de un criterio personal o bien empleando manuales generales. Es necesario conocer la forma adecuada en que deben tomarse los datos para que el análisis de vibraciones sea efectivo; de lo contrario, los datos serán erróneos.

En cada punto se toman tres mediciones, que se denominan por su relación con el eje de la máquina a analizar. Para máquinas con ejes horizontales como las transmisiones o ventiladores, se toman en las siguientes posiciones:

- Dirección vertical: radialmente al eje, con el sensor colocado en posición vertical.
- Dirección horizontal: radialmente al eje, con el sensor colocado en posición horizontal.
- Dirección axial: el sensor se coloca en la misma dirección del eje.

En las figuras 28, 29 y 30 se observan con mayor detalle, las direcciones de colocación del sensor durante la toma de datos.

Figura 28. **Colocación del sensor en dirección vertical**



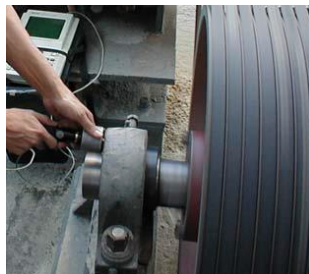
Fuente: elaboración propia.

Figura 29. **Colocación del sensor en dirección horizontal**



Fuente: elaboración propia.

Figura 30. **Colocación del sensor en dirección axial**



Fuente: elaboración propia.

Para máquinas con ejes verticales, los datos se toman en las siguientes posiciones:

- Dirección horizontal frontal: es decir radialmente al eje, con el sensor colocado en posición horizontal al frente del eje.
- Dirección horizontal lateral: es decir radialmente al eje, con el sensor colocado en posición lateral al frente del eje.
- Dirección axial: el sensor se coloca en la misma dirección del eje.

El objetivo de analizar estos componentes es conocer el comportamiento de las vibraciones en las diferentes direcciones, ya que proporcionan información complementaria importante para analizar el espectro de vibración.

Después de que los datos son recolectados en el equipo de medición, son comparados con los límites permisibles para poder determinar el estado actual de la máquina. Los límites permisibles están regidos por normas internacionales para los diferentes elementos.

3.4. Normas empleadas para la medición de la criticidad de la vibración

Una vez que un problema específico de máquina ha sido identificado por su firma de vibración, la pregunta siguiente debe ser: ¿el problema es lo suficientemente grave para requerir mantenimiento?

El estado de una máquina puede determinarse por una serie de mediciones de vibración hecho en un largo tiempo. Normas internacionales pueden utilizarse como guía si no hay datos históricos.

Es necesario observar los niveles de vibración que presenta cada uno de los puntos de la máquina. Los espectros de vibración pueden tener picos característicos de fallas, pero esto no significa que haya un problema, ya que la máquina puede estar operando bajo condiciones normales. El problema se presenta cuando estos picos comienzan a aumentar su nivel y de esta manera incrementan la vibración total del punto.

Las normas internacionales proponen estándares generales para varios tipos de máquinas y niveles de alarma. Estos niveles pueden aplicarse a una gran cantidad de máquinas, pero hay excepciones que exigen estudiar otras herramientas para poder llegar a una conclusión. Una de las instituciones internacionales encargada de estandarizar los límites, es la ISO, en la aplicación para vibraciones mecánicas.

Algunas normas utilizadas para el análisis de vibraciones son:

- Carta de Rathbone
- Norma ISO 2372 de 1974
- Norma ISO 10816 de 1995

3.4.1. Carta de Rathbone

Aunque es una guía no una norma, tiene amplia aceptación en el ámbito industrial. Su creación fue hacia los años treinta y perfeccionada posteriormente. Esta carta dispone de una escala logarítmica frecuencial en Hz

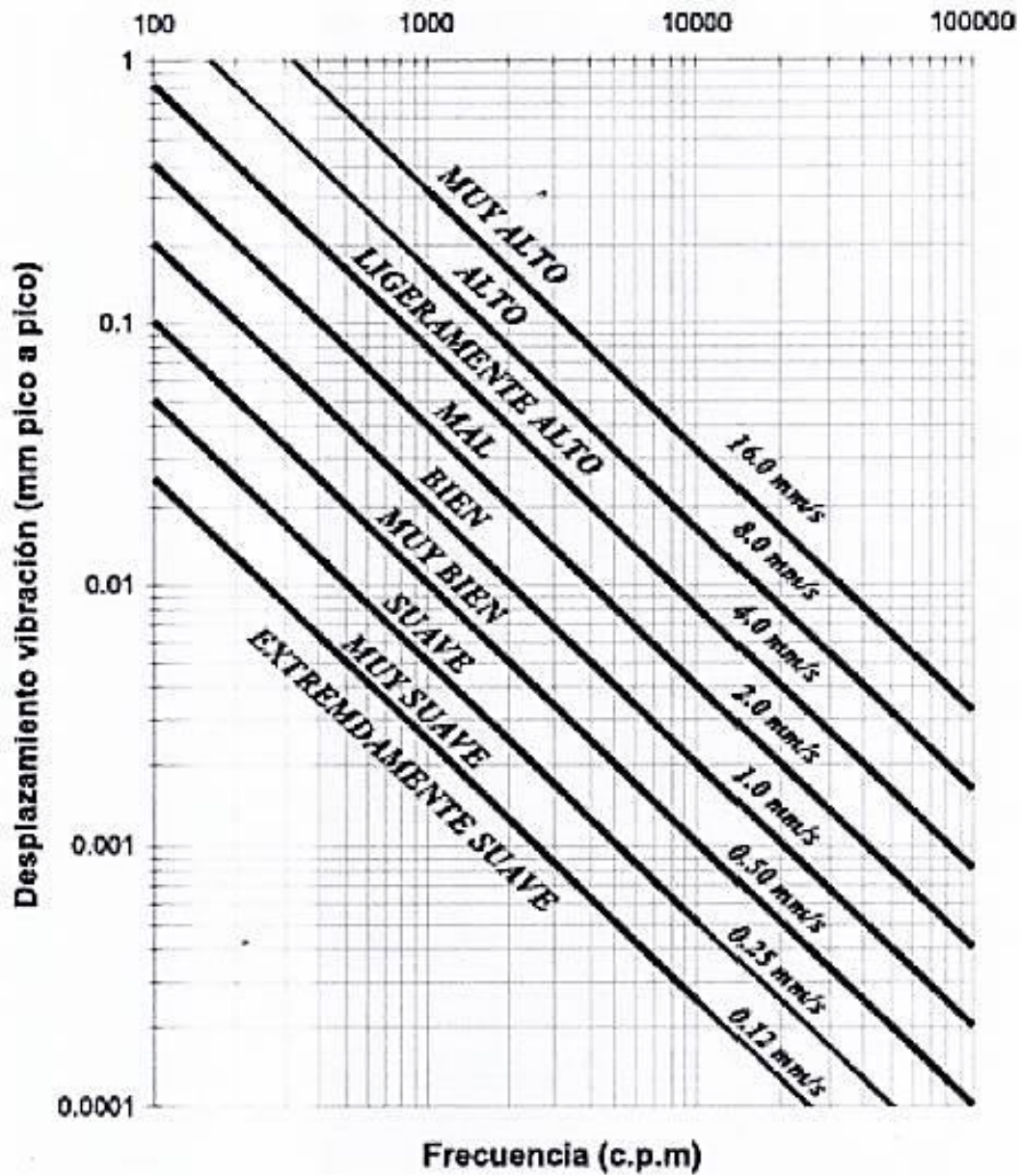
o CPM y de una logarítmica de amplitudes en desplazamiento, pico o pico a pico, y en velocidad mediante los cuales se podrá determinar directamente la severidad de la vibración.

Las principales restricciones de severidad de vibración en esta carta son:

- No tiene en cuenta el tipo de máquina, la potencia y la rigidez de los anclajes.
- Aplicable solamente a equipos rotativos y no a los alternativos u otros sistemas industriales.
- Cuanto mayor es la frecuencia, la amplitud de vibración en desplazamiento tiene que ser menor para que se conserve la misma severidad, es decir, si un equipo vibra a 300 CPM con 0,1 mm. pico a pico la severidad es buena, pero si la misma amplitud corresponde a una frecuencia de 4 000 CPM, entonces la severidad es grave.

La vibración a baja frecuencia es menos peligrosa que la vibración a alta frecuencia, las averías en rodamiento y engranajes se producen a altas frecuencias de vibración por esto son tan peligrosas. Este es el motivo por el cual las amplitudes de baja frecuencia se miden en desplazamientos y las de alta frecuencia en velocidad o aceleración. La carta de Rathbone fue creada para máquinas de bajos CPM y hoy se considera obsoleta.

Figura 31. Carta de Rathbone



Fuente: Construsur. *Vibraciones*. <http://www.construsur.com.ar/media/news/337/Image/vibracion6.jpg>. Consulta: 9 de septiembre de 2017.

3.4.2. Norma ISO 2372 de 1974

Con esta norma se pueden analizar equipos cuya velocidad de operación este entre los 600 o 12 000 CPM.

Los datos que se requieren para su aplicación son el nivel global de vibración en velocidad- valor eficaz RMS, en un rango de frecuencia entre 10 y 1 000 Hz, distinguiendo las clases de equipos rotativos. En la tabla XII se describe la categoría y la característica del equipo.

Tabla XII. **Categorías de las maquinas a partir de su velocidad**

Categoría	Características
Clase I	La máquina puede ser separada en conductor y conducido, o unidades conjuntadas que abarcan maquinaria de movimiento de hasta 15 KW.
Clase II	Maquinaria de movimiento entre 15 KW hasta 75 KW, sin cimentación especial, o motores montados rígidamente o máquinas con 300 KW montados con fundición especial.
Clase III	Máquinas grandes con conductores primarios y otras maquinarias con ensambles rotatorios grandes y montados en fundiciones rígidas y pesadas que son razonablemente derechas en la dirección de la vibración.
Clase IV	Incluye grandes conductores primarios y otras grandes maquinarias con grandes ensambles rotatorios montados en fundiciones las cuales son relativamente suaves en la dirección medida de la vibración, mayor que 10 MW.

Fuente: elaboración propia.

Para utilizar la norma ISO 2372, basta con clasificar la máquina en estudio dentro de la clase correspondiente y una vez obtenido el valor global de vibración entre 600 y 60 000 CPM localizar en la tabla de esta norma, la zona en la que se encuentra. La tabla XIII presenta la severidad según norma ISO 2372.

Tabla XIII. **Severidad de vibraciones según norma ISO 2372**

Velocidad (mm/s RMS)	Tipos de maquinas			
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,18 a 0,28	A	A	A	A
0,28 a 0,45				
0,45 a 0,71				
0,71 a 1,12				
1,12 a 1,8	B	B	B	B
1,8 a 2,8				
2,8 a 4,5	C	C	C	C
4,5 a 7,1				
7,1 a 11,2	D	D	D	D
11,2 a 18				
18 a 28				

A	Buena
B	Satisfactoria
C	Insatisfactoria
D	Inaceptable

Fuente: elaboración propia.

3.4.3. Norma ISO 10816 de 1995

Esta norma establece las condiciones y procedimientos para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas. El criterio general de evaluación se basa tanto en la monitorización operacional como en las pruebas de validación que han sido establecidas fundamentalmente con objetivo de garantizar el funcionamiento confiable de la máquina a largo plazo. Esta norma reemplaza a las normas ISO 2372 e ISO 3945, que en su momento fueron empleadas para analizar vibraciones mecánicas en máquinas que operaban desde 10 hasta 200 revoluciones por segundo.

La norma ISO 10816 contiene un estándar que consta de cinco partes que se describen en la tabla XIV.

Tabla XIV. **Partes estándar de la norma ISO 10816**

Categoría	Característica
Parte I	Indicaciones generales.
Parte II	Turbina de vapor y generadores que superen los 50MW. Con velocidades típicas de trabajo de 1 500, 1 800, 3 000 y 3 600 CPM.
Parte III	Maquinaria industrial con potencia nominal por encima de 15 KW. y velocidades entre 120 y 15 000 CPM.
Parte IV	Conjuntos movidos por turbinas de gas excluyendo las empleadas en aeronáutica.
Parte V	Conjuntos de máquinas de planta de hidrogenación y bombeo.

Fuente: elaboración propia.

