

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO  
INALÁMBRICO DE VIBRACIONES EN MOTORES ELÉCTRICOS EN  
UNA PLANTA TEXTIL**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**ELABORADO POR:**

CRESPO FLORES ALEXANDER

**ASESOR**

M.Sc. ING. JOSE AMBROSIO MACHUCA MINES

**LIMA – PERÚ**

**2021**



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MONITOREO INALÁMBRICO  
DE VIBRACIONES EN MOTORES ELÉCTRICOS EN UNA PLANTA TEXTIL**

## **DEDICATORIA**

A Dios sobre todas las cosas por darme la fortaleza para continuar con toda humildad en mi desarrollo personal y profesional.

De igual forma, dedico este trabajo a mis padres, quienes me apoyaron desde un principio en mis estudios y por brindarme siempre su cariño y apoyo.

A mis hermanos y novia por estar apoyándome y alentándome en todo momento.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, por darme la fortaleza para luchar hacia mis objetivos.

A mis padres por su apoyo y aliento incondicional en todo momento de mi vida.

A mis amigos y compañeros de trabajo por los buenos consejos.

## RESUMEN

En una planta textil, los motores presentan problemas recurrentes de vibraciones mecánicas elevadas provocando paradas de planta no programadas, razón por la cual, la Gerencia de Operaciones ha decidido implementar un sistema de monitoreo de las condiciones vibratorias mecánicas para analizar las amplitudes del espectro que se visualiza en una pantalla en tiempo real mediante el software *Maintraq*, con la finalidad de que la operación de los motores sea confiable operacionalmente. Sin embargo, para alcanzar este fin, la organización aplicó la metodología RCM (*Reliability centred maintenance*) para elaborar planes de mantenimiento de equipos industriales basándose en la operatividad y seguridad en las funciones del equipo y una forma de aplicar esta metodología es mediante la planificación de un mantenimiento predictivo de vibraciones mecánicas. Esto permite predecir la tendencia de la magnitud de las vibraciones mediante los acelerómetros, los cuales registran las vibraciones para transformarlas en señales eléctricas que son procesadas por el dispositivo *vibraspec 800*, permitiendo la interconexión a un computador para mostrar los espectros de vibraciones para ser analizadas por el técnico especialista y de esta manera evaluar la magnitud de los parámetros de vibración según la norma ISO 10816 - 3.

La conexión que se ha establecido es inalámbrica mediante la configuración punto a punto para una distancia de 200m mediante el uso del *Access point TP-link* de 500mW para exteriores de 5GHz a150Mbps TL-WA7510N.

## **ABSTRACT**

The industrial companies seek to guarantee their profits with the minimum number of plant stops, for this reason they carry out programmed predictive maintenance on their rotating machines that are part of their production and which they consider should have high availability. In this case predictive maintenance to the state of the bearings of the electric motors will be carried out by spectral analysis of the vibrations of said bearings, their mechanical behavior is analyzed through mono axial accelerometers, which are vibration sensors that transform vibrations into electrical signals and these are processed by another device, vibraspec800, which will be linked to the PC through a software called Maintraq online and visualized in one or more computer monitors that will be analyzed by the predictive maintenance specialist and provide the status report to the maintenance manager. For this case the vibraspec800 was used, since it has eight outputs for the accelerometers, so it will be possible to monitor up to eight machines. The communication will be wireless through the use of Access point TP-LINK of 500mW for outdoor from 5 GHz to 150 Mbps TL-WA7510N.con a configuration point to point or bridge of long range and power, without altering the information. According to this information it will be possible to analyze the graphs in real time and see the state of the bearings of the motors. Additionally this system emits an alarm when detecting a critical state of the bearing.

## ÍNDICE

<b>PRÓLOGO</b> .....	1
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b> .....	2
1.1 Generalidades .....	3
1.2 Descripción del Problema de Investigación.....	4
1.3 Objetivos del estudio.....	4
1.3.1 Objetivo General .....	5
1.3.2 Objetivos Específicos.....	6
1.4 Antecedentes investigativos.....	7
<b>CAPÍTULO II. MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL</b> .....	10
2.1 Marco Teórico.....	10
2.1.1 Etapas de la gestión de Mantenimiento .....	10
2.1.2 Tipos de mantenimiento.....	16
2.1.3 Tipos de vibraciones mecánicas .....	19
2.1.4 Ecuaciones de movimiento oscilatorio .....	22
2.1.5 Transformada de Fourier .....	24
2.1.6 El rodamiento.....	34
2.2 Marco Conceptual.....	44
a) Desalineación .....	44
b) Instalación inadecuada de los rodamientos .....	45
c) Falta de lubricación.....	45
d) Daño del rodamiento por efecto eléctrico.....	46
e) Contaminación en el interior del rodamiento.....	46
<b>CAPITULO III. DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN</b> .....	48
3.1 Desarrollo de la primera sección del proyecto.....	48
3.2 Desarrollo de la segunda sección del proyecto.....	59



<b>CAPITULO IV. ANALISIS DE RESULTADOS</b> .....	69
4.1 Análisis de los reportes de averías de los motores de la banda transportadora .....	69
4.2 Discusión de resultados .....	75
4.2.1 Tiempo medio entre fallas (MTBF) del motor de la banda transportadora .....	80
4.2.2 Visualización del estado de las vibraciones en tiempo real .....	86
<b>CONCLUSIONES</b> .....	88
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	89
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	90
<b>ANEXOS</b> .....	91

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. Nº 1.1: Evaluación de microestructuras.....	7
Fig. Nº 1.2: Preparación muestras de material.....	8
Fig. Nº 1.3: Banco de pruebas ultrasónicas .....	8
Fig. Nº 1.4: Evaluación de limpieza y análisis de contaminación.....	8
Fig. Nº 1.5: Análisis de contaminación del rodamiento.....	9
Fig. Nº 2.1: Relaciones y leyes que gobiernan a un sistema de Mantenimiento.....	16
Fig. Nº 2.2: Masa suspendida de un muelle .....	19
Fig. Nº 2.3: Movimiento armónico simple .....	20
Fig. Nº 2.4: Medidas de la amplitud en una onda .....	20
Fig. Nº 2.5: Suma de vibraciones simples en el dominio del tiempo.....	22
Fig. Nº 2.6: Procesado FFT de una onda vibratoria compleja .....	24
Fig. Nº 2.7: Suma de vibraciones simples en el dominio de la frecuencia .....	25
Fig. Nº 2.8: Magnitudes en frecuencia .....	26
Fig. Nº 2.9: Desfase entre magnitudes.....	26
Fig. Nº 2.10: Comportamiento espectral en cada magnitud de vibración .....	28
Fig. Nº 2.11 Espectro de vibración de un problema de desequilibrio.....	30
Fig. Nº 2.12: Espectro de vibración por problema de desalineación.....	31
Fig. Nº 2.13: Desalineación angular de ejes.....	32
Fig. Nº 2.14: Simulación de la vibración por desalineación .....	32
Fig. Nº 2.15: Espectro por desgaste de un piñón .....	33
Fig. Nº 2.16: Espectro de vibración en modo de falla eléctrico.....	34
Fig. Nº 2.17: Despiece de un motor eléctrico industrial .....	35
Fig. Nº 2.18: Partes de un rodamiento de motor eléctrico .....	36
Fig. Nº 2.19: Visualización del espectro en el programa <i>Maintraq</i> .....	37

Fig. N° 2.20: Detalle de las alarmas en el programa Maintraq.....	38
Fig. N° 2.21: Alarma de condición de motores .....	39
Fig. N° 2.22: Esquema de equipos de medición de vibración mecánica.....	40
Fig. N° 2.23: Esquema de equipos de lubricación manual y automática .....	41
Fig. N° 2.24: Diagrama de porcentaje de falla en los rodamientos .....	42
Fig. N° 2.25: Diagrama temporal de lubricación manual y automática.....	42
Fig. N° 2.26: Lubricador automático .....	43
Fig. N° 2.27: Fotografía del lubricador automático instalado en un motor de 50 HP .....	43
Fig. N° 2.28: Mapa conceptual de las principales causas de falla en los rodamientos .....	44
Fig. N° 3.1: Fotografía de la instalación de los sensores de vibración.....	48
Fig. N° 3.2: Fotografía del sensor de la chumacera del enrollador de tela .....	49
Fig. N° 3.3: Diagrama de conexión de los acelerómetros al <i>vibraspec 800</i> .....	51
Fig. N° 3.4: Fotografía de la instalación del acelerómetro en la banda transportadora .....	52
Fig. N° 3.5: Fotografía de la instalación del <i>Vibraspec 800</i> en el tablero de control .....	52
Fig. N° 3.6: Esquema de conexión del TL-WA5210G.....	53
Fig. N° 3.7: Asignación de una dirección IP fija.....	53
Fig. N° 3.8: Configuración punto a punto del <i>Access Point</i> .....	54
Fig. N° 3.9: Configuración inalámbrica punto a punto .....	55
Fig. N° 3.10: Configuración del código MAC .....	55
Fig. N° 3.11: Ubicación del código MAC de un Access point.....	56
Fig. N° 3.12: Diagrama de instalación del <i>Vibraspec 800</i> .....	57
Fig. N° 3.13: Diagrama de instalación de sensores en los motores de banda Transportadora .....	58
Fig. N° 3.14: Esquema de red inalámbrica instalada del sistema de monitoreo online .....	58
Fig. N° 3.15: Fotografía de la visualización de los espectros de las señales de vibración ..	60
Fig. N° 3.16: Espectro de señales de vibración.....	60
Fig. N°3.17: Espectro de vibración del motor de rodillo de la faja transportadora.....	61
Fig. N° 3.18: Historial de fallas de un motor eléctrico en el programa <i>Maintraq</i> .....	62
Fig. N°3.19: Gráfica del espectro en vista tridimensional en el programa <i>Maintraq</i> .....	63
Fig. N° 3.20: Espectro de vibración bidimensional en el programa <i>Maintraq</i> .....	64
Fig. N° 3.21: Reporte de vibración del motor de la planta textil .....	64
Fig. N° 4.1: Puntos de medición de vibración en un motor trifásico .....	71
Fig. N° 4.2: Espectro de aceleración de un motor con falla crítica de vibración.....	74

Fig. N° 4.3 Espectro de velocidad de vibración del motor de la banda transportadora .....	75
Fig. N° 4.4: Histograma del MTBF en los periodos 2014 – 2015 de los motores de la banda transportadora .....	85
Fig. N° 4.5: Historial de fallas de un motor de banda transportadora .....	87

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA N° 3.1: Niveles de vibración según la norma ISO 10816-3.....	65
TABLA N° 3.2: Niveles de vibración de motores eléctricos según su potencia.....	66
TABLA N° 3.3: Reporte del motor del rodillo de la banda transportadora.....	66
TABLA N° 3.4: Reporte del motor del rodillo de la banda transportadora.....	67
TABLA N° 3.5: Reporte setiembre 2014 del motor rodillo de la faja transportadora .....	67
TABLA N° 3.6: Reporte del nivel de vibración del motor de la banda transportadora	68
TABLA N° 4.1: Reporte de falla de vibración del motor de la banda transportadora.....	70
TABLA N° 4.2: Registro de medición de las vibraciones mecánicas de los motores de la banda transportadora.....	72
TABLA N° 4.3: Reporte de inspección de un motor en estado crítico de vibración.....	73
TABLA N° 4.4: Registro de vibración del motor de la banda transportadora .....	73
TABLA N° 4.5: Reporte mensual de mediciones de las maquinas rotativas de la empresa textil en el periodo 2014 .....	76
TABLA N° 4.6: Reporte mensual de mediciones de las máquinas rotativas de la empresa textil en el periodo 2015.....	77
TABLA N° 4.7: Registro de los motores de la banda transportadora.....	79
TABLA N° 4.8 Cálculo del MTBF de los motores de las bandas transportadoras en el periodo del año 2014 .....	82
TABLA N° 4.9 Cálculo del MTBF de los motores de la banda transportadora durante el periodo del año 2015 .....	84

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Abrasión:** proceso de desgaste entre dos superficies de contacto, cargadas y que se mueven una contra otra. El desgaste se debe a partículas duras que se arrastran entre ambas superficies de contacto a crestas duras en una o ambas superficies.
- **Acelerómetro:** Los acelerómetros o sensores de aceleración es un dispositivo que están diseñados para realizar una medida de aceleración o vibración.
- **Agarrotamiento:** Cuando un rodamiento no se puede mover ni girar.
- **Agrietamiento térmico:** Se denomina así a las grietas en el aro de un rodamiento resultantes de temperaturas excesivamente altas combinadas con altas tensiones residuales. Las temperaturas excesivas son el resultado de calor por fricción cuando se produce deslizamiento total entre superficies cargadas.
- **Alisado:** La eliminación o aplanamiento de asperezas u otras imperfecciones superficiales, para crear una superficie más lisa.
- **Análisis de causa raíz.** Es un método para la resolución de problemas que intenta evitar la recurrencia de un problema o defecto a través de identificar sus causas.
- **Confiabilidad de una Máquina:** La medida de la confiabilidad de un equipo es la frecuencia con la cual ocurren las fallas con el tiempo. Si no hay fallas el equipo es 100% confiable, si la frecuencia de fallas es muy baja, la confiabilidad es aún aceptable, pero si es muy alta, el equipo es poco confiable.
- **Contaminante:** Partícula sólida o líquida que penetra en el entorno del rodamiento y afecta considerablemente su desempeño.
- **Corrosión:** Es una capa de óxido resultante de una reacción química en una superficie de metal.

- **Corrosión por contacto:** Un tipo de daño en el rodamiento en el que el micromovimiento entre dos componentes de contacto causa restos microscópicos que se oxidarán instantáneamente, dejando una decoloración de la superficie de color rojo negruzco.
- **Corrosión por frotamiento:** Un tipo de desgaste por adherencias. La soldadura superficial local provoca que se arranque material de una de las superficies dejando en ella grandes cavidades.
- **Corrosión por humedad:** La reacción química que ocurre cuando el agua u otro químico se condensa en una superficie de metal, permitiéndole interactuar con el oxígeno(oxidación).
- **Cráter:** picaduras microscópicas que parecen cráteres, que se producen en los caminos de rodadura y elementos rodantes cuando pasa corriente eléctrica perjudicial a través de un rodamiento.
- **Desgaste por adherencias:** El daño que ocurre cuando dos superficies no están correctamente lubricadas se deslizan una contra otra bajo carga. Las adherencias causan que una superficie se transfiera a la otra y dejan un aspecto “de desgarro”.
- **Descascarillado:** Pérdida de pequeñas astillas de material como resultado de fatiga (iniciada en la superficie o sub superficie).
- **Erosión:** La pérdida gradual de material resultante de la interacción mecánica entre una superficie sólida y los contaminantes.
- **Erosión eléctrica:** Macro o microcráteres causados por la fusión local, cuando niveles elevados de corriente eléctrica perjudicial pasan a través de los contactos rodantes de un rodamiento.
- **Espectro de frecuencia:** El espectro de frecuencias es el gráfico que muestra cómo es la descomposición de una señal ondulatoria (sonora, luminosa, electromagnética, etc.) en el dominio frecuencial.
- **Grieta:** Discontinuidad dentro de la masa del material sin separación completa, resultante de las tensiones con carga.
- **Indentación:** Daño causado por la impresión de un componente solido en una superficie en forma de deformación(plástica) permanente. Se observa en los rodamientos de rodillos como muescas en los caminos de rodadura debido al rolado de contaminantes sólidos o restos de fallas. Las indentaciones pueden ser afiladas (de

partículas metálicas), redondeadas (de restos blandos) o fragmentos múltiples (de restos frágiles).

- **Mantenimiento predictivo:** El mantenimiento predictivo son una serie de acciones técnicas que se aplican con el objetivo de detectar posibles fallas y defectos de maquinaria en las etapas incipientes para evitar que estos fallos se manifiesten en uno más grande durante su funcionamiento, evitando que ocasionen paros de emergencia y tiempos muertos.
- **MTBF:** Es el tiempo promedio entre fallas.
- **MTTR:** Es el tiempo promedio de reparación entre fallas
- **Orden de trabajo:** Documento escrito que la empresa hace entrega a la persona que corresponda y que contiene una descripción pormenorizada del trabajo que debe llevar a cabo.
- **Patrón de pista:** Cambio en el aspecto de parte de un área del rodamiento, debido al contacto con otra parte del rodamiento, por ejemplo, elementos rodantes y un camino de rodadura.
- **Picaduras:** Término genérico utilizado para describir un tipo de daño local que se observa como pequeños agujeros, cráteres o cavidades. Las causas de las picaduras incluyen fatiga iniciada en la superficie, corrosión y erosión eléctrica.
- **Plan de mantenimiento:** Un plan de mantenimiento es el conjunto de tareas de mantenimiento programado, agrupadas o no siguiendo algún tipo de criterio, y que incluye a una serie de equipos de la planta, que habitualmente no son todos.
- **Servidores de red:** Un servidor de red es un ordenador que ofrece el acceso a los recursos compartidos entre las estaciones de trabajo u otros servidores conectados en una red informática. Los recursos compartidos pueden incluir acceso a hardware, como discos duros, impresoras, etc. software, servicios de email o acceso a internet.
- **Tiempo muerto:** Se refiere al tiempo que se deja de producir un bien o servicio por problemas de parada de planta industrial.



## PRÓLOGO

En una empresa textil se han suscitado problemas recurrentes en el mantenimiento de sus motores industriales debido a las constantes fallas provocando un aumento en costos de mantenimiento y producción e inclusive afectando la seguridad del personal de operaciones. Por ello, la Gerencia de Operaciones ha decidido invertir en el uso de tecnologías más sofisticadas, con un personal administrativo y técnico capacitado en la aplicación de nuevos métodos y herramientas de soporte en las operaciones de mantenimiento y de esta manera se tomen decisiones con eficacia técnica y económica para alcanzar una alta confiabilidad de los motores eléctricos con todos los estándares de calidad y seguridad. La Gerencia de Operaciones aplicó nuevos métodos y herramientas para la Gestión de Mantenimiento Industrial con una visión más integral entre los distintos departamentos. El estudio del análisis vibracional de los motores eléctricos se planteó como una solución a consecuencia de las frecuentes fallas de los motores debido a un exceso de vibración mecánica provocado, por lo general, a fallas en los rodamientos que ocasionan paradas de los procesos de producción de la Planta. El mantenimiento predictivo de las vibraciones mecánicas de los motores eléctricos permitió disminuir el tiempo promedio entre fallas (o MTBF, del inglés *Mean Time Between Failures*) del motor y de esta manera se ha incrementado las ganancias de la organización. Este trabajo incorpora el desarrollo de las bases teóricas y prácticas del diagnóstico de las vibraciones mecánicas, en la cual se describe los sistemas e instrumentos más recientes, empleados para captar y procesar la información mediante un software y visualizar los valores de las mediciones y graficas del comportamiento de las magnitudes de los parámetros en un monitor en tiempo real.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

La Gerencia de Operaciones de la empresa textil ha decidido desarrollar el mantenimiento predictivo a los motores eléctricos de corriente alterna que permite anticipar las fallas provocadas por las excesivas amplitudes de las vibraciones mecánicas. Este mantenimiento predictivo junto a las acciones preventivas correspondientes permite aumentar las horas de vida útil de los motores hasta el mantenimiento programado y no afectar a la productividad de la planta. En la actualidad existen dispositivos de monitoreo como el *Vibraspec 800* que permite realizar mediciones de los parámetros de vibración y verificar si el nivel de vibración del motor está en el rango permisible o aceptable según la Norma ISO 10816-3. Sin embargo, estas mediciones directas no resultan ventajosas para inspecciones en plena operación de los motores. Por ello, se ha aplicado un monitoreo continuo inalámbrico en tiempo real para el análisis de vibraciones mediante el software *Maintraq online* que permite el contacto indirecto del operador con el motor favoreciendo la disminución del grado de riesgos a atrapamiento del rodillo en plena marcha. Este monitoreo inalámbrico se ha establecido para una distancia aproximada de 200m entre la ubicación del motor y el computador del taller de mantenimiento.

## 1.1 Generalidades:

### 1.1.1 Antecedentes

El análisis de vibraciones mecánicas fue estudiado hace muchos años por filósofos y matemáticos conocidos como se mencionan a continuación:

- **Pitágoras (570 – 497 AC):**

Pitágoras desarrolló la teoría de los números, de la música y la armonía en donde afirmaba la relación entre estas dos ciencias. Se puso a experimentar, haciendo vibrar varias agujas del mismo espesor y tensión, pero de distinta longitud, de esta forma pudo determinar que las notas dependían de la frecuencia de la vibración, concluyendo que la música no era más que una relación matemática de las vibraciones medidas según intervalos.

- **Aristóteles (374-355 AC):**

Este filósofo trabajó con las leyes del movimiento, escribió el primer escrito relacionado con la acústica llamado *On Acoustic*.

- **Galileo Galilei (1564-1642):**

Galileo encontró la relación existente entre la longitud de cuerda de un péndulo y su frecuencia de oscilación y además encontró la relación entre la tensión, longitud y frecuencia de vibración de las cuerdas.

- **Daniel Bernoulli (1700-1782):**

Bernoulli estudió la forma de vibrar de algunos cuerpos usando el principio de superposición de armónicos. Bernoulli con ayuda de Euler realizaron estudios de temas relacionados a la mecánica de los medios flexibles y elásticos, en particular, los problemas de pequeñas oscilaciones de cuerdas y vigas.

- **Joseph Fourier (1768 – 1830):**

Fourier realizó una importante aportación de una herramienta matemática usada para analizar funciones periódicas en la cual se puede expresar como una suma de senos y cosenos; que permitió facilitar el estudio y análisis de las vibraciones mecánicas, ya que en base al algoritmo de la serie de Fourier trabajan los modernos analizadores de vibración.

En la era moderna, donde los avances tecnológicos son más sofisticados, grandes aportaciones matemáticas y métodos de análisis vinieron a resolver algunos problemas en el campo de las vibraciones mecánicas.

- **Stodola Aurel (1859 – 1943):**

Stodola realizó aportaciones importantes relacionadas con las vibraciones de membranas, vigas y placas. En la actualidad el análisis de vibraciones mecánicas se realiza a través de instrumentos llamados analizadores de espectros como el vibrómetro, cuyos resultados están basados en la teoría de espectros de Fourier.

## **1.2 objetivos del del problema de investigación**

La empresa Textil dispone de motores eléctricos de corriente alterna que operan diariamente durante las 24hrs para procesar la materia prima (polipropileno), por lo tanto, requiere de motores de alta confiabilidad de operación, de tal manera que el proceso de la planta no paralice y alcance los objetivos en sus indicadores de producción, calidad y seguridad de la empresa, de tal forma que permita brindar un servicio con todos los estándares de calidad. El objetivo en la gestión de mantenimiento es mantener los activos con una alta confiabilidad mediante un correcto mantenimiento preventivo.

Los problemas o fallas que presentan los motores eléctricos AC que operan diariamente sin parar es debido a un desgaste de los rodamientos o deterioro de su tiempo de vida útil por diferentes factores que se describirán en el marco teórico del presente trabajo.

El rodamiento de toda máquina rotativa actúa como guía y soporte de una carga externa, por ejemplo, como los rodillos de banda transportadora que pesan alrededor de 500Kg que dispone la planta textil.

La organización decidió implementar un mantenimiento predictivo a través del monitoreo continuo de la vibración mecánica que brinde información en tiempo real acerca del estado de los rodamientos para verificar y programar el cambio de este elemento en una parada de planta programada.

La empresa textil dispone de motores de 50HP de las cuales algunas se ubican en zonas de alta temperatura como la zona de Extrusión, cuyas máquinas operan a temperaturas de aproximadamente de 250° C, el cual resulta peligroso para el operador realizar mediciones de las vibraciones de forma directa debido a la exposición al calor y someterse a riesgos de quemaduras o atrapamiento por la faja transportadora.

La empresa prioriza la seguridad de sus colaboradores. Por esta razón más, se ha desarrollado este proyecto propuesta por la jefatura del área de Mantenimiento de la planta, cuyo costo beneficio de este proyecto es satisfactorio porque permite una mayor inspección o seguimiento del estado de vibración de los motores, de esta manera anticipar una futura falla

para lograr reducir los tiempos muertos de producción por paradas no programadas o los cuellos de botella en algunos procesos de productivos de la planta , con esta implementación del proyecto se consiguió de alguna manera brindar mayor seguridad al personal operativo, ya que ahora el operador solo visualiza en una pantalla instalada en el taller de Mantenimiento los parámetros de dichas vibraciones mecánicas, permitiéndole interpretar esta información respecto al estado de estas vibraciones y examinar la tendencia de crecimiento para luego estratégicamente programar el mantenimiento correctivo del motor en una parada de mantenimiento programado por la jefatura del área.

La comunicación establecida es inalámbrica mediante el uso de los *Access point* configurado en modo punto a punto para un alcance de 200m, con buena capacidad de envío fidedigno de información de las señales de los acelerómetros instalados en dos motores que serán procesadas por el dispositivo *Vibraspeak 800* y mediante el software *Maintraq* que permite visualizar los espectros de las vibraciones mecánicas producidas y evaluar si los excesos de vibración es debido a problemas tales como: desgaste en los rodamientos o ejes, desbalance, desalineación, contaminación, holgura, etc., son modos de falla que se explicará a detalle más adelante y analizar las características de sus respectivos espectros. Si bien las vibraciones no se pueden eliminar, pero si se puede controlar hasta un nivel permisible o satisfactorio de operación según indica la norma ISO 10816.

### **1.2.1 Problema a resolver**

El sistema de vibraciones de las máquinas rotativas de la planta textil era inadecuado por lo que se propone implementar un mantenimiento predictivo mediante un monitoreo continuo de las vibraciones mecánicas.

### **1.3 Objetivo de estudio**

#### **1.3.1 Objetivo general:**

El objetivo general del presente trabajo es:

Diseñar e implementar un sistema de monitoreo inalámbrico de vibraciones mecánicas en motores eléctricos en una planta textil.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos para el desarrollo de este trabajo son:

1. Implementar el sistema de monitoreo inalámbrico que permita anticipar las fallas mecánicas en motores eléctricos AC.
2. Desarrollar el programa de control basado en *Maintraq en línea* para analizar el espectro de vibración de cada motor.
3. Elaborar el programa de estados de operación de cada motor (bueno, alerta o crítico) para tomar decisiones de mantenimiento correctivo del motor.

Objetivos específicos	Indicador de logros	Métricas
1. Implementar el sistema de monitoreo inalámbrico que permita anticipar las fallas por vibraciones mecánicas en motores eléctricos trifásicos.	Medición del indicador <i>MTBF</i> que determina el Tiempo promedio entre fallas de una máquina debido a vibraciones mecánica.	Horas
2. Desarrollar el programa de control basado en <i>Maintraq en línea</i> para analizar el espectro de vibración de cada motor AC.	Medición de las amplitudes de la velocidad y aceleración envolvente de las vibraciones mecánicas a través del espectro usando el software <i>Maintraq</i> .	mm/s gE
3. Elaborar el programa de estados de operación de cada motor (bueno, alerta o crítico) para tomar decisiones de mantenimiento correctivo del motor	El software permitirá enviar señales de alerta cuando las vibraciones sobrepasa los valores permisibles según la norma ISO 10816.	Indicador del estado de vibración mecánica en la pantalla de la PC a través de los colores verde, amarillo y rojo indicando los estados bueno, alerta y crítico respectivamente.

## 1.4 Antecedentes investigativos

El alcance de la norma ISO 15243 se limita a los problemas de vibración mecánica por lo general se deben a daños en el rodamiento a través de los cambios de aspecto que ocurren durante la vida útil de este elemento rotativo.

Existen diversos fabricantes de rodamientos como el grupo SKF que analiza e investiga la calidad de los rodamientos considerando los siguientes aspectos.

### a) Metalurgia

- Se evalúan todos los tipos de tratamiento térmico.
- Ensayos de anomalías de la microestructura, redes de carburo y segregaciones, tamaño de grano, flujo de fibra, defectos de superficie, templabilidad y otros parámetros metalúrgicos.
- Pruebas de dureza, determinación de la resistencia a la rotura, límite elástico y estiramiento, pruebas de componentes y otros parámetros técnicos.
- Soporte para desarrollar especificaciones de materiales, ensayos y tratamiento térmico.
- Servicio de ensayo por inmersión ultrasónica (aros completos, rodillos, etc.)



