

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA  
MOLINA**

**FACULTAD DE ECONOMÍA Y PLANIFICACIÓN**

**TITULACIÓN POR EXAMEN PROFESIONAL**



**PROPUESTA DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO  
BASADO EN EL ANÁLISIS VIBRACIONAL  
CASO: SISTEMA DE BOMBEO, UNIDAD DE ESPESADORES  
DEL PROYECTO TOROMOCHO**

**TRABAJO MONOGRÁFICO PRESENTADO POR  
ESTEBAN ALEJANDRO ORCÓN GARCÍA**

**PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
INGENIERO EN GESTIÓN EMPRESARIAL**

Lima – Perú

2015

## INDICE

	<b>Pag.</b>
ÍNDICE DE TABLAS.....	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	II
INDICE DE GRAFICOS.....	III
RESUMEN.....	IV
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.1.1. Descripción del problema .....	1
1.1.2 Formulación del problema.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3. Justificación.....	3
1.3.1. Conveniencia.....	3
1.3.2. Relevancia Social.....	3
1.3.3. Implicaciones prácticas.....	4
1.3.4. Valor Teórico.....	4
1.3.5. Utilidad Metodológica.....	5
1.4. Limitaciones.....	5
CAPÍTULO II. REVISION LITERARIA.....	6
2.1. Antecedentes.....	6
2.2. Marco Teórico.....	7
2.2.1. Mantenimiento.....	7
2.2.2. Tipos de mantenimiento.....	8

2.2.3. Ventajas y desventajas de mantenimiento.....	9
2.2.3.1. Limitaciones en la aplicación del mantenimiento predictivo.....	10
2.2.4. Análisis de vibración.....	10
2.2.4.1. Una tecnología clave de mantenimiento predictivo.....	11
2.2.4.2. Problemas mas frecuentes que causan vibraciones.....	13
2.2.4.2.1. Desbalance.....	13
2.2.4.2.2. Desalineación angular.....	14
2.2.4.2.3. Desalineación paralela.....	14
2.2.4.2.4. Holgura eje agujero.....	14
2.2.4.2.5. En sujeción.....	15
2.2.4.2.6. Desalineación en poleas.....	15
2.2.4.3. Puntos de medicion.....	16
2.2.4.4. Fundamentos trasformada de Fourier.....	17
2.2.4.5. Normas y guías de severidad de vibraciones.....	17
2.2.4.6. Análisis de espectro de frecuencia.....	19
2.2.4.7. Equipos utilizados para realizar el mantenimiento predictivo en la técnica de análisis vibracional... ..	20
2.3. Definición de términos.....	21
<b>CAPITULO III: METODOLOGIA .....</b>	<b>25</b>
3.1. Lugar.....	25
3.2. Tipo de estudio.....	26
3.3. Diseño.....	26
3.3.1. Plan de mantenimiento predictivo.....	27
3.3.1.1. Paso I.....	27
3.3.1.2. Paso II.....	28

3.3.1.3. Paso III.....	29
3.3.1.4. Paso IV.....	29
3.3.2. Programa de mantenimiento propuesto.....	29
3.4. Técnicas e instrumento de recolección de datos.....	30
3.4.1. Observación directa.....	30
3.4.2. Recolección por el software de mantenimiento predictivo data management SKF.....	31
3.4.3. Entrevistas no estructuradas.....	31
3.5. Población.....	32
CAPITULO IV: RESULTADOS.....	33
4.1. Resultados .....	32
4.1.1. Evaluacion de criticidad de los equipos.....	32
4.1.2. Valores de alarma asignados para cada equipo.....	33
4.1.3. Gráficos de espectros.....	35
4.1.3.1.Niveles de alarma de bandas espectrales.....	35
4.1.4. Análisis de falla según e diagrama de Pareto.....	41
4.1.5. Indicadores de gestión de mantenimiento.....	42
4.1.5.1. Tiempo promedio entre fallas (MTBF).....	42
4.2. Discusión.....	43
4.2.1. Discusión de vibración causada por desbalance.....	44
4.2.2. Discusión de vibración causada por Holgura.....	45
4.2.3. Discusión de vibración causada por desalineamiento.....	45
CONCLUSIONES.....	46
RECOMENDACIONES.....	47
BIBLIOGRAFÍA.....	48
Anexos.....	49

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pag.</b>
Tabla.1. Comparativo de las estrategias de mantenimiento.....	9
Tabla.2. Ventajas y desventajas de las estrategias de mantenimiento.....	9
Tabla.3. Severidad de la vibración según la norma ISO 10816-III.....	18
Tabla.4.Criticidad de fallos.....	28
Tabla.5. Equipos críticos evaluados por la criticidad.....	32
Tabla.6.Data vibracional management de SKF.....	33
Tabla.7. Valores de alarma de velocidad y aceleración de las bombas centrifugas.....	34
Tabla.8. Frecuencia de fallas (Diagrama de Pareto).....	41
Tabla.9. Tiempo promedio entre fallas.....	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pag.</b>
Figura 1. Técnica de análisis de falla.....	10
Figura 2. Desbalance de motor - bomba.....	13
Figura 3. Desalineación angular .....	14
Figura 4. Desalineación de paralelo .....	14
Figura 5. Holgura mecánica.....	15
Figura.6. Aflojamiento de equipo.....	15
Figura 7. Desalineación en poleas.....	16
Figura 8. Puntos de media de vibración motor-bomba.....	16
Figura.9. Señal de dominio de tiempo y su equivalencia en el dominio de la frecuencia.....	17
Figura 10. Espectros de aspas de impulsor.....	19
Figura 11. Vibrometro.....	20

## INDICE DE GRAFICOS

	<b>Pag.</b>
Gráfico.1. Las bandas determinadas para las bombas centrifugas y motores eléctricos.	36
Gráfico.2. Espectro de punto horizontal de la bomba del equipo 291-pp-738.....	36
Gráfico .3. Espectro de punto vertical de la bomba del equipo 291-pp-738.....	37
Gráfico.4.Espectro de punto vertical del motor del equipo 292-pp-710.....	37
Gráfico.5. Espectro de punto axial de la motor del equipo 292-pp-710.....	38
Gráfico.6. Espectro de punto horizontal de la motor del equipo 291-pp-714.....	38
Gráfico.7. Espectro de punto axial de la motor del equipo 291-pp-714.....	39
Gráfico.8. Espectro de punto vertical de la bomba del equipo 291-pp-714.....	39
Gráfico.9. Espectro de punto horizontal de la bomba del equipo 292-pp-720.....	40
Gráfico.10. Espectro del punto horizontal del motor del equipo 291-pp-701.....	40
Gráfico.11. Grafica de frecuencias de fallas (Diagrama de Pareto).....	42

## **RESUMEN**

La presente investigación tiene como objetivo proponer un plan de mantenimiento predictivo basado en un análisis de vibración aplicada al área de espesadores del Proyecto Toromocho, cuya finalidad es optimizar los tiempos de parada por efectos de falla de los equipos en base a las Normas ISO 10816.

Para el análisis se determinaron los puntos de medición, se establecieron los niveles de alarma y analizó los niveles de banda espectrales, dando como resultado problemas de desalineación, desbalance, holguras mecánicas, así como también fallas de los acoples. Sin dejar de lado a problemas en las poleas y bandas.

Estas dificultades pueden anticiparse mediante un plan de mantenimiento predictivo que son producidas por un mal montaje de los equipos, una vibración excesiva, fallas en los sellos mecánicos, fallas en rodamientos, o por el desempeño disfuncional en los equipos de bombeo y entre otros, cuya identificación y tratamiento de estos problemas nos sirve para evitar paradas innecesarias que afectan el proceso y permitirán mejorar las frecuencias a las que actualmente se efectúan las tareas de mantenimiento evitando un despilfarro en los repuestos.