Los criterios de vibración de este estándar se aplican a un conjunto de máquinas con potencias superiores a 15 KW. Y velocidades de entre 120 y 15 000 CPM. Los criterios son solo aplicables para vibraciones producidas por la propia máquina y no para vibraciones que son transmitidas a la máquina desde fuentes externas. El valor eficaz, RMS, de la velocidad de la vibración se utiliza para determinar la condición de la máquina, este valor se puede determinar con casi todos los instrumentos convencionales para la medición de la vibración.

Las mediciones deben realizarse cuando el rotor y los descansos principales han alcanzado sus temperaturas estacionarias de trabajo y con la máquina funcionando con condiciones nominales y específicas.

En máquinas con velocidad y carga variable, las velocidades deben realizarse bajo todas las condiciones a las que se espera que las máquinas trabajen durante periodos prolongados de tiempo. Los valores máximos medidos, bajo estas condiciones, serán considerados representativos de la vibración, si esta es superior a lo que el criterio permite y se sospecha de excesiva vibración de fondo, las mediciones se deberán realizar con la máquina detenida para determinar el grado de influencia de la vibración externa. Si con

la máquina detenida excede el 25 % de la vibración medida con la máquina en movimiento, son necesarias acciones correctivas para reducir el efecto de esta vibración.

La severidad de la vibración se agrupa conforme a parámetros, algunos son:

- Tipo de máquina
- Potencia o altura del eje
- Flexibilidad del soporte

3.4.3.1. Clasificación de acuerdo al tipo de maquina

Las significativas diferencias en el diseño, tipos de descanso y estructuras de la máquina, requieren una división en grupos, las máquinas de estos grupos pueden tener eje horizontal, vertical o inclinado y además pueden estar montados en soportes rígidos o flexibles. En la tabla XV se describe cada grupo.

Tabla XV. División de las máquinas en grupos

Clasificación	Características
Grupo I	Máquinas rotativas grandes con potencia superior a 300 KW, máquinas eléctricas con altura de eje mayor o iguales a 315 mm ($H \geq 315$ mm).
Grupo II	Máquinas rotativas medianas con potencia entre 15 y 300 KW, máquinas eléctricas con altura de eje mayor o igual a 160 mm y mayor o igual a 315 mm ($160 \leq H \leq 315$ mm).
Grupo III	Bombas con impulsor de múltiples alabes y con motor separado; flujo centrífugo, axial o mixto, con potencia superior a 15 KW.
Grupo IV	Bombas con impulsor de múltiples alabes y con motor integrado; flujo centrífugo, axial o mixtos, con potencia superior a 15 KW.

Fuente: elaboración propia.

La altura H del eje de una máquina está definida como la distancia medida entre la línea del centro del eje y el plano de la base de la máquina.

La altura H del eje de una máquina sin soportes o de una máquina con pies levantados o cualquier máquina vertical, se debe tomar como la altura del eje de una máquina horizontal en el mismo marco básico. Cuando el soporte es desconocido, la mitad del diámetro de la máquina puede ser utilizado.

3.4.3.2. Clasificación según la flexibilidad del soporte

Si la primera frecuencia natural del sistema máquina-soporte en la dirección de la medición es mayor que su frecuencia principal de excitación en al menos un 25 %, entonces, el sistema soporte puede ser considerado rígido en esa dirección. Todos los otros sistemas soporte pueden ser considerados flexibles. En algunos casos el sistema máquina-soporte puede ser considerado rígido en una dirección de medición y flexible en la otra.

Sí la primera frecuencia natural en la dirección vertical es mayor que la frecuencia principal de excitación y la frecuencia natural horizontal es considerablemente menor, tal sistema sería considerado rígido en el plano vertical y flexible en el plano horizontal. En estos casos, la vibración debe ser evaluada de acuerdo con la clasificación del soporte que corresponda en la dirección de la medición. La tabla XVI muestra la severidad de vibración según norma ISO 10816.

Tabla XVI. Severidad de vibración según norma ISO 10816

Velocidad 10 – 1000 Hz. 2 – 1000 Hz.	mm/s RMS								
	11								
	7,1								
	4,5								
	3,5								
	2,8								
	2,3								
	1,4								
	0,71								
Base		Rígida	Flexible	Rígida	Flexible	Rígida	Flexible	Rígida	Flexible
Tipo de maquina	Bomba > 15 KW. Flujo radial, axial o mixto				Tamaño medio 15KW <P≤ 300KW		Maquinas grandes 300KW <P≤ 50 MW		
	Motor integrado		Motor separado		Motores 160mm ≤H< 300mm		Motores 315mm ≤ H		
Grupo		Grupo IV		Grupo III		Grupo II		Grupo I	
A	Máquina nueva o reacondicionada, valores de vibración de máquinas recién puesta en funcionamiento o reacondicionadas.								
B	Máquinas que pueden trabajar indefinidamente sin restricciones.								
C	Máquinas cuya condición no es adecuada para una operación continua, sino solamente para un periodo de tiempo limitado. Se deberían llevar a cabo medidas correctivas en la siguiente parada programada, antes de que esta pare por si sola.								
D	Máquinas con valores de vibración altos, lo que los hace peligrosos para la máquina ya que esta puede sufrir daño.								

Fuente: elaboración propia.

3.4.4. Normas para certificación en análisis de vibraciones mecánicas

Dentro de las normas para analizar la severidad de la vibración, se encuentran las normas para certificar al personal que realiza dichas lecturas y analizan los datos obtenidos, la más relevante, la norma ISO 18436.

- Norma ISO 18436-2 de 2003: especifica los procedimientos para capacitar y certificar al personal que realiza monitoreo de condiciones de maquinaria y diagnóstico de máquinas basados en el análisis de vibraciones. La certificación de esta norma supondrá el reconocimiento de las cualificaciones y competencias del personal para realizar mediciones de la vibración utilizando sensores portátiles e instalados en dichos equipos.

La certificación en esta norma solo puede lograrse una vez se hayan cursado y aprobado sus 4 categorías:

- Categoría I: personal certificado para realizar mediciones de vibraciones en máquinas con instrumentos de un canal y análisis de espectros preliminares en algunos tipos de máquinas.
- Categoría II: personal calificado para realizar medición y análisis de vibraciones básicas en máquinas industriales de acuerdo con procedimientos establecidos.
- Categoría III: personal calificado para realizar medición y análisis de vibraciones con instrumentos multicanales, seleccionar las técnicas de análisis más apropiadas y establecer programas de monitoreo de vibraciones.
- Categoría IV: personal calificado para realizar o dirigir todo tipo de medición y análisis de vibraciones, recomendar acciones correctivas de uso común para reducir el nivel de vibraciones de máquinas y estructuras, interpretar y evaluar normas y recomendación del fabricante para fijar niveles de aceptación y alarma.

4. INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LAS MÁQUINAS

Cada fallo lleva consigo un espectro característico el cual será imprescindible para realiza el diagnóstico de una máquina.

La mayoría de los problemas de origen mecánico que se dan en máquinas a baja frecuencia se deben fundamentalmente a desequilibrio, desalineación y holguras. Sin embargo, existen otros fallos que pueden presentarse y que a veces se llega a confundir con uno de estos tres últimos, puesto que los síntomas que presentan son similares. Es por ello por lo que debe de profundizarse mediante la aplicación de:

- Tendencias
- Análisis de la gravedad de los cambios de condición
- Diagnóstico de problemas

4.1. Tendencias

Se considera tendencia a la disposición de que un hecho ocurra con cierto grado de frecuencia comportándose con ciertas características específicas. En el análisis de vibraciones, consiste en almacenar las firmas de vibración grabadas a tiempos específicos anotando los cambios en los niveles de vibración de las frecuencias forzadas con respecto al tiempo.

Las tendencias son utilizadas en el análisis de vibraciones estableciendo un espectro de vibración representativo de una máquina operando normalmente como punto de referencia, y comparando esta referencia con espectros que se almacenarán a su tiempo en la misma máquina.

Cuando se realiza la comparación, hay varios puntos importantes que deben tomarse en cuenta:

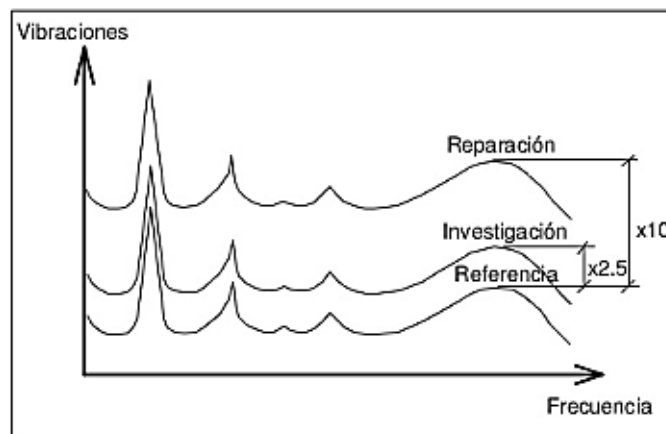
- Las condiciones en las que opera la máquina al recolectarse el nuevo espectro deben ser similares a las condiciones en que operaba cuando se recolectó el espectro de referencia. De esta forma los espectros serán comparables reduciendo la probabilidad de falsas lecturas de fallo.
- Los datos de las vibraciones deben ser obtenidos de manera exactamente igual que los datos de referencia. El transductor debe ser montado en el mismo lugar y su calibración debe ser lo más precisa posible.
- Cuando se toman datos de las vibraciones con un instrumento analizador, es importante realizar un promedio de varios espectros instantáneos para reducir las variaciones aleatorias y los efectos de ruido en la señal medida. La cantidad de promedios espectrales que se graban, debe ser suficiente para producir una firma uniforme y constante. Según la metrología se debe escoger un número de promedios entre 8 y 14.
- En algunas máquinas como turbinas y motores reciprocantes con un contenido de ruido aleatorio relativamente alto en sus firmas, es posible que se necesiten tiempos de promedio más largos. Una regla general es

grabar un espectro con varios promedios e inmediatamente después grabar otro con el doble de promedios que el anterior. Si hay una diferencia significativa mayor al 5 % entre los espectros, la cantidad de promedios se debe duplicar otra vez y se debe grabar otro espectro. Si los dos últimos espectros son similares, entonces la cantidad anterior de promedios es adecuada para la máquina.

4.1.1. El espectro de referencia

Cuando desea realizarse monitorización con base en gráficos de tendencia es de suma importancia que se seleccione un espectro de vibración que sea representativo de la máquina para hacer las comparaciones con los datos de pruebas que se programen posteriormente.

Figura 32. Espectro de referencia



Fuente: Slidesharecdn. *Análisis de vibraciones*.

<https://image.slidesharecdn.com/analisisdevibraciones-101111215347-phpapp01/95/analisis-de-vibraciones-64-638.jpg?cb=1422651125>. Consulta: 9 de septiembre de 2017.

4.1.2. Firmas de vibración promediadas

Se ha demostrado que la mejor manera de generar una referencia razonable es realizar el promedio de varios espectros de máquinas del mismo tipo. Si hay un número de máquinas similares, el promedio estadístico de sus espectros de referencia es una buena indicación del estado general de este tipo de máquina en particular. Una serie de máquinas en buen estado de funcionamiento producirá espectros de vibración similares que tendrán variaciones aleatorias en nivel. Se hace el promedio de los espectros de las máquinas y se calculan las desviaciones estándar de nivel a cada frecuencia importante.

Algunas máquinas son tan particularmente especiales que cuando se hace el promedio, la desviación estándar entre las magnitudes de vibración es tan grande, que el promedio no tiene sentido. En este caso, se tiene que usar cada máquina, para realizar una referencia que tenga sentido, calculando el promedio de una serie de mediciones durante un período de tiempo extenso y generando una máscara del espectro promedio de referencia.

Cuando se hace el promedio de espectros de un grupo de máquinas se debe tener especial atención al verificar que los espectros a promediar sean válidos y que las máquinas de las que provengan están en condiciones óptimas de funcionamiento. Una de las tareas más importantes del analista de vibraciones es de asegurarse que los espectros promedios son válidos y representativos de las máquinas.