Fig. 1.1: Evaluación de microestructuras

Fuente "Daño de rodamientos y análisis de fallas" PUB BU/I3 17186 ES febrero 2017



Fig. 1.2: Preparación muestras de material

Fuente "Daño de rodamientos y análisis de fallas" PUB BU/I3 17186 ES febrero 2017



Fig. 1.3: Banco de pruebas ultrasónicas

Fuente: "Daño de rodamientos y análisis de fallas" PUB BU/I3 17186 ES febrero 2017



Fig. 1.4: Evaluación de limpieza (análisis de contaminación)

Fuente: "Daño de rodamientos y análisis de fallas" PUB BU/I3 17186 ES febrero 2017



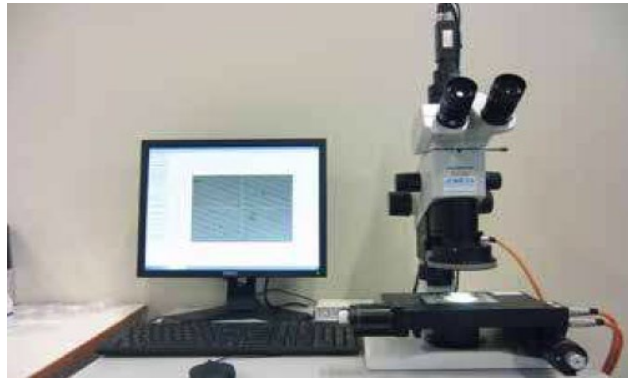


Fig. 1.5: Análisis de contaminación del rodamiento

Fuente: “Daño de rodamientos y análisis de fallas” PUB BU/I3 17186 ES febrero 2017

### **b) Análisis de falla y desempeño**

Análisis de fallas de rodamientos y otros componentes de producción (p.ej. soportes, árboles de levas), bancos de prueba, etc.

### **c) Análisis de metalografía y ensayos de materiales.**

- Microanálisis de partículas y contaminación de rodamientos, capas y recubrimientos reactivos.
- Análisis de respuesta de material basado en difracción de rayos x (XRD) de los rodamientos de bancos de prueba o del campo, para identificar el mecanismo y el avance de la carga de material.

### **d) Análisis de la composición química y propiedades**

- Evaluación de las propiedades físicas y químicas de los lubricantes, polímeros y materiales de sellos.
- Ensayos de grasas y aceites para determinar la vida remanente de la grasa y los niveles y tipos de contaminación.
- Ensayo de la composición química de los metales por espectrometría de emisión óptica, fusión de gas inerte o métodos de combustión.
- Evaluación de conservadores y recubrimientos.
- Ensayo de compatibilidad de lubricantes, polímeros y materiales de sellos.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

En este capítulo se describe el marco teórico relacionado a las etapas de la gestión de mantenimiento que permite comprender el desarrollo del mantenimiento predictivo y proactivo. Adicionalmente se desarrolla también la teoría de las vibraciones mecánicas y de la transformada de Fourier para el estudio fundamental del análisis vibracional en motores eléctricos de corriente alterna.

#### **2.1 Marco Teórico**

El Mantenimiento de los motores eléctricos AC presentan diferentes etapas, desde la fabricación de herramientas e instrumentos básicos para la reparación de las máquinas hasta el uso de la tecnología que permite recabar e interpretar la información continua del estado de vibración de los motores eléctricos.

##### **2.1.1 Etapas de la Gestión de Mantenimiento**

###### **a) Etapa I: Fabricación de herramientas para los mantenimientos correctivos**

Durante la etapa I, aparecen las primeras acciones de fabricación de herramientas para iniciar con las actividades de mantenimiento netamente correctivo: “hasta que falle la máquina”.

###### **b) Etapa II: Reclutamiento del personal especializado.**

En esta etapa se contrata o se entrena al personal especializado en mecánica, electricidad, mecatrónica, neumática, electrónica, etc., con la finalidad de realizar las acciones de mantenimiento correctivo, procurando corregir la falla de manera eficiente.

En la etapa II también se establecen las órdenes de trabajo, los almacenes de repuestos e insumos de mantenimiento. Surgen las primeras informaciones que luego se constituyen en un sistema de información. Se desarrollan además las técnicas y las tecnologías propias de una empresa, etc.

Las fallas imprevistas se convierten en el principal problema de los procesos de producción, debido a que impiden el desarrollo normal de la actividad. El objetivo principal de esta fase consistió en solucionar las paradas repentinas de las máquinas mediante una gestión de mantenimiento planificado en cuanto a las acciones de prevención o predicción de fallas y por ende, la empresa adquiere el conocimiento y la destreza para diferenciar las acciones propias de mantenimiento, antes y después de la falla. La planificación de mantenimiento incluye el uso de técnicas y tecnologías propias de la prevención y predicción, tales como rutinas de inspecciones, planes preventivos, mediciones técnicas, valoración de condición de estado de los equipos, ensayos no destructivos, registro de datos técnicos, monitoreo de equipos, reposición de elementos antes de que entren en estado de falla. Control de la vida útil de los elementos, medición de la funcionalidad de los dispositivos, análisis de vibraciones, ajustes de función antes de la falla, etc.

La etapa II permite distinguir entre las acciones correctivas, modificativas, preventivas y predictivas. Las dos primeras son posteriores a la falla y las últimas son previas al estado de no funcionalidad del equipo. En esta etapa solo se practica el mantenimiento correctivo o reparativo. Las piezas y equipos que componen la máquina se llevan al límite de su vida útil hasta la falla y la recuperación de la función inicial de la máquina simplemente reemplazando la pieza que no funciona, sin aplicar un mayor análisis sobre la causa raíz del problema, por esta razón se establecen los planes de mantenimiento, las órdenes de trabajo programadas, la implementación de los mecanismos de manejo y recolección de datos de una forma sencilla, completa y eficiente del historial de operación de la máquina, que posteriormente se convierten en todo un sistema de información.

### **a) Etapa III: Aplicación de metodologías para la Gestión de Mantenimiento**

Esta etapa tiene un enfoque más estratégico para la prevención de fallas. Las empresas aplican una metodología en su gestión para tomar acciones de planificación, programación y control en el mantenimiento de los motores u otras máquinas, podrán también establecer indicadores que le permita evaluar si las acciones ejecutadas son beneficiosas para sus empresas. En esta etapa se adopta una táctica de mantenimiento, entre las que se destacan:

TPM (Roberts, 2008) especialmente enfocada a mejorar la productividad, RCM (Smith, 1992; Moubray 2004), MCC, PMO, Proactivo, mantenimiento centrado en los riesgos (Tavares, 2005 y Williamson, 2008), mantenimiento centrado en habilidades y competencias, etc. Se interesan por maximizar la explotación y la combinación de sus factores productivos de la empresa. En tanto que el mantenimiento se constituye como una unidad independiente de producción, de apoyo logístico a operación y manufactura, dado que es normal que en las anteriores fases I y II, aun depende del área operativa en cuanto a nivel jerárquico.

#### **b) Etapa IV: El uso de indicadores en la Gestión de Mantenimiento.**

En la etapa IV se describe el uso de indicadores de forma cuantitativa que permiten evaluar la gestión del área de mantenimiento para cumplir con los objetivos planteados por la empresa. En esta fase, la empresa se interesa en evaluar resultados mediante indicadores y sistemas de costos destinados al mantenimiento, como el LCC (*Life Cycle Costing*). En esta etapa se implementa también el registro histórico de fallas y reparaciones de las máquinas.

En este nivel, el área de producción pretende mejorar su productividad y su mantenimiento utilizando las estrategias con las cuales puede llegar a controlar en forma integral y específica todas las actividades de mantenimiento. El resultado del desarrollo de las etapas anteriores condujo a establecer la Teratecnología, también conocida como mantenimiento integral logístico.

La Teratecnología es un nuevo concepto que relaciona tecnología y economía para incrementar la fiabilidad y optimización de los recursos del mantenimiento industrial, para tal fin hace uso de varias ciencias y de diversas áreas de la empresa, como: logística, administración, finanzas, ingeniería, los costos de fabricación y sostenimiento de equipos, los ciclos de vida de los equipos y de la tecnología, la construcción, etc. En especial utiliza la logística, la ingeniería, a partir de que la competitividad se sustituye como parámetro primordial en los negocios por la innovación tecnológica.

Los directivos y todas las demás áreas corporativas de la empresa se involucran en un solo objetivo: obtener la mayor eficiencia productiva y la máxima reducción de costos. En este sistema se establecen metas alcanzables a todas las áreas involucradas, además de detectar las necesidades reales de desarrollo de personal y capacitación, con el fin de que los miembros del área de mantenimiento alcancen niveles adecuados de calificación.

### **c) Etapa V: Capacitación del personal operativo.**

En esa etapa se interesan por el desarrollo de habilidades y competencias de todo el personal técnico y administrativo, de tal forma que se planifique una estrategia de mantenimiento integral basada en procesos, en las que se analicen las actividades, procesos y el macroproceso de mantenimiento, mediante la implementación de índices e indicadores sobre la calidad, el tiempo y los costos de mantenimiento. El área de producción también implementa metodologías, como *lean producción* o producción ajustada a la demanda, manejo de inventarios, sistemas de control, etc. Y todas aquellas mejoras prácticas que aumenten la productividad, la rentabilidad, la competitividad, la utilización de innovación tecnológica; todo en base a una producción ajustada a la demanda requerida.

Las empresas que pasan por todas estas etapas descritas anteriormente alcanzan tal grado de conocimiento, experiencia, desarrollo de tecnologías propias y dominio de modernas técnicas de mantenimiento y producción, donde estas dos áreas empiezan a trabajar en forma conjunta y alineada por encima de cualquier obstáculo propio con el objetivo de optimizar el bien común que las relaciona, que es la máquina, pues deja de mirarla como un pasivo que hay que utilizar para producir y mantenerlo para que se pueda utilizar, y pasa a entenderlo como un activo que genera ingresos para la empresa.

### **d) Etapa VI. Enfoque a la máquina como un activo de la empresa**

En esta etapa la máquina es considerada por todos los colaboradores como un activo de la empresa, es decir, un elemento importante que genera utilidades a la organización. Para entender a la máquina como un activo es fundamental diferenciar entre un bien activo y pasivo, que conceptualmente el primero de ellos se asocia a la producción de riqueza, mientras que el segundo se refiere a inversión o gasto (Kiyosaki) bajo esta premisa se influye el mantenimiento en cuanto a la forma de visualizar la utilización de los activos.

La gestión de activos empresariales busca gestionar todo el ciclo de vida de los activos físicos de una organización con el objetivo de maximizar su valor. Abarca procesos como el diseño, construcción, explotación, mantenimiento y reemplazo de activos e infraestructuras. La gestión de los activos puede mejorar su rendimiento, reducir costes, extender su vida útil y mejorar el retorno de inversión de los activos.

El mantenimiento industrial en sus inicios se enfocó netamente al mantenimiento correctivo, que generaban considerables gastos. Posteriormente se pasa a evitar fallas y paradas

imprevistas en los equipos mediante acciones preventivas, gobernadas básicamente por periodos de tiempo, para las reposiciones o cambio de repuestos.

Con estos criterios se determina una parada general de la maquina donde se realiza una inspección general y se desarrollan diferentes actividades como limpieza, ajustes y reparaciones. Todo esto se realiza en aquella época inicial a partir de la experiencia o de las recomendaciones de los fabricantes.

A mediados del siglo XX empiezan a aparecer otras formas de organización del mantenimiento en las cuales la falla de una maquina no solo debe interesarle al área de mantenimiento, sino también a toda la estructura organizacional para que participen de una forma integral y brindar una respuesta rápida ante cualquier eventualidad de falla de cualquier máquina. Para ello las tácticas de mantenimiento productivo y el mantenimiento centrado en la confiabilidad que le dan toda la importancia a la organización y planeación. En el ámbito mundial aparece el concepto según el cual el mantenimiento ya no depende de la producción, sino que se establece como una unidad independiente, pues deja de ser un departamento gestor de pasivos y causante de gastos.

La aparición del TPM, el cual integra al personal de producción hacia la actividad del mantenimiento para procurar una mejor productividad, marca un hito en la aparición de las tácticas que luego evolucionan hacia el mantenimiento basado en la confiabilidad, proactivo, reactivo, clase mundial, centrado en objetivos que se desarrollan hasta la actualidad. Los japoneses integran los conceptos desarrollados anteriormente y los asocian a la necesidad de ocupar el tiempo ocioso del profesional de operaciones en actividades sencillas y bien definidas de mantenimiento. Eso deja un tiempo disponible a sus profesionales para realizar tareas de análisis y desarrollo de ingeniería de mantenimiento, que permiten evaluar proyectos, las características de los equipos, instalaciones, así como los métodos y procesos adoptados. Las ventajas del mantenimiento productivo total son sus aportes de normas, reglas, usos, costumbres y pilares bien definidos y reconocido como la más antigua y básica de las tácticas de mantenimiento.

- **Importancia económica y tecnológica de mantenimiento**

La etapa VI de mantenimiento, bajo la metodología de gestión de activos, la posiciona como estratégica dentro de la organización, lo cual la convierte en un área clave, donde se deben incrementar todos los esfuerzos posibles de la empresa orientado a la búsqueda de beneficios económicos de corto y medianos plazos.

El departamento de mantenimiento, desarrollado como una unidad estratégica de negocios, generadora de ingresos, se ha constituido en la meta durante las últimas décadas en varios países de Europa y Estados Unidos. En este aspecto muchos autores e industriales investigan al respecto, al tratar de cambiar el enfoque cerrado de mantenimiento orientado a producción. Esta situación se ve influenciada positivamente por el aseguramiento de la calidad en mantenimiento, en producción, en las demás divisiones industriales y técnicas de las empresas por la necesidad de diseñar planes estratégicos especiales de mantenimiento en concordancia con los de la organización.

- **Función y objetivo de Mantenimiento.**

Según Albert Ramond y Asociados (EE. UU), la función principal de mantenimiento es maximizar la disponibilidad que se requiere para la producción de bienes y servicios, al preservar el valor de las instalaciones. Para minimizar el deterioro de los equipos, lo cual se debe lograr con el menor costo posible y a largo plazo.

El objetivo de mantenimiento es: "... conseguir un determinado nivel de disponibilidad de producciones en condiciones de calidad exigible, al mínimo costo, con el máximo nivel de seguridad para el personal que lo utiliza y lo mantiene y con una mínima degradación del medio ambiente. Al conseguir todos estos puntos se está ante una buena gestión integral de mantenimiento".

En síntesis, la misión principal de mantenimiento es garantizar que el parque industrial esté con la máxima disponibilidad cuando se requiera con la máxima confiabilidad, durante el tiempo solicitado para operar, con las velocidades requeridas para producir bienes o servicios que satisfagan sus requerimientos oportunos al menor costo posible. Y con los mayores índices de productividad y competitividad posibles para optimizar su rentabilidad, pero para alcanzar este objetivo las áreas de producción y mantenimiento debe girar en torno a un activo común (máquina) como muestra la Fig. 2.1, el cual debe alcanzar una alta confiabilidad de operación.



Fig. 2.1: Relaciones y leyes que gobiernan a un sistema de Mantenimiento

Fuente: Libro de mantenimiento industrial. Autor: Mora Gutiérrez

### 2.1.2 Tipos de Mantenimiento:

- **Mantenimiento correctivo:**

El mantenimiento correctivo es el conjunto de tareas destinadas a la corrección de las averías o fallas de la máquina. En este tipo de mantenimiento se plantea la intervención de la máquina solamente cuando presente alguna falla crítica. Es por ello, que el mantenimiento de las máquinas bajo este concepto resulta muy costoso y deficiente. Es por ello que hubo la necesidad de querer anticipar las fallas para disminuir las pérdidas económicas y aumentar la disponibilidad de la máquina.

- **Mantenimiento preventivo:**

A partir de las necesidades de mejora en cuanto a costos derivados de las bajas disponibilidades de la máquina y de las paradas no programadas de producción llevaron a los gestores de mantenimiento a programar revisiones periódicas con el objeto de mantener las máquinas en el mejor estado posible y reducir su probabilidad temprana de fallo.



- **Mantenimiento predictivo**

El mantenimiento preventivo permite mejorar los tiempos medios entre fallas de una máquina, sin embargo, presenta una desventaja porque el planteo del mantenimiento es de manera genérica y no personalizada, por ejemplo, el mantenimiento preventivo a los automóviles es en función del kilometraje de recorrido, pero no se toma en cuenta algunos aspectos como la manera de conducir su vehículo cada persona, ya que cada conductor tiene una manera diferente de realizar los cambios del embrague, el control del estado del refrigerante, el aceite, filtros, bujes, discos de embrague, etc.. Estas incertidumbres que presenta el mantenimiento preventivo y con el desarrollo tecnológico e investigación, se desarrolló un nuevo concepto de mantenimiento basado en la condición o estado de la máquina. Este tipo de intervención se conoce como mantenimiento predictivo, y viene a suponer toda una revolución dada su filosofía de anticipación a la avería por medio del conocimiento del comportamiento de la máquina y de cómo debería comportarse, conociendo de este modo previamente qué elemento puede fallar y cuándo. Así se puede programar una intervención sin afectar al proceso productivo, con las consiguientes optimizaciones en costes de producción, mano de obra y repuestos. Se evitan de este modo grandes y costosas averías agilizando las intervenciones.

Las paradas de planta por el deterioro de los rodamientos eran un problema para la Gerencia de la empresa, ya que cuenta con numerosos motores eléctricos de hasta 50HP, como: ventiladores, inyectores de aire, rodillos cilíndricos de media tonelada. Todos los motores operando durante las 24hrs al igual que los rodillos de 10 toneladas por donde pasa la tela, en cuyos extremos se encuentran las chumaceras y rodamientos que actúan como soporte.

- **Mantenimiento proactivo:**

El mantenimiento predictivo permite anticipar la falla mediante mediciones de parámetros e identificar si algún elemento de la máquina puede fallar, sin embargo, no logra identificar la causa de la falla, esto conllevó a establecer el mantenimiento proactivo como complemento al mantenimiento predictivo, en la cual se interesa por identificar a través de métodos mediante el análisis de causa raíz de la falla para identificar la causa de la avería y de esta manera la falla no se vuelva recurrente, el mantenimiento proactivo o también conocido como fiabilidad de máquina analiza la causa raíz de la avería,

Las causas de las fallas más comunes en los motores eléctricos de la empresa son:

- Soporte de gran carga de operación.
- Fallas de rodamiento debido a desgaste mecánicos.
- Holgura por desgaste mecánico.
- Desalineación de ejes ya sea angular o paralelo.
- Calidad del material del rodamiento.
- Falta o cambio de lubricación a los rodamientos.
- Montaje incorrecto de los rodamientos.

Existen dos métodos de medición vibracional, la medición directa o manual, es decir, el analista predictivo mide directamente colocando el acelerómetro del instrumento al motor en las direcciones vertical, horizontal y axial tanto en la parte posterior donde se encuentra el ventilador como en la parte del acople al eje del motor. Sin embargo, existen algunas dificultades para aplicar este tipo de medición en algunas máquinas industriales ubicadas en zonas de difícil acceso o de condiciones no muy favorables, zonas como extrusión, por ejemplo, donde las máquinas operan a una temperatura de 220°C, el cual pone en riesgo la seguridad del técnico u operario responsable de las inspecciones o mediciones de vibración a estos motores. Por consiguiente, la jefatura de mantenimiento optó por el método de monitoreo inalámbrico de las vibraciones para un alcance de 200m. Este segundo método de medición inalámbrica, a diferencia del monitoreo manual, los sensores se encuentran ya fijados en el motor en diferentes direcciones (vertical, horizontal y axial), donde el operario observara los espectros en un monitor de forma segura, aumentando además la precisión de las medidas obtenidas.

El análisis de fallas vibracional de un motor se requiere conocer conceptos claves que ayudarán a entender el comportamiento en el tiempo de las magnitudes de los parámetros. Cada motor en su estado operativo presenta una vibración característica, y las fallas por ejemplo en el rodamiento se puede identificar observando los patrones de pista de los rodamientos, el cual también se conoce comúnmente como firma de vibración. Esta señal está totalmente condicionada por su diseño, fabricación, uso y desgaste de sus componentes. El ingeniero de mantenimiento a cargo de un equipo industrial debe tener la capacidad de plantear las posibles soluciones que no permitan que se repitan estas fallas al menos por un tiempo medio alto y por defecto permita un ahorro en costos del mantenimiento de los motores eléctricos.

### 2.1.3 Tipos de vibraciones mecánicas

#### i) Vibración simple

Las señales de vibración en el dominio del tiempo se representan como ondas sinusoidales. Estas señales son las más simples y son la representación de las oscilaciones puras. Una oscilación pura puede representarse físicamente con el siguiente experimento: imagínese una masa suspendida de un muelle como se muestra en la Fig. 2.2. Si esta masa es soltada desde una distancia  $A$ , en condiciones ideales, se efectuará un movimiento armónico simple que tendrá una amplitud. Ahora a la masa vibrante le añadimos un lápiz, y una hoja de papel en su parte posterior, de manera que pueda marcar su posición. Si desplazamos el papel con velocidad constante hacia el lado izquierdo se dibujará una onda como la representada en la Fig. 2.3. A continuación, se describen los parámetros que definen este tipo de vibración.

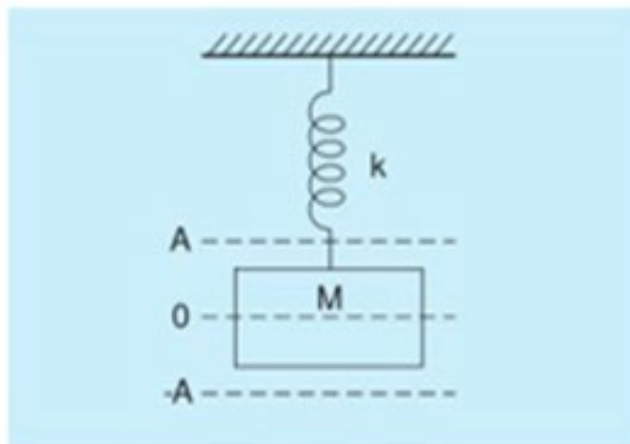


Figura 2.2: Masa suspendida de un muelle.

Fuente: Elaboración propia.

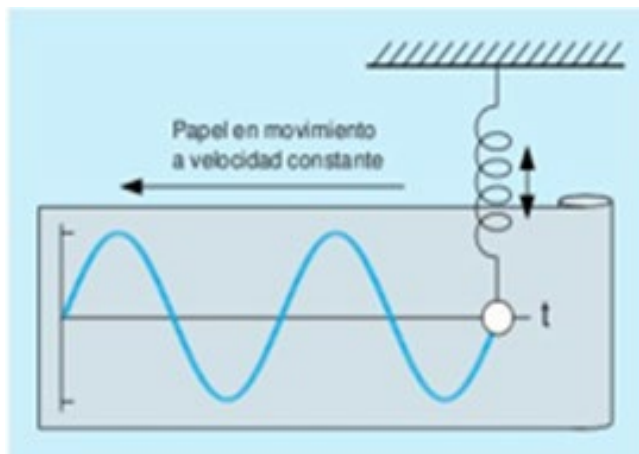


Figura 2.3: Movimiento armónico simple.

Fuente: introducción al análisis de vibraciones - Glen White.

### a) Amplitud

La amplitud desde el punto de vista de las vibraciones es la máxima distancia que puede recorrer una masa desde una posición de equilibrio (marcada como 0 en Fig. 2.2). Existen diversas formas de medir la amplitud de una onda como se puede ver en la Fig. 2.4. Podemos decir que el movimiento tiene una amplitud de pico de  $A$  mm, ya que sabemos que como la curva es simétrica también existe un movimiento de amplitud  $A$  mm en la dirección opuesta.

La tercera forma de describir la amplitud se denomina valor RMS. En el caso de una onda sinusoidal el valor RMS es igual a 0.707 del valor pico, pero esto es sólo válido en el caso de una onda sinusoidal. El valor RMS se utiliza para medir la energía de la forma de onda.

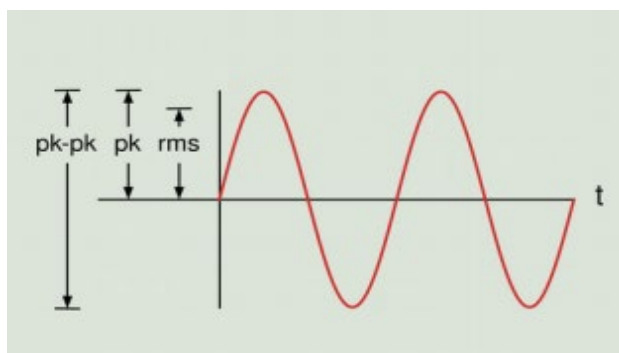


Fig. 2.4: Medidas de la amplitud en una onda

Fuente: Introducción al análisis de vibraciones. Autor: Glen White

**b) Frecuencia**

El tiempo que tarda la masa en ir y volver al punto A es siempre constante. Este tiempo recibe el nombre de periodo de oscilación y significa que el muelle completó el ciclo. El recíproco del periodo es la frecuencia la cual generalmente es dada en Hz (ciclos por segundo) o CPM (ciclo por minuto).

**c) Fase**

Es una medida de la diferencia de tiempo entre dos ondas sinusoidales. Aunque la fase es una diferencia de tiempo.

La diferencia en fase entre dos formas de onda se llama desfase o desplazamiento de fase. Un desplazamiento de fase de  $360^\circ$  es un retraso de un ciclo o un período completo de la onda, lo que realmente no es ningún desplazamiento. Un desplazamiento de  $90^\circ$  o un desplazamiento de  $\frac{1}{4}$  del periodo de la onda, etc. El desplazamiento de fase puede ser considerado positivo o negativo; eso quiere decir que una forma de onda puede estar retrasada respecto a otra o puede estar adelantada respecto a otra. Esos fenómenos se llaman retraso de fase y avance de fase respectivamente.

## ii) Vibración compuesta

Una vibración compuesta es la suma de varias vibraciones simples. La vibración de una máquina es una vibración compuesta de una serie de vibraciones simples asociadas a sus componentes internos en movimiento. Teniendo esto en cuenta, se deduce que la forma de onda de vibración de una máquina no es una señal sinusoidal, sino que puede llegar a ser muy compleja. Como se puede apreciar en la Fig. 2.5, dos señales de vibración de diferente frecuencia se suman formando una vibración compuesta. Incluso en casos tan sencillos como este, no resulta fácil obtener las frecuencias y amplitudes de las dos componentes a partir de la forma de onda resultante. La gran mayoría de las señales de vibración son mucho más complejas que pueden llegar a ser extremadamente difíciles de interpretar.

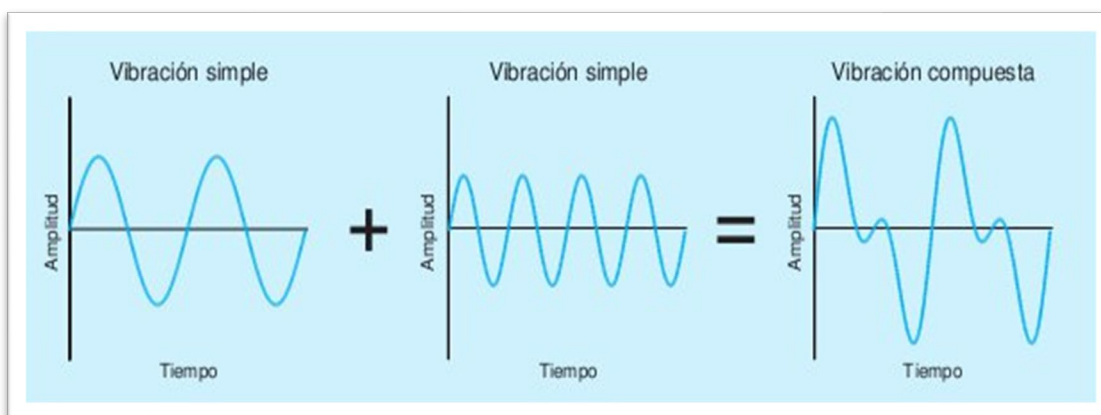


Fig. 2.5: Suma de vibraciones simples en el dominio del tiempo

Fuente: Introducción al análisis de vibraciones. Autor: Glen White

### 2.1.4 Ecuaciones de movimiento oscilatorio

La ecuación de movimiento armónico de un objeto se representa como una onda senoidal como se indica en la siguiente ecuación:

$$d = D \sin(\omega t) \dots \dots \dots (1.1)$$

Donde:

d: desplazamiento instantáneo

D: desplazamiento máximo o pico

t: tiempo

La velocidad instantánea del movimiento es igual a la proporción del cambio del desplazamiento respecto al tiempo.

$$v = \frac{d_d}{d_t} = wD \cos(wt) \dots \dots \dots (1.2)$$

Según esta función de la velocidad también es senoidal, pero ya que está descrita por el coseno, está desplazado 90°.