## **CAPITULO I: INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Planteamiento del problema**

#### **1.1.1. Descripción del problema**

El presente trabajo de investigación se realizó en el Proyecto Toromocho que es un proyecto cuprífero, consistente en una mina a cielo abierto y Planta Concentradora con capacidad de proceso de 117.200 toneladas diarias de mineral y una vida estimada de 36 años de operación, con un promedio de 1.838 toneladas diarias de concentrado de cobre y 25,7 toneladas diarias de óxido de molibdeno.

Las unidades críticas se localizan en área de espesadores, y posee una variedad de equipos, entre estos se encuentran equipos de bombeo, como bombas centrífugas, y bombas de desplazamiento positivo (bombas peristálticas), y de estas depende la mayor parte del proceso productivo.

Actualmente el mencionado proceso se ha visto afectado por la aparición de fallas en los equipos de bombeo de las áreas en mención; las más comunes son fugas por sellos, altas vibraciones y filtros dañados, ocasionando la paralización del proceso planificado y en consecuencia generando pérdidas para el usuario, no sólo por la paralización del equipo sino también los altos tiempos fuera de servicio.

En la actualidad la empresa Techint Ingeniería y Construcción, contratista encargada del manejo del área de flotación, espesadores y la planta de hidrometalurgia desarrolla una gestión de mantenimiento en bombas que en la actualidad no desempeña su buen funcionamiento, recurriendo en la mayoría de los casos a la sustitución de piezas dañadas, debido a muchas fallas imprevistas

las cuales producen paradas y por ello retrasos en la producción, alto costo de mantenimiento y pérdida de materia prima.

### **1.1.2. Formulación del problema**

#### **A. Problema general**

El incremento del tiempo de parada de los equipos de bombeo en la actual gestión de mantenimiento.

**¿Es posible disminuir el tiempo de paradas de los equipos del área de espesadores mediante un plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis vibracional?**

#### **B. Problemas Secundarios**

- No se cuenta con información de los puntos en los cuales serán medidas las vibraciones para establecer las fallas mas recurrentes en los equipos.
- Se manejan niveles de alarma a nivel correctivo, no se establece procedimientos predictivos para cada uno de las bombas centrifugas.
- No se cuenta con información de los espectros en los equipos, ni hay forma de compararlos para para identificar los problemas presentes.
- No se tienen información de los criterios de severidad, ni de las frecuencias en las cuales serán monitoreados los equipos
- No se cuenta con personal capacitado para planificar las tareas que ayuden a prevenir las fallas y mejoren la confiabilidad de los equipos.
- Se generan gastos y tiempo innecesarios al tener que atender varias veces el mismo equipo por la misma falla.
- No se cuenta con información confiable sobre el costo-efectividad posible para realizar un mantenimiento preventivo óptimo.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo general**

Disminuir el tiempo de parada de los equipos de bombeo mediante la propuesta de un plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis vibracional en el área de espesadores del Proyecto Toromocho.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Determinar los puntos en los cuales serán medidas las vibraciones producidas y las rutas en que serán medidas para cada equipo.
- Determinar los niveles de alarma y de bandas espectrales para cada uno de las bombas centrifugas mediante normas internacionales.
- Comparar los espectros obtenidos en los equipos con espectros típicos de fallas, identificando los problemas presentes.
- Establecer, por criterios de severidad, las frecuencias en las cuales serán monitoreados los equipos.
- Determinar, si al incorporar el mantenimiento predictivo, mejorara el mantenimiento preventivo a través de la técnica de análisis vibracional.

## **1.3. Justificación**

### **1.3.1. Conveniencia:**

Optimizando el mantenimiento predictivo se puede conseguir una disminución sustancial del costo de mantenimiento correctivo, incluso llevándolo a un valor cero de parada no planeada.

### **1.3.2. Relevancia:**

Sera además una fuente generadora de capacitación permanente, utilizando generalmente mano de obra calificada, como especialistas, peritos, expertos, técnicos e ingenieros

### **1.3.3. Implicaciones prácticas**

En mantenimiento es fundamental tener en cuenta que la inteligencia, la imaginación y la prontitud en la toma de decisiones para solucionar los problemas que se presentan en nuestro quehacer diario, son esenciales; y obligan a una permanente mejora.

La propuesta motiva el incremento del mantenimiento predictivo de forma progresiva y controlada, obteniendo que el costo del mantenimiento correctivo disminuya o tienda a ser cero, sin que los costos totales aumenten.

### **1.3.4. Valor teórico**

En el desarrollo y aplicación del Kaizen (Mejoramiento continuo) se ven amalgamados conocimientos y técnicas vinculados con Administración de Operaciones, Ingeniería Industrial, Comportamiento Organizacional, Calidad, Costos, Mantenimiento, Productividad, Innovación y Logística, presupuestos, entre otros. Por tal motivo bajo lo que podríamos llamar el paraguas del Kaizen se encuentran involucradas e interrelacionadas métodos y herramientas tales como: Control Total de Calidad, Círculos de Calidad, Sistemas de Sugerencias, Automatización, Mantenimiento Productivo Total, Kanban, Mejoramiento de la Calidad, Just in Time, Cero Defectos, Actividades en Grupos Pequeños, Desarrollo de nuevos productos, Mejoramiento en la productividad, Cooperación Trabajadores-Administración, disciplina en el lugar de trabajo.

La aplicación de esta propuesta impulsara la formulación de normas, formulas, diagramas, etc., para implementar en otros sistemas similares en razón de que no exista literatura específica para la aplicación en procesos similares que se desarrollen en el país.

### **1.3.5. Utilidad metodológica**

En nuestra investigación una herramienta importante a querer implantar para mejorar permanentemente la efectividad global de los equipos, con la activa participación de los operadores es el mantenimiento productivo que involucra a la participación de todos (Mantenimiento productivo total)

### **1.4. Limitaciones.**

- Carácter multidisciplinar del mantenimiento: diversidad de los equipos en el área de investigación.
- Dificultades en los instrumentos de medida y en la propia definición de las variables utilizadas. Ausencia de datos y la falta de credibilidad.
- Escasos trabajos de investigación a nivel local y nacional.
- Limitación en el tiempo por nuestro recargado trabajo y tiempo de efectuar el informe.

## **CAPITULO II: REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Antecedentes.**

En la industria de procesos el desarrollo desde los años 50 empieza por otro camino, el modelo más avanzado que suple la carencia de Mantenimiento Planificado, aparece el concepto de sobre mantenimiento, nace como una secuela negativa de demasiados paros planificados que aparte de costosas no resuelven el problema de baja fiabilidad de muchos activos; por ello, en los años 60 y 70 se introduce el modelo del mantenimiento basado en estado o condiciones reales de activos industriales, popularmente llamado Mantenimiento Predictivo.

Los primeros pasos en este sentido, se dan cuando las intervenciones planificadas con reposiciones de elementos de máquinas a frecuencia fija, se empiezan a sustituir por las inspecciones cualitativas (gamas de preventivo). El Mantenimiento Predictivo da otra dimensión a dichas inspecciones, ya que se basa en mediciones periódicas de variables de estado técnico (amplitudes de vibración y sus frecuencias, impulsos de choque, temperatura, presión, espesores, etc.), observando la tendencia del cambio de niveles medidos en su comparación con ciertos patrones de referencia (ejemplo: normas de severidad de vibración). De esta manera, se organizan sistemas de auscultación de activos en operación para determinar sus necesidades reales de intervención correctiva, preventiva o de mejora, todo ello sin interferencia con la disponibilidad productiva de la instalación.

Al principio el Mantenimiento Predictivo, no es asequible debido a los altos costes de la instrumentación analógica. Se expande por los sectores estratégicos de la industria de procesos petroquímicas y energéticas, pero posteriormente a medida que pasa el tiempo y gracias a las mejoras tecnológicas se expande a químicas, cementeras, papeleras y

gracias a una gran oferta tecnológica de instrumentos portátiles se implanta en los sectores manufactureros. (AMENDOLA).