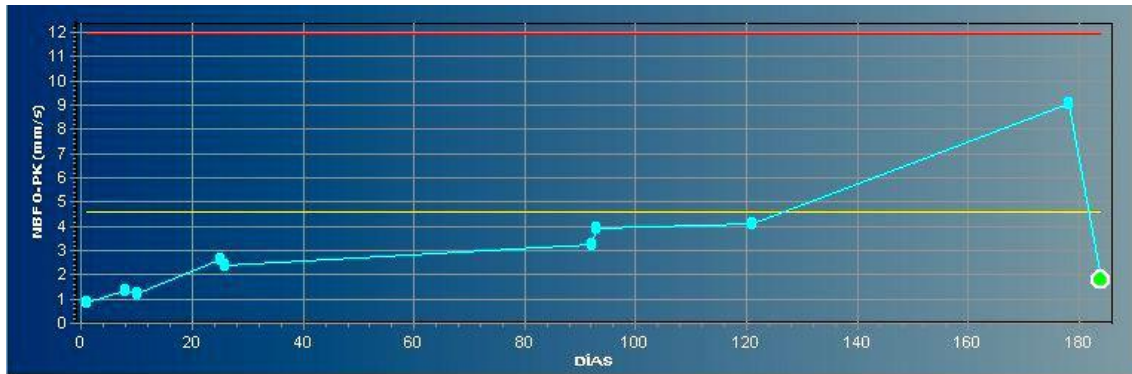
4.1.3. Frecuencias forzadas

El análisis de vibraciones en maquinaria se basa en que los elementos específicos en las partes rotativas de cualquier máquina producirán fuerzas que causarán vibraciones a frecuencias específicas. Una de las frecuencias forzadas más importantes son los CPM del eje, debido a que cualquier rotor siempre presenta una cierta cantidad de desbalanceo residual. Esto imparte una fuerza centrífuga radial en los rodamientos y causa la vibración de la estructura a la frecuencia fundamental o 1X.

Los llamados tonos de rodamientos, que son característicos de cada geometría de rodamiento, son fuerzas generadas por defectos en las pistas del rodamiento y en los elementos rodantes. Las frecuencias de engranaje provienen de los impactos individuales de los dientes de un engrane contra los dientes de otro y la frecuencia de engranaje es igual al número de dientes en el engrane multiplicado por los CPM del engrane.

Las frecuencias de paso de aspas o alabes son similares al engranaje y son igual al número de alabes en un impulsor, multiplicado por los CPM. Cada frecuencia forzada va a crear un pico en el espectro de vibración. La amplitud del pico dependerá de la gravedad de la condición que lo causa. De esa manera, la frecuencia indica el tipo de problema, y la amplitud indica su gravedad. La figura 33 muestra un ejemplo de curva de tendencia.

Figura 33. Curva de tendencias



Fuente: A-Maq S.A. *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*. p. 41.

4.2. Análisis de la gravedad de los cambios de condiciones

Determina cuando la vibración de una máquina es excesiva, a tal punto que se debe realizar un paro y reacondicionarla, es una de las decisiones más difíciles que tiene que enfrentar el analista de vibraciones. La razón obvia es que no existen parámetros absolutos en cuanto a la tolerancia de vibración, que indiquen cuando la falla es inminente.

Las máquinas difieren considerablemente entre sí, en cuanto a tamaño, rigidez y amortiguamiento, y por ello muestran diferentes niveles de vibración bajo condiciones operacionales similares. Un nivel de vibración que puede representar un problema serio en una máquina puede ser normal para otra. Debido a ello, se hace necesario diagnosticar los problemas basándose en guías prácticas y sugerencias.

4.3. Diagnóstico de problemas

La información dinámica de maquinaria se fundamenta en las características de la vibración, y de su interpretación. Se pueden identificar y diagnosticar los problemas, ya que cada uno tiene características propias. La característica clave en el diagnóstico de problemas debido a la vibración excesiva es la frecuencia.

El primer paso en el análisis de vibración de máquina es la identificación del pico espectral que corresponde a la velocidad de rotación del eje, o sea el pico llamado 1X, también conocido como pico de primera orden.

Muchas veces, los picos 1X del eje van acompañados de una serie de armónicos múltiplos enteros de 1X y esto ayuda a identificarlos. Una buena confirmación del pico de primer orden es la existencia de otras frecuencias forzadas conocidas como el paso de alabes del impulsor en bombas, el número de pistones en un motor recíprocante, los alabes en ventiladores, los polos de motores eléctricos o generadores, entre otros. Por ejemplo, si una bomba tiene seis alabes, en el impulsor, normalmente habrá un fuerte pico espectral en 6X, o sea en el sexto armónico de la velocidad de revolución.

Los tipos más comunes de máquinas recíprocas son bombas de pistón, compresores y motores de combustión interna. En todas estas máquinas el ritmo del pistón es dominante, junto con el ritmo de ignición de los motores de 4 tiempos. No es fuera de lo común encontrar niveles de vibración altos como 177,8 mm/s en máquinas sanas como estas. El analista juzgará el estado de la máquina comparando con niveles anteriores, en lugar de aplicar niveles de referencia absolutos.

Muchas máquinas recíprocas tienen turbocargadores y esos se diagnostican como otras turbinas rotativas y compresores. Problemas en engranes de árboles de levas también son comunes y se pueden ver, examinando la frecuencia del engranaje. Si el motor tiene un amortiguador torsional en el eje, este puede fallar incrementando de manera importante la vibración en la frecuencia del modo de vibración torsional del primer cigüeñal.

Bombas con pistón con desplazamiento variable son mucho más suaves que los compresores y se prestan bien al análisis de vibración. Si hay armónicos del ritmo del pistón presentes en niveles significativos eso indica por lo general un problema en la activación del pistón. Un tono muy prominente en la frecuencia fundamental del pistón puede ser indicativo de un desgaste de la placa de giro excéntrico.

Después de la verificación de la validez de los espectros y de la identificación positiva de los picos espectrales especialmente los componentes 1X, el diagnóstico de los problemas de máquinas puede empezar. Los problemas más comunes diagnosticados mediante el análisis de vibraciones son:

- Desalineación
- Desbalanceo
- Soltura mecánica
- Fallas en rodamientos
- Fallas en chumaceras
- Fallas en engranajes
- Fallas en bandas y poleas
- Fallas en bombas y turbinas

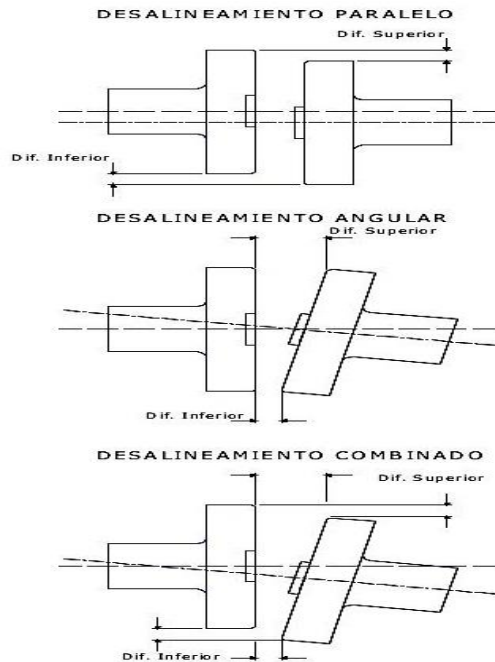
4.3.1. Desalineación

La desalineación es una de las principales causas de fallas de componentes y se la considera la segunda fuente que prevalece en vibraciones. Se ha encontrado que la desalineación ocurre más frecuentemente que el desbalanceo.

La desalineación es la principal causa de la excesiva carga sobre los equipos, lo cual se manifiesta en alta vibración en las máquinas. Como consecuencia de esto disminuye la vida útil de rodamientos, cojinetes, sellos y acoples.

La desalineación es una condición en la que las líneas centrales de los ejes acoplados no coinciden. Si las líneas centrales de los ejes desalineados están paralelas, pero no coinciden, entonces se dice que la desalineación es una desalineación paralela. Si los ejes desalineados se juntan, pero no son paralelos, entonces la desalineación se llama desalineación angular. Casi todas las desalineaciones que se observan en la práctica son una combinación de estos dos tipos. En la figura 34 se presentan las formas de desalineación.

Figura 34. **Formas de desalineación**



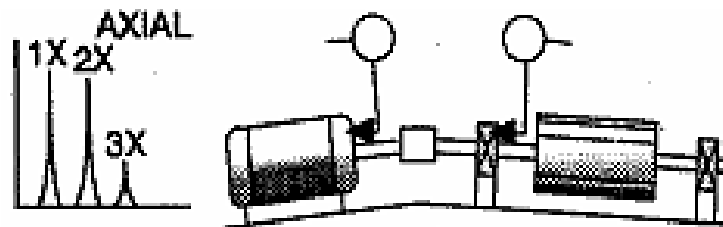
Fuente: Slidesharecdn. *Eje de cola*. <https://image.slidesharecdn.com/ejedecolapdf-160301134238/95/eje-de-cola-pdf-19-638.jpg?cb=1456839773>. Consulta: 9 de septiembre de 2017.

4.3.1.1. Desalineación angular

Ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido unidos en el acople, no son paralelos. La desalineación angular se caracteriza por una alta vibración axial, 180° fuera de fase a través del acople, típicamente tendrá una vibración axial en 1XCPM y 2XCPM. Sin embargo, no es inusual que tanto 1X, 2X o 3X domine. Estos síntomas también pueden indicar problemas de acople. Una severa desalineación angular puede excitar muchos armónicos de 1XCPM. A diferencia de la soldadura mecánica de tipo C, estas múltiples armónicas no tienen típicamente un incremento de ruido en el piso del espectro.

Para corregirlo, el conjunto motor-rotor debe alinearse empleando un equipo de alineación adecuado. La figura 35 muestra el espectro típico y la relación de fase de la desalineación angular.

Figura 35. **Espectro y relación de fase en desalineación angular**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 89.

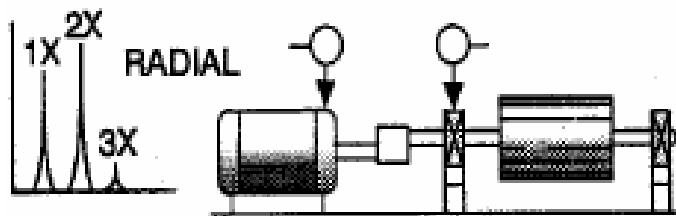
4.3.1.2. Desalineación paralela

Ocurre cuando los ejes del motor y del rotor conducido están paralelos, pero no son colineales. La desalineación paralela posee síntomas de vibración similares a la angular, pero muestra una alta vibración radial que se aproxima a 180° fuera de fase a través del acople. El armónico 2X es por lo regular mayor que 1X, pero su altura respecto a 1X es por lo general debida al tipo de acople y construcción de este.

Cuando cualquier desalineación, angular o radial, se vuelve severa, puede generar picos de gran amplitud a altas armónicas, 4X u 8X, como también toda una serie de armónicas de alta frecuencia, similares en apariencia a la soldadura mecánica. El tipo de acople y el material influyen de gran manera a todo el espectro cuando la desalineación es severa. No presenta por lo general un incremento de ruido en el piso.

Se debe alinear el conjunto para corregir el daño utilizando el equipo de alineación adecuado. La figura 36 muestra el espectro típico y la relación de fase de la desalineación paralela.

Figura 36. **Espectro típico y relación de fase en desalineación paralela**

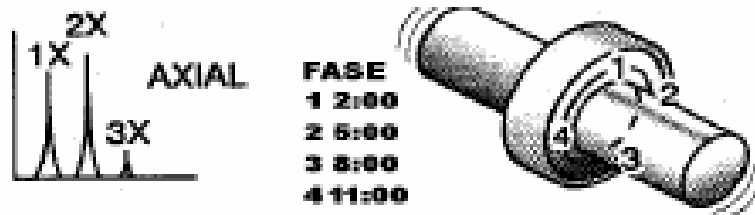


Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 90.

4.3.1.3. Desalineación de rodamiento inclinado sobre el eje

Un rodamiento inclinado genera una vibración axial considerable. Puede causar un movimiento torsional con un cambio de fase aproximado de 180° de arriba a abajo o de lado a lado cuando se mide en dirección axial de la misma carcasa del rodamiento. Intentos de alinear el acople o balancear el rotor no corregirán el problema. Es necesario remover el cojinete e instalarlo correctamente. La figura 37 muestra el espectro típico y la relación de fase de la desalineación de rodamiento inclinado sobre el eje.

Figura 37. **Espectro típico y relación de fase en desalineación de rodamientos inclinados sobre el eje**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 92.

La firma de vibración causada por un eje flexionado se parece a la firma causada por desalineación y es fácil de confundir. Un eje flexionado, que por lo general es causada por un calentamiento desigual en el rotor, causa altos picos axiales 1X y 2X, con altos picos radiales y transversales 1X en ambos rodamientos.