La aceleración del movimiento está definida como la proporción de cambio de la velocidad y se representa mediante la siguiente ecuación:

$$a = \frac{d_v}{d_t} = -w^2 D \sin(wt) \dots \dots \dots (1.3)$$

En esta ecuación se ve que la velocidad es proporcional al desplazamiento por la frecuencia, y que la aceleración es proporcional al cuadrado de la frecuencia. Es decir que un desplazamiento considerable y a una alta frecuencia, resultan velocidades muy altas, y se requieren niveles altos de aceleración. Por ejemplo, supongamos que un objeto vibrando está sometido a un desplazamiento de 0.1 pulgadas a 100Hz.

La velocidad es igual al desplazamiento por frecuencia:

$$v = 0.1 \times 100 = 10 \text{ in/s}$$

$$a = 0.1 \times 100^2 = 1000 \text{ in/s}^2$$

Un G de aceleración es igual a 386  $\text{in/s}^2$ , por lo tanto:

$$a = \frac{1000}{386} = 2.59G$$

Si se aumenta la frecuencia a 1000Hz

$$v = 0.1 \times 1000 = 100 \text{ in/s}$$

$$a = 0.1 \times 1000^2 = 100\,000 \text{ in/s}^2 \text{ o } 259G$$

A partir de estos resultados se observa que los problemas de vibración mecánica se hacen críticas cuando se aumenta las velocidades de operación de un motor de rodillo con el objetivo de elevar la productividad de la empresa. De ahí la importancia del monitoreo continuo del estado de las vibraciones mecánicas en los motores eléctricos.

### 2.1.5 Transformada de Fourier

Las vibraciones en el dominio del tiempo son señales representadas como una suma de ondas sinusoidales de distintas frecuencias. Sin embargo, existe un problema a la hora de realizar un diagnóstico: estas señales están cargadas de mucha información en forma muy compleja, por el cual prácticamente resulta imposible distinguir a simple vista sus comportamientos característicos. Existen otras formas para realizar un estudio de vibraciones, entre las cuales se encuentra analizar las señales en el dominio de la frecuencia. Para ello se emplea la gráfica de amplitud frente a frecuencia que es conocida con el nombre de espectro. Esta es la mejor herramienta que se tiene actualmente para el análisis de maquinaria. El matemático francés Jean Baptiste Fourier (1768 - 1830) fue quien encontró la forma de representar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas sinusoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos.

El analizador de espectros que trabaja con la transformada rápida de Fourier es capturar una señal de una máquina, calcular todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y por último mostrarlas de forma individual en una gráfica de espectro.

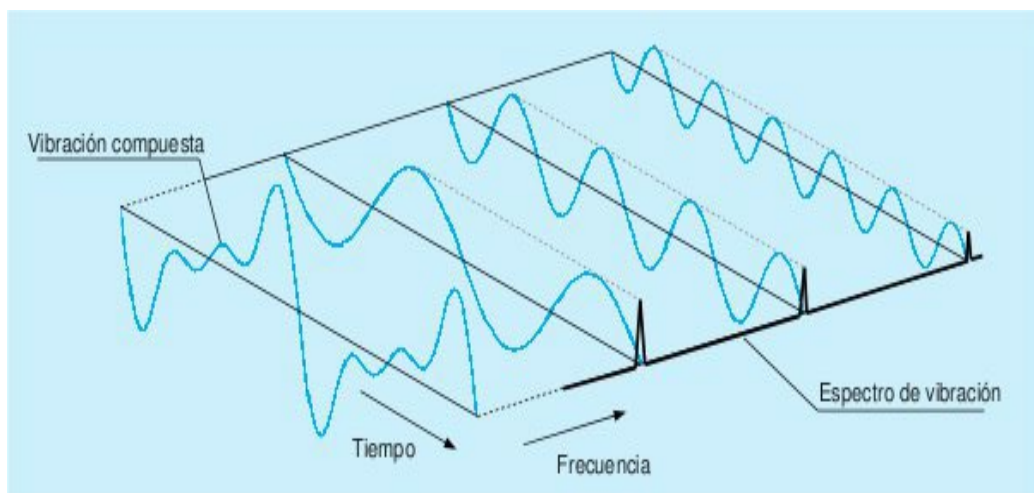


Fig. 2.6: Procesado FFT de una onda vibratoria compleja  
Fuente: Introducción al análisis de vibraciones. Autor: Glen White

En la Fig. 2.6 se visualiza la señal de vibración compuesta, capturada desde una máquina. La señal real expresada en el dominio del tiempo también se puede representar descomponiendo mediante una serie de señales sinusoidales de distintas frecuencias y mediante la



transformada de Fourier, se suman las vibraciones simples mostradas en la Fig. 2.7 y obtener la vibración compuesta de una señal.

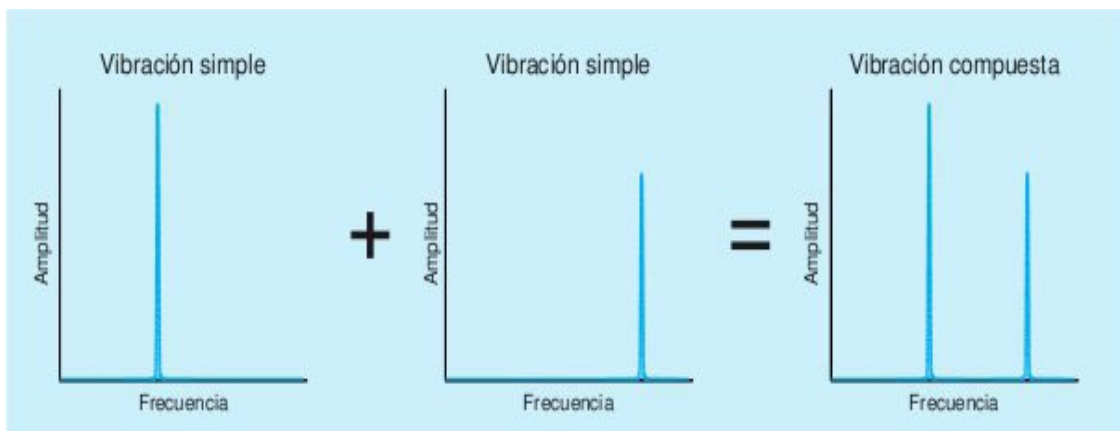


Fig. 2.7: Suma de vibraciones simples en el dominio de la frecuencia

Fuente: Introducción al análisis de vibraciones. Autor: Glen White

En la gráfica de la Fig. 2.6 la señal es representada en el dominio del tiempo en forma de onda, y la gráfica en el dominio de la frecuencia se representa como espectro.

La representación de la frecuencia supone una reducción de datos con respecto a la representación del tiempo. La información es exactamente la misma en ambos dominios, pero en el dominio de frecuencia es más compacta.

El desplazamiento se define como la distancia al objeto desde una posición de referencia o punto de equilibrio. Aparte de un desplazamiento variable, un objeto vibrando presenta una velocidad variable y una aceleración variable. La velocidad se define como la proporción de cambio en el desplazamiento y se mide por lo general en in/s (pulgadas por segundo) o mm/s. La aceleración se define como la proporción de cambio en la velocidad y se mide en g (la aceleración promedio debida a la gravedad en la superficie de la tierra) o mm/s<sup>2</sup>.

El desplazamiento de un cuerpo que está sometido a un movimiento armónico simple es una onda sinusoidal. También la velocidad y la aceleración del movimiento son ondas sinusoidales. Cuando el desplazamiento está en su máximo, la velocidad vale cero, porque esa es la posición en la que la dirección del movimiento se invierte. Cuando el desplazamiento vale cero (en el punto de equilibrio), la velocidad estará en su máximo. Esto quiere decir que la fase de la onda de velocidad se desplazará hacia la izquierda 90°, comparada con la forma de onda del desplazamiento. En otras palabras, la velocidad está adelantada 90° con respecto al

desplazamiento. La aceleración es la proporción del cambio de velocidad. Cuando la velocidad está en su máximo, la aceleración vale cero ya que la velocidad no cambia en ese momento. Cuando la velocidad vale cero, la aceleración está en su máximo en ese momento dado que es cuando más rápido cambia la velocidad. En la figura 13 la curva sinusoidal de la aceleración en función del tiempo se puede ver de esta manera como desplazada en fase hacia la izquierda respecto a la curva de velocidad y por eso la aceleración tiene un avance de 90 grados respecto a la velocidad y de 180° respecto al desplazamiento.

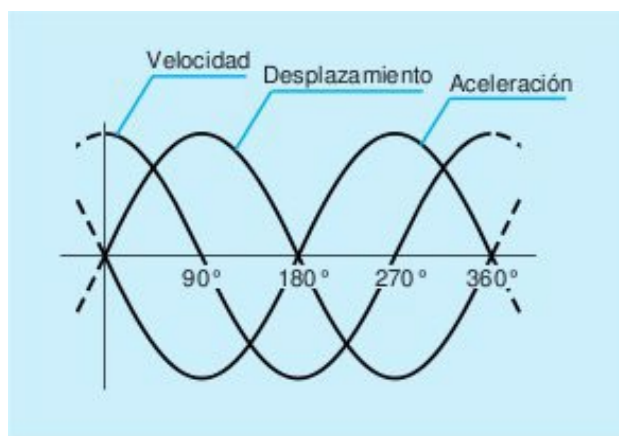


Fig. 2.8: Magnitudes en frecuencia

Fuente: Introducción al análisis de vibraciones. Autor: Glen White

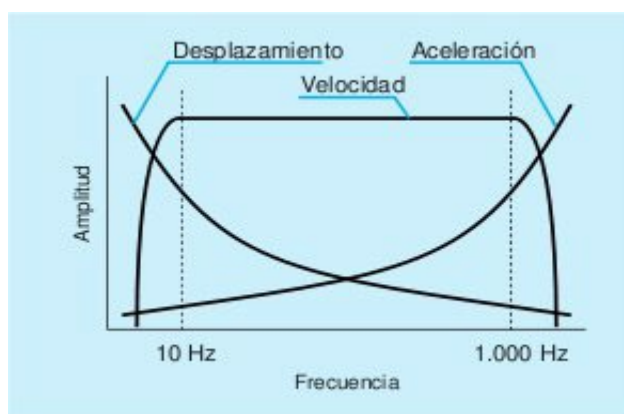


Fig. 2.9: Desfase entre magnitudes

Fuente: Introducción al análisis de vibraciones. Autor: Glen White

Las unidades de amplitud seleccionadas para expresar cada medida tienen gran influencia en la claridad con la cual se manifiestan los fenómenos vibratorios. Así, según se puede ver en la Fig. 2.9, el desplazamiento muestra sus mayores amplitudes en bajas frecuencias

(típicamente por debajo de 10 Hz), la velocidad lo hace en un rango intermedio de frecuencias (entre 10 y 1000 Hz), y la aceleración se manifiesta mejor a altas frecuencias (por encima de 1000 Hz).

En la Fig. 2.10 se observa el comportamiento de las distintas unidades de amplitud en todo el rango de frecuencias. La curva de desplazamiento es más difícil de leer a frecuencias más altas. En cambio, la curva de velocidad es más uniforme en todo el rango de frecuencias. Estas graficas muestran el comportamiento típico de la mayoría de las máquinas rotativas, sin embargo, en algunos casos las curvas de desplazamiento y aceleración son más uniformes. El parámetro de vibración que se utiliza más comúnmente en trabajos de diagnóstico de maquinaria es la velocidad.

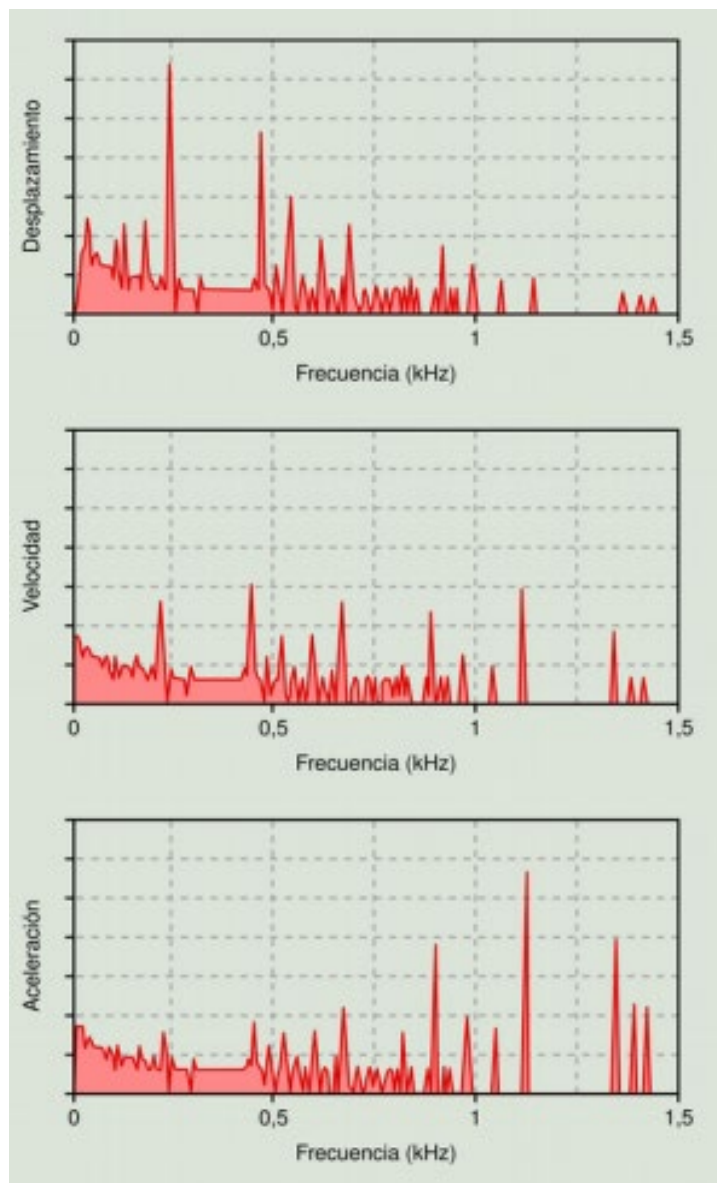


Fig. 2.10: Comportamiento espectral en cada magnitud de vibración

Fuente: Introducción al análisis de vibraciones. Autor: Glen White

Los conceptos de desplazamiento, velocidad y aceleración es fundamental para entender el análisis de vibraciones mecánicas, ya que son parámetros importantes para la toma de datos que permitirán obtener en forma metódica y precisa los datos de vibraciones de una máquina donde se ha detectado uno o varios problemas que acarrear las altas oscilaciones mecánicas e identificarlas para ver el momento más oportuno para el mantenimiento correctivo, es decir, que se dé solución al fallo y su costo económico sea el mínimo posible. Un fallo por vibración

puede localizarse al comparar las amplitudes de dichas vibraciones tomadas. En general una máquina que funciona correctamente tiene valores que suelen seguir una línea con tendencia ligeramente ascendente o constante. Cuando en algún momento los valores aumentan o la tendencia asciende de una forma inesperada, se puede pensar en la presencia de algún problema. Generalmente los valores de amplitud que se comparan son los de velocidad, una vez observado que esta ha aumentado de una forma inesperada, es importante comparar los valores de la energía de impulsos (g), estos valores indicarán la gravedad del problema. Así un fallo puede detectarse al encontrar una tendencia de velocidad ascendente de forma imprevista y unos valores del parámetro g altos. Valores altos de *spike energy* pueden ser indicadores en la mayor parte de los casos de problemas de rodamientos, acoplamientos y en los casos más extraños de problemas hidráulicos. Generalmente la máxima amplitud de vibración se da en los puntos donde se localiza el problema, aunque muchas veces la vibración es transmitida a otros puntos de la máquina, aunque en ellos no se encuentre el problema. El análisis de las gráficas puede indicar el tipo de defecto existente, pero muy pocas veces aparecen problemas únicos y por tanto espectros donde se refleje un defecto claramente. La experiencia y el conocimiento de la máquina son dos factores fundamentales a la hora de identificar la causa que produce una vibración importante. Es esencial una vez corregido el problema seguir la evolución de la reparación, de esta forma se conocerá si realmente existía el defecto, si estaba situado en el punto con máxima vibración y lo que es más importante, seguir la evolución tras la reparación y asegurarse que el problema ha desaparecido. El estudio de los datos de vibraciones, de sus espectros es la base para encontrar las causas y la forma de corregir el defecto que ellas indican. Sólo es importante prestar especial atención a las vibraciones que vayan acompañadas de otros efectos como ruido, pérdida de aceite o cualquier fallo, o bien los valores de amplitudes que sean excesivos comparados con otros en funcionamiento correcto, en esos casos se analizará la forma de los espectros que identificarán las causas de los problemas. Los problemas mecánicos más comunes en las máquinas que producen vibraciones son desequilibrio entre ejes, falta de alineación de acoplamientos, defectos en rodamientos y engranajes y problemas eléctricos. A continuación, se pueden ver la forma de identificar estos problemas analizando los datos y espectros de vibraciones.

El mantenimiento predictivo mediante el monitoreo de las vibraciones se puede explicar mediante el siguiente esquema que se muestra a continuación.

- **Desequilibrio:** Esta es una de las causas más probable de que exista vibración en las máquinas, en casi todos los elementos es fácil encontrar un pico en el gráfico de amplitud frente a frecuencia, que denote un pequeño desequilibrio. Como se puede apreciar en la Fig. 2.11 hay un pico en una frecuencia que coincide con la velocidad de giro.

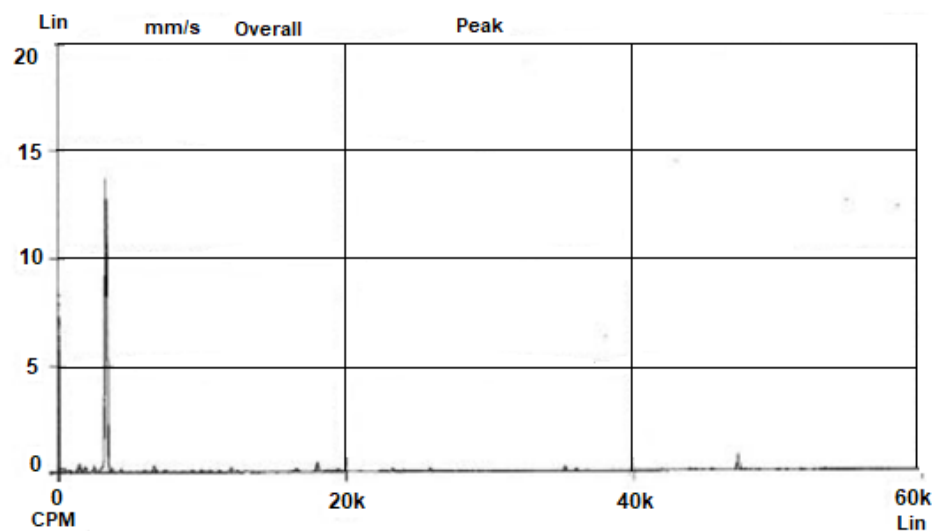


Fig. 2.11: Espectro de vibración de un problema de desequilibrio

Fuente: Análisis de vibraciones e interpretación de datos - Jesús A. Royo Gloria

La amplitud de la señal de vibración mecánica, es proporcional a la cantidad de desequilibrio. Normalmente, la amplitud de vibración es mayor en sentido radial (horizontal y vertical) en las máquinas con ejes horizontales, aunque la forma de la gráfica sea igual en los tres sentidos, para analizar datos de vibraciones es importante que el operario tenga experiencia y conocimiento del funcionamiento de la máquina. El desequilibrio no es la única causa posible, la desalineación también puede producir picos a esta frecuencia. Al aparecer vibraciones en esta frecuencia como otras causas posibles están los engranajes o poleas excéntricas, falta de alineamiento o eje torcido si hay alta vibración axial, bandas en mal estado, resonancia o problemas eléctricos.

## • Desalineación

La desalineación es un problema muy común debido a la dificultad que supone alinear dos ejes y sus rodamientos de forma que no se originen fuerzas que produzcan vibraciones. La forma de vibración de un eje torcido es similar a la de una mala alineación angular

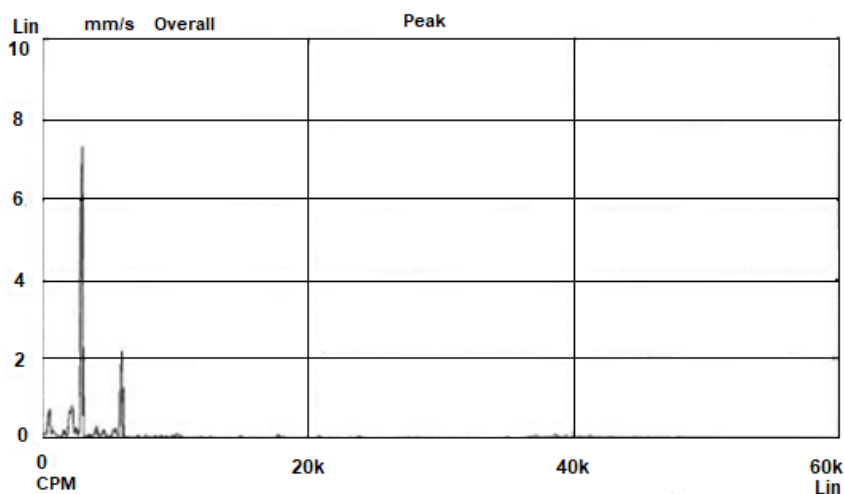


Fig. 2.12: Espectro de vibración por problema de desalineación

Fuente: Análisis de vibraciones e interpretación de datos Jesús A. Royo Gloria

La vibración debido a una desalineación se identifica mediante la gráfica de espectros cuya característica principal es que las amplitudes de vibración tienen frecuencias iguales a la velocidad de giro del eje. Un ejemplo del espectro de este problema se observa en la Fig. 2.12, la forma de la gráfica será similar en las tres direcciones, variando únicamente la amplitud. Este fallo puede presentar alta vibración en sentido axial además de radial. Así siempre que exista una alta vibración en axial y radial, y si la axial es mayor que la mitad de la radial puede existir un problema de desalineación o ejes torcidos. En la Fig. 2.13 se pueden ver los tres tipos básicos de desalineación, en paralelo, angular y una combinación de ambos. La falta de alineación en paralelo, figura 19, produce sobre todo vibración en dirección radial con frecuencia igual al doble de la velocidad de giro del eje.

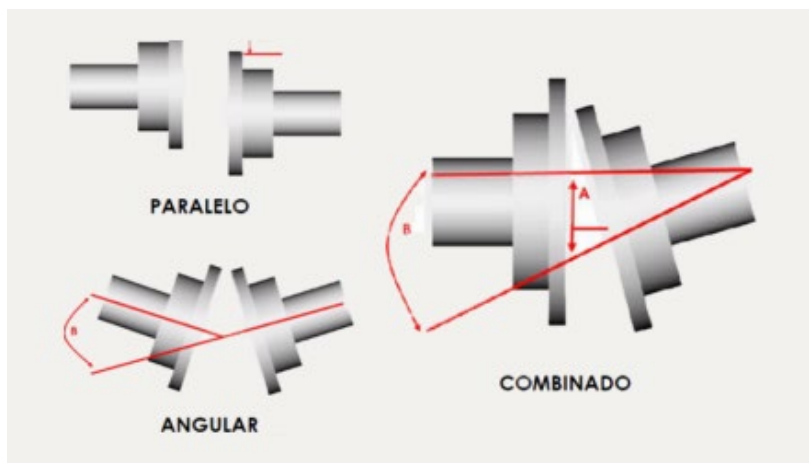


Fig. 2.13: Desalineación paralelo, angular y combinado

Fuente: Manual del fabricante SKF

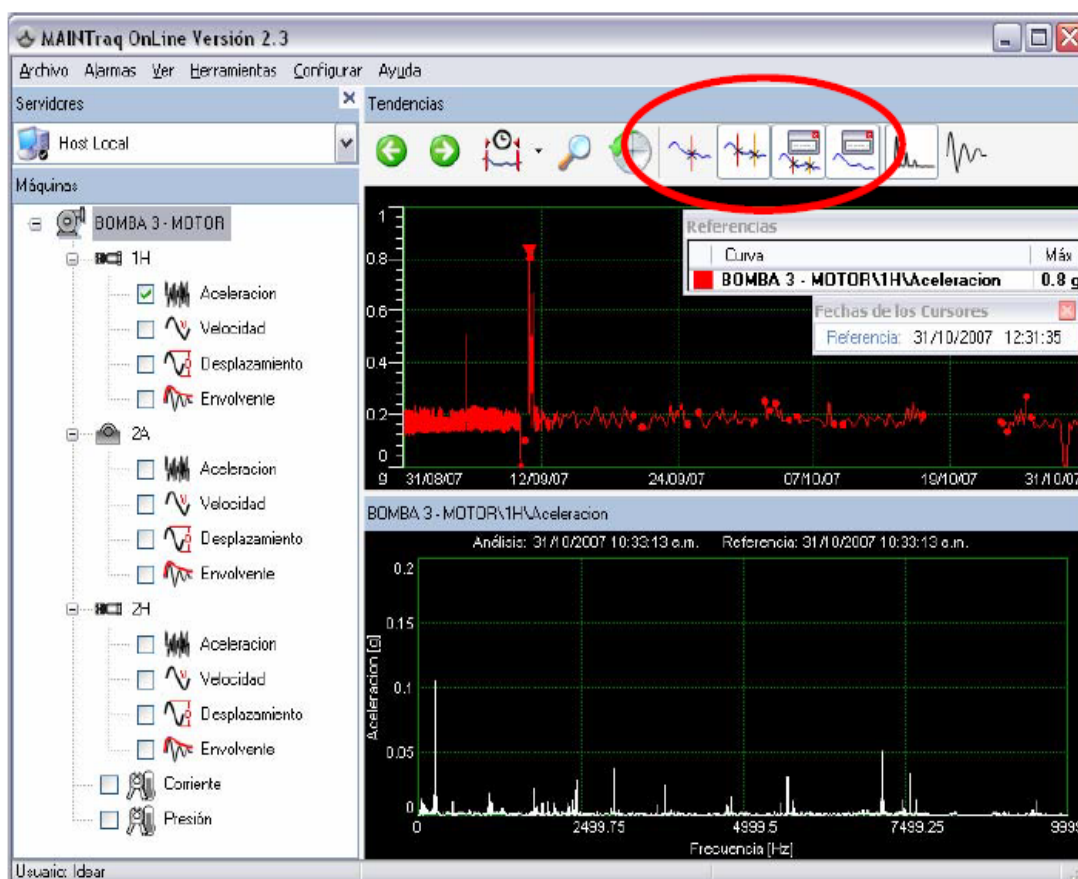


Fig. 2.14: Simulación de la vibración por desalineación

Fuente: Elaboración propia.



En la Fig. 2.14, se observa el espectro de vibración mediante el programa *Maintraq*, el cual se tiene la información de la amplitud de velocidad y la magnitud de la aceleración de la envolvente de los movimientos radial o axial en el dominio de la frecuencia en tiempo real.

Los movimientos vibratorios en una máquina rotativa son movimientos que no se eliminan. Sin embargo existen valores referenciales según la norma ISO que ayudaran a determinar si los valores de velocidad y aceleración envolvente que presentan son los adecuados.