Esta filosofía se basa en el hecho de que cuando un equipo ha empezado a gastarse, sus condiciones de operación, tales como vibración, temperatura, condición del aceite, presión, etc. Empezaron a cambiar razón por el cual este tipo de mantenimiento propone un monitoreo frecuente de la condición del tiempo (monitoreo por condición), precisamente para detectar el cambio, analizar la causa del cambio y dar la solución correcta justo antes de que se produzca la falla.

El mantenimiento predictivo empieza a realizar estudios de CAUSA-EFECTO a partir de los años 80 para averiguar el origen de los problemas y sus síntomas incipientes para actuar antes de que las consecuencias sean inadmisibles. Se comienza a hacer partícipe a la producción en las tareas de detección de fallos (KAURO ISHIKAWA).

## **2.2. Marco teórico.**

### **2.2.1. Mantenimiento**

En términos generales por mantenimiento se designa al conjunto de acciones que tienen como objetivo mantener un artículo o restaurarlo a un estado en el cual el mismo pueda desplegar la función requerida o las que venía desplegando hasta el momento en que se dañó, el mantenimiento busca la calidad, la eficiencia, eficacia, reduce costos, se preocupa por la seguridad, da mayor confiabilidad y mayor tiempo de vida a los equipos, por tanto podemos decir que el mantenimiento hace más competitivo al proceso productivo.

### 2.2.2. Tipos de mantenimiento

<b>Mantenimiento correctivo</b>	<b>Mantenimiento Preventivo</b>	<b>Actuación sobre</b>	<b>Mantenimiento predictivo</b>
Consiste en el conjunto de actividades destinadas a corregir desperfectos o fallas en el momento.	Es periódico el desmontaje de la maquinaria crítica para su inspección y posterior montaje.	Prevención de fallos catastróficos	Incremento de la producción
Es recomendable utilizarlo lo menos posible, pues resulta generalmente mas caro que los otros tipos de mantenimiento.	Alto costo	Prevención de fallos catastróficos	Eliminación de costos de una gran reparación
	Intervención a máquinas que funcionan correctamente.	Prevención de fallos catastróficos	Incrementamos la seguridad de la planta.
	Posibilidad de perder el equilibrio de funcionamiento después de la intervención	Prevención de fallos catastróficos	
Básicamente hay que relacionar todo aquello que está bajo la vigilancia y control.	Intervención en máquinas para sustituir piezas o componentes que puedan estar en buen estado .	Reparaciones planificadas	Mejorar la calidad de reparación
			Reducimos las horas en la intervención, el almacenaje de piezas de recambio.
Debemos de disponer la información técnica adecuada quien permita determinar los recursos humanos y recursos técnicos necesarios en cada caso.	Se le supone	Conocimiento del problema dentro de la maquina	Reparaciones más rápidas, se conoce el problema antes de desmontar el equipo.
Incremento de		Reducción de	Reduce la



costos de producción		costos	necesidad de equipos en stand by para cubrir paradas críticas
			Reduce los costos de seguro de los equipos.

**Tabla.1. Comparativo de estrategias de mantenimiento. Fuente elaborada por kaerina929394.blogspot.com**

### 2.2.3. Ventajas y desventajas del mantenimiento

	<b>Mantenimiento correctivo</b>	<b>Mantenimiento preventivo</b>	<b>Mantenimiento predictivo</b>
<b>VENTAJAS</b>	No hay gastos para el mantenimiento preventivo	Actividad mínimas de mantenimiento	Agotamiento de las existencias de desgaste
	Aprovechamiento complejo de las existencias de desgaste	Amplia posibilidad de planificación	Reducido riesgos de averías
		Necesidad de piezas de recambio conocidas	Posibilidad de planificación en cuanto a tiempo y contenido
		Alta disponibilidad de instalaciones	prevención de gastos de averías
<b>DESVENTAJAS</b>	Elevado riesgo de averías	Elevado gastos de planificación y mantenimiento	Inversiones en el sistema de medición y diagnóstico
	No hay garantía de disponibilidad de instalaciones	No hay agotamiento de las existencias	Inversiones en la planificación de personal de mantenimiento
	Dado el caso, graves consecuencias	Tiempo de paro débiles a mantenimiento	
	Posibilidad de planificación mas difícil		
	Necesidad elevada de piezas de recambio.		

**Tabla.2. Ventajas y desventajas de las estrategias de mantenimiento. Fuente elaborada por TEPSUP campo virtual**

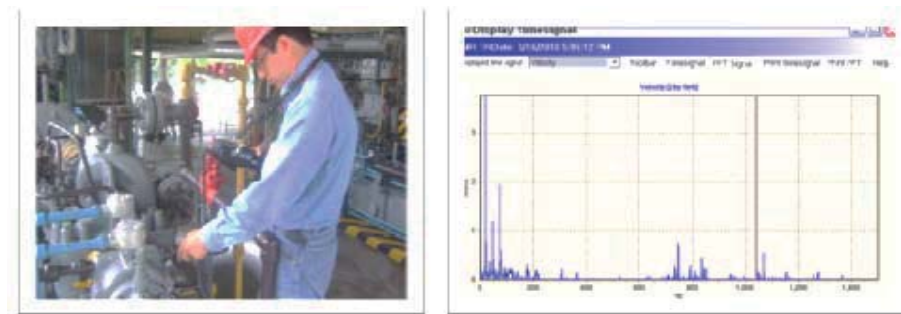
### 2.2.3.1. Limitaciones en la aplicación del mantenimiento predictivo

- No se aplica a aquellos sistemas en los que existen reglamentos o normas que estipulan el número máximo de horas de funcionamiento de las instalaciones o máquinas; en este caso se aplica el mantenimiento preventivo programado según dichos intervalos.
- Tampoco se aplica en aquellos sistemas en los que la detección de avería es costosa y/o poco fiable, ni en aquellos en los que la reposición se puede realizar a bajo costo y de forma inmediata.

### 2.2.4. Análisis Vibracional

Antes de realizar un estudio profundo sobre aquellos problemas que puede causar los niveles altos de vibración, es necesario conocer aquellos conceptos básicos que son de vital importancia dentro del presente análisis.

Esta es una técnica predictiva que ha sido utilizada como un indicador del estado técnico de componentes de máquinas y por ende de las mismas, pudiéndose a través de la medición de vibraciones, detectar e identificar fallos ya desarrollados o en período de desarrollo prematuro.



**Fig. 1. Técnica de análisis vibracional**

El interés principal para el mantenimiento deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de las vibraciones detectadas en el elemento o máquina, la determinación de las causas de la vibración, y la corrección de problemas que ellas presentan.

Las consecuencias de las vibraciones mecánicas son el aumento de los esfuerzos y las tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales, y las más temidas: daños por fatiga de los materiales, además de ruidos molestos en el ambiente laboral, etc.

#### **2.2.4.1. Una tecnología clave del mantenimiento predictivo**

El análisis de vibraciones, permite diagnosticar el estado de las máquinas y sus componentes mientras funcionan normalmente dentro de una planta de producción, es una de las tecnologías más utilizadas en el mantenimiento predictivo de las máquinas rotativas.

El mantenimiento predictivo aplica técnicas no destructivas en las máquinas para predecir cuándo requieren operaciones de reparación o cambio de piezas.

Una de ellas, y quizás la más utilizada es el análisis de vibraciones, que sirve para determinar el estado de cada uno de los componentes de los equipos con el fin de programar las actividades de mantenimiento respectivas, sin afectar al desarrollo normal de la planta de producción.