4.3.2. Desbalanceo

El desbalanceo es simplemente la distribución desigual de peso en un rotor, es una fuerza que actúa centrífugamente y que cambia de dirección conforme el rotor gira.

Por esta razón, un problema de vibración por desbalanceo, se observará a la frecuencia de giro del rotor. La mayor componente de vibración se percibirá en las direcciones radiales, aunque para rotores montados en voladizo, la componente axial de la vibración será comparable con la radial, o en ocasiones, aún mayor.

Aunque el desbalanceo es un problema fácil de diagnosticar, se debe prestar especial atención, debido a que existen otros problemas que normalmente también aparecen a la frecuencia de giro del rotor. Otra opción para confirmar el desbalanceo es mediante la forma de onda en dominio del tiempo.

Las máquinas están sujetas a varias condiciones de desbalanceo, las más importantes son:

- Desbalanceo estático
- Desbalanceo de par de fuerzas
- Desbalanceo dinámico
- Desbalanceo de rotor en voladizo
- Rotor excéntrico
- Eje doblado

4.3.2.1. Desbalanceo estático

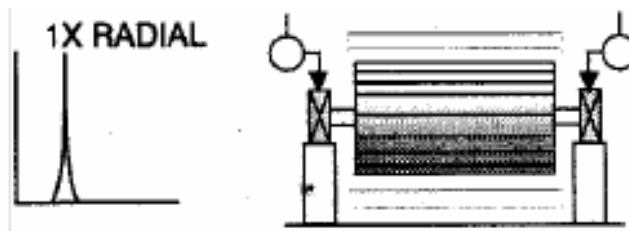
El desbalanceo estático es un estado donde el centro de rotación de un eje no corresponde a su centro de masa. Generalmente, se produce por desgaste radial superficial no uniforme en rotores en los cuales su largo es despreciable en comparación con el diámetro.

El desbalanceo estático estará en fase y estable. La amplitud debido al desbalance aumentará por el cuadrado de la velocidad incrementada estando por debajo de la primera crítica del rotor, un incremento de velocidad de $3X$ = una vibración a $9X$ mayor. La $1X$ CPM siempre estará presente y, por lo general, domina el espectro. Puede ser corregido colocando un solo peso de corrección de balance en un plano en el centro de gravedad del rotor. Una diferencia de

fase aproximadamente de 0° debe existir entre los horizontales OB&IB, así como entre las verticales OB&IB. Usualmente también ocurre una diferencia de fase aproximadamente de 90° entre las lecturas de fase horizontal y vertical en cada rodamiento del rotor desbalanceado $\pm 30^\circ$.

La figura 38 muestra el espectro típico y la relación de fase en desbalance estático.

Figura 38. **Espectro tipo y relación de fase en desbalanceo estático**



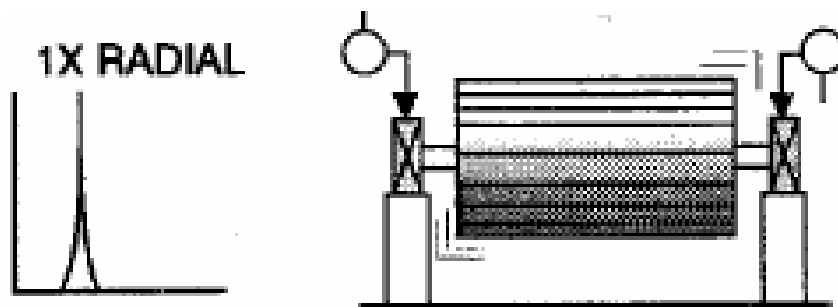
Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 93.

4.3.2.2. Desbalanceo de par de fuerzas

Un desbalanceo de par de fuerzas resulta en un desfase de 180° del movimiento en el mismo eje. La 1XCPM siempre está presente y normalmente domina el espectro. La amplitud varía por el cuadrado de la velocidad incrementada por debajo de la primera velocidad crítica del rotor. Puede causar una alta vibración axial, así como radial. La corrección requiere la colocación de pesos de balanceo en al menos 2 planos. Debe existir una diferencia aproximada de 180° entre las horizontales OB&IB, así como entre las verticales OB&IB. También, usualmente ocurre una diferencia aproximada de 90° entre las lecturas horizontal y vertical en cada rodamiento $\pm 30^\circ$.

La figura 39 muestra el espectro típico y la relación de fase del desbalanceo de par de fuerzas.

Figura 39. **Espectro típico y relación de fase en desbalanceo de par de fuerzas**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 94.

4.3.2.3. Desbalanceo dinámico

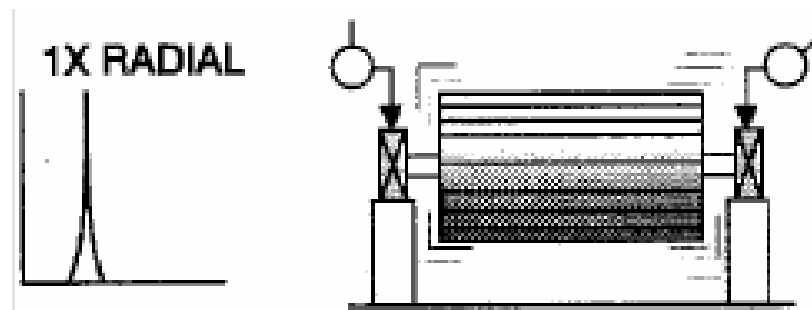
El desbalanceo dinámico ocurre en rotores medianos y largos. Es debido principalmente a desgastes radiales y axiales simultáneos en la superficie del rotor.

Es el tipo de desbalanceo que ocurre más comúnmente y es una combinación de desbalanceo estático y de par de fuerzas. La 1XCPM domina el espectro y realmente necesita una corrección en 2 planos. Aquí la diferencia de fase radial entre los rodamientos externos e internos puede estar en cualquier lugar del rango entre 0° y 180°. Sin embargo, la diferencia de fase horizontal debe de cuadrar usualmente con la diferencia de fase vertical, cuando se comparan las mediciones de los rodamientos externos e internos $\pm 30^\circ$. Si el

desbalance predomina a una diferencia de fase de 90° resulta entre las lecturas horizontal y vertical de cada rodamiento $\pm 40^\circ$.

La figura 40 muestra el espectro típico y la relación de fase del desbalanceo dinámico.

Figura 40. **Espectro típico y relación de fase en desbalanceo dinámico**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 95.

4.3.2.4. **Desbalanceo de rotor en voladizo**

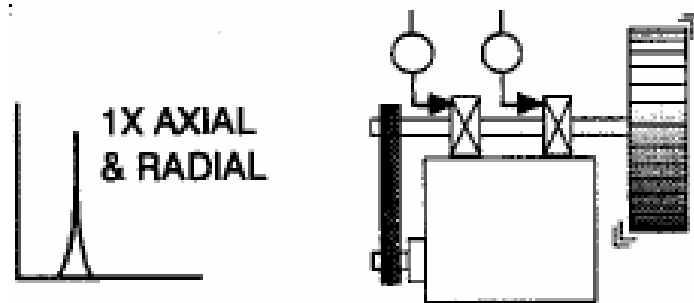
Ocurre en rotores que se encuentran en el extremo de un eje, es producido por desgaste en la superficie del rotor y doblamiento del eje.

El desbalanceo de rotor en voladizo causa un alto 1XCPM en las direcciones axial y radial. Las lecturas axiales tienden a estar en fase mientras que las lecturas de fase radial pueden estar inestables. Sin embargo, las diferencias de fase horizontal usualmente cuadran con las diferencias de fase vertical en el rotor desbalanceado $\pm 30^\circ$. Los rotores en voladizo tienen desbalances estáticos y de par de fuerzas, cada uno de los cuales requiere una

corrección. Así, los pesos de corrección casi siempre tendrán que ser colocados en dos planos para contrarrestar ambos desbalances.

La figura 41 muestra el espectro típico y la relación de fase del desbalance de rotor en voladizo.

Figura 41. **Espectro típico y relación de fase en desbalance de rotor en voladizo**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 95.

4.3.2.5. Rotor excéntrico

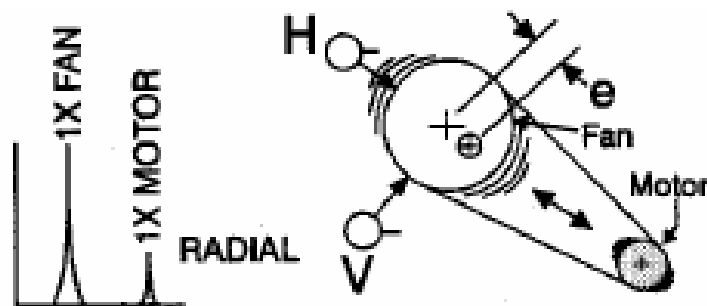
Ocurre cuando el centro de rotación no coincide con el centro geométrico en una polea, engranaje, rodamiento, armadura de motor, entre otros.

La vibración mayor ocurre a 1XCPM del componente excéntrico en una dirección a través de la línea que une el centro de ambos rotores. Comparativamente, las lecturas de fase horizontal y vertical usualmente difieren 0° o 180°, cada una de las cuales indica el movimiento en línea recta. El intentar balancear un rotor excéntrico resulta en reducir la vibración en una

dirección radial, pero incrementarla en la otra, dependiendo de la cantidad de excentricidad.

La figura 42 muestra el espectro típico y la relación de fase de un rotor excéntrico.

Figura 42. **Espectro típico y relación de fase en rotor excéntrico**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 97.

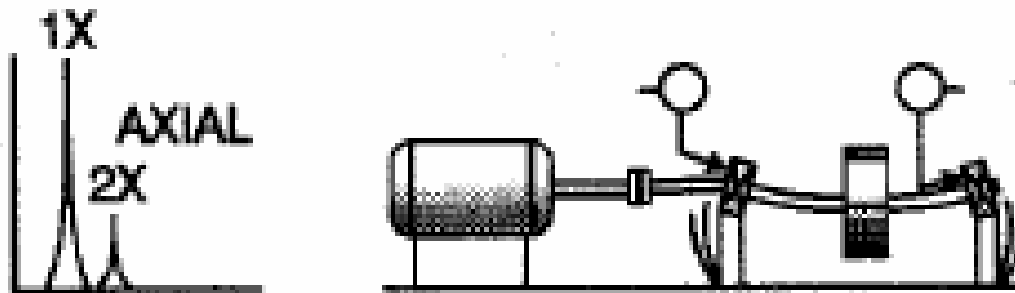
4.3.2.6. Eje doblado

Común en ejes largos, se produce por esfuerzos excesivos en el eje.

Los problemas del eje doblado causan una alta vibración axial con una diferencia de fase a 180° en el mismo componente de la máquina. La vibración dominante ocurre normalmente a 1X si el eje está doblado cerca del centro del eje, pero ocurre a 2X si está doblado cerca del acople. Se utiliza un indicador de dial para confirmar el doblado de eje.

La figura 43 muestra el espectro típico y la relación de fase de un eje doblado.

Figura 43. **Espectro típico y relación de fase en eje doblado**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 98.

4.3.3. **Soltura mecánica**

La soltura mecánica típica resulta como vibración predominante a la frecuencia de dos veces la velocidad de rotación, pero se puede mostrar en órdenes de frecuencia más bajos y más altos según el tipo de soltura mecánica.

Los distintos tipos que puedes presentarse son:

- Soltura estructural
- Soltura de pedestal o chumacera
- Soltura de ejes
- Fricción del rotor

4.3.3.1. Soltura estructural

También conocida como tipo A, es causada por debilitamiento estructural del pie de la máquina, la placa base o cimentación, también por una sedimentación deteriorada, soltura de los pernos que sujetan a la base y distorsión de la base. Su manifestación espectral se podría confundir con desbalanceo porque se genera vibración a la frecuencia de 1X, radialmente. El análisis de fase puede revelar una diferencia de 90° a 180° entre la medición vertical de los pernos, el pie de máquina, o la base misma.

En la figura 44, se ilustra el espectro típico y la relación de fase de la soltura estructural.

Figura 44. Espectro típico y relación de fase en soltura estructural



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 98.