### • Engranajes

Los problemas de vibración en los engranajes se presenta cuando existen picos de amplitudes a frecuencias que coinciden con múltiplos enteros de la velocidad de giro del engranaje que falla, además existirá vibración de amplitud menor de forma simétrica a la frecuencia del engranaje. En la Fig. 2.15 se puede observar picos de valor importante a frecuencias que son múltiplos de la velocidad de giro de un piñón, de forma simétrica a estos picos existen otros de valor muy pequeño y separados una distancia igual a la velocidad de giro.

Los problemas de engrane que ocasionan vibraciones s

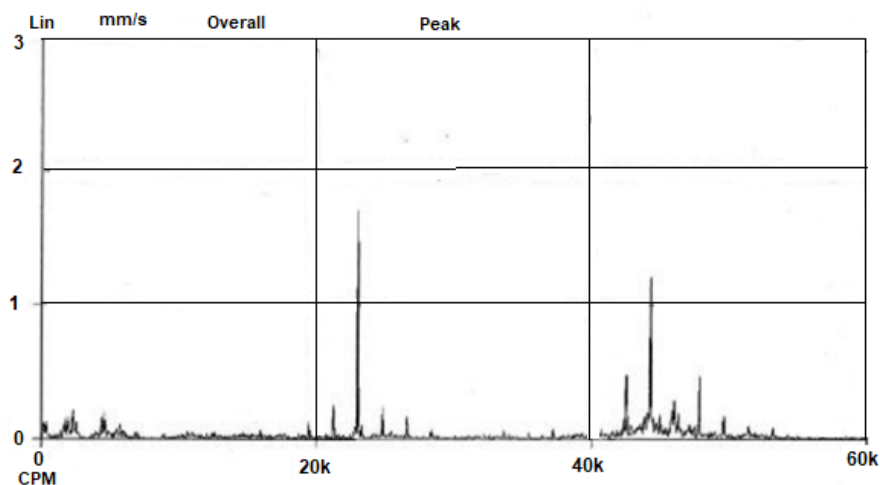


Fig. 2.15: Espectro por desgaste de un piñón

Fuente: Análisis de vibraciones e interpretación de datos Jesús A. Royo Gloria

e deben a un desgaste excesivo de los dientes, inexactitud de los dientes, fallos de lubricación, elementos extraños entre dientes. Las vibraciones causadas por defectos de engranajes pueden ser detectadas en varios puntos de las máquinas. Esta es una característica que diferencia una gráfica causada por un engranaje con poca carga y la vibración producida por

un rodamiento, ya que el diagrama de amplitud frente a frecuencia puede dar lugar a confusión cuando la carga del piñón es baja. Los fallos de engranaje en el rodamiento, llevan consigo también a la aparición de ruido.

- **Averías por efectos eléctricos**

La vibración es creada por fuerzas desiguales que pueden ser causadas por la forma interna de elemento. Es complicado reconocer gráficamente este problema, ya que no tiene características que indiquen de forma sencilla que esta es la causa de vibración. El espectro puede llevar a errores por ser similar a la del desequilibrio, solo que aquí al desconectar la corriente el problema desaparece. Rodamiento y casquillo los espectros desaparecen. Se detectarán picos mayores a distancias iguales a cuatro veces la velocidad de giro si los polos son cuatro, distinguiendo la vibración separada una frecuencia coincidente con la velocidad de giro. En la Fig. 2.16 se ve el espectro debido a este tipo de problema.

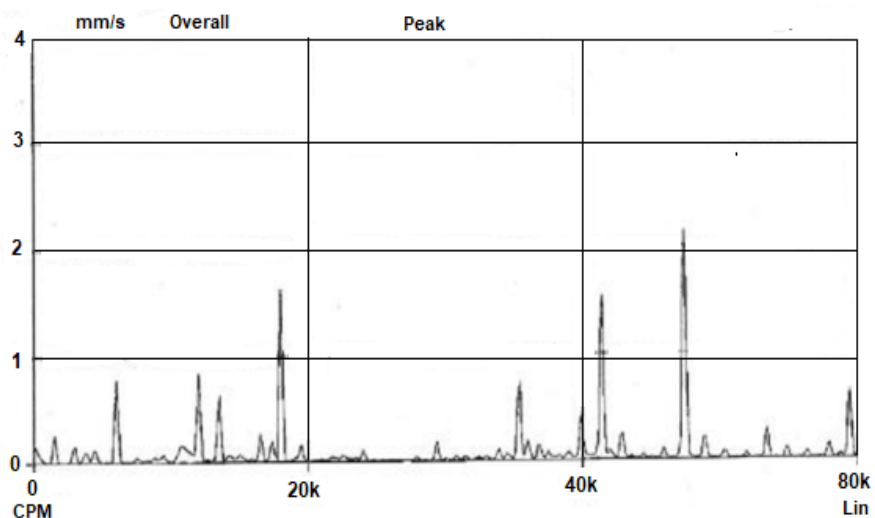


Fig. 2.16: Espectro de vibración en modo de falla eléctrico

Fuente Análisis de vibraciones e interpretación de datos Jesús A. Royo G

### 2.1.6 El rodamiento

El rodamiento es un dispositivo mecánico que reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a este por medio de una rodadura, el cual le sirve de apoyo y facilita su desplazamiento, en su forma actual. En la actualidad los rodamientos son una de las piezas

de maquinaria más utilizadas, ya que su movimiento giratorio facilita todos los movimientos y además ayuda a reducir la fricción entre los distintos elementos móviles.

Los rodamientos tienen dos funciones principales:

- Transfieren el movimiento, es decir, apoyan y guían componentes que giran entre sí.
- Transmiten fuerza o soporte.

Los principales tipos de rodamientos son:

#### a) Rodamientos de rodillos y rodamientos sin elementos de rodadura

En un manguito o rodamiento sin elementos de rodadura, el eje y el rodamiento se mueven en direcciones opuestas a través de una superficie de deslizamiento. Por el contrario, los dos componentes de un rodamiento de rodillos que se mueven uno hacia el otro, los anillos interior y exterior, están separados por elementos rodantes. Este diseño genera significativamente menos fricción que el de un rodamiento sin elementos de rodadura.

#### b) Rodamientos radiales y rodamientos axiales

Los rodamientos pueden transmitir cargas en una dirección radial o en una dirección axial (empuje) y, en muchos casos, hay una combinación tanto de cargas radiales como axiales en la transmisión del movimiento.

En la Fig. 2.17 se observa la ubicación del rodamiento de los motores eléctricos. La elección del diseño de los rodamientos de bolas como se visualiza en la Fig. 2.18 o cilíndricas depende de la aplicación, ya sea por la velocidad de operación o la carga en el eje del motor eléctrico.

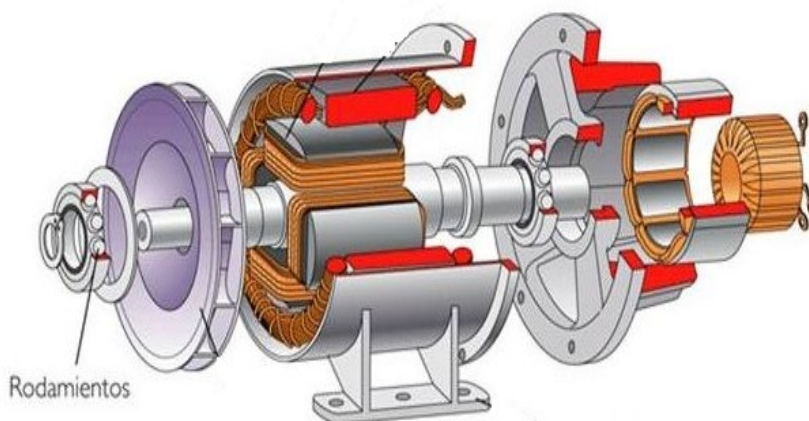


Fig. 2.17: Despiece de un motor eléctrico industrial.

Fuente: Manual de rodamiento SKF

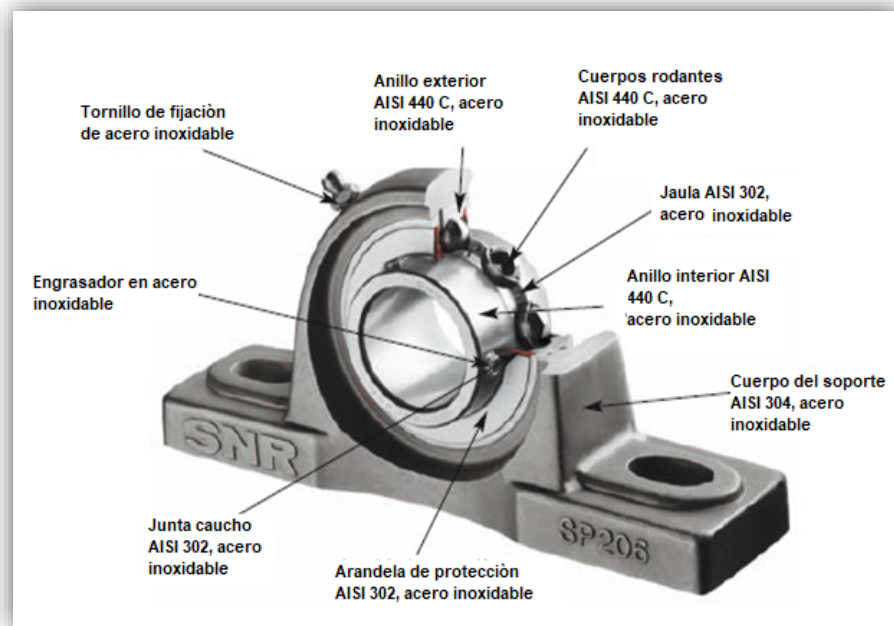


Fig. 2.18: Partes de un rodamiento de motor eléctrico.

Fuente: Manual de rodamiento SKF

En la Fig. 2.19 se aprecian los espectros de las vibraciones mecánicas en una semana procesadas por el *vibraspeck 800* con la opción de visualización de manera tridimensional o bidimensional para analizar las magnitudes de los parámetros de vibración de un motor trifásico.

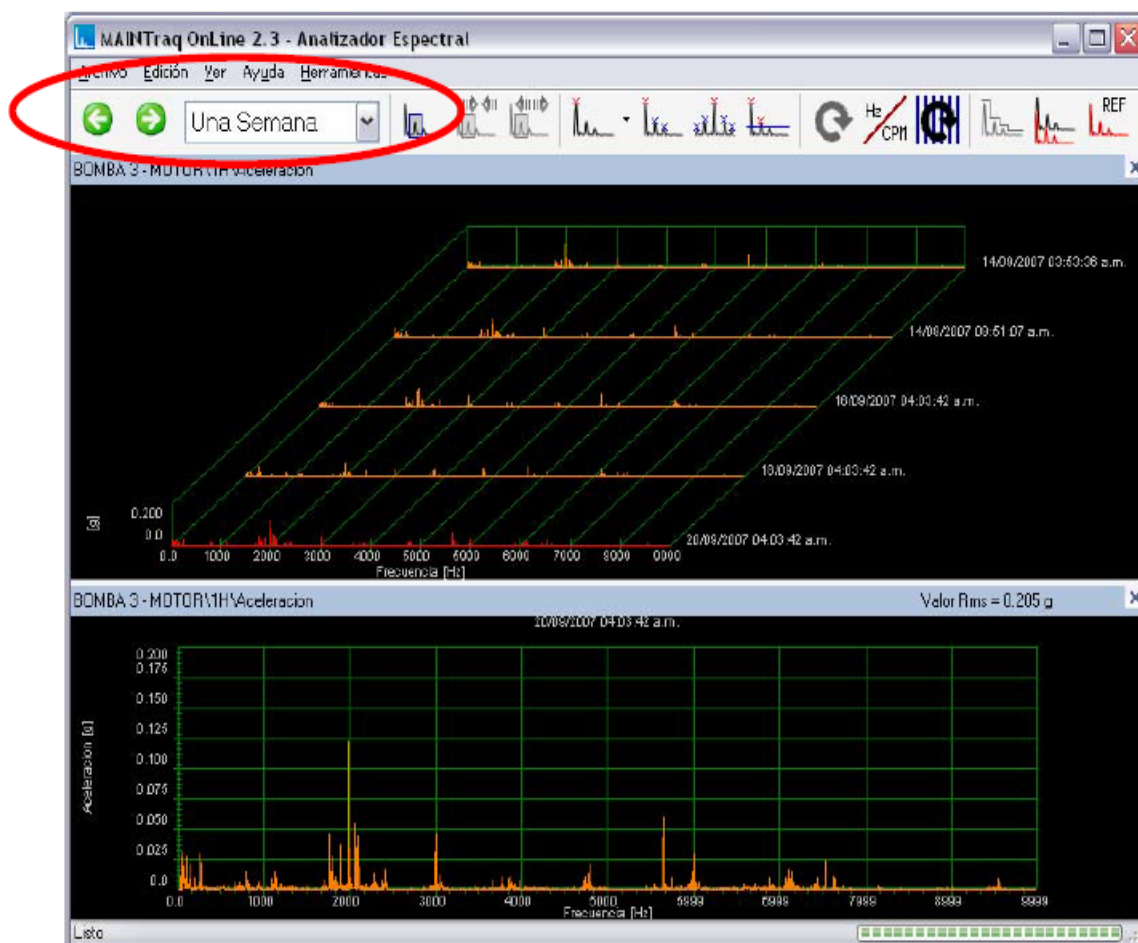


Fig. 2.19: Visualización del espectro en el programa *Maintraq*.

Fuente: Elaboración propia

Otra característica relevante del sistema de monitoreo es que permite llevar un control de las fallas, ya que indica la fecha y hora de la alerta mediante el software instalado en el computador, como se muestra en la Fig. 2.20, del analista o jefe de planta y de esta manera obtener detalles de la operación llevando a cabo un mejor control mediante del historial de operación de la máquina y analizar la causa raíz del problema.

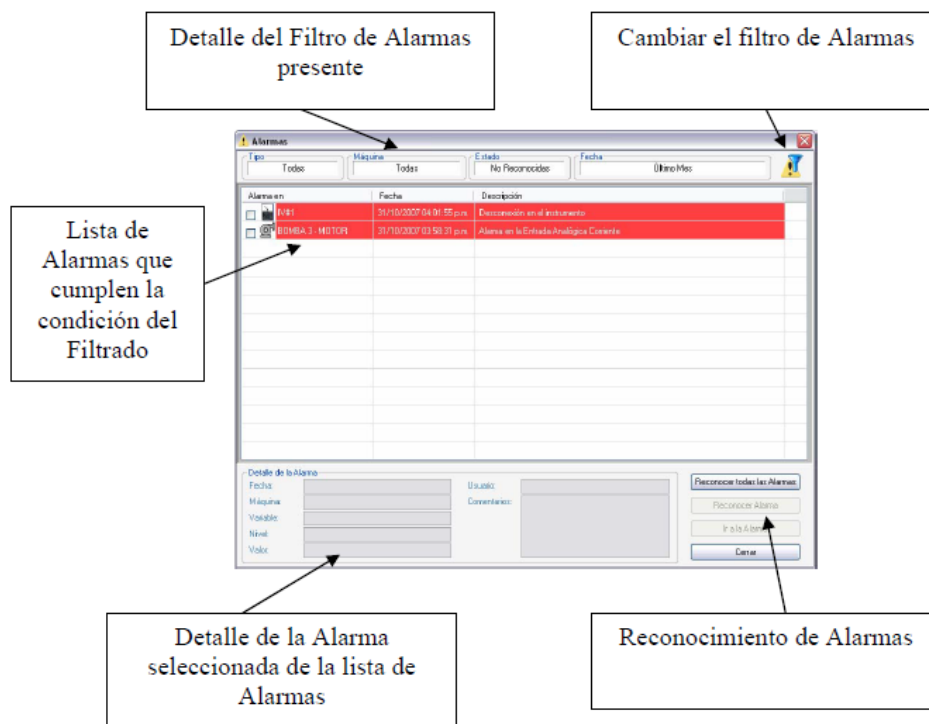


Fig. 2.20: Detalle de las alarmas en el programa *Maintraq*.

Fuente Manual *vibraspec 800*

Mediante el software *Maintraq en tiempo real* se podrá apreciar los nombres que se asignó a cada equipo con los colores indicando los estados de los mismos como se muestra en la Fig. 2.21

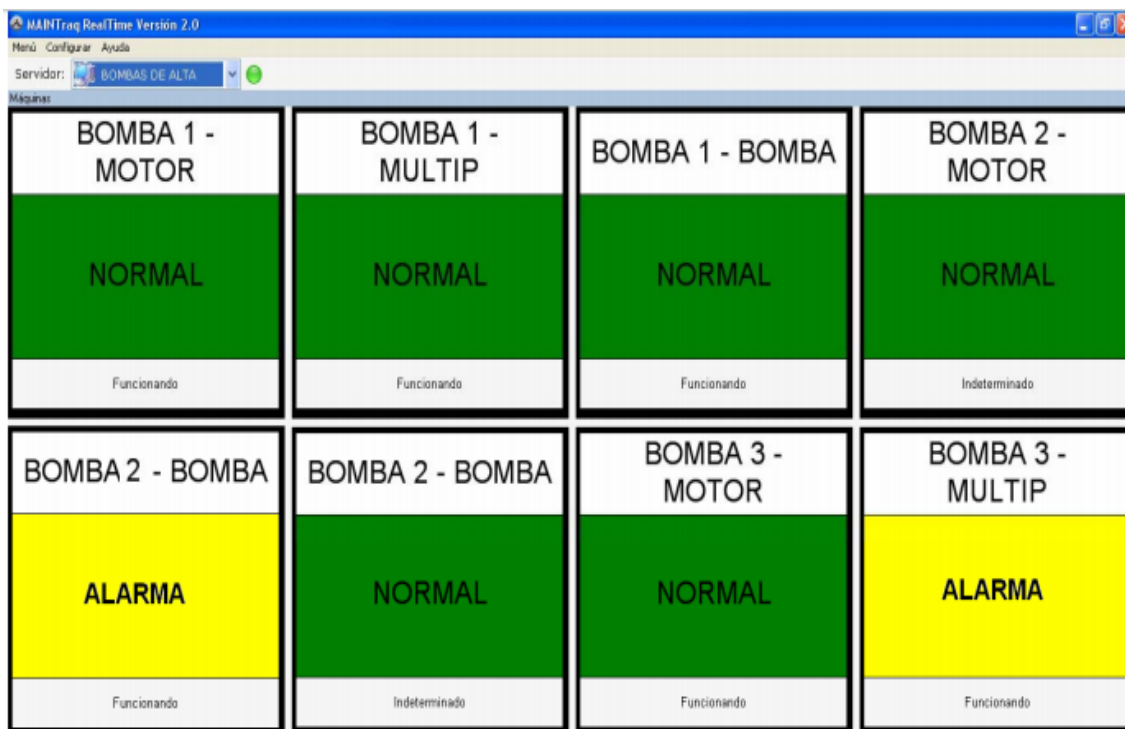


Fig. 2.21: Alarma de condición de motores.

Fuente Elaboración propia

La obtención de la información de las medidas de las vibraciones mecánicas es fundamental para obtener soluciones auxiliares o provisionales, evitando la parada de la planta textil. En caso se presente alguna alerta amarilla, indicando que la máquina está a punto de pasar a un estado crítico de vibración se procede a lubricar manualmente el rodamiento, inyectando con la grasera en el punto de lubricación, esperando luego el comportamiento de las vibraciones por esta acción.

INSTRUMENTO	IMAGEN	APLICACIÓN
<p><b>Analizador de vibraciones</b></p>	 <p><b>Vibracheck IDEAR</b></p>	
<p><b>Vibrómetro</b></p>	 <p><b>Vibrómetro SKF</b></p>	

Fig. 2.22: Esquema de equipos de medición de vibración mecánica.

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 2.22 se muestra dos equipos de medición de vibraciones mecánicas para realizar las inspecciones directas de un motor trifásico. Sin embargo, esta acción de medir manualmente resulta peligrosa cuando se realizan operaciones en caliente, es decir, con la maquina operando ya sea en zonas de alta temperatura o riesgos de atrapamiento o de difícil acceso o de condiciones poco favorables que exponen la seguridad al personal técnico. Por esta razón y aplicando la política de seguridad, la empresa textil decidió implementar adicionalmente la lubricación automática como parte del mantenimiento preventivo programado y ayude a la mejor obtención de datos del sistema de monitoreo de vibraciones a todas las maquinas rotativas y rodillos en zonas de poco acceso, instalados en chumaceras, motores de ventiladores, turbinas, rodillos, etc. Se utilizó el dispositivo de la marca SKF LAGD 125/WA2 que puede durar hasta un año. Además, que es programable y suministra constantemente el lubricante que lleva en su interior. La programación se puede manipular para cada 2, 3, ,4...,12 meses según crea conveniente el analista. En la Fig. 2.23 se puede comparar dos instrumentos para llevar a cabo la



lubricación en el transcurso del tiempo, ya sea por una acción manual utilizando la grasea o el uso de un lubricador automático mediante instalado en la chumacera del motor.

MODO DE LUBRICACION	INSTRUMENTO	APLICACIÓN
<p style="text-align: center;"><b>MANUAL</b></p>		
	<p style="text-align: center;">Grasea</p>	
<p style="text-align: center;"><b>AUTOMATICO</b></p>		
	<p style="text-align: center;">Lubricador automatico SKF</p>	

Fig. 2.23: Esquema de equipos de lubricación manual y automática.

Fuente: Elaboración propia

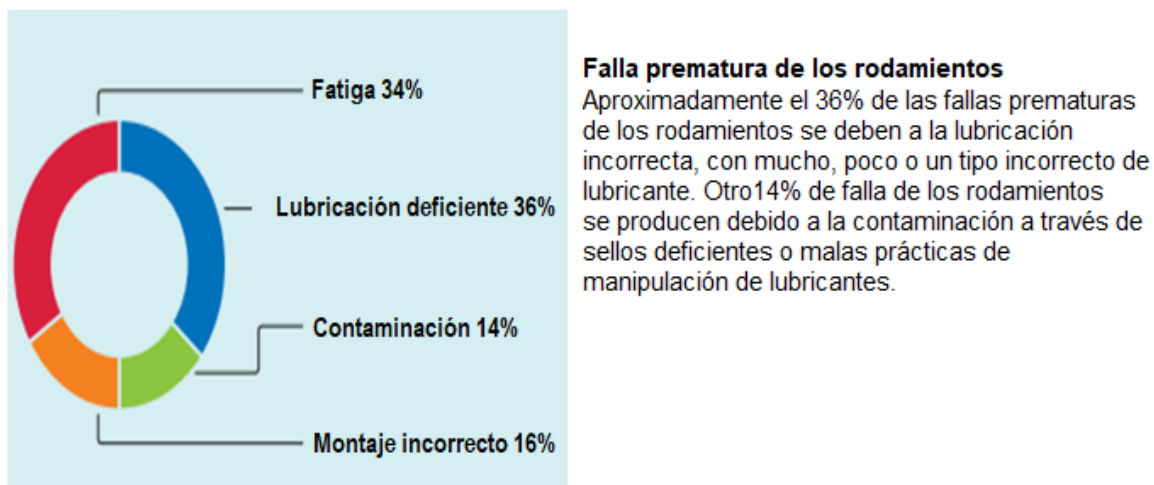


Fig. 2.24: Diagrama de porcentaje de falla en los rodamientos.

Fuente: Manual de rodamientos SKF

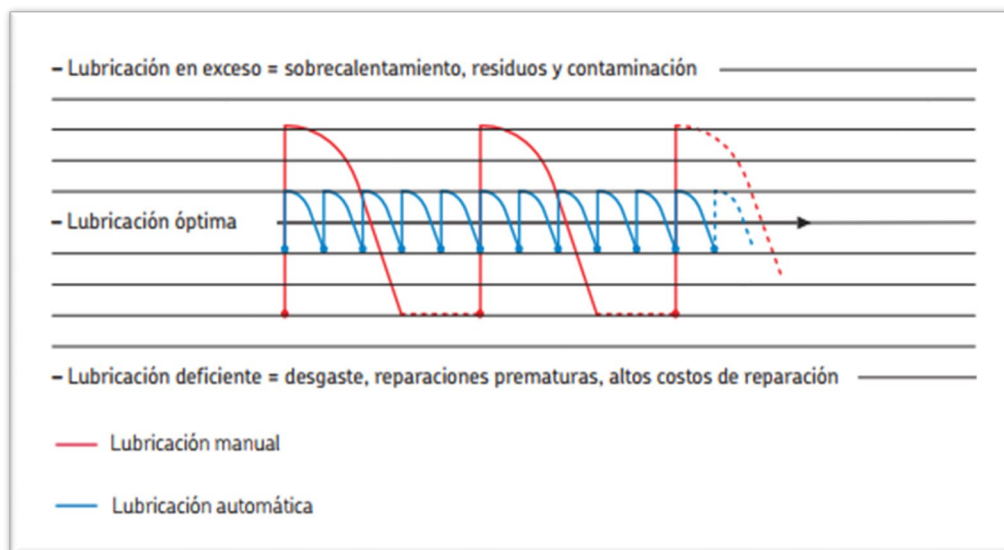


Fig. 2.25: Diagrama temporal de lubricación manual y automática.

Fuente: manual de lubricación SKF

En la figura Fig. 2.25 se observa un cronograma de lubricación manual y automática. La desventaja de una lubricación manual es evidente, debido a que existen intervalos de tiempo sin lubricación en la chumacera de un motor e incluso se excede en el suministro de grasa a la chumacera. Esto provoca la contaminación de los rodamientos de polvo, desgaste mecánico progresivo, holgura entre el eje y anillo interior del rodamiento, desbalance, etc. En cambio,

en una lubricación automática a diferencia de la lubricación manual, dispone de un dispositivo que suministra grasa en cantidades en intervalos de tiempo exactos según sea programado, de esta manera los rodamientos permanecen engrasados y con las cantidades adecuadas que permite aumentar el tiempo de vida útil del rodamiento y por ende la operación de la máquina.