Con el desarrollo de esta tecnología, se consiguen equipos analizadores de vibración y paquetes informáticos que agilizan y facilitan el análisis de vibraciones, porque entregan al usuario las gráficas de las señales de las vibraciones ya sea en el dominio del tiempo o en la frecuencia para que se pueda realizar su interpretación y emitir un diagnóstico acertado. Todas las máquinas generan vibraciones como parte normal de la actividad, sin embargo,

cuando falla alguno de sus componentes, las características de estas vibraciones cambian, permitiendo bajo un estudio detallado identificar el lugar y el tipo de falla que se está presentando, su rápida reparación y mantenimiento.

El análisis de vibraciones está basado en la interpretación de las señales de vibración tomando como referencia los niveles de tolerancia indicados por el fabricante o por las normas técnicas.

Las fallas que se pueden detectar en las máquinas por medio de sus vibraciones son las siguientes:

- Desbalanceo.
- Desalineamiento.
- Defecto de rodamientos.
- Ejes torcidos.
- Desajuste mecánico.
- Defecto de transmisiones por correa.
- Defectos de engranajes.
- Problemas eléctricos

En términos generales, una vibración es la oscilación de un cuerpo con respecto a un punto de referencia. Cuyos parámetros van a definir los espectros relacionados a cada punto de medición para su posterior análisis, estas son el periodo, frecuencia, desplazamiento, fase y dirección.

La toma de vibraciones es ampliamente utilizada en mantenimiento predictivo, con el objetivo de vigilar el comportamiento dinámico mecánico de las máquinas rotativas.

La correcta utilización de esta tecnología en términos de cantidad de pruebas (tendencia), y el análisis espectral aportan información valiosa en el diagnóstico prematuro de fallas en los elementos rodantes, engranajes, bombas, compresores, ventiladores y muchas otras máquinas rotativas.

Se toman mediciones de amplitud vs. Frecuencia de vibración, en las direcciones horizontal, vertical y axial, en cada punto y en las siguientes unidades de velocidad, aceleración, enveloping, y onda en el tiempo.

#### **2.2.4.2. Problemas más frecuentes que causan vibraciones**

A continuación se explica los problemas más frecuentes que se observan en el funcionamiento de los equipos; en las figuras se muestran las partes que son afectadas por las vibraciones, produciendo averías a los equipos, las representaciones sirven como guía para ejemplificar lo que ocurre en el interior y exterior de las bombas centrífugas aun operativas.

##### **2.2.4.2.1. Desbalance**

Generalmente producido por desgaste radial superficial no uniforme en rotores en los cuales su largo es despreciable en comparación con el diámetro.



**Fig.2. Desbalance motor-bomba**

#### 2.2.4.2.2. Desalineación angular

Ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido unidos en el acople, no son paralelos. Caracterizado por altas vibraciones axiales. 1 X RPS y 2 X RPS son las más comunes, con desfase de 180 grados a través del acople.

También se presenta 3 X RPS. Estos síntomas también indican problemas en el acople.

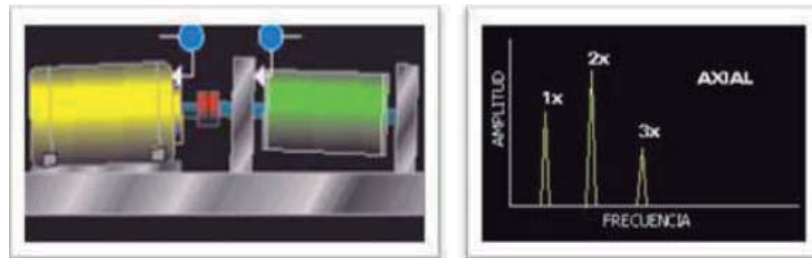


Fig.3. Desalineación angular

#### 2.2.4.2.3. Desalineación Paralela

Los ejes del motor y del rotor conducido están paralelos, pero no son colineales. Se pueden detectar altas vibraciones radiales a 2 X RPS, predominante, y a 1 X RPS, con desfase de 180 grados a través del acople.

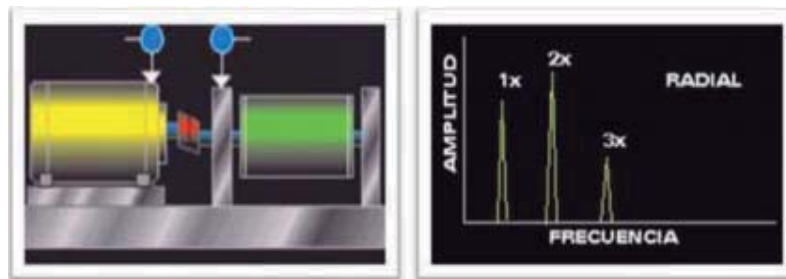
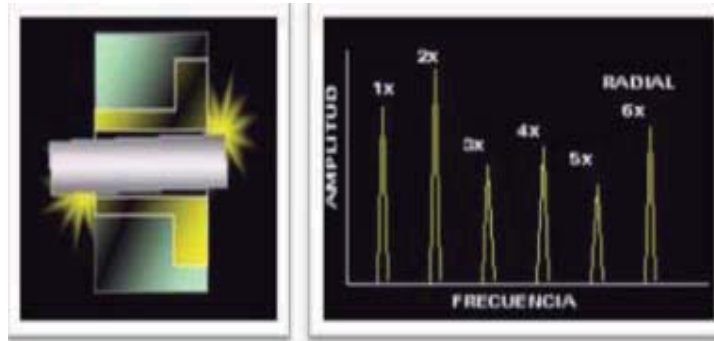


Fig.4. Desalineación Paralela

#### 2.2.4.2.4. Holguras Eje-Agujero

Aflojamiento de manguitos, tolerancias de manufactura inadecuadas (con juego), y holgura entre el impulsor y su eje en bombas. Causa un truncamiento en la forma de onda en el dominio del tiempo.

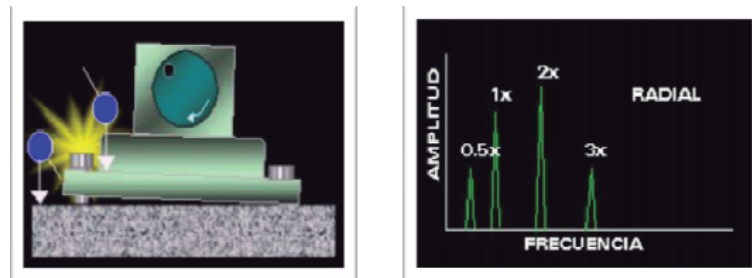
La falla genera múltiples armónicos y subarmónicos de 1 X RPS, destacándose los armónicos fraccionarios 1/2 X, 1/3 X, 1.5 X, 2.5 X, Frecuentemente la fase es inestable y el nivel máximo tiende a una dirección notable realizando lecturas radiales espaciadas 30 grados entre sí.



**Fig.5. Holgura mecánica**

#### 2.2.4.2.5. En Sujeción

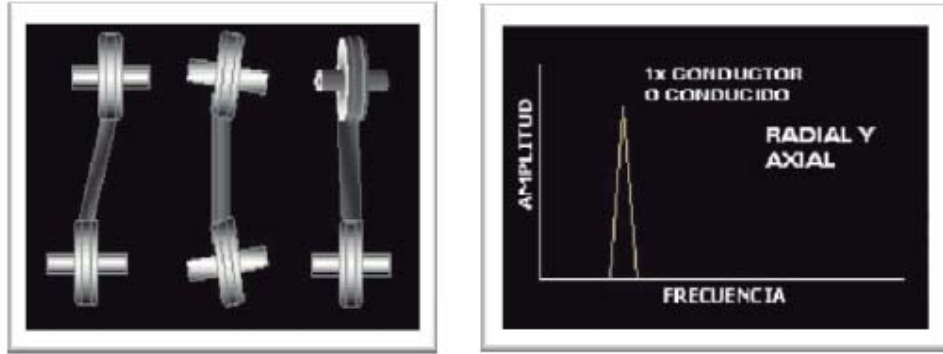
Aflojamiento o pérdida de tuercas o fracturas en la estructura de soporte. Armónicos a 0.5X, 1 X, 2 X, y 3 X con predominante 2 X RPS, en dirección de la falla. Altamente direccional en la dirección de sujeción.