4.3.3.2. Soltura de pedestal o chumacera

Conocida también como tipo B, generalmente causada por soltura de los pernos de la bancada, fisuras en la estructura del bastidor o en el pedestal del cojinete. La vibración generada se caracteriza por ser predominantemente radial y compuesta por picos mayores a la frecuencia de 2X aunque también

aparecen picos a 1X y algunas veces a 3X. No es raro encontrar picos subarmónicos a las frecuencias de 1/2X. La figura 45 muestra el espectro típico y la relación de fase de la soldadura de pedestal o chumacera

Figura 45. **Espectro típico y relación de fase en soldadura de pedestal o chumacera**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 99.

4.3.3.3. **Soldadura de eje**

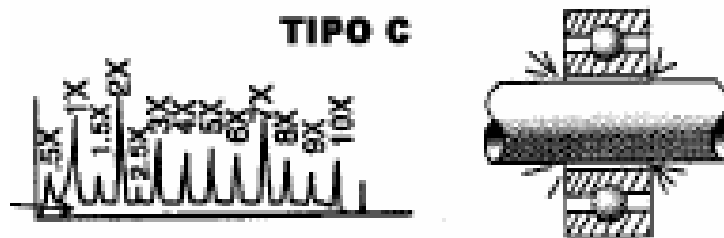
Conocida también como tipo C es normalmente generada por un ajuste inadecuado entre las partes componentes, que puede causar numerosas armónicas debidas a respuestas no lineales de partes flojas a fuerzas dinámicas del rotor. Causa un truncamiento de la onda de tiempo y un ruido elevado en el suelo del espectro.

El tipo C es causada con frecuencia por el aflojamiento de un cojinete en su caja, por un espacio excesivo en la camisa o los elementos rodantes del rodamiento, un impulsor o eje flojo, entre otros. La fase tipo C es con frecuencia inestable y puede variar ampliamente de un arranque al siguiente. La soldadura mecánica es a menudo altamente direccional y puede causar lecturas notablemente diferentes si se comparan niveles en incrementos de 30° en

dirección radial alrededor de la carcasa del rodamiento. La soldadura podría causar múltiples subarmónicas exactamente a 0,5X, 1,5X, 2,5X.

La figura 46 muestra el espectro típico y la relación de fase de soldadura de eje.

Figura 46. **Espectro típico y relación de fase en soldadura de eje**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 100.

4.3.3.4. Fricción del rotor

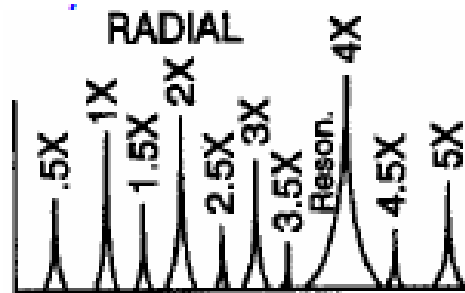
El roce del rotor produce un espectro similar al de la soldadura mecánica cuando las partes giratorias entran en contacto con los componentes fijos. La fricción puede ser parcial o en toda la revolución del rotor. Usualmente genera una serie de frecuencias, lo que por lo general excita una o más resonancias. A menudo existen subarmónicas de fracción entera, de la velocidad de fraccionamiento. Dependiendo de la ubicación de las frecuencias naturales del rotor.

La fricción del rotor puede excitar numerosas frecuencias altas, puede ser muy grave y de corta duración si es causado por el eje haciendo contacto con el

babbitt del cojinete. Una fricción anular total alrededor de toda la revolución del eje puede inducir una precesión reversa con el rotor girando rápidamente a la velocidad crítica en dirección opuesta a la rotación del eje, inherentemente inestable que puede llevar a una falla catastrófica.

La figura 47 muestra el espectro típico de la fricción del rotor.

Figura 47. **Espectro típico de la fricción del rotor**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 102.

4.3.4. Fallas en rodamientos

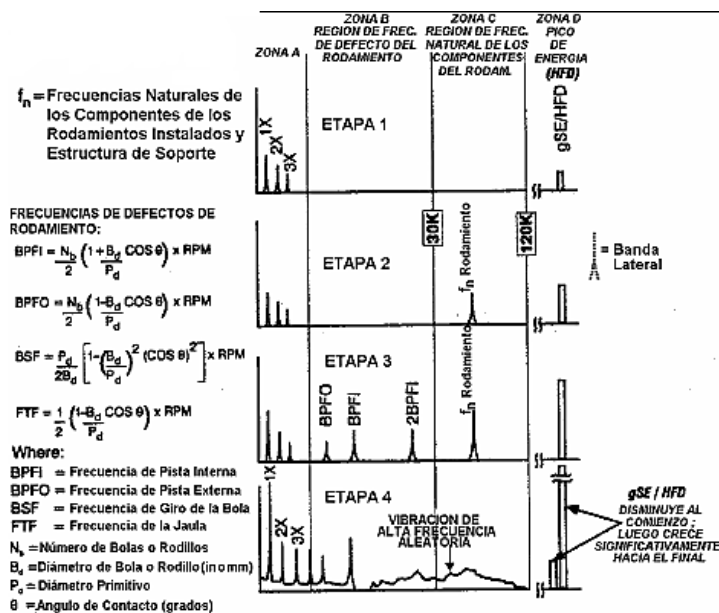
Los problemas de rodamientos son las fallas más comunes que se diagnostican en el análisis de la vibración. Un rodamiento defectuoso producirá componentes de vibración que son múltiplos exactos de 1X; en otras palabras, son componentes no síncronos. La existencia de componentes no síncronos en un espectro de vibraciones representa una alarma que indica la existencia de problemas de rodamientos y el analista inmediatamente debería de excluir otras posibles fuentes de este tipo de componentes para verificar el diagnóstico. Un rodamiento puede presentar alguna de las siguientes etapas de falla:

- Etapa 1: las indicaciones más tempranas de que existen problemas con los cojinetes aparecen en las frecuencias ultrasónicas que van desde cerca de 250 000 – 350 000 Hz, luego cuando aumenta el desgaste, usualmente cae aproximadamente a 20 000 – 60 000 Hz. Estas frecuencias son evaluadas mediante el pico de energía (gSE), HFD e impulso de choque. Por ejemplo, el pico de energía puede aparecer cerca de 0,25 gSE en la etapa 1, el valor real dependerá de la ubicación de la medición y la velocidad de la máquina. Adquiriendo espectros de alta frecuencia se confirmará si el rodamiento fallo o no en la etapa 1.
- Etapa 2: ligeros defectos del cojinete comienzan a hacer sonar las frecuencias naturales de los componentes del rodamiento, que ocurren predominantemente en el rango de 30 000 -120 000 CPM. Esas frecuencias naturales pueden también ser resonancias de las estructuras de soporte del rodamiento. Al final de la etapa 2 aparecen frecuencias de banda lateral por encima y por debajo del pico de frecuencia natural. El pico de energía *Overall* crece, por ejemplo, de 0,25 a 0,50 gSE.
- Etapa 3: aparecen frecuencias y armónicas de defectos en rodamientos. Cuando el desgaste progresa, más frecuencias armónicas aparecen y el número de bandas laterales aumenta, ambas alrededor de estas y las frecuencias naturales de los componentes del rodamiento. El pico de energía *overall* sigue incrementando, por ejemplo, de 0,50 a más de 1 gSE. El desgaste es ahora por lo general visible y se puede prolongar a la periferia del rodamiento, particularmente, cuando bandas laterales bien formadas acompañan a las armónicas de la frecuencia de defecto de rodamiento. Espectros de alta frecuencia y cubiertos ayudan a confirmar la etapa 3. El rodamiento debería de ser emplazado en esta etapa.

- Etapa 4: hacia la parte final, la amplitud 1XCPM es incluso afectada. Crece y normalmente causa el aumento de numerosas armónicas de velocidad de giro. De hecho, los discretos defectos del cojinete y las frecuencias naturales de los componentes comienzan a desaparecer, y son reemplazados por un ruido de piso al azar, de banda ancha y alta frecuencia. Además, las amplitudes del ruido de piso de alta frecuencia y el pico de energía disminuyen, sin embargo, justo antes de que ocurra la falla, el pico de energía y el HFD crece, por lo general, a amplitudes excesivas.

En la figura 48, se presentan los espectros típicos de las 4 etapas de fallas de rodamientos.

Figura 48. Espectro típico de las 4 etapas de falla en rodamientos



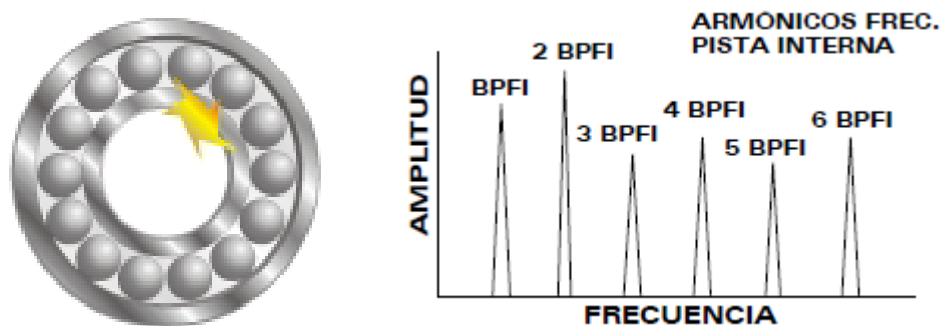
Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 105.

4.3.4.1. Falla en pista interna

Agrietamiento del material en la pista interna, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente. Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X CPM la frecuencia de falla de la pista interna, en dirección radial. Además, el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1 a 10 KHz.

El rodamiento debe ser reemplazado, ya que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento. Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga. En la figura 49 se presenta el espectro típico de falla en pista interna de rodamientos.

Figura 49. **Falla en pista interna y espectro típico de vibración**



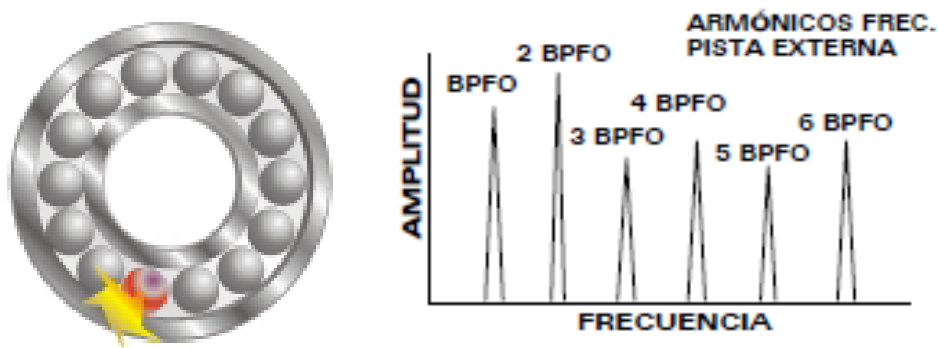
Fuente: A – Maq S.A. *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*. p. 41.

4.3.4.2. Falla en pista externa

Agrietamiento del material en la pista externa, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente. Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X CPM la frecuencia de falla de la pista externa, en dirección radial. Además, el contacto metal - metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1 a 10 KHz

El rodamiento debe ser reemplazado, ya que la falla seguirá incrementándose. Antes de revisarse el estado de lubricación del rodamiento. Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga. En la figura 50 se presenta el espectro típico de falla en pista externa de rodamientos.

Figura 50. **Falla en pista externa y espectro típico de vibración**



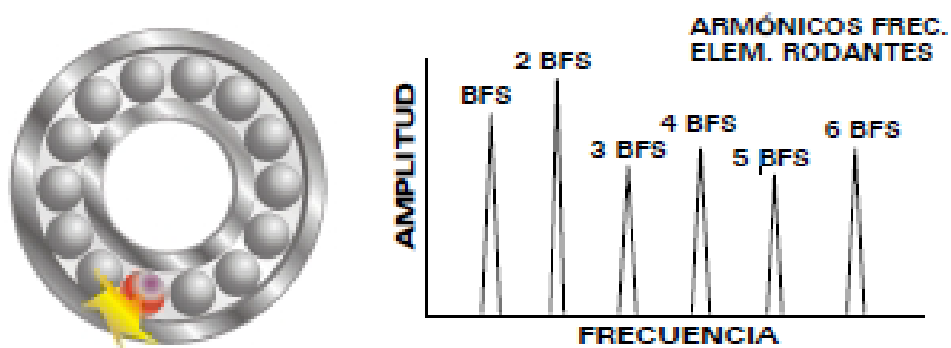
Fuente: A – Maq S.A. *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*. p. 21.