Fig. 2.26: Lubricador automático  
Fuente manual de lubricación SKF

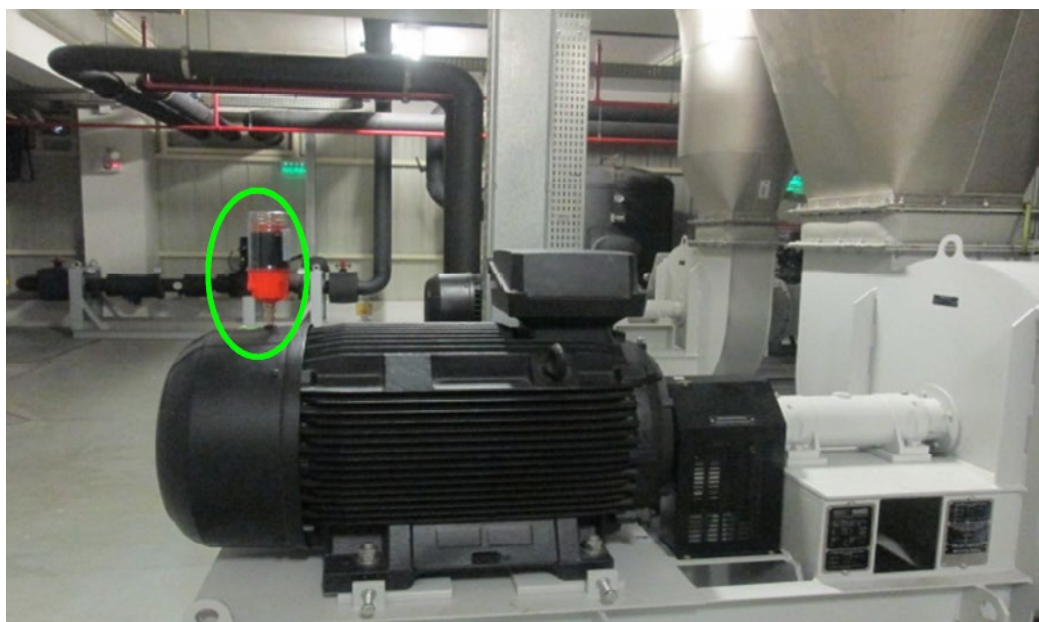


Fig. 2.27: Fotografía del lubricador automático instalado en un motor de 50HP  
Fuente Elaboración propia

## 2.2 Marco Conceptual

### 2.2.1 Diagrama de los modos de falla frecuentes en un rodamiento

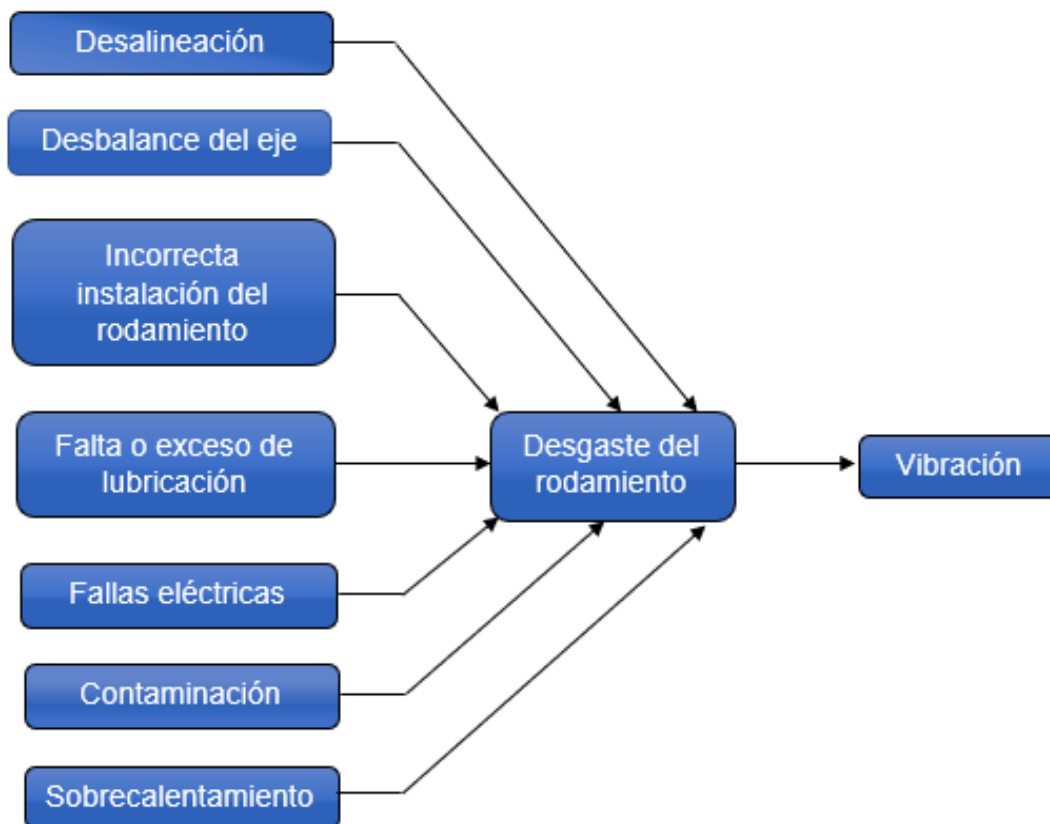


Fig. 2.28: Mapa conceptual de las principales causas de falla en los rodamientos

Fuente: Elaboración propia

La Fig. 2.28 se muestra los modos de falla (causas) en los rodamientos que producen excesos en las amplitudes de vibración. A continuación, se describe cada una de estas causas que provocan el deterioro de los rodamientos en un motor eléctrico:

#### a) Desalineación:

La desalineación ocurre cuando los centros de los ejes de acople no coinciden. Los ejes doblados o vencidos, hombros de eje descuadrados, espaciadores descuadrados, tuercas de sujeción fuera de escuadra y la instalación inadecuada debido a ajustes flojos pueden causar desalineación, lo que puede dar lugar a sobrecalentamiento y falla del separador.

- **Diagnóstico de la falla**

En una desalineación de ejes se observa generalmente una trayectoria de desgaste que no es paralela a los bordes de la pista del anillo no giratorio.

- **Correctivo de la falla**

Inspeccionar los ejes y los alojamientos para evitar el descuadre de los hombros y los asientos de los rodamientos, y utilice las contratueras de precisión.

### **b) Instalación inadecuada de los rodamientos:**

En la mayoría de los casos, los rodamientos deberían montarse con un ajuste a presión sobre el eje rotatorio.

- **Diagnóstico de la falla**

Los rodamientos operan en condiciones que pueden causar dentado, desgaste, anillos agrietados, altas temperaturas de funcionamiento, fatiga temprana y falla prematura de los rodamientos. Entre estas se incluye el montaje de rodamientos en los ejes presionando o golpeando de tal forma que se malogren los sellos, montando los rodamientos dentro de un alojamiento presionando el anillo interior, ajustes con soldadura en el eje, soldadura del rodamiento en el alojamiento, ajuste excesivamente apretado, carcasas ovaladas y acabado deficiente en el asiento del rodamiento.

- **Correctivo de la falla**

Seguir las instrucciones de montaje apropiadas y proporcionar capacitación para asegurar que todos los técnicos comprendan la correcta instalación de un rodamiento.

### **c) Falta de lubricación:**

La falta de lubricación según un estudio reciente, hasta un 80 por ciento de las fallas de los rodamientos son causadas por una lubricación inadecuada. Esto incluye por ejemplo la lubricación insuficiente, uso de lubricantes inadecuados o temperaturas excesivas que degradan al lubricante.

- **Diagnóstico de la falla**

La falta de lubricante en un rodamiento es posible identificarlo si existe alguna decoloración en los elementos rodantes (tonalidades azul o marrón) y señales de sobrecalentamiento en las pistas o desgaste excesivo en el rodamiento.

- **Correctivo de la falla**

Las acciones correctivas para solucionar esta falla se utiliza el tipo adecuado y la cantidad correcta de lubricante, evita la pérdida de grasa, y se continúa con los intervalos de lubricación adecuada.

**d) Daño del rodamiento por efecto eléctrico:**

El paso constante de corriente alterna o directa, incluso con corrientes bajas, puede provocar daños eléctricos.

- **Diagnóstico de la falla**

En este tipo de falla se observan marcas de color café paralelas al eje en una gran parte de la pista de rodadura o cubriendo toda la circunferencia de la pista.

- **Correctivo de la falla**

El rodamiento común debe ser cambiado por un rodamiento con un recubrimiento aislante de tal manera evitar que la corriente eléctrica fluya a través del rodamiento.

**e) Contaminación en el interior del rodamiento**

La contaminación es causada por sustancias extrañas como tierra, arena abrasiva, polvo, virutas de acero, áreas de trabajo contaminadas que contaminan a la grasa o aceite en el rodamiento acortando de esta manera el tiempo de vida útil del rodamiento.

- **Diagnóstico de la falla**

El patrón de pista del rodamiento presenta marcas de dentado que causan vibraciones.

- **Correctivo de la falla**

El rodamiento debe contener una cantidad adecuada de lubricante, las áreas de trabajo deben estar limpias. los trabajos de montaje o desmontaje deben realizarse con el uso de guantes limpios para reducir el riesgo de contaminación.

## **f) Sobrecalentamiento por fuerzas externas**

El sobrecalentamiento generalmente es el resultado de temperaturas de funcionamiento excesivas y lubricación inadecuada. Las altas temperaturas pueden causar salida de aceite en los rodamientos, lo que reduce la eficiencia del lubricante. En condiciones de temperatura elevada, la oxidación puede conducir a la pérdida del aceite de la grasa, dejando un jabón seco y crujiente que puede hacer que el rodamiento se aferre. Las temperaturas elevadas también reducen la dureza del metal, causando una falla temprana.

### **▪ Diagnóstico de falla**

El sobrecalentamiento en el rodamiento se identifica si se observa alguna decoloración de los anillos, bolas, o jaula del rodamiento. El sobrecalentamiento provoca una alteración de las propiedades del lubricante y una deformación en los elementos del rodamiento.

### **▪ Correctivo de la falla**

Los controles térmicos o de sobrecarga, disipadores de calor adecuados y enfriamiento suplementario son algunas de las mejores opciones para mitigar el sobrecalentamiento.

## CAPÍTULO III

### DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se describe el desarrollo del proyecto que consta de dos secciones. En la primera sección se describen la instalación y configuración de los *Access point* mediante el enlace punto a punto, en la segunda sección se diseña la plataforma para los motores instalados en los rodillos de la faja transportadora utilizando el programa *Maintraq en línea*.

#### 3.1 Desarrollo de la primera sección del proyecto:

En esta sección se describe la implementación del hardware utilizado.

##### 3.1.1 Instalación de Hardware

La primera etapa del proyecto consiste en la instalación de ocho acelerómetros fijados en los motores eléctricos de un par de rodillos de la banda transportadora y los sensores que se conectan al *vibraspec 800* como se muestran en las figuras Fig. 3.1 y Fig. 3.2.



Fig. 3.1: Fotografía de la instalación de los sensores de vibración.

Fuente: Elaboración propia



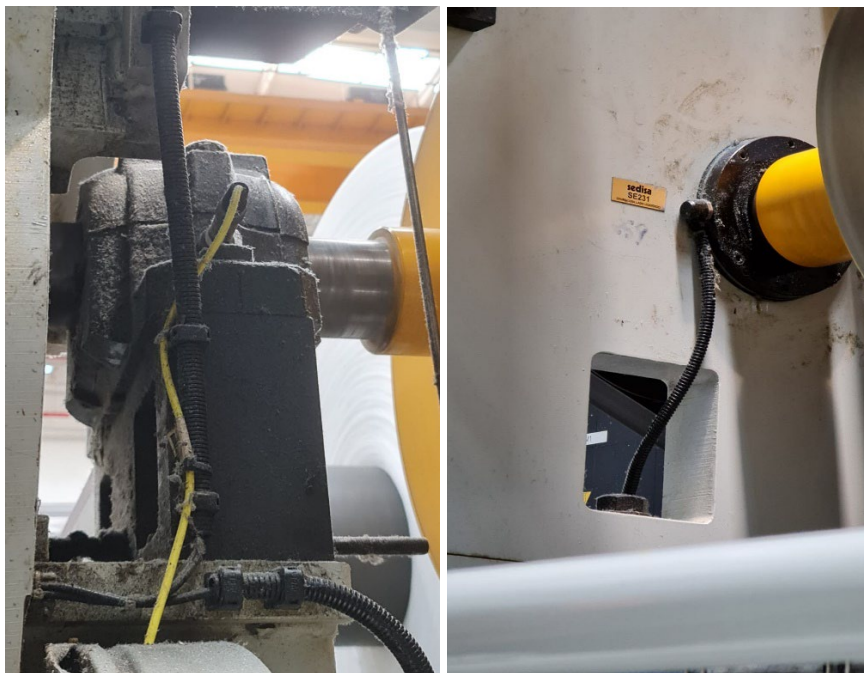


Fig 3.2: Fotografía del sensor de la chumacera del enrollador de tela

Fuente: Elaboración propia

El módulo *vibraspec 800* es un dispositivo que procesa la información de la señal emitida por los acelerómetros y mediante el software *configX* que permite enlazar a un computador. El *vibraspec 800* realiza las siguientes acciones:

- Mide la aceleración, velocidad y desplazamiento mediante las señales emitidos por los acelerómetros.
- Permite la visualización de espectros con el software *Maintraq en línea*.
- Realiza la comunicación ethernet, Modbus TCP.

### **Aplicaciones:**

El módulo *vibraspec 800* permite realizar mediciones de vibración con buena precisión en máquinas rotativas como:

- Turbogeneradores a gas o a vapor.
- Turbogeneradores hidráulicos.
- Motores eléctricos.
- Bombas de agua

- Ventiladores.
- Compresores.

### **Detección de fallas en motores eléctricos**

Las averías por vibraciones mecánicas en los motores eléctricos de corriente alternan frecuentemente se deben a los siguientes modos de falla:

- Fallas en los rodamientos.
  - Incorrecta lubricación.
  - Cavitación.
  - Desbalanceo.
  - Desalineaciones.
  - Solturas mecánicas
  - Reductores.
2. Los *Access point* se han configurado de punto a punto para establecer el enlace inalámbrico. Este enlace permite la transmisión de las señales de vibración mediante el Access point TP-LINK de 500mW para exteriores de 2.4GHz a 150 Mbps modelo TL-WA5210G, la cual contiene una antena interna de 12db con un alcance de cobertura hasta 15Km para envío de señales.

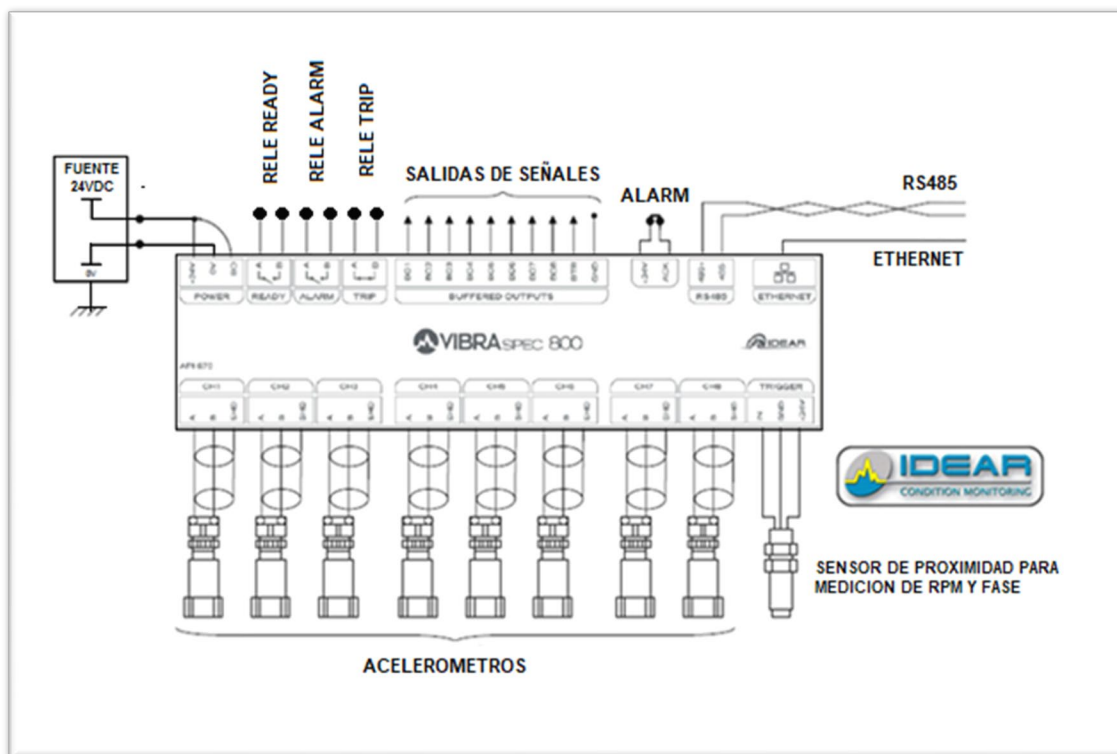


Fig. 3.3: Diagrama de conexión de los acelerómetros al *vibraspec 800*.

Fuente IDEAR

3. Los sensores se conectan al *Vibraspec 800* como se muestra en la Fig. 3.3 y en la ubicación del motor de la banda transportadora como se aprecia en la Fig. 3.13
4. Para establecer la comunicación inalámbrica entre los *Access point* se ha considerado las siguientes fases:



Fig. 3.4: Fotografía de la instalación del acelerómetro en la banda transportadora

Fuente: Elaboración propia

- a) El tablero de control donde se ubica el *vibraspec 800* debe ser espaciosa, no húmeda y visible, tal como se aprecia en la Fig. 3.5



Fig. 3.5: Fotografía de la instalación del *Vibraspec 800* en el tablero de control.

Fuente: Elaboración propia

- b) Las conexiones del sistema inalámbrico se han realizado como se muestra en la Fig. 3.6, luego se deshabilita la red *WIFI* y se asigna una dirección IP fija. Para este caso se ha establecido la dirección IP como: IP 120.168.1.20 tal como se representa en la Fig. 3.7.

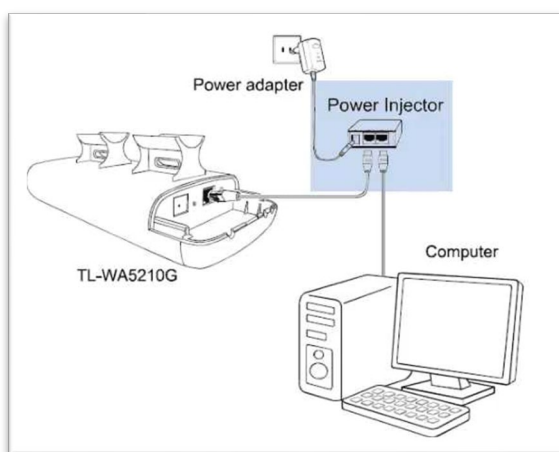


Fig. 3.6: Esquema de conexión del TL-WA5210G.

Fuente: Elaboración propia

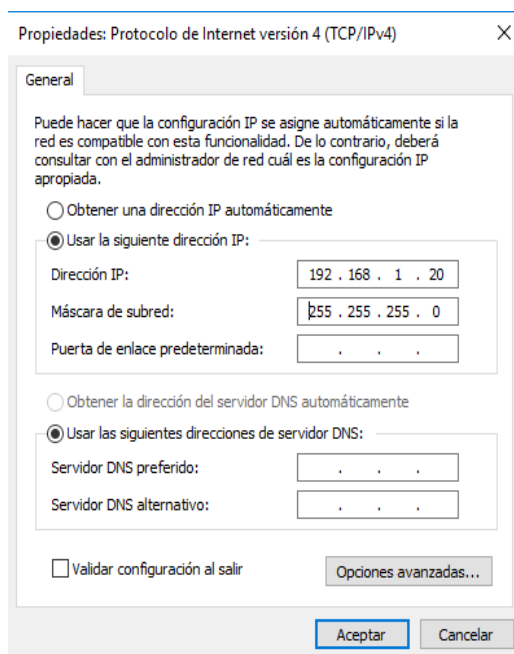


Fig. 3.7: Asignación de una dirección IP fija.

Fuente: Elaboración propia

- a) En el navegador de internet del computador se digita la dirección IP del *access point* 192.168.1.254, en seguida se visualiza un cuadro cuyo nombre de usuario y contraseña en su defecto es admin como se observa en la Fig. 3.8.

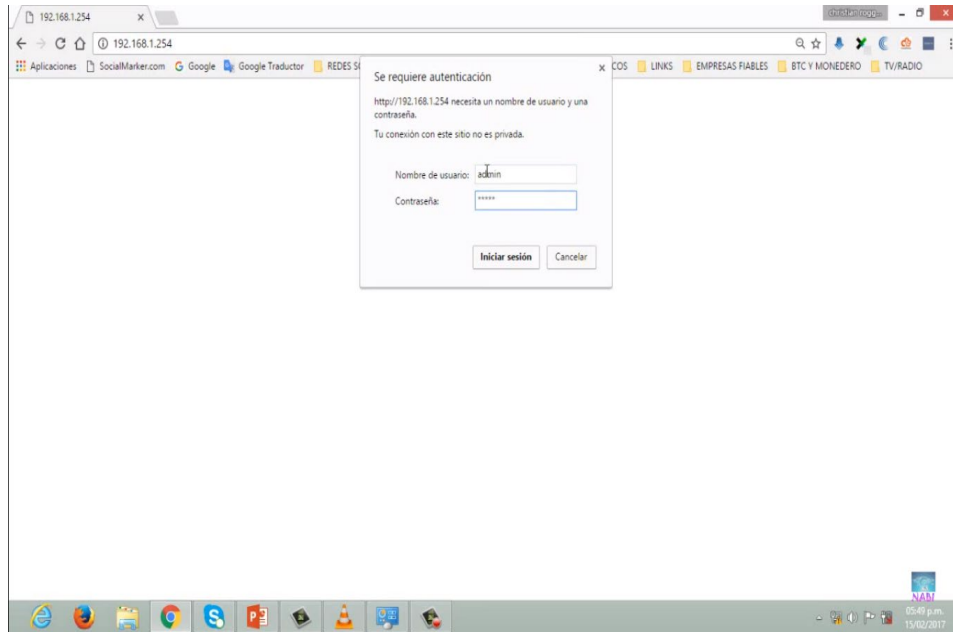


Fig.3.8: Configuración punto a punto del Access Point.

Fuente TP-LINK

- b) En la Fig. 3.9 se muestra una pantalla gráfica, luego se selecciona el modo de operación AP (*Access point*) y se activa el ícono *guardar*.

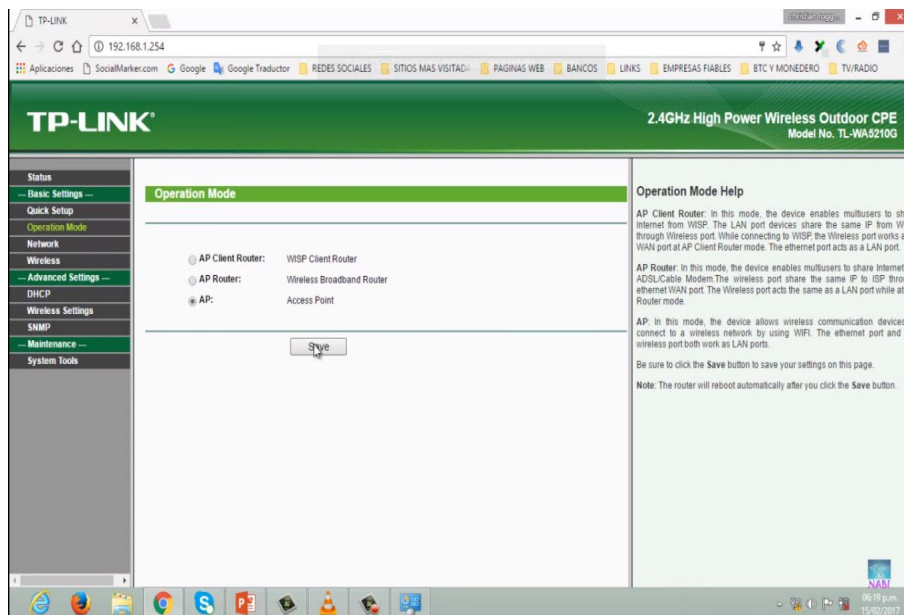


Fig. 3.9: Configuración inalámbrica punto a punto

Fuente Elaboración propia

- c) El modo *Wireless* se activa y se selecciona *bridge* como muestra la Fig. 3.10. Luego se digita el código MAC que aparece en la etiqueta del *Access point B* como se indica en la Fig. 3.11.

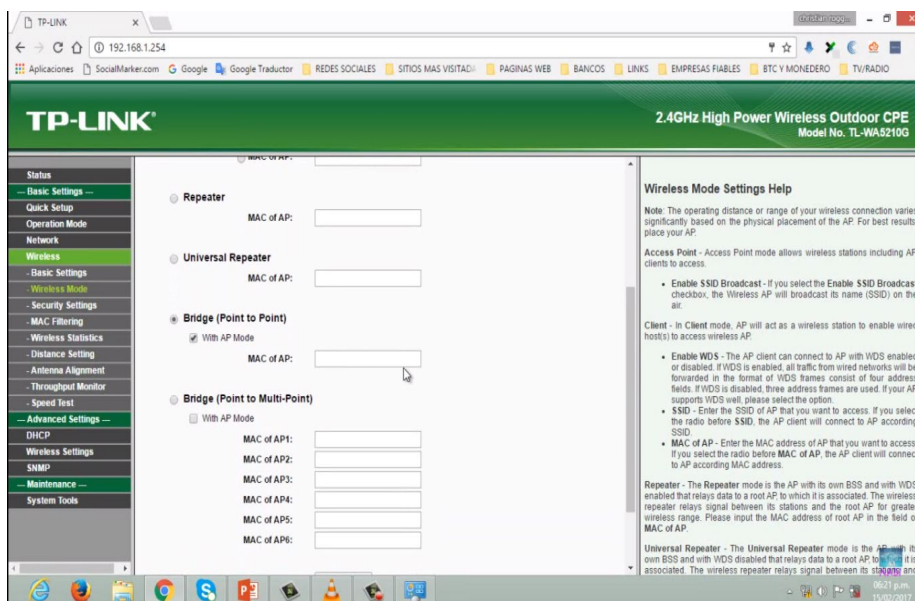


Fig. 3.10: Configuración del código MAC.

Fuente: Elaboración propia



Fig. 3.11: Ubicación del código MAC de un *Access Point*.

Fuente: Manual TP- LINK

- d) El *Access point* B de la misma manera que el *access point* A, considerando que la dirección IP debe ser diferente a la dirección IP del *Access Point* A (IP 192.168.1.20). En este caso se cambió por la dirección IP 192.168.1.21 y luego se digita el código *MAC* del *Access point* A en la ventana de configuración de *TP- LINK*.
- e) Los *Access point TLWA5210G* se han instalado según la Fig. 3.12 con una distancia de separación de 200m y en lugares estratégicos donde la interferencia de comunicación debido a las estructuras de la planta, sea mínima.



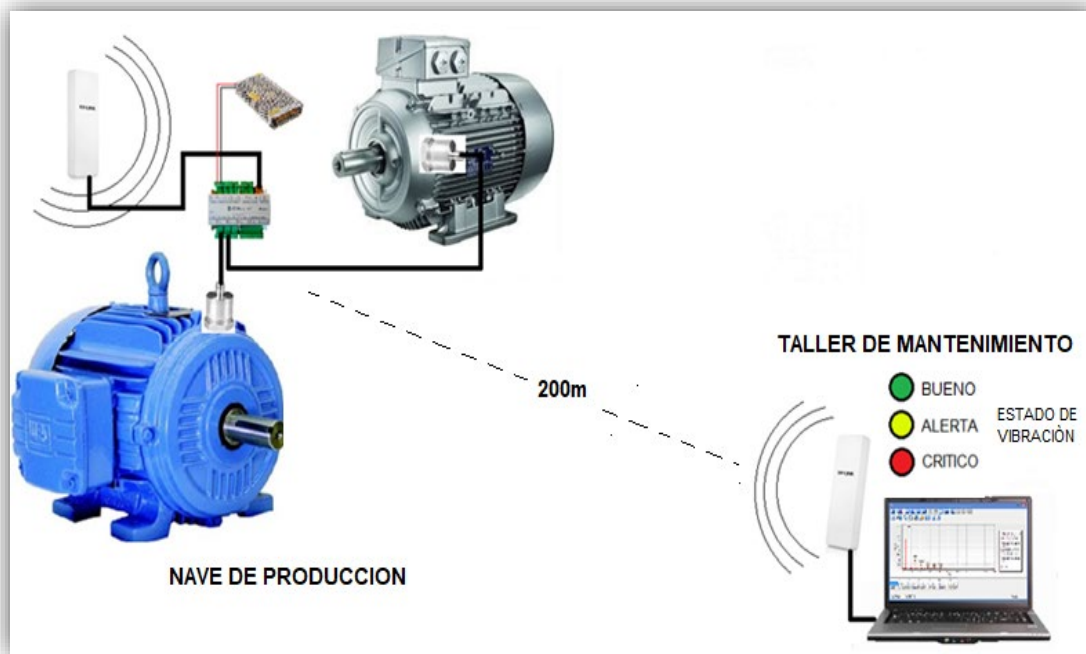


Fig. 3.12: Diagrama de instalación del *Vibraspec 800*.

Fuente: Elaboración propia

- f) El *WIFI* es habilitado nuevamente para establecer la comunicación inalámbrica entre el *vibraspec 800* y el computador.
- g) Los acelerómetros se ha instalado permanentemente en la parte posterior y anterior del motor del rodillo de la banda transportadora como se visualiza en las figuras Fig. 3.13 y Fig. 3.14.