**Fig.6. Aflojamiento de equipo**

#### 2.2.4.2.6. Desalineación en Poleas

Puede ocurrir porque los ejes de las poleas no están alineados o porque las poleas no están paralelas. También pueden ocurrir ambos casos simultáneamente. Produce alta vibración axial a 1x RPS de la conductora o la conducida, generalmente la conducida. La buena medida de las amplitudes de las vibraciones depende de donde sean tomados los datos.

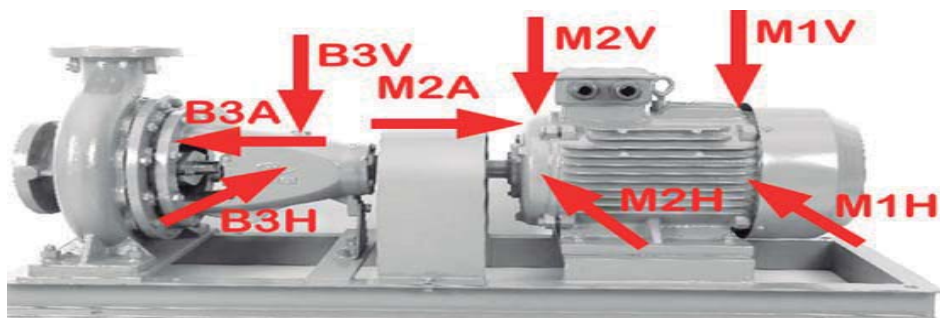


**Fig.7. Desalineación de poleas**

### 2.2.4.3. Puntos de medición

Seleccionaremos los puntos de medición según tipo de bomba, con el fin de realizar las mediciones siempre en el mismo lugar para lograr uniformidad en los resultados. Los puntos de medición fueron posicionados en las áreas de mas trascendencia de fallas, por lo que fue necesario conocer el funcionamiento interno y posiciones de las piezas presentes en cada bomba.

Mencionaremos mediciones en tres planos, vertical (V), horizontal (H) y axial (A) para los dispositivos de mando y no mando de una máquina incluyendo los ejes intermedios de un reductor si existiera. Como también dependiendo de la configuración del equipo puede existir, varios puntos de medición.



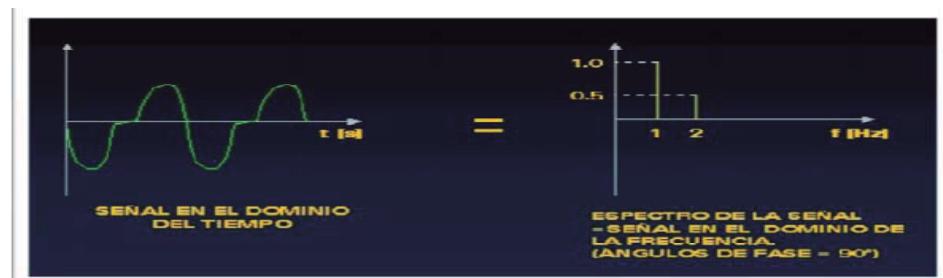
**Fig. 8. Puntos de medida de vibración motor-bomba**



#### 2.2.4.4. Fundamento transformada de Fourier

Debido a la complejidad que presentan las señales de las vibraciones, muchas veces, es necesario convertirlas en señales más sencillas para facilitar su análisis e interpretación. Esto se consigue transformando la señal al dominio de la frecuencia a través de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), la cual captura la señal en el tiempo, la transforma en una serie de señales sinusoidales y finalmente las conduce al dominio de la frecuencia.

En el grupo de categorías se presentan los espectros característicos de las fallas más comunes. Estos espectros han sido el fruto de muchos estudios y se convierten en "patrones" que ayudan a descubrir los problemas que pueden suceder en una máquina.



**Fig.9. Señal en el dominio del Tiempo y su equivalente en el dominio de la frecuencia.**

#### 2.2.4.5. Normas y Guías de Severidad de Vibraciones

##### - Norma ISO 10816

Establece las condiciones y procedimientos generales para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas sobre partes no rotativas de las máquinas. Este estándar consta de cinco partes, de los cuales, se aplicó el apartado III cuyas características más relevantes son:

**Clase III: Es aplicable en maquinaria industrial con potencia nominal por encima de 15 kW y velocidades entre 120 y 15000 RPM.**

Para utilizar la norma ISO 10816 - III, se debe clasificar la máquina en estudio dentro del grupo correspondiente tomando en cuenta, e tipo de máquina, la potencia o altura del eje y la flexibilidad del soporte. Una vez obtenido el valor global de vibración determinar la zona en la que se encuentra (A, B, C o D).

Esta norma reemplaza a la ISO 2372, que han sido objeto de revisión técnica.

									Velocidad mm/s rms
				D				11	
								7.1	
				C				4.5	
								3.5	
				B				2.8	
								2.3	
				A				1.4	
								0.71	
Rígida	Flexible	Rígida	Flexible	Rígida	Flexible	Rígida	Flexible	BASE	
Bombas > 15 kW Flujo Radial, Axial o Mixto				Máq. Medianas 15kW<P<300kW		Máq. Grandes 300kW<P<50Mw		TIPO DE MÁQUINA	
Mot. Integrado		Motor Separado		Motores 160mm≤H<315mm		Motores 315 mm ≤ H			
GRUPO 4		GRUPO 3		GRUPO 2		GRUPO 1		GRUPO	
A		Buena		C		Insatisfactoria			
B		Satisfactoria		D		Inaceptable			

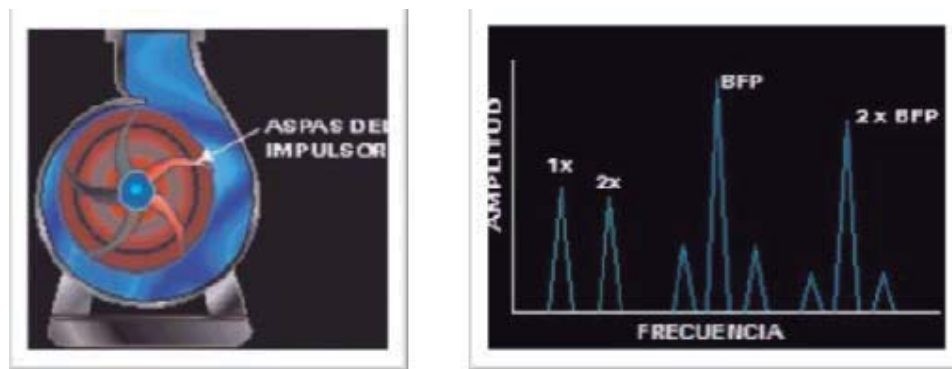
**Tabla.3. Severidad de la vibración según la norma ISO 10816-III.**

- A:** Los equipos se encuentran en óptimas condiciones
- B:** Los equipos se encuentran en buen estado u probablemente con algunos defectos nada significativos.
- C:** Los equipos se encuentran en una situación medianamente crítica con averías ya significantes
- D:** Los equipos se encuentran en situación crítica con fallas bastante significativas, incluso con separación del proceso.

#### 2.2.4.6. Análisis de espectros de frecuencia.

Un espectro FFT es una herramienta muy poderosa al sospechar de un posible problema en la máquina ya que suministra información que ayuda a determinar la localización y causa del problema, siendo ésta una de las tareas más difíciles en el análisis de condición de la maquinaria. El método de análisis espectral es el recomendado para resolver los problemas de vibración debido a que los problemas de vibración casi siempre ocurren a diferentes frecuencias. Mediante el análisis espectral se determinan las causas de la vibración y observando la tendencia se conocerá cuando estos problemas se convertirán en críticos.