4.3.4.3. Falla en elementos rodantes

Agrietamiento del material en los elementos rodantes, producido por errores de ensamble, esfuerzos anormales, corrosión, partículas externas o lubricación deficiente. Se produce una serie de armónicos siendo los picos predominantes 1X y 2X CPM la frecuencia de falla de los elementos rodantes, en dirección radial. Además, el contacto metal – metal entre los elementos rodantes y las pistas producen pulsos en el dominio del tiempo del orden de 1 a 10 KHz

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Antes revise el estado de lubricación del rodamiento. Generalmente la medida más confiable es en dirección de la carga. En la figura 51 se presenta el espectro típico de falla en elementos rodantes de rodamientos.

Figura 51. **Falla en elementos rodantes y espectro típico de vibración**



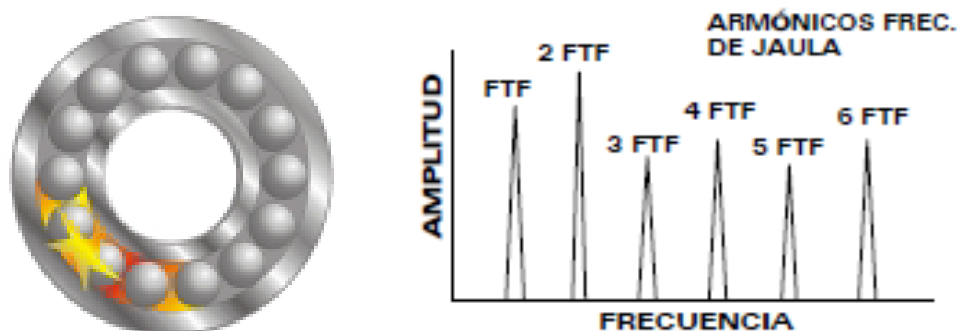
Fuente: A – Maq S.A. *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*. p. 22.

4.3.4.4. Deterioro de jaula

Deformación de la jaula, caja o cubierta que mantiene en su posición a los elementos rodantes. Se produce una serie de armónicos de la frecuencia de la jaula siendo los picos predominantes 1X y 2X RPS de la frecuencia de falla en jaula, en dirección radial o axial.

El rodamiento debe ser reemplazado, debido a que la falla seguirá incrementándose. Revise la posible causa que está dando origen a la falla. En la figura 52 se presenta el espectro típico de deterioro de jaula de rodamientos.

Figura 52. **Falla en deterioro de jaula y espectro típico de vibración**



Fuente: A – Maq S.A. *Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico*. p. 23.

4.3.5. Fallas en chumacera

La mayoría de las chumaceras generarán picos espectrales a frecuencias más bajas que 1X, y estos se llaman picos subsíncronos. A veces, los armónicos de estos picos subsíncronos también se generan, lo que indica una fuerte degeneración del rodamiento. Las fallas que se producen en chumaceras son:

- Problemas por desgaste
- Inestabilidad por remolino de aceite
- Inestabilidad por latigazo de aceite

4.3.5.1. Problemas por desgaste

Etapas posteriores del desgaste de cojinete son normalmente puestas en evidencia debido a la presencia de series completas de armónicas de velocidad de funcionamiento. Cojinetes gastados a menudo permiten altas amplitudes verticales en comparación con las horizontales, pero solo mostraran un pico pronunciado a 1XCPM. Los cojinetes con soltura excesiva pueden permitir que un desbalance o desalineación menor cause una alta vibración, que sería mucho menor si el juego del cojinete se ajustara a las especificaciones.

En la figura 53 se ilustra el espectro típico de vibración en problemas por desgaste.

Figura 53. Espectro típico de problemas por desgaste



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 109.

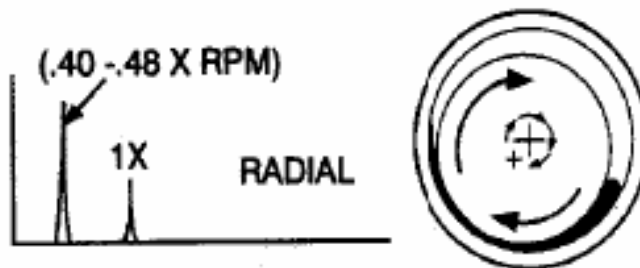
4.3.5.2. Inestabilidad por remolino de aceite

La inestabilidad por remolino de aceite ocurre a $0,40 - 0,48 \times \text{CPM}$ y a menudo es bastante grave. Se le considera excesiva cuando la amplitud excede el 40 % de la holgura del cojinete. El remolino de aceite es una vibración de la película de aceite donde las desviaciones en las condiciones normales de operación provocan que una cuña de aceite empuje al eje dentro del cojinete. El remolino de aceite es inestable ya que incrementa las fuerzas centrífugas que aumentan las fuerzas del remolino. Cambios en la viscosidad del aceite, presión de lubricación y cargas previas externas pueden afectar al remolino de aceite.

El remolino de aceite es una condición seria, que necesita corrección cuando se encuentra, ya que se puede deteriorar rápidamente hasta el punto donde hay contacto de metal a metal en el rodamiento.

En la figura 54 se ilustra el espectro típico de inestabilidad por remolino de aceite.

Figura 54. Espectro típico de inestabilidad por remolino de aceite



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 109.

4.3.5.3. Inestabilidad por latigazo de aceite

El latigazo de aceite es una condición muy destructiva que puede ocurrir si la máquina opera a o sobre 2X la frecuencia crítica del rotor. El latigazo de aceite ocurre cuando el componente de excitación por remolino de aceite llega a una frecuencia igual a la frecuencia natural del rotor y podrá causar una vibración excesiva que la película de aceite no sea capaz de soportar. El latigazo de aceite a veces ocurre al arrancar, en máquinas con rotores largos.

Ya que la frecuencia natural que se está excitando es la influencia controladora en el sistema, la frecuencia de la vibración no cambiará a medida que se incrementa la velocidad. Esto en contraste con el sencillo remolino de aceite, cuya frecuencia se cambia con la velocidad del rotor. Esto proporciona un buen método para la detección de latigazo de aceite.

En la figura 55 se ilustra el espectro típico de vibración en inestabilidad por latigazo de aceite.

Figura 55. Espectro típico de inestabilidad por latigazo de aceite



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 110.

4.3.6. Fallas en engranajes

Los problemas de engranajes son normalmente de fácil identificación, porque su vibración se presenta a la frecuencia de engrane GMF.

$$GMF = T_n \times CPM$$

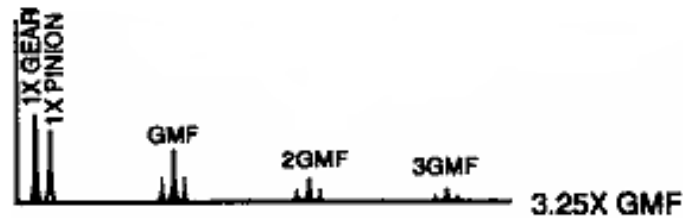
Donde:

- T_n = número de dientes
- CPM = frecuencia de rotación del engranaje

Un espectro de vibración normal mostrara las velocidades del engranaje y el piñón junto con la frecuencia de engrane y armónicas muy pequeñas de GMF. Las armónicas de GMF, por lo general, tienen bandas laterales de velocidad de giro. Todos los picos son de baja amplitud y no se excitan las frecuencias naturales de los engranajes. La F_{MAX} recomendada es a 3,25 XGMF cuando el número de dientes sea conocido. Si no se conoce el número de dientes, debe utilizarse F_{MAX} a 200XCPM en cada eje.

La figura 56 muestra el espectro de vibración normal en engranajes.

Figura 56. **Espectro normal**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 112.

Los problemas de engranajes que se pueden detectar mediante análisis de vibraciones son:

- Desgaste del diente
- Carga del diente
- Excentricidad del engranaje y juego entre dientes
- Desalineación del engranaje
- Diente agrietado o roto
- Problemas de fase de ensamble de engranajes
- Problemas de caza de diente

4.3.6.1. Desgaste del diente

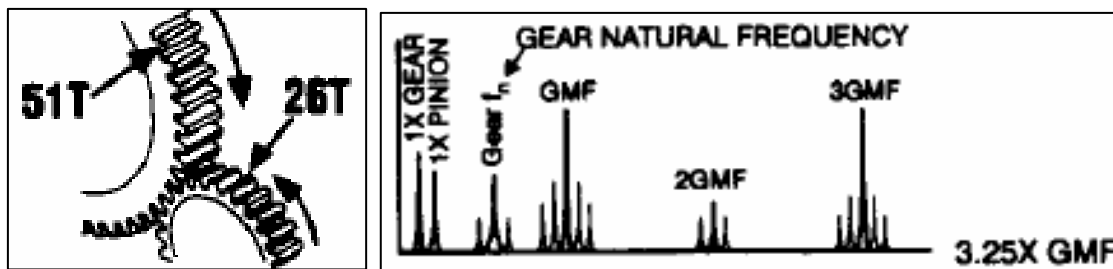
Un indicador clave del desgaste uniforme del diente es la excitación de la frecuencia natural del engranaje f_n , junto con las bandas laterales alrededor de la velocidad de giro del engranaje dañado.

La GMF puede o no cambiar en amplitud, aunque bandas laterales de gran amplitud rodeando a GMF usualmente aparecen cuando el desgaste es

notable. Las bandas laterales pueden ser mejor indicador que las mismas frecuencias GMF. También, pueden ocurrir grandes amplitudes tanto a 2XGMF como a 3XGMF, aun si la amplitud de GMF es aceptable.

La figura 57 ilustra la fuente del problema y su espectro típico de vibración.

Figura 57. **Desgaste del diente y su espectro típico de vibración**



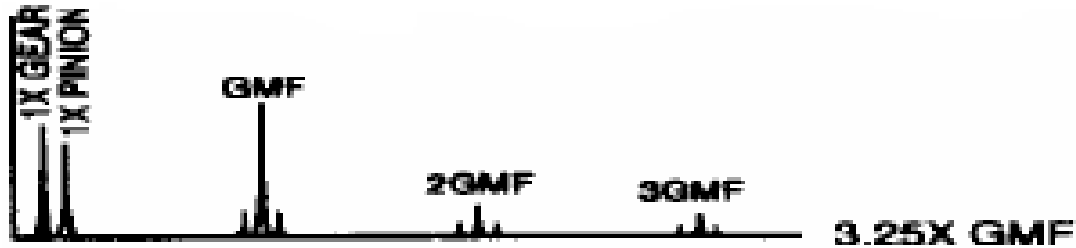
Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 114.

4.3.6.2. Carga del diente

Las frecuencias de engrane a menudo son muy sensibles a la carga. Amplitudes altas de GMF no necesariamente indican un problema. Un incremento substancial de la amplitud de una frecuencia de engrane entre dos inspecciones consecutivas dentro de un plan de mantenimiento predictivo podría indicar variaciones de carga, especialmente, si la amplitud de las bandas laterales permanece baja y si no se excitan frecuencias naturales asociadas con el engrane. Por lo anterior, las inspecciones de cajas reductoras o de incrementadores de velocidad se deben hacer siempre bajo condición de máxima carga.

La figura 58 ilustra el espectro típico de vibración en carga del diente.

Figura 58. **Espectro típico de carga del diente**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 115.

4.3.6.3. Excentricidad del engranaje y juego entre dientes

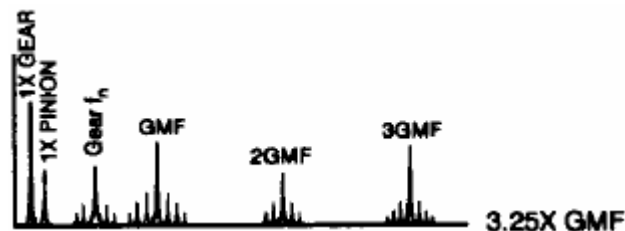
Un pobre ajuste entre dientes exhibirá excesiva tolerancia y un excesivo ajuste se traduce en interferencia; éste último puede generar grandes esfuerzos y vibración, pero en ambos casos existe una alta probabilidad de que ocurran impactos. La excentricidad ocurre cuando el centro de simetría no coincide con el centro de rotación.

A menudo bandas laterales de gran amplitud alrededor de las armónicas de GMF sugieren excentricidad del engranaje, juego o ejes no paralelos que permiten que la rotación de un engranaje module la velocidad de giro del otro. El nivel de 1XCPM del engranaje excéntrico será alto si la excentricidad es el problema dominante. Un juego entre los dientes inadecuado normalmente excita las armónicas de GMF y la frecuencia natural del engranaje, las que

generan bandas laterales a 1XCPM. Las amplitudes de GMF generalmente disminuyen con el incremento de la carga si el juego es el problema.