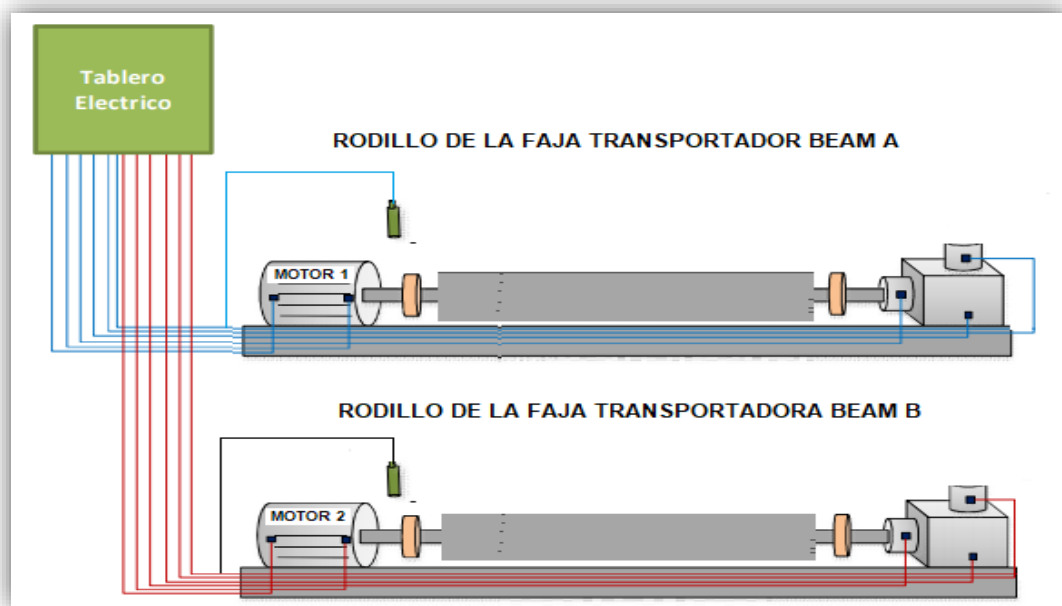


Fig. 3.13: Diagrama de instalación de sensores en los motores de banda transportadora.  
Fuente: Elaboración propia

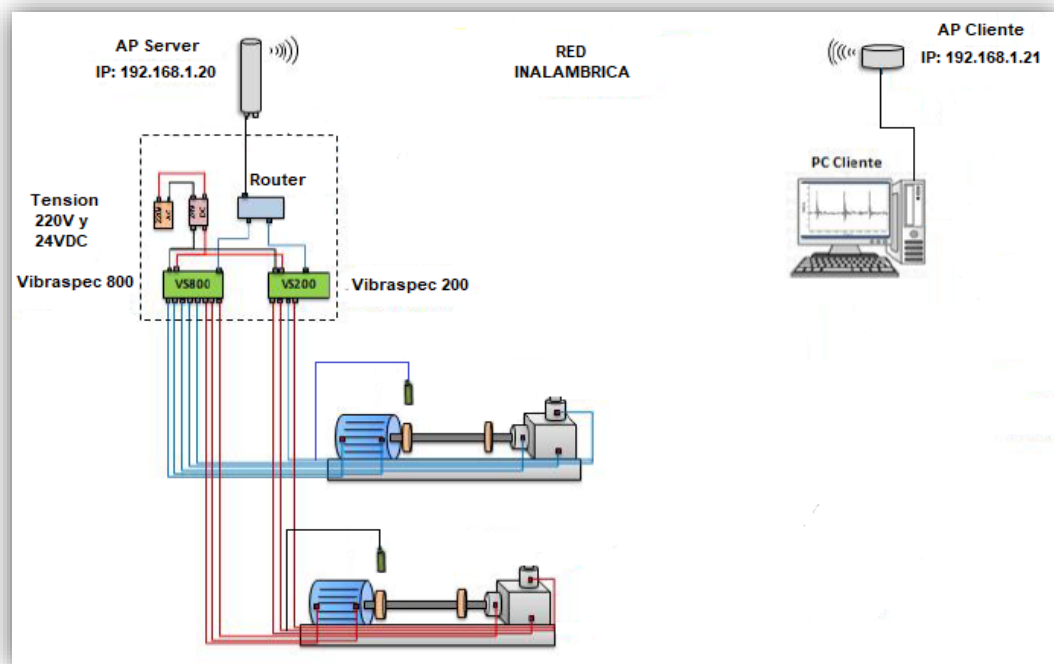
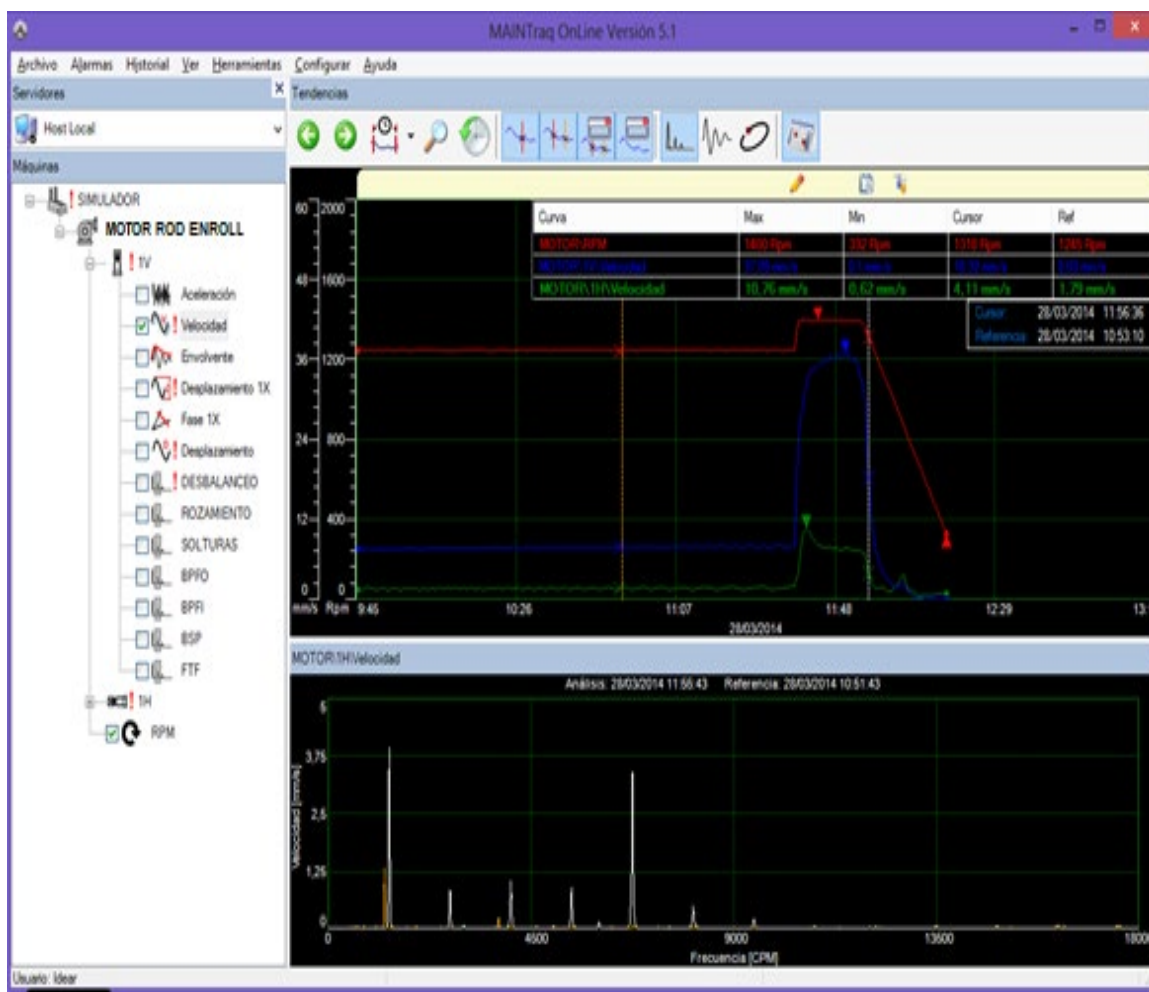


Fig. 3.14: Esquema de red inalámbrica instalada del sistema de monitoreo online.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Desarrollo de la segunda sección del proyecto

La comunicación establecida entre ambos *Access point* mediante el software *Maintraq online* y el software *Config X* se realiza por medio de la conexión Ethernet que permite enlazar el hardware *VIBRASpec 800* y el computador y de esta manera visualizar los espectros en la pantalla como se aprecia en las figuras Fig. 3.15, Fig. 3.16 y Fig 3.17. Además, el software *Maintraq real time* permite visualizar las alarmas con fecha y hora de la detección de la falla en la pantalla del monitor como la que aparece en la Fig. 3.18.



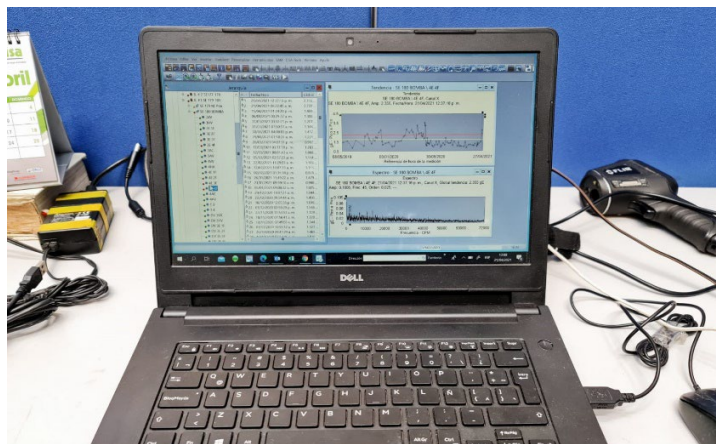


Fig. 3.15: Fotografía de la visualización de los espectros de las señales de vibración.

Fuente: Elaboración propia

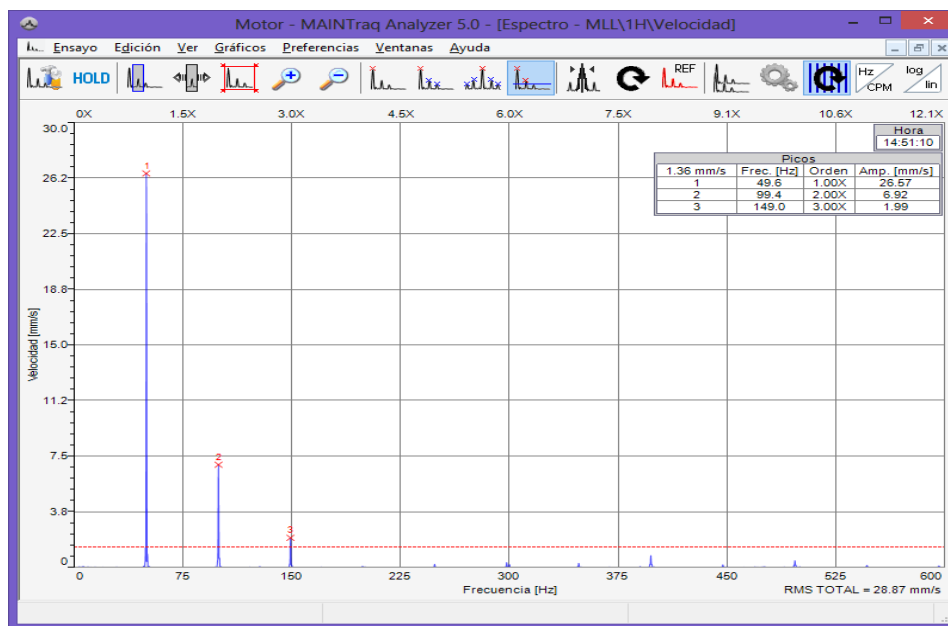


Fig. 3.16 Espectro de señales de vibración.

Fuente: Elaboración propia

Mediante el programa *Maintraq* es posible realizar las siguientes acciones:

- Medir y analizar las vibraciones mecánicas
- Medir y evaluar a las máquinas periódicamente.
- Medir y evaluar máquinas en tiempo real.
- Leer variables de proceso desde los sistemas de control por red Ethernet.
- Enviar el valor de las mediciones de vibraciones hacia sistemas de control.
- Informar al personal de operación de cualquier anomalía detectada

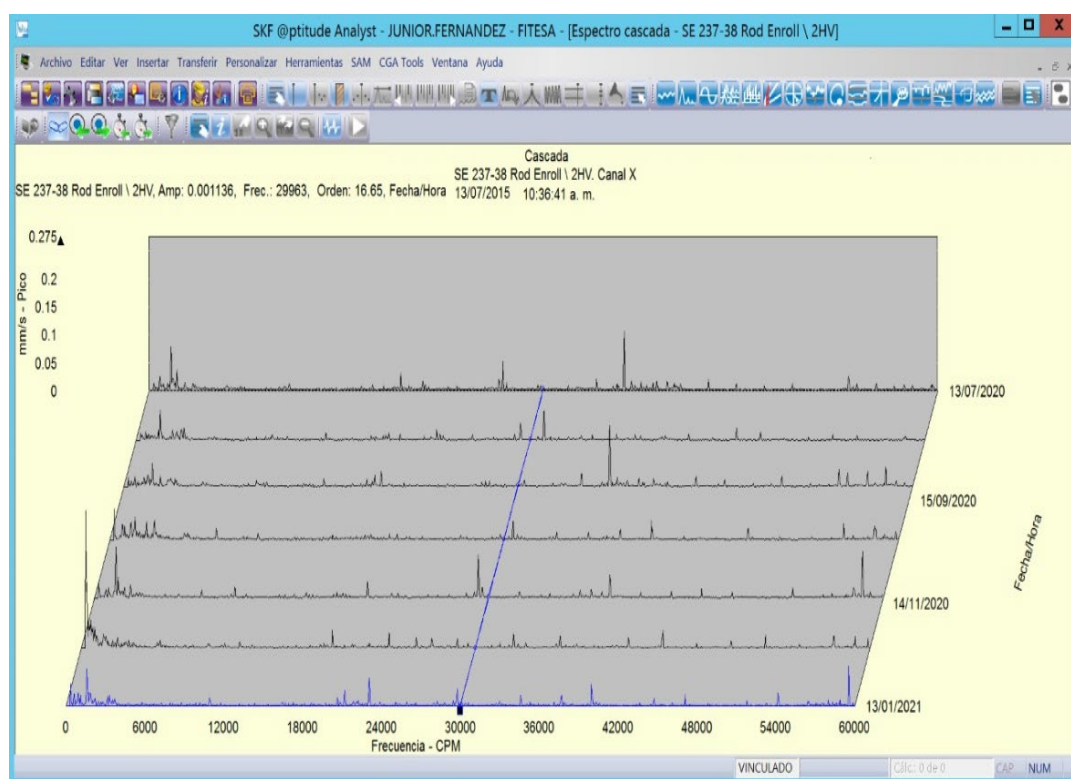


Fig. 3.17: Espectro de vibración del motor de rodillo de la faja transportadora.

Fuente Elaboración propia

Alarma en	Fecha	Descripción
<input type="checkbox"/> MOTOR/DESBALANCEO/ROD ENROLL	28/07/2015 11:45:09	Valor alto
<input type="checkbox"/> MOTOR/1H/DESPLAZAMIENTO/ROD ESPLAZAMIENTO/ROD	28/07/2015 11:44:07	Valor muy alto
<input type="checkbox"/> MOTOR/1H/SOLTURAS/ ROD ENROLL	28/07/2015 11:43:23	Valor alto
<input type="checkbox"/> MOTOR/1V/DESBALANCEO/ROD ENROLL	28/07/2015 11:43:29	Valor muy alto
<input type="checkbox"/> MOTOR/1H/VELOCIDAD/ROD ENROLL	28/07/2015 11:43:19	Valor alto
<input type="checkbox"/> MOTOR/1H/DESPLAZAMIENTO 1X/ROD ENROLL	28/07/2015 11:43:18	Valor alto
<input type="checkbox"/> MOTOR/1H/DESPLAZAMIENTO/ROD ENROLL	28/07/2015 11:43:17	Valor alto
<input type="checkbox"/> MOTOR/1V/VELOCIDAD/ROD ENROLL	28/07/2015 11:43:17	Valor muy alto
<input type="checkbox"/> MOTOR/1V/DESBALANCEO/ROD ENROLL	28/07/2015 9:48:49	Valor alto
<input type="checkbox"/> MOTOR/1V/DESPLAZAMIENTO/ROD ENROLL	28/07/2015 9:48:30	Valor muy alto
<input type="checkbox"/> MOTOR/1V/DESPLAZAMIENTO 1X/ ROD ENROLL	28/07/2015 9:48:30	Valor muy alto
<input type="checkbox"/> MOTOR/1V/VELOCIDAD/ROD ENROL	28/07/2015 9:48:30	Valor alto

Detalle de la Alarma

Fecha:  Usuario:

Máquina:  Comentarios:

Variable:

Nivel:

Valor:

Reconocer todas las Alarmas

Reconocer Alarma

Reconocer Alarmas en Instrumentos

Cerrar

Fig. 3.18: Historial de alarmas de fallas de un motor eléctrico en el programa Maintraq.

Fuente: Elaboración propia

Mediante el programa Maintraq es posible apreciar en una vista tridimensional las amplitudes de velocidad para un mejor análisis como muestra la Fig.3.19, en la cual se aprecia una velocidad de vibración que supera los 3.75 mm/s a una frecuencia aproximada de 3400, la cual según la norma ISO 10816-3 para motores es una condición o estado de alerta de vibración del motor.

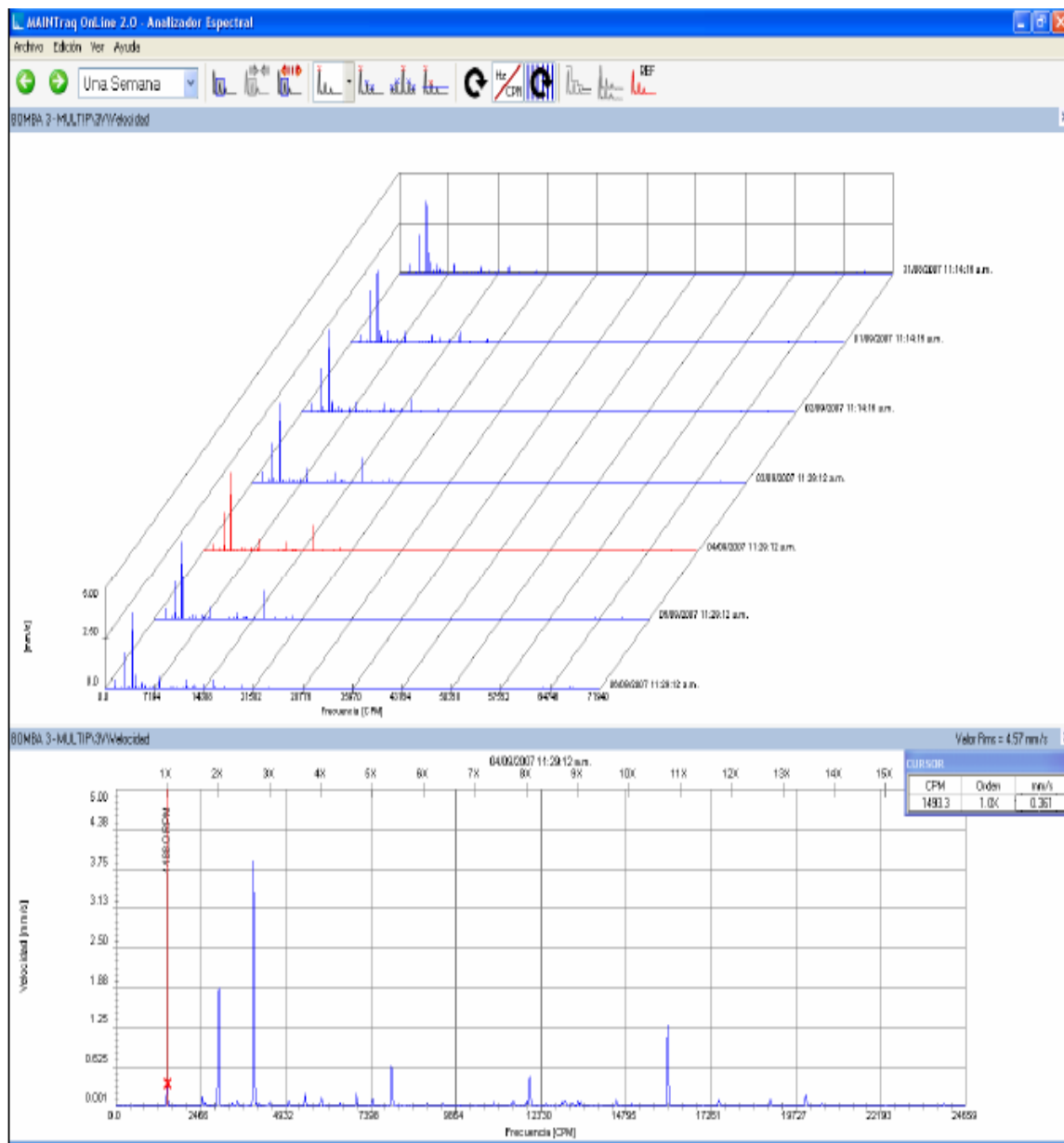


Fig. 3.19: Gráfica del espectro en vista tridimensional en el programa *Maintraq*

Fuente: Elaboración propia

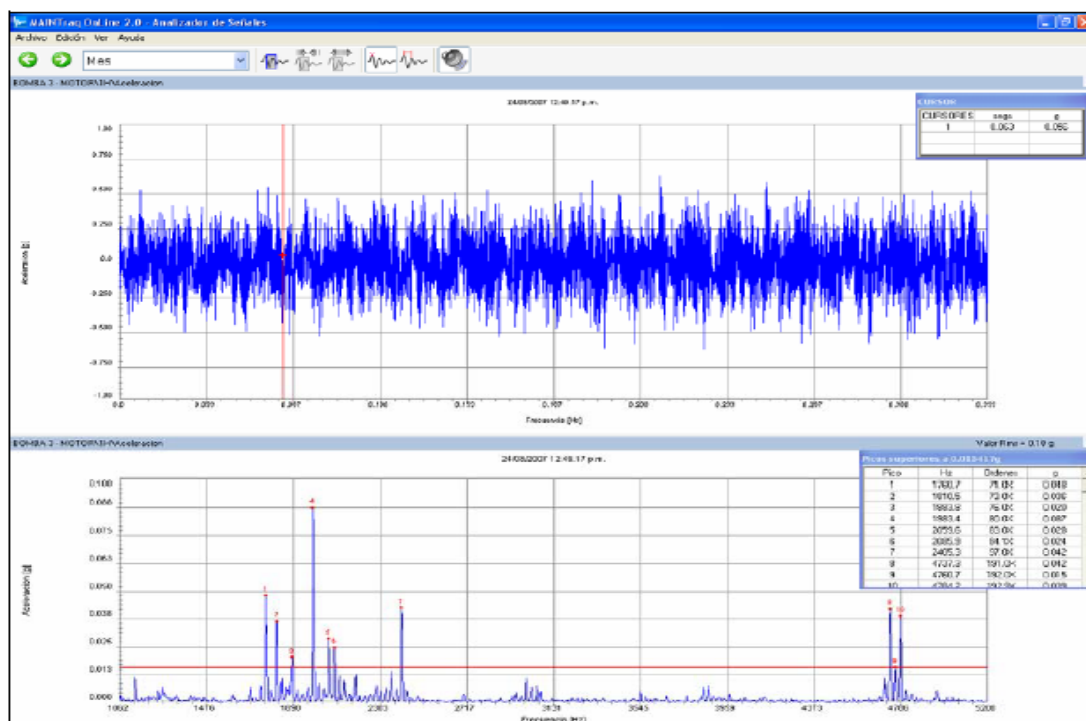


Fig. 3.20: Espectro de vibración bidimensional en el programa *Maintraq*

Fuente: Elaboración propia

EMPRESA :	FITESA	LÍNEA :	REICOFIL
PLANTA :	CAJAMARQUILLA	<b>SIGEM</b> Sistema Integral De Gestión y Monitoreo	
FECHA DE REPORTE :	26/09/2014		
PROBLEMAS DETECTADOS	Según Reporte		
EQUIPO PADRE:	RODILLO # 7	NOMBRE DE ACTIVO:	CHUMACERA LADO DERECHO - CHUMACERA LADO IZQUIERDO
MAQUINARIA:	SISTEMA DE TRANSPORTE	ANALISTA:	JOSÉ ROJAS
SISTEMA:	REICOFIL - BANDA TRANSPORTADORA	FECHA DE MONITOREO:	19/09/2014
INSPECCIONES - DATOS DE ÚLTIMAS INSPECCIONES			
Código de observación	19-sep		
1 Detector de paso de corriente	*		
2 Estado de fajas	*		
3 Limpieza	C		
4 Elemento de transmisión de potencia	*		
5 Pernos de sujeción	A		
6 Filtros - presiones estables	*		
7 Líneas de refrigeración por agua	*		
8 Ruido	A		
9 Nivel de aceite	*		
10 Fugas por el sello de la bomba	*		
11 Fugas por la tubería de la bomba	*		
12 Rigidez	A		
13 Temperatura	A		




Fig. 3.21: Reporte de vibración del motor de la planta textil

Fuente: Elaboración propia



La empresa Sedisa SAC brinda servicios de lubricación y mantenimiento predictivo a los motores eléctricos de la empresa Fitesa Perú SAC. En la Fig. 3.21 se muestra el informe emitido en el mes de setiembre del año 2014, se observa la causa de las vibraciones debido a la contaminación del lubricante en los rodamientos por acumulación de productos de tela en el eje de la planta que origina el desgaste del rodamiento en el interior de la chumacera.

La medición de la temperatura de operación en los puntos extremos al eje del motor es importante, ya que los rodamientos están diseñados para ciertos rangos de operación de temperatura. A temperatura ambiente se utilizan, por ejemplo, rodamientos de material de grafito. En cambio, para temperaturas más altas los rodamientos utilizados deben ser de material de acero. El registro de la temperatura también resulta importante porque es un indicador muy probable que exista un desgaste interno en el rodamiento debido a las fricciones de fuerzas causantes de vibraciones en el motor.

En la planta textil se utilizan rodamientos de alta consistencia, carga y durabilidad según el código del fabricante.

Otros indicadores importantes a considerar son la velocidad y la aceleración envolvente cuyos valores se deben comparar a lo permisible según la norma ISO 10816 -3 tal como se muestra en la tabla1.

TABLA N° 3.1: Valores permisibles de niveles de vibración según la norma ISO 10816 - 3

<b>Valores según Norma ISO</b>		
Estado	mm/s	gE
V.alerta	4.5	1
V.emergencia	7.1	4

TABLA N° 3.2: Niveles de vibración para todas las clases en los motores eléctricos trifásicos.

Fuente: Norma 10816 – 3

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816						
MACHINE		CLASS I	CLASS II	CLASS III	CLASS IV	
Vibration Velocity Vrms	in/s	mm/s	Small <5HP	Medium <500HP	Large rigid foundation	Large soft foundation
	0.01	0.28		Excelent		
	0.02	0.45				
	0.03	0.71				
	0.04	1.12		Good		
	0.07	1.80				
	0.11	2.80		Satisfactory		
	0.18	4.50				
	0.28	7.10		Unsatisfactory		
	0.44	11.20				
	0.71	18.00				
	1.10	28.00		Unacceptable		
	1.77	45.00				

TABLA N° 3.3: Reporte del motor del rodillo de la faja transportadora.

Fuente: Elaboración propia

REPORTES DE ANALISIS VIBRACIONALES - VALORES DE ULTIMAS MEDICIONES				
Listado de Falla	Fecha	Diagnostico y recomendaciones en Activo Motriz	Estado	Tendencia
0	19-sep	Equipo presenta niveles de vibración en condición aceptable, según las características de trabajo e internas del equipo. Se debe de seguir con el monitoreo programado para identificar cambios en la tendencia o aparición de frecuencias extrañas.	BUENO	NUEVA TENDENCIA
Listado de Falla	Fecha	Diagnostico y recomendaciones en el Activo Conducido	Estado	Tendencia
FALLA RODAMIENTO	19-sep	Chumaceras presentan elevados niveles de vibración con relación a los demás rodillos, se muestran frecuencias asincrónicas a la velocidad de giro que indican defecto en los rodamientos. Se debe de programar la intervención del equipo para realizar el cambio del rodamiento.	ALERTA	NUEVA TENDENCIA
ANALISIS DE ACEITE - VALORES DE ULTIMAS MEDICIONES DEL EQUIPO CONDUcido				
Listado de Falla	Fecha	Diagnostico y recomendaciones en el Conducido	Estado	Tendencia
		COLOCAR SI SE HACE MUESTREO DE ACEITE		

TABLA N° 3.4: Reporte del motor del rodillo de la banda transportadora.