El análisis espectral en términos sencillos es la descomposición del valor overall en las diferentes frecuencias que componen la señal, las cuales corresponden en si a las armónicas de un movimiento periódico. Los espectros de frecuencia generalmente se refieren a la frecuencia de giro del equipo que se está analizando, correspondiendo a esta el valor de 1X. Si existen armónicos o subarmónicos de la frecuencia de giro éstos se denominarán 2X, 3X, 4X,  $\frac{1}{2} X$ ,  $\frac{1}{3}X$ , etc. Los problemas de vibración en maquinaria usando espectros de frecuencia se diagnostican mediante la comparación del espectro obtenido con espectros típicos del problema o mediante el conocimiento de la forma como se presenta determinado problema.



**Fig.10. Espectro de aspas de impulsor**

#### 2.2.4.7. Equipo Utilizado para Realizar el Mantenimiento Predictivo en la Técnica de Análisis Vibracional

Para efectuar un monitoreo continuo con la técnica de análisis vibracional existen herramientas de vital importancia, estos son los equipos colectores y analizadores de vibraciones, así como los equipos nos ayudan a corregir los problemas consecuentes de un severo nivel vibraciones.

Estos equipos y herramientas pueden depender de los requerimientos y capacidad adquisitiva de los usuarios a continuación se menciona a los equipos utilizados en nuestro análisis.



**Fig.11. Vibrometro**

Microvibe PCMV L 3850 SKF permite la medición de vibraciones y la recogida de datos en un solo aparato. Este aparato fue desarrollado junto con el correspondiente PC-Software para el control del registro de datos offline.

Microvibe PCMV L 3850 SKF, es muy apropiado para el control de grandes plantas de producción, ahorrando esfuerzos durante una larga ronda de medición. Con este aparato se pueden determinar los valores característicos de aceleración y velocidad de las vibraciones, en bandas de frecuencias ajustables.

### 2.3. Definición de términos.

- **Alineación:** Un estado en el que los componentes de una transmisión están en paralelo o perpendicular, según los requisitos de diseño. El comprobador puede diagnosticar estados de alineación incorrecta en los que los componentes ya no están alineados según los requisitos de diseño, lo cual provoca un desgaste excesivo de los rodamientos y aumenta el consumo de alimentación de la máquina.
- **Axial:** Uno de los tres ejes de vibración (radial, tangencial y axial); el plano axial es paralelo a la línea central de un eje o un eje giratorio de una pieza giratoria.
- **Alarma:** Señal o aviso que advierte sobre la proximidad de un peligro.
- **Amplitud:** Principios del movimiento vibratorio, unidades de medición, parámetros para diferentes aplicaciones.
- **Avería:** Daño, rotura o fallo que impide o perjudica el funcionamiento del mecanismo de una máquina, una red de distribución u otra cosa
- **Aceleración:** Son los valores derivados del desplazamiento, siendo la velocidad un parámetro importante para el análisis vibracional en las gráficas de los espectros.
- **Bandeamiento:** Balancear o desplazar una cosa hacia sus lados.
- **Bomba:** Es un equipo que utiliza la energía para desplazar fluidos.
- **Bomba centrífuga:** Es un equipo que utiliza la bomba centrífuga del rotor para desplazar fluidos.
- **Bomba de alimentación:** Es un equipo que sirve para suministrar agua a la caldera; la presión de la alimentación de la bomba es mayor que la interior de la caldera.

- **Bomba de recirculación:** Es un equipo que sirve para recircular el retomo del fluido.
- **Cuprífero:** Se aplica al mineral que contiene cobre
- **Colineales:** Dos cuerpos o componentes que están ubicados en la misma dirección y sobre una misma línea recta.
- **Cizallamiento:** Deformación lateral que se produce por una fuerza externa. También llamado corte, cortadura.
- **Desbalanceo:** Se dice que una pieza se encuentra desbalanceada cuando su centro de masa (centro de gravedad) no coincide con su centro geométrico. Esta condición es causada por una distribución desigual del peso del rotor alrededor de su centro geométrico.
- **Desplazamiento:** Es la distancia total que describe el elemento vibrante, desde un extremo de su movimiento al otro.
- **Desalineamiento:** Se dice que dos piezas o componentes de máquina se encuentran desalineadas cuando los ejes de la parte conductora (motriz) y conducida no tienen la misma línea de centros. El desalineamiento puede ser paralelo, angular o una combinación de ambos.
- **Dirección:** Las vibraciones pueden producirse en 3 direcciones; radial, axial y tangencial.
- **Equilibrio:** (Mecánico) Ajuste de la distribución de masa en un elemento giratorio para reducir las fuerzas vibratorias generadas por la rotación.
- **Espectro:** En términos prácticos se explica el procesamiento de señales mediante equipos FFT, la fortaleza de contar con el Espectro, y su conversión a partir de las Formas de Onda (o Señales en el Dominio del Tiempo).

- **Enveloping:** (Ge) para analizar problemas de rozamientos mecánicos, desgastes en bujes, filtrar frecuencias específicas para análisis de rodamientos (frecuencias de pista exterior, interior, bolas, canastilla) etc.
- **Frecuencia:** Es el número de ciclos en la unidad de tiempo, medido en (minuto) o ciclos por segundo (CPS o HZ).
- **Fase:** Dada la relevancia del análisis de fase, se explica la forma de medir este parámetro, su interpretación, y el potencial que involucra dentro de los procesos de diagnósticos de fallas.
- **Falla:** Es una condición no deseada que hace que el elemento estructural no desempeñe una función para la cual existe. Comparación de lo que está sucediendo con lo que debería suceder.
- **Holgura:** Amplitud o anchura de una cosa, que hace que algo o alguien quepa en ella con espacio de sobras.
- **ISO 2372** Norma que especifica la diferencia de límites en la condición mecánica de la máquina de acuerdo con las potencias y el tipo de soporte.
- **ISO 10816** Norma Internacional que clasifica a las máquinas en grupos de acuerdo a la potencia del motor.
- **Mecanismo:** combinación de dispositivos mecánicos de cuya integración resulta un trabajo útil.
- **Onda:** para analizar problemas de engranajes, piñones con dientes picados, daño de rodamientos etc.
- **Peristálticos:** Se aplica al movimiento ondulatorio de contracción y dilatación que producen los músculos de ciertos órganos tubulares, especialmente en el aparato digestivo, que impulsa de arriba abajo su contenido

- **Parada:** Es la inmovilización de un objeto en movimiento durante un tiempo o cargar o descargar cosas, sin más duración que la absolutamente imprescindible para su objeto. En sentido amplio, el término se utiliza comúnmente para los más diversos tipos de detenciones.
- **Período:** Es el tiempo requerido para cumplir un ciclo, es decir cuánto se demora un cuerpo en volver a su posición original en las condiciones iniciales expresada.
- **PP:** Clasifica el tipo de equipo en este caso se refiere a bombas (Pump Gould)
- **Radial:** Uno de los tres ejes de vibración (radial, tangencial y axial); el plano radial representa la dirección desde el transductor al centro del eje del equipo giratorio. En el caso de las máquinas verticales típicas, el eje radial equivale al eje vertical. En el caso de las máquinas horizontales, el eje radial se refiere al eje horizontal al que el acelerómetro está fijado.
- **Sensores:** Se explican en detalle el funcionamiento y características de los tres tipos de sensor utilizados hoy día: Desplazamiento, Velocidad, y Aceleración (sensores portátiles y fijos).
- **Severidad:** Se discuten los criterios ISO, y su aplicación práctica para establecer la severidad en la condición de las máquinas. Se llevan los criterios a la realidad de los diferentes software de mantenimiento predictivo.
- **TPM:** Mantenimiento productivo total es una filosofía originaria de Japón, el cual se enfoca en la eliminación de pérdidas asociadas con paros, calidad y costes en los procesos de producción industrial.
- **Vibración:** Una vibración se puede considerar como un movimiento repetitivo alrededor de una posición de equilibrio. La posición de "equilibrio" es a la que llegará cuando la fuerza que actúa sobre él sea cero.