La figura 59 ilustra el espectro típico de vibración en excentricidad del engranaje y juego entre dientes.

Figura 59. **Espectro típico de excentricidad del engranaje y juego entre dientes**



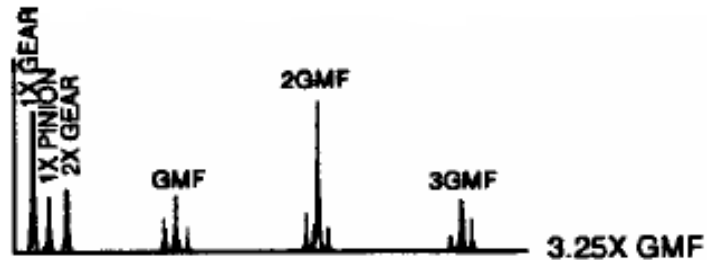
Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 116.

4.3.6.4. Desalineación del engranaje

Casi siempre excita la armónica de GMF de segundo orden o una mayor, que tendrá bandas laterales a la velocidad de funcionamiento. A menudo mostrará solo una pequeña amplitud 1XGMF, pero niveles más altos a 2X y 3XGMF. Es importante colocar F_{MAX} suficientemente alta para captar al menos 3 armónicas de GMF. También, bandas laterales alrededor de 2XGMF estarán espaciadas a 2XCPM. Las amplitudes de banda lateral a menudo no son iguales a la derecha e izquierda del GMF debido a la desalineación del diente.

La figura 60 ilustra el espectro típico de vibración en desalineación del engranaje.

Figura 60. **Espectro típico de desalineación del engranaje**



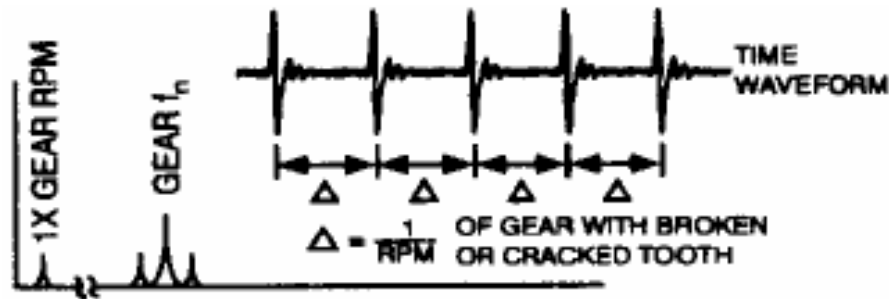
Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 118.

4.3.6.5. Diente agrietado o roto

Podrá generar una gran amplitud a 1XCPM de este engranaje solo en la onda de tiempo, además excitará la frecuencia natural del engranaje, f_n , con bandas laterales a su velocidad de giro. Se detecta mejor en onda de tiempo ya que mostrará un pico pronunciado cada vez que el diente problemático trate de engranar con los dientes del engranaje compañero. El tiempo entre los impactos corresponde a 1XCPM del engranaje con el problema. Las amplitudes de picos de impacto en la onda de tiempo serán de 10 a 20 veces más grandes que 1XCPM en el FTT.

La figura 61 ilustra el espectro típico de vibración en dientes agrietados o rotos.

Figura 61. Espectro típico de diente agrietado o roto.



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 119.

4.3.7. Problemas en transmisión de correas

Este elemento de transmisión es muy popular por su capacidad de absorción de impactos y vibración. Sin embargo, los problemas de vibración asociados con bandas son generalmente de dos tipos:

- Reacción de la correa a otra fuerza en el equipo
- Vibración debida a un problema real de la correa

Una correa puede reaccionar a fuerzas provocadas por desbalanceo, soltura mecánica, desalineación o excentricidad de poleas; en cuyo caso, la solución no es cambiar la correa.

Por lo tanto, la frecuencia de la vibración es el factor clave para determinar su naturaleza. Los problemas de correas generan vibración a frecuencias armónicas de su velocidad de rotación.

La mejor forma de detectar vibración de correas es colocar el transductor sobre la chumacera próxima a la transmisión en dirección paralela a la tensión de las correas. Los defectos de correa normalmente generan mayor amplitud en dicha dirección.

Las correas son un tipo de transmisión de fuerza relativamente barato, pero están sujetas a muchos problemas. Hay muchas clases de correas y todas están sujetas a desgaste y a daños. Las correas deben ser revisadas frecuentemente para ver si tienen daños. Deben ser mantenidas a la tensión correcta y deben estar limpias.

4.3.7.1. Desgaste, aflojamiento o descuadre de las correas

Los problemas de desgaste, aflojamiento o descuadre son normalmente de fácil identificación, porque su vibración se presenta a la frecuencia fundamental de las correas FFC.

$$FFC = (\pi \times D \times CPM) / L$$

Donde:

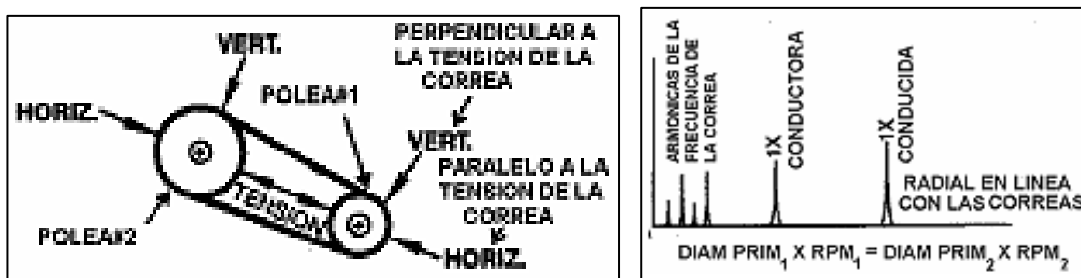
- FFC = frecuencia fundamental de la correa
- D = diámetro de la polea
- L = longitud de la correa
- CPM = velocidad de revolución de la polea

La frecuencia de la correa está por debajo de las CPM de la máquina conducida. Cuando están desgastadas, flojas o descuadradas, normalmente

causan de 3 a 4 múltiplos de frecuencia de correa. A menudo la frecuencia 2X de la correa es el pico dominante. Las amplitudes son normalmente inestables algunas veces pulsando tanto con la CPM del conductor o del conducido. En correas dentadas, el desgaste o desalineación de la polea es indicado por altas amplitudes a la frecuencia de la correa dentada. Las transmisiones de cadena indicarán problemas a la frecuencia de paso de cadena.

La figura 62 muestra la fuente del problema y su espectro típico de vibración.

Figura 62. **Fuente del problema y espectro típico de vibración en desgaste, aflojamiento o descuadre de las correas**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 121.

4.3.7.2. Desalineación de la correa o polea

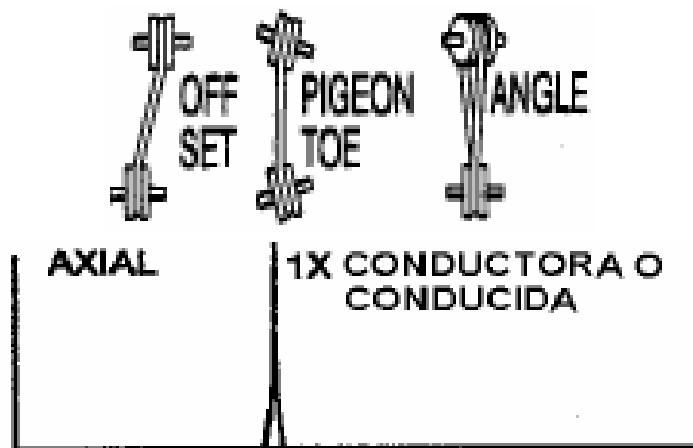
Puede ocurrir porque los ejes de las poleas no están alineados o porque las poleas no están paralelas. También, pueden ocurrir ambos casos simultáneamente.

La desalineación de la polea produce alta vibración a 1XCPM predominantemente en la dirección axial. El ratio de las amplitudes de las CPM de la polea conductora a la conducida depende de donde se toman los datos, así como de la masa relativa y la rigidez del bastidor.

A menudo con la desalineación de la polea la vibración axial más elevada se encontrará a las CPM del ventilador, o viceversa. Puede ser confirmada por mediciones de fase colocando el filtro de fase a las CPM de la polea con mayor amplitud axial; luego compare las fases a esta frecuencia en particular en cada rotor en la dirección axial.

La figura 63 muestra la fuente del problema y su espectro típico de vibración.

Figura 63. **Fuente del problema y espectro típico de vibración en desalineación de correas o poleas**



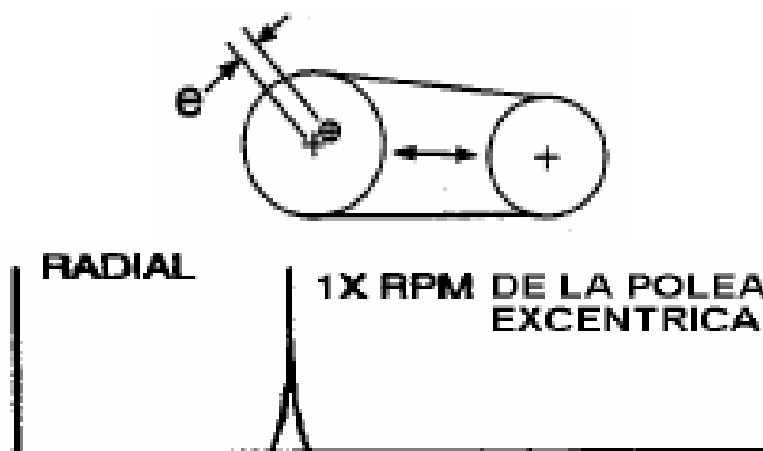
Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 121.

4.3.7.3. Poleas excéntricas

Ocurre cuando el centro de rotación no coincide con el centro geométrico en una polea. Las poleas excéntricas causan alta vibración a 1XCPM. La amplitud es normalmente la más alta cuando se encuentra alineada con las correas y debe aparecer tanto en los rodamientos de la polea conductora como en la conducida. En ocasiones es posible balancear las poleas excéntricas colocando arandelas a los pernos. Sin embargo, aunque se balancee, la excentricidad seguirá induciendo vibración y esfuerzo de fatiga reversible en la correa. La excentricidad de la polea puede ser confirmada por un análisis de fase que muestre la diferencia de fase horizontal y vertical cercana a 0° a 180° .

La figura 64 muestra la fuente del problema y su espectro típico de vibración.

Figura 64. **Fuente del problema y espectro típico de vibración en poleas excéntricas**



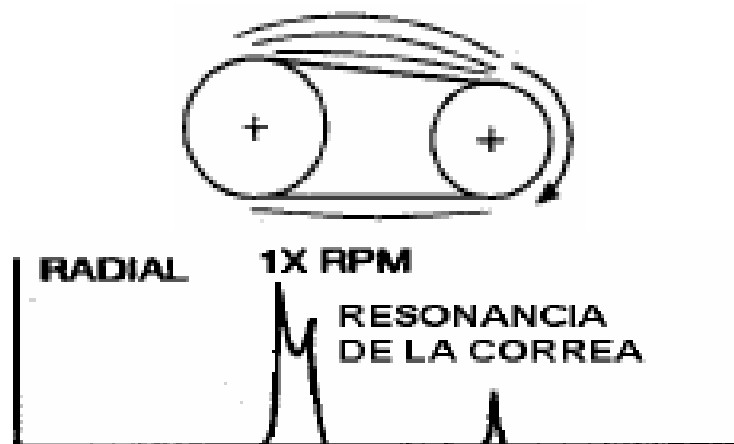
Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 122.

4.3.7.4. Resonancia de correas

Sucede si la frecuencia natural de la banda coincide o se aproxima a la velocidad nominal del motor o de la máquina conducida, puede ocasionar amplitudes altas. La frecuencia natural de la correa puede ser alterada cambiando la tensión, longitud o sección transversal de la correa. Puede ser detectada tensionando y luego soltando la correa mientras se mide la respuesta en las poleas y rodamientos. Sin embargo, cuando está operando, las frecuencias naturales de las correas tenderán a ser un poco más altas en el lado tensionado y un poco más bajas en el lado flojo.

La figura 65 muestra la fuente del problema y su espectro típico de vibración.

Figura 65. **Fuente del problema y espectro típico de vibración en resonancia de correas**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 124.