Fuente: Elaboración propia

EMPRESA :	FITESA	LINEA :	REICOFIL
PLANTA :	CAJAMARQUILLA	<b>SIGEM</b> Sistema Integral De Gestión y Monitoreo	
FECHA DE REPORTE :	26/09/2014		
PROBLEMAS DETECTADOS	Según Reporte		
EQUIPO PADRE:	RODILLO #6	NOMBRE DE ACTIVO :	CHUMACERA LADO DERECHO - CHUMACERA LADO IZQUIER
MAQUINARIA:	SISTEMA DE TRANSPORTE	ANALISTA :	JOSE ROJAS
SISTEMA:	REICOFIL - BANDA TRANSPORTADORA	FECHA DE MONITOREO :	19/09/2014
INSPECCIONES - DATOS DE ULTIMAS INSPECCIONES			
Codigo de observación	19-sep		
1 Detector de paso de corriente	-		
2 Estado de fajas	-		
3 Limpieza	A		
4 Elemento de transmisión de potencia	-		
5 Pernos de sujeción	A		
6 Filtros - presiones estables	-		
7 Líneas de refrigeración por agua	-		
8 Ruido	A		
9 Nivel de aceite	-		
10 Fugas por el sello de la bomba	-		
11 Fugas por la tubería de la bomba	-		
12 Rigidez	A		
13 Temperatura	A		


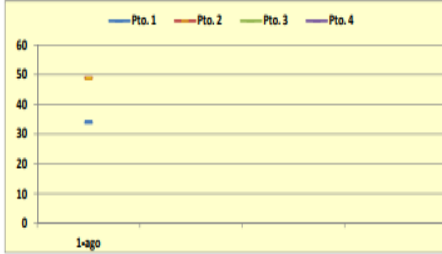


TABLA N° 3.5: Reporte setiembre 2014 del motor rodillo de la faja transportadora.

Fuente: Elaboración propia

TENDENCIA DE TEMPERATURA - VALORES DE ULTIMAS MEDICIONES						
Valores de Alarmas		Temperatura (°C)				
Valor de Alerta	85					
Valor de Emergencia	100					
		Motor		Conducido		
Fecha	Pto. 1	Pto. 2	Pto. 3	Pto. 4	Valor Max.	
1-ago	41	47			47	

TENDENCIA DE VIBRACIONES - VALORES DE ULTIMAS MEDICIONES						
Fecha	0-ene					
Posición	mm/s	gE	mm/s	gE		
Motor	Pto. 1V	0,0				
	Pto. 1H	0,0	0,0			
	Pto. 1A	0,0				
	Pto. 2V	0,0				
	Pto. 2H	0,0	0,0			
Pto. 2A	0,0					
Valor Max.	0,0	0,0				
Conducido	Pto. 3V	0,2				
	Pto. 3H	0,2	5,6			
	Pto. 3A	0,3				
	Pto. 4V	0,3				
	Pto. 4H	0,2	1,6			
Pto. 4A	0,2					
Valor Max.	0,3	5,6				

Unidades

Velocidad: mm/seg.

Envolvente: gE

Valores Según Norma ISO

Estado	mm/s	gE
V. Alerta	4,5	2
V. Emergencia	7,1	4

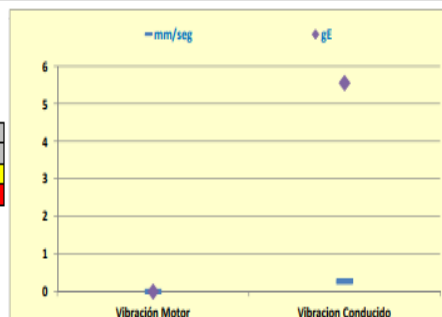


TABLA N° 3.6: Reporte del nivel de vibración del motor de la faja transportadora.

Fuente: Elaboración propia

REPORTES DE ANALISIS VIBRACIONALES - VALORES DE ULTIMAS MEDICIONES				
Listado de Falla	Fecha	Diagnostico y recomendaciones en Activo Motriz	Estado	Tendencia
FALLA RODAMIENTO	19-sep	Chumaceras presentan elevados niveles de vibración con relación a los demás rodillos, se muestran frecuencias asíncronas a la velocidad de giro que indican defecto en los rodamientos. Se debe de programar la intervención del equipo para realizar el cambio del rodamiento.	EMERGENCIA	NUEVA TENDENCIA
Listado de Falla	Fecha	Diagnostico y recomendaciones en el Activo Conducido	Estado	Tendencia
FALLA RODAMIENTO	19-sep	Chumaceras presentan elevados niveles de vibración con relación a los demás rodillos, se muestran frecuencias asíncronas a la velocidad de giro que indican defecto en los rodamientos. Se debe de programar la intervención del equipo para realizar el cambio del rodamiento.	EMERGENCIA	NUEVA TENDENCIA
ANALISIS DE ACEITE - VALORES DE ULTIMAS MEDICIONES DEL EQUIPO CONDUCIDO				
Listado de Falla	Fecha	Diagnostico y recomendaciones en el Conducido	Estado	Tendencia
		COLOCAR SI SE HACE MUESTREO DE ACEITE		
OBSERVACIONES DE SEGURIDAD Y OPERACIÓN / MEJORAS RECOMENDADAS				
Fecha	Observación		Mejora	
	Ninguna		Ninguna	

## **CAPÍTULO IV**

### **ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

El análisis de resultados del monitoreo de vibraciones mecánicas a dos motores trifásicos de 20HP de la banda transportadora en una planta textil que están rotulados como UE-1 y UE-2, considerados como *máquinas críticas* debido a las constantes averías por las excesivas amplitudes de vibración que provocaban paradas imprevistas de mantenimiento que conllevan a pérdidas en la productividad de planta.

#### **4.1 Análisis de reportes de averías del motor de la banda transportadora**

En la TABLA N° 4.1 se muestra el reporte del mes de setiembre del año 2014, en la cual se detalla el estado de las inspecciones realizadas al motor de la banda transportadora, el estado de los niveles de vibración mecánica se representa con los colores verde, amarillo y rojo en la cual indica los estados bueno, alerta y crítico respectivamente de acuerdo a las condiciones de limpieza, soltura de los pernos de sujeción, ruido, temperatura, desbalance, desalineación, etc. en el motor trifásico.

El mantenimiento preventivo basado en inspecciones visuales o táctiles sin medición alguna no es suficiente, por la cual es necesario de un instrumento de medición de vibraciones.

TABLA N° 4.1: Reporte de falla de vibración del motor de la banda transportadora.  
Fuente: Elaboración propia.

EMPRESA :	FITESA	LINEA :	REICOFIL
PLANTA :	CAJAMARQUILLA	<b>SIGEM</b> Sistema Integral De Gestión y Monitoreo	
FECHA DE REPORTE :	26/09/2014		
PROBLEMAS DETECTADOS	Según Reporte		
EQUIPO PADRE:	RODILLO # 3	NOMBRE DE ACTIVO :	CHUMACERA LADO DERECHO - CHUMACERA LADO IZQUIER
MAQUINARIA:	SISTEMA DE TRANSPORTE	ANALISTA :	JOSE ROJAS
SISTEMA:	REICOFIL - BANDA TRANSPORTADORA	FECHA DE MONITOREO :	19/09/2014
INSPECCIONES - DATOS DE ULTIMAS INSPECCIONES			
Codigo de observación	19-sep		
1 Detector de paso de corriente	-		
2 Estado de fajas	-		
3 Limpieza	A		
4 Elemento de transmisión de potencia	-		
5 Pernos de sujeción	A		
6 Filtros - presiones estables	-		
7 Líneas de refrigeración por agua	-		
8 Ruido	A		
9 Nivel de aceite	-		
10 Fugas por el sello de la bomba	-		
11 Fugas por la tubería de la bomba	-		
12 Rigidez	A		
13 Temperatura	A		



En la TABLA N° 4.1 se muestra el *checklist* de inspección del motor de la banda transportadora que se realizó en setiembre del año 2014. Según este reporte el motor eléctrico de la banda transportadora no presenta problemas de limpieza, de ajustes de los pernos de sujeción, la emisión de ruidos extraños, temperatura, etc. Sin embargo, estas inspecciones no son suficientes para el análisis vibracional. Por ello la empresa realizó la orden de compra en un dispositivo de vibración llamado *vibracheck* para la medición insitu de la vibración en determinados puntos y direcciones del motor como se ha mostrado en la figura Fig. 2.22. Estos puntos se colocan los sensores del *vibrasheck* y se registran los valores de las tres direcciones: vertical (V), horizontal(H) y axial(A). En la Fig. 4.2 se muestran los puntos y las direcciones que se consideran en el registro de las mediciones de vibración. Los puntos 1 y 2 ubicado en la parte del eje o acople y los puntos 3 y 4, en la parte posterior del motor.

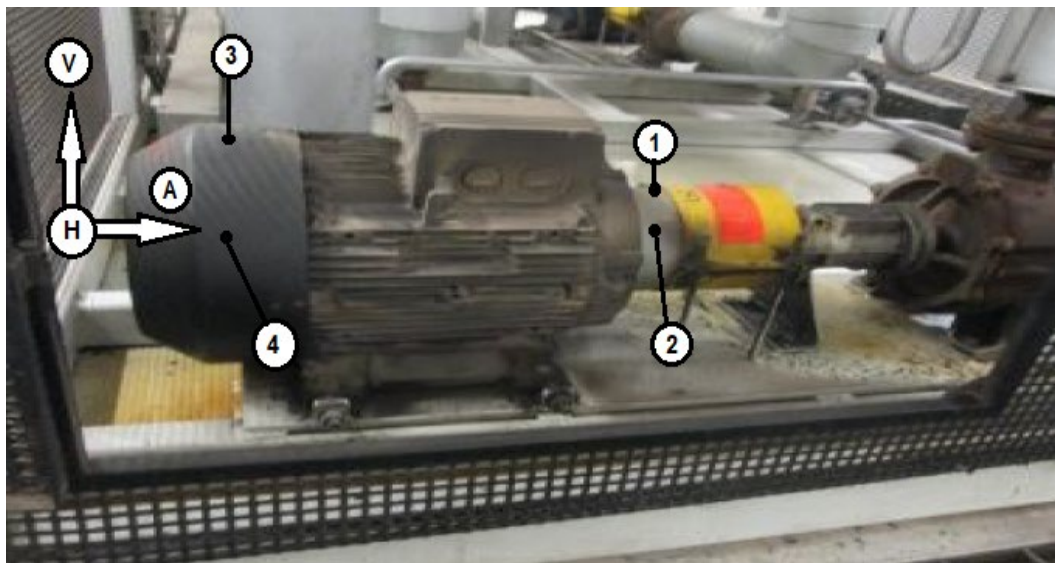


Fig. 4.1: Puntos de medición de vibración en un motor trifásico.

Fuente: Elaboración propia

En la TABLA N° 4.2 se muestran el registro de los valores de velocidad y aceleración de la envolvente en los puntos 1,2,3 y 4 cada una en las direcciones axial, radial y horizontal. Los valores de la velocidad de vibración son mínimo. Sin embargo, en los valores de aceleración de la envolvente se observa lo siguiente: En los puntos 1, 2 y 4, los valores registrados son casi nulo y en el punto 3 el valor registrado es 2.6 gE, el cual es un indicador de alerta según la norma ISO 10816-3. El técnico especialista informado del nivel alerta de vibración del motor monitorea constantemente las amplitudes del espectro de vibración y también realiza las acciones preventivas que permita extender un poco el tiempo de vida útil del rodamiento hasta un posterior cambio programado. Estas acciones son la lubricación de las chumaceras con la grasera, la ventaja es que se puede realizar sin necesidad de parar el funcionamiento del motor, es decir a plena marcha, y por consiguiente no afectar la línea de proceso de la tela. El operario lubrica los rodamientos para reemplazar la grasa contaminada por la suciedad o limallas provocadas por las fricciones o contactos en el interior de los rodamientos.

TABLA N° 4.2: Registro de medición de las vibraciones mecánicas de los motores de la banda transportadora. Fuente: Elaboración propia

Fecha		Sep - 14	
Posición		mm/s	gE
Motor	Pto. 1V	0,0	0,0
	Pto. 1H	0,0	
	Pto. 1A	0,0	
	Pto. 2V	0,0	
	Pto. 2H	0,0	
	Pto. 2A	0,0	
Valor Max.		0,0	0,0
Conducido	Pto. 3V	0,2	2,6
	Pto. 3H	0,2	
	Pto. 3A		0,0
	Pto. 4V	0,2	
	Pto. 4H	0,2	
	Pto. 4A	0,2	
Valor Max.		0,2	2,6

Unidades	
Velocidad:	mm/s
Envolvente:	gE

Valores segun norma ISO 10816		
Estado	mm/s	gE
V. Alerta	4,5	2
V. Emergencia	7,1	4

En la TABLA N° 4.3 se aprecia el reporte de otro motor eléctrico de la banda transportadora con problemas de contaminación por producto de tela entre el eje del rodillo y el rodamiento, el cual ha provocado niveles altos de vibración. Esta medida de vibración registrada en la TABLA N°4.4 de magnitud 4.5 gE que según la norma ISO 10816 - 3 está en el rango crítico de vibración.

Las fallas en año 2014 por exceso de vibración eran recurrentes en la planta textil y la tendencia de aumento de estas vibraciones eran incontrolables. La jefatura de Mantenimiento de aquel entonces, no tuvo otra opción, que sustituir varias veces los rodamientos provocando pérdidas económicas y en tiempo por paradas de planta imprevistas, tiempo de arranque de las máquinas, tiempo de preparación y colocación de la tela y en el tiempo de obtención del repuesto. Por estas razones la organización planteó una primera solución a este problema mediante el monitoreo con el *Vibrascheck*, sin embargo, se aplicó por unos meses ya que resultó peligroso realizar mediciones a los motores en plena marcha por el difícil acceso a estos motores para colocar correctamente el acelerómetro del *vibrascheck*, esto ha generado mediciones no fiables e incluso hasta accidentes. En vista de ello se recurrió a otra opción mediante el monitoreo a distancia ya con los acelerómetros instalados fijamente a los motores.



TABLA N° 4.3: Reporte de inspección de un motor en estado crítico de vibración.

Fuente: Elaboración propia.

EMPRESA :	FITESA	LÍNEA :	REICOFIL
PLANTA :	CAJAMARQUILLA	<b>SIGEM</b> Sistema Integral De Gestión y Monitoreo	
FECHA DE REPORTE :	26/09/2014		
PROBLEMAS DETECTADOS	Según Reporte		
EQUIPO PADRE:	RODILLO # 7	NOMBRE DE ACTIVO :	CHUMACERA LADO DERECHO - CHUMACERA LADO IZQUIER
MAQUINARIA:	SISTEMA DE TRANSPORTE	ANALISTA :	JOSE ROJAS
SISTEMA:	REICOFIL - BANDA TRANSPORTADORA	FECHA DE MONITOREO :	19/09/2014
INSPECCIONES - DATOS DE ULTIMAS INSPECCIONES			
Codigo de observación	19-sep		
1 Detector de paso de corriente	-		
2 Estado de fajas	-		
3 Limpieza	C		
4 Elemento de transmisión de potencia	-		
5 Pernos de sujeción	A		
6 Filtros - presiones estables	-		
7 Líneas de refrigeración por agua	-		
8 Ruido	A		
9 Nivel de aceite	-		
10 Fugas por el sello de la bomba	-		
11 Fugas por la tubería de la bomba	-		
12 Rigidez	A		
13 Temperatura	A		




TABLA N° 4.4: Registro de tendencias de vibración del motor de la banda transportadora.

Fuente: Elaboración propia.

TENDENCIAS DE VIBRACION			
Fecha		sep - 2014	
Posición		mm/s	gE
Motor	Pto. 1V	0,0	0,0
	Pto. 1H	0,0	
	Pto. 1A	0,0	
	Pto. 2V	0,0	0,0
	Pto. 2H	0,0	
	Pto. 2A	0,0	
Valor Max.		0,0	0,0
Conducido	Pto. 3V	4,4	4,5
	Pto. 3H	3,2	
	Pto. 3A	2,5	
	Pto. 4V	2,5	1,4
	Pto. 4H	2,0	
	Pto. 4A	2,2	
Valor Max.		4,4	4,5

La figura Fig. 4.2 muestra el espectro de vibración de un punto de medición del motor de la banda transportadora en estado crítico, cuyas señales de máximas amplitudes están a frecuencias aproximadas de 9887.69 y 21620.40 cpm y cercanas a los múltiplos enteros de la frecuencia de giro del motor (1800 cpm), el cual se podría interpretarse esta como un problema de desalineamiento angular. La aceleración cuadrática media de la aceleración de la envolvente de todas las señales registradas en este punto es 0.503 in/sec equivalente a 6.35gE, el cual es mayor que 4.5 gE de la norma ISO 10816.

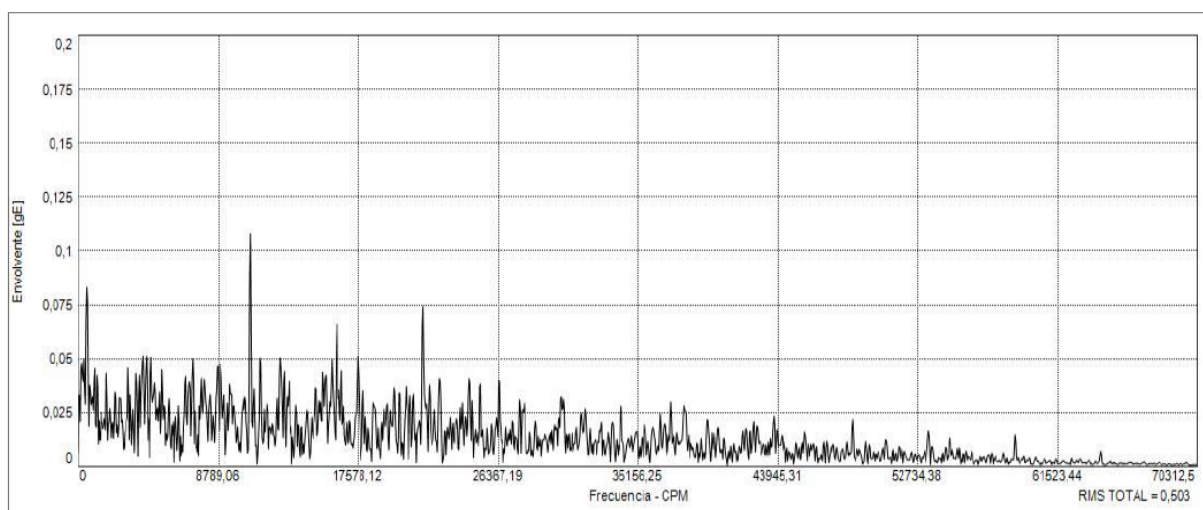


Fig. 4.2: Espectro de aceleración de un motor con falla crítica de vibración mecánica.

Fuente: Elaboración propia

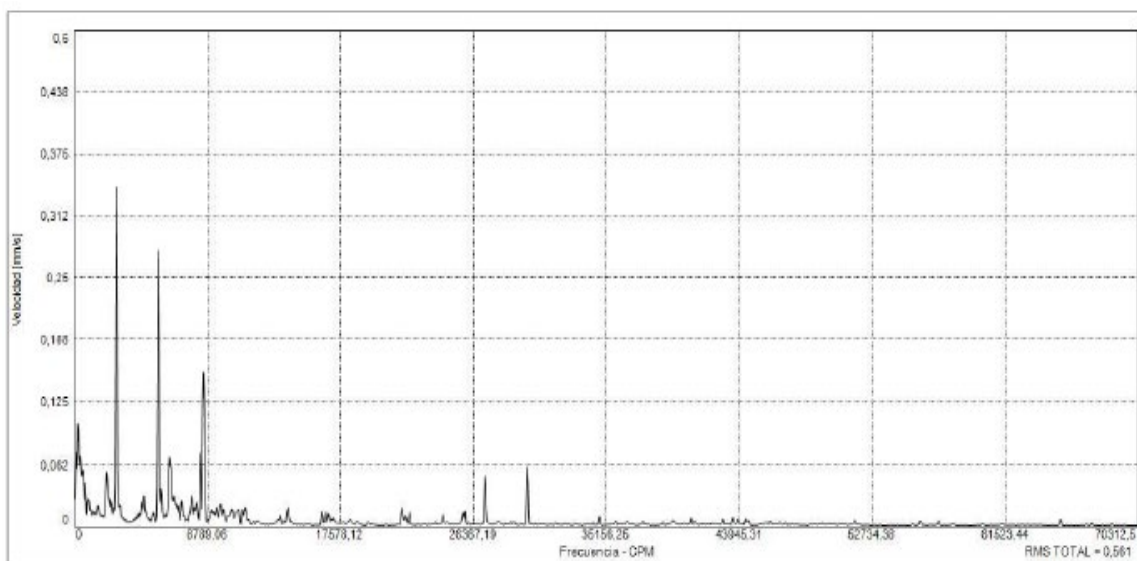


Fig.

4.3: Espectro de velocidad de vibración del motor de la banda transportadora.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2 Discusión de resultados

Los resultados mensuales de registro de vibración durante el año 2014 de las máquinas rotativas de la planta textil del motor de la banda transportadora (antes de la implementación del proyecto) están representados en la TABLA N°4.5 mediante el uso del *Vibrasheck*. Se puede apreciar las fallas constantes de los motores en sus niveles de vibración debido a una falta de mayor control en sus mediciones, la capacitación de personal, dar mucha prioridad a la productividad de la planta, mayor investigación a otras alternativas de solución al problema. Esto motivó a cambiar de estrategias y métodos. Por ello se planteó un plan de mantenimiento predictivo basado en el monitoreo inalámbrico de las vibraciones mediante el dispositivo *vibraspeck 800*. En la TABLA N° 4.6 se muestra el registro mensual de vibración durante el periodo 2015 para los mismos motores que fueron monitoreados en el periodo del año 2014. Se puede observar relativamente una mejora, ya que las fallas críticas pasaron de una ocurrencia mensual a un periodo de falla de cuatro meses, el cual es aceptable por el periodo de vida de los rodamientos y por consiguiente ya requieren un cambio de este elemento. Además otra mejora con la implementación del monitoreo inalámbrico es el mayor control de las vibraciones mediante las inspecciones constantes para ejecutar las acciones preventivas mediante la visualización de los parámetros de vibración en el computador del taller.

TABLA N° 4.5: Reporte mensual de mediciones de las maquinas rotativas de la empresa textil en el periodo 2014.

Fuente: Elaboración propia

Equipo	Ene-14		Feb-14		Mar-14		Abr-14		May-14		Jun-14		Jul-14		Ago-14		Set-14		Oct-14		Nov-14		Dic-14			
	V(mm/s)	gE	V	gE	V	gE	V	gE	V	gE	V	gE	V	gE	V	gE	V	gE	V	gE	V	gE	V	gE		
1 Rodillo UE-02- motor - sistemas de evaporadores - banda transportadora			7.7	0.4	7	1.4	7.2	0.4	14	0.3	21	0.8	6.5	0.4	11.6	0.5	10	3.5	5.8	1.5	5.9	0.3	18.9	0.8		
2 Rodillo UE-01- motor- sistemas de evaporadores - banda transportadora			9.3	1.6	6.9	1.2	10	0.7	7.7	0.4	10	0.7	8	0.6	8	0.4	7.1	0.5	7	0.5	7.7	0.5	12	1.5		
3 Bomba n83 Chiller de agua- motor- sistema de bombeo			7.7	1	4.5	0.9	4.7	1.2	4.1	0.6	9.8	0.8	6.1	1.1												
4 Bomba n82 Chiller de agua - motor- sistema de bombeo			4.8	0.7	4.7	1.7	3.8	0.9	4.2	0.7																
5 Motobomba n81- sistema de bombeo de agua blanda			1.6	0.6	1.4	1	1.5	0.6	1	0.4	1	1.2														
6 Rodillo n82-chumacera lado derecho-sistema de transporte					0.3	1.9	0.3	1.2	0.3	1.8	0.3	2.6	0.3	2.1												
7 Coextrusor cabezal beam E- motor- sistemas de extrusion			0.9	6	1	5.5	1.9	8.5	0.7	3.8	0.7	3.8	1.8	3.1	1.1	3.1	1.8	5.88	3	4.72						
8 Accionamiento de rodillos tensores 1 y 2- motor- desenrolladora			9.5	0.7	4.5	0.9	8	0.9	32	3.1	14	1.3	9.8	0.8												
9 Extractor de monomero beam B - motor- sistema de extraccion de monomeros			4.6	1.1	5.1	1	3.1	1.2	5	0.6	5	1.6														
10 Rodillo grabado- junta rotativa Izq- sistema de accionamiento de rodillo grabado					1.4	1	2.4	1.8	2.2	2.2	8	2.1	7.9	2												
11 Rodillo contrapresion rolo pressorB - motor -sistema de transporte							5	1.6	13	2.5	4.6	2.5	9.7	2.5	8.7	2.2	3.9	0.9	2.8	1	2.8	1				
12 Rodillo de salida inferior- chumacera lado derecho- sistema de accionamiento rodillo de salida							1.1	1	1.8	0.5	1.6	1.6	3.7	3.3	6	3.5			1.9	1.2	1.74	1.31	2.57	20.5		
13 Rollopressor Beam A- junta rotativa lado izquierdo- sistema de transporte									7.6	0.7	4.3	0.6	6.5	4.5	6.2	5.1	5.1	0.88	5.3	0.95	6.17	1.18	5.42	0.68		
14 Succion primario Beam A-motor-sistema succion aire proceso Reicofil									0.9	1.5	1.9	3.7	1.6	1.4												
15 Rodillo N96- chumacera lado izquierdo y derecho- Banda transportadora								0.3	4.7	0.2	6.7	0.2	4.6	0.3	4.8	0.2	4.8	0.2	3.8							
16 Rodillo N88- chumacera lado izquierdo y derecho- Banda transportadora								0.3	0.8	0.3	1.1	0.4	1.3	0.4	1.8	1	4.6	0.3	1.9	0.3	0.6					
17 Rodillo contrapresion rollopressor E								0.8	0.2	8.7	1.7	7.9	2.5	15	2.3											
18 Soplador Spun bond-motor- sistema de compresion									7.5	8.4	8.8	11.2	8.8	11.2	6.6	10	5.9	8.11	5.4	8.24	6.08	7.98	5.31	10.8		
19 Rodillo contrapresion Rollo Presor Beam E															15	1.3	14	1.1	8.3	1.2	8.4	1.6				
20 Bomba de inyección cabezal Beam C													0.5	0.31	0.7	0.35	0.5	0.23	0.6	0.07	0.66	0.29				
21 Rollopressor Beam B- junta rotativa lado izquierdo- sistema de transporte													4.6	3.3	4.4	4	4.1	5.54	4.1	4.45	8.40	5.31				
22 Rodillo N811- chumacera lado izquierdo y derecho- sistema de transporte													0.3	1.85	0.3	2.32	0.3	1.19	0.3	1.98	0.24	1.94	0.23	1.35		
23 Rodillo superior rodillo motriz- chumacera lado izquierdo y derecho- sistema de accionamiento													0.6	1.06	1.2	0.6	0.5	2.45	0.5	2.77	0.45	3.31	0.64	1.85		
24 Accionamiento ventilador principal- motor derecho-sistema de accionamiento ventilador principal															2	1.9	1.7	1.6	1.5	2	1.7	1.6	1.1	2		
25 Coextrusor cabezal beam A- motor- sistemas de extrusion															1.3	0.84	2.3	0.61	5.7	0.86						
26 Accionamiento rodillo de salida - motor y reductor																			3.3	1.92	3.39	1.93				
27 Peletizador - motor - sistema peletizador de corte en caliente																			5.6	2.7	5.8	2.19	14	1.84	12.5	2.02
28 Bomba llenado - motor - sistema de inyector soplador transportador																			5.2	2.28	4.3	2.14	15.1	2.26		
29 Ventilador secundario Beam A - motor - Sistema de ventilacion proceso Reicofil																					1.1	1.8	1.2	2.1	1.3	3.6
30 Ventilador primario Beam B - sistema de ventilacion proceso Reicofil																					3.7	2.6	4.5	2.4	2.7	2.9
31 Unidad hidraulica grupo de cabeza obturadora - motor- calandra																						1.66	1.8	1.15	3.89	
32 Ventilador primario Beam A- motor derecho- sistema de ventilacion proceso Reicofil																						5.3	0.9	5.7	1.8	
33 Rollopressor Beam E- junta rotativa- sistema de transporte																										
34 Bomba de inyeccion Beam A - motor- sistema de inyeccion polipropileno																										
35 Bomba de circulacion de circuito primario - bomba - sistema de recirculacion de aceite																										
36 Accionamiento rodillo enrollador - reductor - sistema de enrollamiento																										
37 Succion auxiliar beam B - motor - sistema de succion aire proceso Reicofil																										