## **CAPITULO III: METODOLOGÍA.**

### **3.1. Lugar.**

**Proyecto:** TOROMOCHO

**Cliente:** Minera Chinalco Perú S.A.

**Lugar:** Perú (distrito Morococha, provincia Yauli, departamento de Junín)

**Alcance Original:** CONSTRUCCIÓN

El Proyecto Toromocho de Minera Chinalco Perú S.A., empresa subsidiaria de Aluminum Corporation of China (CHINALCO), fue gerenciado bajo la modalidad EPCM por la compañía Jacobs Perú S.A, que tuvo bajo su responsabilidad la Ingeniería, Suministros principales y Gerenciamiento de la construcción de la obra.

Es un proyecto cuprífero, consistente en una mina a cielo abierto y Planta Concentradora con capacidad de proceso de 117.200 toneladas diarias de mineral y una vida estimada de 36 años de operación, con un promedio de 1.838 toneladas diarias de concentrado de cobre y 25,7 toneladas diarias de óxido de molibdeno.

Está ubicado Perú, en el distrito Morococha, provincia de Yauli, en la región de Junín, a 142 km al este de la ciudad de Lima, emplazado a 4.500 m.s.n.m.

Para la construcción del proyecto, el cliente conformó diferentes contratos para cada una de las áreas o componentes de la planta.

Estos contratos fueron adjudicados a diversas empresas, tanto Internacionales como Locales, siendo las principales contratistas Techint, Graña y Montero, COSAPI, San Martín, Salfa Montajes, entre otros.

A nivel global, la planta concentradora cuenta con los siguientes componentes:

- Chancadora primaria.
- Faja transportadora.
- Pila de almacenamiento de mineral.

- Área de molinos: Molinos SAG y de bolas.
- Área de flotación: Celdas Rougher y de limpieza.
- Área de espesadores y bombas de relave
- Planta hidrometalurgia y de filtrado de molibdeno

### **3.2. Tipo de estudio.**

Teniendo la necesidad de encontrar las razones y causas del porque se dan paradas en planta teniendo un plan de mantenimiento preventivo en situó. Se tiene la necesidad de darle énfasis en la fase de investigación del tipo aplicada o tecnológica, ORTIZ Y GARCÍA (2009) estableciendo que “La investigación aplicada, pragmática o tecnológica, tiene por objeto específico satisfacer necesidades relativas al bienestar de la sociedad. En este sentido, su función se orienta a la búsqueda de fórmulas que permitan aplicar los conocimientos científicos en la solución de problemas de producción.

En virtud de lo anterior, el presente estudio se considera como una investigación aplicada explicativa, ya que con los resultados obtenidos del proceso de evaluación se presenta una propuesta de plan de acción para cerrar las brechas detectadas con respecto al mantenimiento.

### **3.3. Diseño.**

El diseño de investigación es experimental, considerando que se llevara a cabo en condiciones rigurosamente controladas, ubicándose como un estudio de causa - efecto, intentaremos comprobar si aplicando el modelo de mantenimiento predictivo basado en un análisis de vibración se lograra minimizar el tiempo de paradas en nuestro proceso productivo, por lo tanto diremos que el diseño de investigación que se adecua al presente trabajo ha sido definido en función de los objetivos generales y específicos de la misma.

Existen muchas propuestas de clasificación de los tipos de diseño de investigación, pero de manera primaria, en relación al tipo de datos que se deben recolectar, estos se pueden clasificar en diseños de campo y diseños bibliográficos. En tal sentido, atendiendo a los objetivos delimitados, la investigación se orienta hacia un diseño de campo.

Por tal motivo se establecerá un buen plan de mantenimiento predictivo que se explica a continuación.

### **3.3.1. Plan de mantenimiento predictivo (MPd)**

#### **3.3.1.1. Paso I.**

¿Qué máquinas deben incluirse en el monitoreo de condición de los equipos?

Para la selección de máquinas se emplearan hasta tres criterios diferentes:

##### **1. Criticidad:**

Equipos que sean muy importantes para el proceso, para la cual se recomienda clasificar a los equipos en cuatro categorías:

- Categoría 1: Equipos críticos únicos, cuya falla para o restringe severamente la producción.
- Categoría 2: Equipos críticos con stand-by, cuya falla o parada de ambas unidades para o restringen severamente la producción.
- Categoría 3: equipos únicos no críticos, cuya falla no afecta en gran medida la producción.
- Categoría 4: Equipos no críticos, que operan intermitentemente.

**2. Estado actual:** Toman en cuenta varios factores, como la seguridad de personal, la probabilidad de falla, la operatividad, etc., del equipo, de tal manera que la máquina que vaya obteniendo mayor puntaje, será el primero en ser implementado en el programa.

3. **Rol:** Costo de monitoreo de condición vs el costo potencial de averías, pérdida de producción y reparaciones. Básicamente relaciona que beneficios puedo obtener ante la inversión en MPd, en un tiempo determinado (recuperación de inversión). Lógicamente, el equipo que brinde mejores beneficios, tendrá la primera opción en la implementación del MPd.

**Tabla de Criticidad de los Fallos**

Criticidad	Personal	Disponibilidad	Estado Equipo/instalación	Consecuencias en producción
<b>Máxima</b>	Riesgo de muerte	Inmovilización con daños	Averiado	Parada
<b>Media</b>	Heridas	Inmovilización sin daños	Disminuido	Disminuida
<b>Minima</b>	Poca	Sin inmovilización	Operativo	Minima

**Prioridad de Actuación**

**Tabla.4. Criticidad de fallos. Fuente elaborada por tuveras.com**

Este análisis permitirá determinar las zonas más problemáticas, de solución prioritaria, así como las posibles medidas correctoras. Todo ello resulta recomendable plasmarlo en un informe final de conclusiones

### 3.3.1.2. Paso II

Se monitoreara los equipos

Por lo general las condiciones a monitorear son las siguientes:

- Temperatura
- **Vibración (Análisis vibracional siendo tema de investigación)**
- Estado de aceite
- Características eléctricas de funcionamiento.

El monitoreo de análisis vibracional permitirá contar con un panorama real pero no completo del estado del equipo.

### 3.3.1.3. Paso III

Se establece frecuencias y puntos de medición

- **Intervalos cortos o de monitoreo continuo:** Se justifica en aquellos componentes cuya falla puede resultar catastrófico para la producción.
- **Monitoreo periódico:** Para parámetros que generalmente cambian lentamente, y se requieren una alarma precisa y temprana de los campos de condición que finalmente conduzcan a la falla.

Respecto a los puntos de medición, se debe considerar la condición mecánica del equipo a nivel componentes.

### 3.3.1.4. Paso IV

Se establece niveles de alarma

- Se debe conocer que es lo normal. Se recomienda fijar los niveles según niveles de diseño (presión y temperatura) o según las normas vigentes (normas de vibración ISO 10816).
- Los niveles establecidos se modifican en el futuro por experiencia y después de realizar evaluaciones estadísticas de la base de datos generada.

### 3.3.2. Programa de Mantenimiento propuesto

Las tareas se planifican y se ejecutan mediante programas por meses, semestres y por horas (250,320, 500, 2000, 8000 horas).

Al día se registran las horas de funcionamiento de cada grupo con el que se está bombeando, en base a este registro de horas reales y establecidas las frecuencias, se conocen las fechas exactas para realizar las tareas de mantenimiento.