4.3.8. Fuerzas hidráulicas y aerodinámicas

Hay muchos tipos de bombas en uso, y sus firmas de vibración varían en un rango ancho. Cuando se está monitoreando la vibración en bombas, es importante que las condiciones de operación sean idénticas de una operación a la siguiente, para asegurar firmas consistentes. La presión de succión, la presión de descarga y especialmente la inducción de aire y la cavitación afectarán la firma de vibración.

El impulsor de la bomba produce presión en el fluido bombeado, cuando cada alabe pasa el puerto de salida. Este excita la frecuencia de vibración del paso de alabes en la tubería, y por lo general se transmite a través de la máquina.

Las bombas centrífugas siempre tienen un componente de vibración importante en la frecuencia de paso de alabes, que es igual al número de alabes de la impulsora por las CPM. Si la amplitud se incrementa de manera significativa, por lo general, indica que hay un problema interno como una desalineación, o daño en las alabes. Los armónicos del paso de alabes también son común en estas bombas.

Las fuentes comunes de problemas en bombas y turbinas son:

- Paso de alabes
- Turbulencia del flujo
- Cavitación

4.3.8.1. Paso de alabes

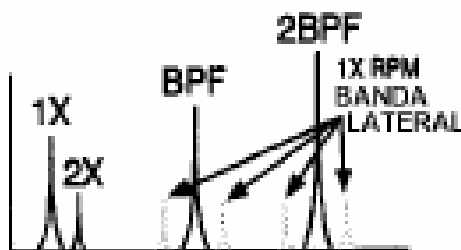
La frecuencia de paso de alabes, BPD, está dada por:

$$\text{BPD} = \text{N}^\circ \text{ de alabes} \times \text{CPM}$$

Esta frecuencia es inherente en bombas, ventiladores y compresores y normalmente no representa problemas. Sin embargo, las BPD de gran amplitud pueden ser generadas en la bomba si el espacio entre los alabes de rotación y los difusores no es igual en todas ellas. También, las BPD pueden coincidir en ocasiones con una frecuencia natural del sistema causando alta vibración. Una BPD alta puede ser generada si el impulsor desgasta los anillos de agarre al eje o si falla la soldadura que sostiene a los alabes del difusor. También, las BPD altas pueden ser causadas por dobleces abruptos en la tubería, obstrucciones que interrumpan el flujo, posiciones del dámper, o si el rotor se encuentra excéntrico dentro de la carcasa de la bomba o ventilador.

La figura 66 ilustra el espectro típico de vibración en paso de alabes.

Figura 66. **Espectro típico de vibración de paso de alabes**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 125.

4.3.8.2. Turbulencia del flujo

La turbulencia del flujo ocurre en sopladores debido a variaciones en la presión o en la velocidad del aire pasando a través del ventilador o de los ductos. Esta interrupción causa turbulencia que genera una vibración a baja frecuencia aleatoria, típicamente en el rango de 50 a 2 000 CPM. Si ocurre purga dentro del compresor, puede ocurrir una alta frecuencia de vibración de banda ancha al azar. Excesiva turbulencia puede también excitar la alta frecuencia de banda ancha.

La figura 67 ilustra el espectro típico de vibración en turbulencia del flujo.

Figura 67. **Espectro típico de vibración de turbulencia del flujo**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 126.

4.3.8.3. Cavitación

La cavitación genera normalmente una energía de banda ancha de frecuencia muy alta aleatoria, que algunas veces se superpone con las frecuencias armónicas del paso de alabes. Normalmente, indica insuficiente presión de succión. La cavitación puede ser un tanto destructiva para los

elementos internos de la bomba si no es corregida. Puede particularmente erosionar los alabes del impulsor. Cuando está presente, a menudo suena como si pasaran piedras a través de la bomba. La cavitación es usualmente causada por insuficiencia en el flujo de entrada. Puede ocurrir en un recorrido y estar ausente en el siguiente.

La figura 68 ilustra el espectro típico de vibración en cavitación.

Figura 68. **Espectro típico de vibración de cavitación**



Fuente: TUPPLA, Juan Carlos. *Ahorro de energía y mantenimiento industrial S.A.C. Tablas de Charlotte*. p. 127.

CONCLUSIONES

1. Las técnicas de análisis para el mantenimiento de equipos proporcionan en tiempo real el estado en el que se encuentra la máquina y sus distintos componentes; evita paros innecesarios, extiende el tiempo de operación y permite planificar de manera efectiva el reacondicionamiento del equipo.
2. Las máquinas rotativas presentan en su funcionamiento normal ciertos parámetros de vibración; para hacer efectivo su análisis se necesita tener conocimiento de términos básicos de movimiento armónico simple y sus componentes, amplitud, frecuencia y fase. De la misma forma poseer conocimientos más complejos como dominio de tiempo y de frecuencia, transformada de Fourier y análisis espectral.
3. Para realizar de manera eficiente la toma de mediciones en máquinas, es necesario definir un procedimiento estandarizado para que no se presenten alteraciones en la toma de estos. Se deberá definir con antelación el equipo que será evaluado para considerar el tipo de sensor a utilizar, las posiciones en las que el sensor será colocado y el número de iteraciones que el instrumento de medición realizará con la finalidad de obtener lecturas precisas y constantes que serán comparadas con normas de vibración y con tomas de datos anteriores para la realización de tendencias.

4. Con la información obtenida de las recolecciones periódicas con el aparato de medición, se obtendrá una base de datos de los equipos evaluados. Los datos obtenidos serán comparados en búsqueda de comportamientos anómalos que permitan de manera proactiva conocer en su etapa inicial de falla el estado de los componentes que los conforman; de manera que pueda predecirse el tiempo en que se deberá realizar el reacondicionamiento del equipo; se proponen mantenimientos programadas para evitar paros y gastos innecesarios que refutan la idea de que el departamento de mantenimiento es un departamento de pérdidas.

RECOMENDACIONES

1. Al especialista en mantenimiento encargado de la toma de mediciones, utilizar el equipo y la técnica correspondiente según la máquina, el fallo que esté produciéndose o información que desea conocerse sobre el estado del equipo.
2. Al especialista en mantenimiento encargado de la recolección de firmas de vibración, asignar prioridad a las variables que proporcionarán la información relevante según el equipo y caso de estudio.
3. Al especialista en mantenimiento encargado de la recolección de firmas de vibración, el realizarlo frecuentemente con rutas y procedimientos que favorezcan la estandarización del proceso.
4. Al especialista en mantenimiento encargado de actualizar la base de datos de las firmas de vibración, identificar posibles comportamientos anómalos que proporcionen datos sobre el estado de los componentes que conforman los equipos para la adecuada programación de reacondicionamiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABARCA, Diego F.; IGLESIAS, Francisco J. *Elaboración de un plan de mantenimiento predictivo mediante la aplicación de termografía industrial en los motores eléctricos de la planta de eurolit en la empresa TUBASEC C.A.* Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2012. 245 p.
2. CASTELLANOS, Melvin; SÁNCHEZ, Max. *Programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en equipo crítico de la industria azucarera.* El Salvador: Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, 2005. 89 p.
3. CHERRES, Diego; ÑAUTA, José. *Estudio de implementación del sistema de mantenimiento predictivo en la compañía ecuatoriano del caucho ERCO.* Ecuador: Escuela Politécnica Salesiana, 2015. 168 p.
4. CRUZ, Adian. *Implementación de mantenimiento predictivo en la empresa AGR-RACKEND.* México: Universidad Tecnológica de Tula Tepeji, 2011. 87 p.
5. ESTÉVEZ, Antonio. *Estudio de un sistema de mantenimiento predictivo basado en análisis de vibraciones implantado en instalaciones de bombeo y generación.* España: Universidad de Sevilla, 2013. 123 p.

6. GUTIÉRREZ, Diego; SERNA, Edwin. *Diseño e implementación de un sistema de monitoreo de vibraciones en un equipo rotativo de Buencafé liofilizado de Colombia*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2014. 140 p.
7. LEÓN, Ismael. *Análisis de vibraciones como base para la ejecución de un plan de mantenimiento predictivo para la maquinaria petrolera de Occidental Exploración y Producción Company*. España: Escuela Politécnica del Ejército, 2006. 312 p.
8. OLARTE, William; BOTERO, Marcela; CAÑÓN, Benhur. *Análisis de vibraciones: una herramienta clave en el mantenimiento predictivo*. 2010. 222 p.
9. _____. *Técnicas de mantenimiento predictivo utilizados en la industria*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2010. 215 p.
10. ROSA, Manuel; MILES, Luis; PÉREZ, José. *Manual de aplicación de herramientas y técnicas del mantenimiento predictivo*. El Salvador: Universidad de El Salvador, 2009. 621 p.
11. RUIZ, Adriana. *Modelo para la implementación de mantenimiento predictivo en las facilidades de producción del petróleo*. Colombia: Universidad industrial de Santander, 2012. 130 p.
12. VALDÉS, Jorge L.; SAN MARTIN, Erick A. *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo-predictivo aplicado a los equipos de*

emplasa REMAPLAST. Colombia: Universidad de Cartagena,
2009. 242 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Información de activos

Identificación de la máquina			
Descripción de la máquina			
Código de identificación de la máquina		Orientación	Vertical____ Horizontal____
Aplicación		Montaje	Rígido____ Flexible____
Horas de trabajo		Importancia del proceso	Alta____ Media____ Baja____
Categoría de los impactos	Daño al personal____ Efecto en la población____ Impacto ambiental____		
Inspecciones visuales			
• Conexiones intactas • Cables pelados • No hay filtros obstruidos • Falta de tornillos o tuercas • Caja de interruptores bien colocada • No hay fugas de agua en el quipo • Fugas de aceite • No hay riesgo de residuos	• Fugas de vapor en el sellador • Infiltraciones de grasa • No hay ruidos inusuales • Fugas de vapor en tubería • Entrada de aire del motor limpia • No se dan temperaturas inusuales • Fugas en conducto de transporte	• No se observan vibraciones inusuales • Suciedad excesiva • Correas peladas • Mirilla de lubricación en estado inusual • Problemas de montajes y cimentación • Boquillas de engrase rotas • Correas aflojadas	
Inspecciones de seguridad			
• Barandilla suelta • Riesgo potencial de resbalamiento • Residuos en suspensión • Componentes de giro al descubierto • Riesgos de llamas abiertas • Una sola ruta de entrada y salida • Materiales cáusticos • Puntos de sujeción • Superficies de transito irregular • Agua o aceite estancada • Bordes afilados	• Falta de barandilla • Riesgo de descarga eléctrica • Riesgos para la vista • Riesgos de exposición al calor • Exposición a chispas • Equilibrio inestable • Etiquetado incorrecto • Necesario equipo de protección personal • Superficies con temperaturas altas • Riesgo de chorro de aire • Ruidos elevados • Ruido repentino y alto de explosivos	• Visibilidad deficiente • Gases • Riesgo de caídas • Riesgos de desenganche • Equipo descuidado • Riesgo de deslizamiento de material • Riesgo de ejes y poleas • Fuga térmica potencial • Superficie resbaladiza • Riego de succión cerca de ventiladores • Descarga repentina y violenta de aire	
Notas de inspección visual o de seguridad			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Equipo de accionamiento

Motor eléctrico: ____ Turbina: ____ Motor: ____ Otros: _____

Identificación de activo			
Fabricante		KW/HP	
Modelo		Armazón	
Voltaje nominal		Corriente nominal	
Número de barras del rotor		Acoplamiento	Rígido ____ Flexible ____ Correa ____
Cuchillas de ventilador		Aletas	Sí ____ No ____
Alimentación	60Hz ____ 50Hz ____ CC ____	RPM de salida medidas	
Gráfica TFF			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. Caja de cambios

Reductora: ____ Aumentador de velocidad: ____ Otros: _____

Identificación de activo			
Fabricante			
Modelo		RPM de entrada medida	
Relación o tasa		Número de dientes del piñón	
RPM de salida medida		Número de dientes piñón transmisión de entrada	
Número de dientes piñón transmisión de salida		Número de dientes del mecanismo de giro	
Gráfica TFF			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Accionamiento del equipo**

Bomba: ____ Ventilador: ____ Compresor: ____ Otros: _____

Identificación de activo					
Fabricante		Modelo			
RPM medida		Capacidad			
Fases		Número de cuchillas o paletas			
Tipo		Número de cilindros		Número de dientes engranaje transmisor	
Gráfica TFF					

Fuente: elaboración propia.