TABLA N° 4.6: Reporte mensual de mediciones de las maquinas rotativas de la empresa textil en el periodo 2015.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Ene-15		Feb-15		Mar-15		Abr-15		May-15		Jun-15		Jul-15		Ago-15		Set-15		Oct-15		Nov-15		Dic-15	
	v(mm/s)	gE	v	gE	v	gE	v	gE	v	gE	v	gE	v	gE	v	gE	v	gE	v	gE	v	gE	v	gE
1 Rodillo UE-02- motor - sistemas de evaporadores - banda transportadora																								
2 Rodillo UE-01- motor- sistemas de evaporadores - banda transportadora	6.1	0.6	5.7	0.7	5.8	0.9	5.8	1.2	15.9	2.6	11.8	4.6	14.5	4.3										
3 Bomba n83 Chiller de agua- motor- sistema de bombeo	7.4	0.4													7.3	0.7	8.5	1.6	3.9	4.5	3.9	4.5	4.4	5.1
4 Bomba n82 Chiller de agua - motor- sistema de bombeo																								
5 Motobomba n81- sistema de bombeo de agua blanda																								
6 Rodillo n82-chumacera lado derecho-sistema de transporte																								
7 Coextrusor cabezal beam E- motor- sistemas de extrusion																								
8 Accionamiento de rodillos tensores 1 y 2- motor- desenrolladora																								
9 Extractor de monomero beam B - motor- sistema de extraccion de monomeros																								
10 Rodillo grabado- junta rotativa izq- sistema de accionamiento de rodillo grabado																								
11 Rodillo contrapresion rollo pressorB - motor- sistema de transporte																								
12 Rodillo de salida inferior- chumacera lado derecho- sistema de accionamiento rodillo de salida																								
13 Rollopressor Beam A- junta rotativa lado izquierdo- sistema de transporte																								
14 Succión primario Beam A-motor-sistema succion aire proceso Reicoffi											3.29	0.53	3.76	0.65	3.32	1.18	3.63	4.21						
15 Rodillo N86- chumacera lado izquierdo y derecho- Banda transportadora															0.7	1.1	0.8	0.8	0.9	3.7	0.7	5.4	0.8	3.8
16 Rodillo N88- chumacera lado izquierdo y derecho- Banda transportadora																								
17 Rodillo contrapresion rollopressor E																								
18 Soplador Spun bond-motor- sistema de compresion					14.3	2.1	16.8	1.3	17.4	1.4	9.7	1	12.6	1.2	19.8	1.7								
19 Rodillo contrapresion Rollo Presor Beam E	6.27	9.48																						
20 Bomba de inyección cabezal Beam C			9.9	1.7	14.3	2.1	16.8	1.3	17.4	1.4	9.7	1	12.6	1.2	19.8	1.7	14.9	1.5						
21 Rollopressor Beam B- junta rotativa lado izquierdo- sistema de transporte																								
22 Rodillo N811 -chumacera lado izquierdo y derecho- sistema de transporte			6.47	0.38	6.47	0.69	4.51	0.41	6.03	2.94														
23 Rodillo superior rodillo matriz- chumacera lado izquierdo y derecho- sistema de accionamiento																								
24 Accionamiento ventilador principal- motor derecho-sistema de accionamiento ventilador principal					0.45	1.44	0.71	2.59	0.72	1.94	0.86	1.93			0.51	0.61	0.53	0.81	0.72	1.94	0.86	1.93	0.69	0.97
25 Coextrusor cabezal beam A- motor- sistemas de extrusion	1.6	1.8																						
26 Accionamiento rodillo de salida - motor y reductor					0.7	2.2	1.3	4.4	1.2	5.1	2.8	6												
27 Peletizador - motor - sistema peletizador de corte en caliente					1.83	2.85	2.17	2.81	1.74	3.74	1.64	7.83	2.2	9.31	2.51	1.99	2.4	1.76	2.68	1.7	2.62	7.55		
28 Bomba llenado - motor - sistema de inyector soplador transportador	16.67	2.44	15.16	1.55	15.09	2.32																		
29 Ventilador secundario Beam A - motor - Sistema de ventilacion proceso Reicoffi			4.17	1.3	5.87	2.57	6	2.36	17.44	3.55														
30 Ventilador primario Beam B - sistema de ventilacion proceso Reicoffi																								
31 Unidad hidraulica grupo de cabeza obturadora - motor- celandra	5.4	3.4	4.3	3.6	4.2	3.4	4.9	3.9	2.3	3.8	1.4	3.7	1.5	3.3	2.1	3.8								
32 Ventilador primario Beam A- motor derecho- sistema de ventilacion proceso Reicoffi	0.96	4.12	1.05	5.24	1.73	7.05	1.65	2.41																
33 Rollopressor Beam E- junta rotativa- sistema de transporte	3.5	1	6.1	1.7	5	1.4																		
34 Bomba de inyección Beam A - motor- sistema de inyección polipropileno			7.48	0.58	10.97	0.35	9.78	0.51	8.28	5.6														
35 Bomba de circulación de circuito primario - bomba - sistema de recirculación de aceite					0.73	0.82	2.75	2.75	0.69	1.29	4.83	1.86												
36 Accionamiento rodillo enrollador - reductor - sistema de enrollamiento							1.56	6.94	1.42	5.91	1.32	9.35	1.48	11.33	1.73	7.79								
37 Succión auxiliar beam B - motor - sistema de succion aire proceso Reicoffi							0.29	0.22	2.83	1.42	1.32	0.72	2.52	7.96										

En la TABLA N° 4.6 se muestran las magnitudes de las vibraciones de todas las máquinas rotativas de la empresa que son monitoreados de manera manual o directa mediante el equipo *Vibrasheck*. Sin embargo, para un mejor estudio de resultados se ha realizado el análisis para los motores de la banda transportadora UE-1 y UE-2 por presentar más fallas críticas de vibración durante el periodo 2014. En la TABLA N° 4.7. se observan los valores críticos de vibración registrados durante el año 2014, el cual provocó dieciocho paradas no programadas acumulando un total de 24 horas de inactividad y en consecuencia un resultado desfavorable de sus indicadores de producción de la empresa y sobre todo en el tiempo de entrega fuera de plazo de sus productos a sus principales clientes.

- El costo en mantenimiento correctivo de los motores en el periodo 2014 teniendo en cuenta los costos de materiales presentados en el anexo:

- $Costo_{Mtto} = 165.31 \times 18 = 2,975.58 \text{ dólares}$

De la TABLA N° 4.9 se contabilizan seis paradas por fallas de vibración de los motores durante el año 2015. A continuación, se calcula el costo de mantenimiento de estos motores:

- El costo en mantenimiento correctivo de los motores en el periodo 2015:

- $Costo_{Mtto} = 165.31 \times 6 = 991.86 \text{ dólares}$

La diferencia de estos costos es 1,983.86 dólares, el cual resulta ser el ahorro generado al año. Teniendo en cuenta esto, se ha calculado el tiempo de recuperación de la inversión de \$12,595.00 para este proyecto:

$$T_{rec.inv} = \frac{12595}{1983.86}$$

$$T_{rec.inv} = 6.35 \text{ meses}$$

Por lo tanto, la empresa ha recuperado su inversión en aproximadamente siete meses.

TABLA N° 4.7: Registro de los motores de la banda transportadora.

Fuente: Elaboración propia.

	Ene-14	Feb-14	Mar-14	Abr-14	May-14	Jun-14	Jul-14	Ago-14	Set-14	Oct-14	Nov-14	Dic-14
V/gE del motor de rodillo UE-01 sistemas de evaporadores		9.3 2	6.9 1	10 1	7.7 0	10.2 0.7	8 0.6	8 0.4	7.1 0.5	7 0.5	7.7 0.5	12 1.5
Horas de inactividad del motor de rodillo UE-01		8		6		4		6				9
Numero de paradas del motor		2		3		2		2				3
V/Ge del motor de rodillo UE-02 sistemas de evaporadores		7.7 0	7 1	7.2 0	14 0	20.8 0.8	6.5 0.4	11.6 0.5	10 3.5	5.8 1.5	5.9 0.3	19 0.8
Horas de inactividad del motor de rodillo UE-02						6		2	6			3
Numero de paradas del motor						2		1	2			1

#### 4.2.1 Cálculo del tiempo medio entre fallas (MTBF) de los motores de la banda transportadora.

Los indicadores de Mantenimiento son importantes porque permiten determinar si la gestión que se realiza para mantener los equipos o activos de la empresa son realmente eficientes. Caso contrario se debe cambiar de planes o acciones de tal forma que los indicadores sean valores óptimos. En este caso el indicador que se ha calculado para conocer la efectividad del presente trabajo es el indicador del tiempo medio entre fallas (MTBF). El MTBF se calcula de la siguiente manera:

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total disponible} - \text{Tiempo de inactividad}}{\text{Numero de paradas}} \dots \dots (4.1)$$

##### a) Cálculo del MTBF del motor UE -1 en el periodo del año 2014:

###### - MTBF – febrero

$$MTBF_{Feb} = \frac{28 \times 24 - 8}{2} = 332 \text{ horas/falla}$$

Aplicando la ecuación (4.1), el MTBF en el mes de febrero aproximadamente es 14 días/ falla, es decir, que cada 14 días se presenta una avería.

###### - MTBF – abril

$$MTBF_{Mar} = \frac{31 \times 24 - 6}{3} = 246 \text{ horas/falla}$$

El MTBF en el mes de abril aproximadamente es 10 días/ falla, es decir, que cada 10 días se presenta una avería.

###### - MTBF – junio

$$MTBF_{Jun} = \frac{30 \times 24 - 4}{2} = 246 \text{ horas/falla}$$

El MTBF en el mes de junio aproximadamente es 15 días/ falla, es decir, que cada 15 días se presenta una avería.

###### - MTBF – agosto

$$MTBF_{Ago} = \frac{31 \times 24 - 6}{2} = 369 \text{ horas/falla}$$



El MTBF para el mes de agosto aproximadamente es 15 días/ falla, es decir, que cada 15 días se presenta una avería.

- **MTBF – diciembre**

$$MTBF_{Dic} = \frac{31 \times 24 - 9}{3} = 245 \text{ horas/falla}$$

El MTBF para el mes de diciembre aproximadamente es 10días/ falla, es decir, que cada 10 días se presenta una avería.

El MTBF de los dos motores de la banda transportadora rotulados como UE-1 Y UE-2 se describen completamente en la TABLA N° 4.8:

TABLA N° 4.8: Calculo del MTBF de los motores de las bandas transportadoras en el periodo del año 2014.

Fuente: Elaboración propia.

	Ene-14	Feb-14	Mar-14	Abr-14	May-14	Jun-14	Jul-14	Ago-14	Set-14	Oct-14	Nov-14	Dic-14											
V/Ge del motor de rodillo UE-01 sistemas de evaporadores		9.3	2	6.9	1	10	1	7.7	0	10.2	0.7	8	0.6	8	0.4	7.1	0.5	7	0.5	7.7	0.5	12	1.5
Horas de inactividad del motor de rodillo UE-01		8			6			4		6												9	
Numero de paradas del motor		2			3			2		2												3	
V/Ge del motor de rodillo UE-02 sistemas de evaporadores		7.7	0	7	1	7.2	0	14	0	20.8	0.8	6.5	0.4	11.6	0.5	10	3.5	5.8	1.5	5.9	0.3	19	0.8
Horas de inactividad del motor de rodillo UE-02								6		2		6										3	
Numero de paradas del motor								2		1		2										1	
	<b>2014</b>																						
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic											
MTBF - motor de rodillo UE-01 ( días/falla)		13.8		9.92		14.92		15.4				10.2											
MTBF - motor de rodillo UE-02 ( días/falla)						14.88		30.9	14.9			30.9											

En la TABLA N° 4.8 se observa el MTBF de forma mensual durante el periodo del año 2014. En la cual se ha verificado que en los meses de febrero, abril, junio, agosto, setiembre y diciembre las fallas por exceso de vibración en el motor UE-1 es cada 20,11,10, 21 y 9 horas respectivamente. En el caso del motor UE-02 las fallas se presentaron durante los meses de junio, agosto, setiembre y diciembre cada 9, 22, 9 y 21 horas respectivamente. Los directivos de la planta textil teniendo conocimiento de estas estadísticas de fallas no podían paralizar varias veces la productividad de la empresa, ya que implicaría pérdidas económicas, seguridad del personal operativo y la competitividad con otras empresas del mismo rubro y sobre todo las inconformidades de sus clientes por el tiempo de entrega.

El análisis vibracional que se realizaba de forma manual o directa mediante un analizador de espectro resulta algo peligroso e inclusive en la evaluación de las mediciones in situ, ya que se realizan con la maquina en operación. Además, dichas evaluaciones de las mediciones obligaban a ser constantes, por ser estos motores de carácter crítico para la productividad de la planta. A partir de estas dificultades los directivos de la empresa han decidido implementar un sistema de monitoreo constante e inalámbrico. Este sistema se ha instalado en marzo del año 2015, cuyos resultados de las mediciones durante este periodo se muestra en la TABLA N° 4.9:

**b) Cálculo del MTBF del motor UE -1 en el periodo del año 2015:**

**- MTBF – enero**

$$MTBF_{Feb} = \frac{31 \times 24 - 3}{1} = 741 \text{ horas/falla}$$

Utilizando la ecuación (4.1), el MTBF en el mes de enero prácticamente es 31 días/ falla, es decir, que cada 31 días se presenta una avería.

**- MTBF – mayo**

$$MTBF_{Ago} = \frac{30 \times 24 - 4}{2} = 358 \text{ horas/falla}$$

el MTBF en el mes de enero prácticamente es 15 días/ falla, es decir, que cada 31 días se presenta una avería.

TABLA N° 4.9: Calculo del MTBF de los motores de la banda transportadora durante el periodo del año 2015.

Fuente: Elaboración propia

	Ene-15	Feb-15	Mar-15	Abr-15	May-15	Jun-15	Jul-15	Ago-15	Set-15	Oct-15	Nov-15	Dic-15					
V/gE del motor de rodillo UE-01 sistemas de evaporadores	7.4	0.4						7.3	0.7	8.5	1.6	3.9	4.5	3.9	4.5	4.4	5.1
Horas de inactividad del motor de rodillo UE-01	3								2								
Numero de paradas del motor	1								1								
V/Ge del motor de rodillo UE-02 sistemas de evaporadores	6.1	0.6	5.7	0.7	5.8	0.9	5.8	1.2	15.9	2.6	11.8	4.6	14.5	4.3			
Horas de inactividad del motor de rodillo UE-02						4			6								
Numero de paradas del motor						2			2								
	2015																
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic					
MTBF - motor de rodillo UE-01 ( dias/falla)	31																
MTBF - motor de rodillo UE-02 ( dias/falla)					15.4		15.4		22								

En la TABLA N° 4.9 se puede observar que, a partir de marzo del año 2015, mes en el cual se ha empezado a monitorear a distancia las vibraciones de los motores de la banda transportadora UE -1 y UE -2 de manera inalámbrica, se observa que las paradas de mantenimiento se dieron en los meses de mayo, julio y setiembre con un tiempo total de parada de 12 horas de inactividad. Sin embargo, a diferencia del reporte de fallas imprevistas en el periodo 2014, las paradas de planta en el periodo 2015 eran controladas mediante acciones preventivas hasta un mantenimiento de parada de planta programado mensual donde se lleva a cabo los mantenimientos correctivos de las máquinas. El monitoreo continuo de las vibraciones mecánicas de los motores eléctricos permitió una mayor atención a fallas antes de llegar a nivel crítico ya que el propio programa manda una señal de alerta acústica.

El tiempo medio entre fallas (MTBF) del periodo 2015 es relativamente bajo respecto al periodo 2014, por ejemplo, al final del primer mes de prueba (abril del 2015), se registró un MTBF promedio de 2 meses/falla aproximadamente en comparación del MTBF de 1 mes/falla en el periodo 2014. Los demás resultados del MTBF se muestra en el siguiente histograma para ambos motores UE -1 y UE - 2.

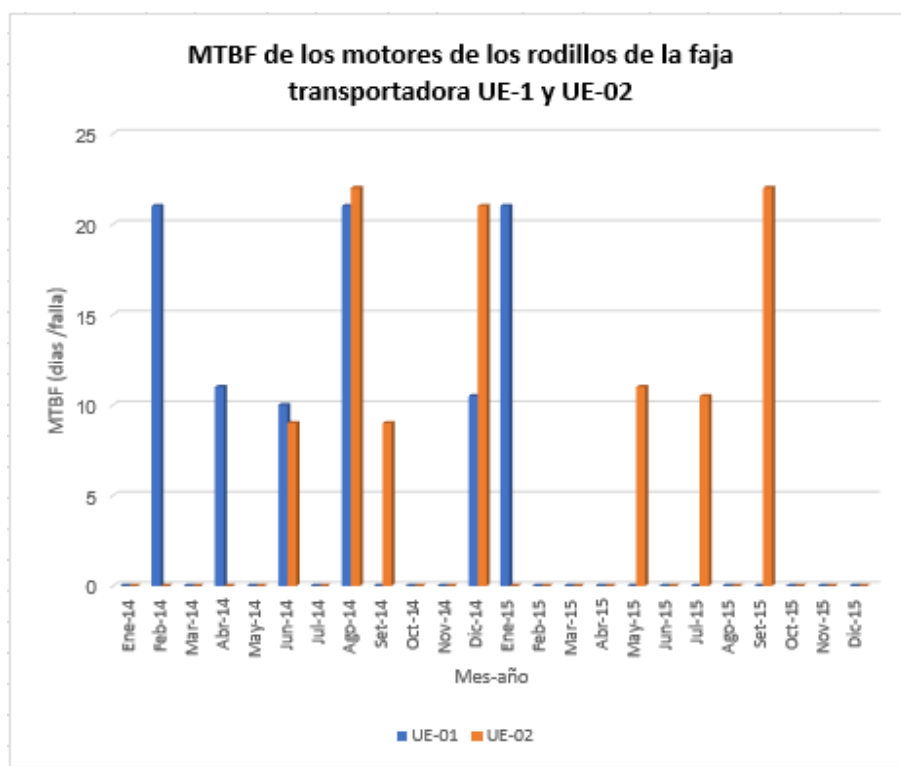


Fig. 4.4: MTBF en los periodos 2014 - 2015 de los motores de la banda transportadora.

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 4.4 se presenta un histograma en la cual se observan las magnitudes de los MTBF (días/falla), donde se aprecia notablemente un mejoramiento de este indicador a partir de abril 2015, fecha en que se llevó a cabo el monitoreo del análisis de vibraciones de manera continua. De septiembre a diciembre del 2015 se observa una diferencia notable en el tiempo medio entre fallas, el cual es un valor optimo, ya que va acorde con el tiempo de vida útil promedio del rodamiento, cuyo cambio del rodamiento se ejecuta preferentemente en una parada de mantenimiento programado y de esta manera no afectar la productividad de la planta textil.

Un indicador muy importante que toda empresa que desea alcanzar para considerarse una organización de clase mundial es la *efectividad global del equipo* (OEE), en la cual es una métrica que involucra no solo la parte operativa de la máquina sino a tres parámetros importantes para la mejora en la productividad de una empresa como son la disponibilidad, rendimiento y la calidad de la máquina.

#### **4.2.2 Visualización del estado de las vibraciones en tiempo real.**

El exceso de las magnitudes de las vibraciones mecánicas se visualiza en la pantalla de un computador del taller de mantenimiento, por medio de mensajes de alerta en registro del historial de averías del programa *Maintraq en línea* tal como se aprecia en la Fig. 4.5. Las señales de alerta están señaladas en colores amarillo (observado) o rojo (alerta u observado) acorde a la tabla ISO 10816 – 3. Además de una señal visual el vibraspeck 800 tiene un relé de salida para instalar una sirena o buzzer para alertar ante una vibración mecánica fuera de rango. El historial de falla detalla el tipo de máquina, la fecha y hora de la ocurrencia de la avería y la descripción del nivel de vibración.

Alarma en	Fecha	Descripción
MOTOR/DESBALANCEO/ROD ENROLL	28/07/2015 11:45:09	Valor alto
MOTOR/1H/DESPLAZAMIENTO/ROD ESPLAZAMIENTO/ROD	28/07/2015 11:44:07	Valor muy alto
MOTOR/1H/SOLTURAS/ ROD ENROLL	28/07/2015 11:43:23	Valor alto
MOTOR/1V/DESBALANCEO/ROD ENROLL	28/07/2015 11:43:29	Valor muy alto
MOTOR/1H/VELOCIDAD/ROD ENROLL	28/07/2015 11:43:19	Valor alto
MOTOR/1H/DESPLAZAMIENTO 1X/ROD ENROLL	28/07/2015 11:43:18	Valor alto
MOTOR/1H/DESPLAZAMIENTO/ROD ENROLL	28/07/2015 11:43:17	Valor alto
MOTOR/1V/VELOCIDAD/ROD ENROLL	28/07/2015 11:43:17	Valor muy alto
MOTOR/1V/DESBALANCEO/ROD ENROLL	28/07/2015 9:48:49	Valor alto
MOTOR/1V/DESPLAZAMIENTO/ROD ENROLL	28/07/2015 9:48:30	Valor muy alto
MOTOR/1V/DESPLAZAMIENTO 1X/ ROD ENROLL	28/07/2015 9:48:30	Valor muy alto
MOTOR/1V/VELOCIDAD/ROD ENROL	28/07/2015 9:48:30	Valor alto

Detalle de la Alarma

Fecha:  Usuario:

Máquina:  Comentarios:

Variable:

Nivel:

Valor:

Reconocer todas las Alarmas

Reconocer Alarma

Reconocer Alarmas en Instrumentos

Cerrar

Fig. 4.5: Historial de fallas del motor de la banda transportadora en el programa *Maintraq*

Fuente: Elaboración propia

Las señales de alerta representados en colores verde, amarillo y rojo indicando los estados bueno, alerta y critico respectivamente. Es importante no solo saber cómo es la tendencia de los valores registrados en el sistema, sino el conocer el porqué de la falla y esto se logró, mediante la aplicación de una metodología complementaria al mantenimiento predictivo llamado mantenimiento proactivo mediante el uso de la técnica del análisis de causa raíz. Esta técnica permite identificar el origen de la falla.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **1. CONCLUSIONES:**

- Con la implementación de este proyecto de monitoreo de vibraciones mecánicas se logró reducir el tiempo de averías de los motores de la banda transportadora UE - 1 y UE - 2 de 33 a 5 y de 17 a 10 horas de parada no programada de planta por año respectivamente.
- Con el desarrollo del programa se realizó el monitoreo continuo del estado de vibración mecánica reduciendo los tiempos del mantenimiento correctivo de los motores UE – 1 y UE – 2 de 12 a 2 y de 7 a 4 intervenciones al año respectivamente.
- La realización del proyecto ha permitido que la empresa ahorre al año 1,983.86 dólares en mantenimiento correctivo de dos motores de la banda transportadora.
- Con el monitoreo de las vibraciones mecánicas se han realizado acciones preventivas que han permitido extender el tiempo de vida útil promedio de 1 a 3 meses.
- El tiempo de recuperación de la inversión del proyecto es 7 meses aproximadamente.
- En el desarrollo del proyecto se ha aplicado la ley N°29783 referente a seguridad y salud en el trabajo mediante la realización el monitoreo a distancia del estado de los motores en tiempo real.
- En el sistema de monitoreo se han incorporado alarmas visuales y sonoras que alertan algún exceso de la magnitud de los parámetros de vibración mecánica de los motores.



## **2. RECOMENDACIONES:**

- Se recomienda instalar los acelerómetros en modo de prueba a los motores considerados como críticos para el proceso de productividad de la planta.
- Es recomendable que en este proyecto se incorpore un servidor que permita almacenar la información de las averías y el estado de las alarmas.
- Para que la interferencia no afecte a la información, las antenas (transmisor y receptor) se debe instalar en lugares con obstrucciones mínimas.
- Se recomienda capacitar al personal periódicamente en montaje, alineación, balanceo, lubricación, análisis de causa raíz (ACR) y análisis vibracional de máquinas rotativas para un adecuado mantenimiento preventivo y correctivo de los motores eléctricos AC.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Mora Gutiérrez, Luis Alberto. Tendencias, Perspectivas y Evolución Histórica de la Gestión del Mantenimiento Industrial en el mundo.
- [2] Glen White, "Introducción al análisis de vibraciones", Azima DLI, 300 trade Center, Suite 4610, wobum, MA 01801 U.S A.
- [3] Análisis de vibraciones e interpretación de datos Jesús A. Royo Gloria Rabanaque Fernando Torres DIDYF Universidad de Zaragoza
- [4] Publicación grupo SKF "Daño de rodamientos y análisis de fallas" PUB BU/I3 17186 ES febrero 2017.
- [5] Manual de Análisis de Vibraciones Power – MI Cloud condition monitoring
- [6] A-MAQ SA, "Titular de vibraciones para mantenimiento mecánico", calle 106 53-56 Oficina 610 Edificio Grupo 7 Torre 106(Bogotá), pp.38, enero 2005.

**ANEXO A**  
**DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES**



Fig. A.1: Módulo *vibraspec 800*.

Fuente: IDEAR



Fig. A.2: Acelerómetro Model 786500.  
Fuente Wilcoxon



Fig. A.3: Analizador de vibraciones.  
Fuente IDEAR

**ANEXO B**  
**COSTOS DE MATERIALES DEL PROYECTO**

TABLA B.1: Tabla de costos de materiales para la implementación del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

TABLA DE COSTOS					
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	P.UNIT(USD)	SUBTOTAL(USD)
1	Vibraspeck 800	1	UND	8500.00	8500.00
2	Acelerómetro(787B)	6	UND	520.00	3120.00
3	Cable de conexión del acelerómetro	20	m	22.500	450.00
4	Access Point	2	UND	55.00	110.00
5	Tablero eléctrico de 40x30x15 cm	1	UND	150.00	150.00
6	Fuente de alimentación de 12Vdc,2 A	1	UND	15.00	15.00
7	Sirena de alarma 90w, 220vac	3	UND	150.00	150.00
8	Otros				100.00
<b>COSTO TOTAL INCLUYENDO IGV</b>					<b>12,595.00</b>

TABLA B.2: Costo en mantenimiento correctivo de vibraciones mecánicas.

Fuente: Elaboración propia

COSTOS EN MANTENIMIENTO CORRECTIVO					
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	P. UNIT(USD)	SUBTOTAL(USD)
1	Rodamiento 22218 EK/C3	1	UND	118.51	118.51
2	Manguito de montaje H318	1	UND	45.00	45.00
3	Grasa Mobilux EP2	400	g	1.80	1.80
<b>COSTO TOTAL</b>					<b>165.31</b>

TABLA B.3: Costo de equipos de medición de vibraciones

Fuente: Elaboración propia.

COSTOS DE EQUIPOS DE MEDICIÓN DE VIBRACIÓN DIRECTA					
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	P.UNIT(USD)	SUBTOTAL(USD)
1	Analizador Vibrasheck	1	UND	9800.000	9800.00
2	Vibrador+ sensor magnético CMAC 112K	1	UND	1660.00	1660.00