La propuesta es que en los equipos se disminuyan cierta cantidad de horas a las frecuencias de 2000, 8000 y 24000; es decir que ahora en el programa general de mantenimiento figuran frecuencias de 1500, 7000 y 22000 horas, debido a

ciertos factores analizados en gran parte del tiempo de funcionamiento de los grupos de bombeo; análisis realizado por los operadores y por técnicos de mantenimiento de la empresa.

Las tareas programadas para ser ejecutadas en una determinada fecha no siempre son cubiertas. Por cualquier motivo ajeno a la programación; ya sea por falta de repuestos y en este caso recurriendo a la reparación del elemento (si es posible realizarlo), porque no está el personal necesario o debido a inconvenientes con la producción, no se realizan las tareas en las fechas establecidas.

Al no existir un plan de mantenimiento predictivo, lógicamente no existe una programación de mantenimiento preventivo.

La frecuencia con que se realiza el trabajo de medición de vibraciones está basada prácticamente en la experiencia y conocimiento del técnico encargado.

Gracias a la utilización del software de gestión de mantenimiento, se registran las órdenes de trabajo clasificadas de acuerdo al área (eléctrica - mecánica) y éstas a su vez por el tipo de mantenimiento (preventivas y correctivas). Todas estas órdenes de trabajo se registran por cada año y son utilizadas como un tipo de historial de averías, que les permiten realizar las modificaciones anteriormente citadas al plan de mantenimiento.

Para el cumplimiento de la programación de mantenimiento existe una adecuada coordinación con el departamento de operaciones, para evitar que se interrumpan gran parte de las actividades de ambos departamentos.

### **3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

#### **3.4.1. Observación directa.**

La observación directa se aplicó para determinar cuáles son los equipos críticos que se encuentran en dichas áreas que se les va a realizar el estudio.

### **3.4.2. Recolección por software de mantenimiento predictivo data management de SKF**

Antes de iniciar esta etapa fue necesario revisar el manual de instrucciones del software, complementada con una pequeña explicación por parte del personal de mantenimiento acerca de su uso y funcionamiento. Posteriormente, se procedió a almacenar en el Software de mantenimiento predictivo (Data Management de SKF), los equipos sometidos a estudio, todas sus especificaciones técnicas, puntos de medición asignados y las rutas a seguir para la obtención de datos de vibraciones, con el fin de poseer una base de datos completa que permita realizar una recolección y posterior análisis confiable.

Antes de realizar el monitoreo se tiene que cargar toda la información almacenada en el software al equipo medidor de vibraciones (Microvibe P CMVL 3850 SKF). Con este equipo se va a las áreas donde se encuentran las bombas y se recolectan todos los valores de vibraciones siguiendo las rutas preestablecidas. Al finalizar la recolección de datos se descarga toda la información en el software para luego ser analizada por el personal.

### **3.4.3. Entrevistas no estructuradas.**

Este tipo de entrevistas se le realizó al personal operativo que labora en el área de mecánica y eléctrica, al jefe de mantenimiento, al supervisor de Pre-Comisionamiento y entre otros. De esta manera se pudo recopilar mayor información acerca de los equipos, el mantenimiento que se hace en la planta, su planificación, estado de los equipos, selecciones de los mismos, entre otros.

### **3.5. Población**

La totalidad de equipos de bombeo en el proyecto Toromocho que tienen probabilidad de presentar avería.

## CAPITULO IV: RESULTADOS

### 4.1. Resultados

#### 4.1.1. Evaluación de criticidad de los equipos

- Los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación para la propuesta del mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones, se dará inicio con la selección de la muestra de equipos que deben ser evaluados para el reconocimiento de fallas mediante un análisis de criticidad que nos arrojará los posibles equipos propensos a averías.

Esto quiere decir que asignaremos valores de ponderación calificando el equipo por su incidencia sobre cada variable. Este paso requiere un buen conocimiento del equipó, su sistema, su operación, su valor y los daños que podría ocasionar una falla. En la tabla se clasificara por área (291), tipo de equipo (BL,PP) y etiquetado (TAG).

AREA	TAG N°	SYSTEM	Kw	RPM	Hz
291-BL-001	291-PP-738	291-02-Extration	100	3560	59.3
292-BL-001	292-PP-710	291-02-Extration	100	3560	59.3
291-BL-001	291-PP-714	Stripping	75	1750	29.2
291-BL-001	291-PP-701	PLS Preparation	200	3555	39.2
292-BL-001	291-PP-720	Crud Treatmet	25	3530	58.8

**Tabla.5. Equipos críticos evaluados por criticidad. Fuente elaborada por TECHINT Ingeniería y Construcción.**

- Los datos de vibración que se establece para cada equipo es el resultado de un análisis cuantificado de un conjunto de valores tomados de un solo punto de medición del motor–bomba, esta se aplica durante un periodo de una hora en intervalos de cinco lecturas cada uno, tomando al final el valor más próximo a los otros.



Amplitud/medicion	Vmm/s RMS/738	Vmm/s RMS/710	Vmm/s RMS/714	Vmm/s RMS/720	Vmm/s RMS/701
1H	1.95	3.9	4.5	3.35	1.54
1V	1.9	0.65	4	1.58	3.25
1 <sup>a</sup>					2.1
2H	2.51	2.27	5.5	3.5	7.1
2V	3.5	7	4.5	3.25	2.35
2 <sup>a</sup>	3.71	6.6	7.1	4.3	4.5
3H	5.6	1.68	7	7.2	7.3
3V	6.3	0.93	7	6.5	2.8
3 <sup>a</sup>	3.18	0.25	6.5	4.2	3.2

**Tabla.6. Data vibrational Management de SKF. Fuente de elaboración propia.**

Los rectángulos de diferentes colores muestran la satisfacción e insatisfacción que es probable que pueden tener los equipos de bombeo, en la cual solo nos enfocaremos en los de color marrón y rojo, ya que son valores muy altos de vibración.

#### **4.1.2. Valores alarma asignados para cada equipo**

Para determinar los niveles de alarma de vibración de los equipos será necesario la utilización de la norma ISO 10816 para unidades de velocidad.

En la tabla se muestran los niveles de alarma en unidades de velocidad (mm/s), de las bombas, de acuerdo a la Norma ISO-10816.

EQUIPO	ALARMA Vmm/S		ACELERACION (G)	
	MOTOR	BOMBA	MOTOR	BOMBA
291-PP-738		5.6	5.6	4.6
291-PP-738		6.3	6.3	4.3
292-PP-710	7			
292-PP-710	6.6			
291-PP-714	5.5	7	7	5
291-PP-714	7.1	7	7	5
291-PP-714		6.5		4.5
292-PP-720		7.2		5.3
292-PP-720		6.5		4.5
291-PP-701		7.3	3	5.2
291-PP-701	7.1		5.1	

**Tabla.7. Valores de alarma de velocidad y aceleración/ de las bombas centrifugas. Fuente elaboración propia.**

En la tabla se muestra los valores altos de vibración del motor y la bomba, en la cual se realizara la conversión en el momento de la transducción en el acelerómetro, para luego cargar estos valores al software de vibración (vibrometro), dando como resultado los espectros de frecuencia para hacer analizadas.

Los valores de alarma de vibración permiten tener un rango de valores globales de vibración aceptables en los equipos, pero no permite localizar donde es la falla que produce que la vibración se incremente, por lo que se necesita el análisis de espectros. La utilización de la norma ISO 10816 es muy útil para iniciar un monitoreo por vibraciones, pero se hace necesario que con el transcurso del tiempo se determinen nuevos niveles de alarma adaptados al comportamiento vibracional de los equipos a lo largo del tiempo y a las necesidades de la empresa.

### **4.1.3. Gráficas de Espectros**

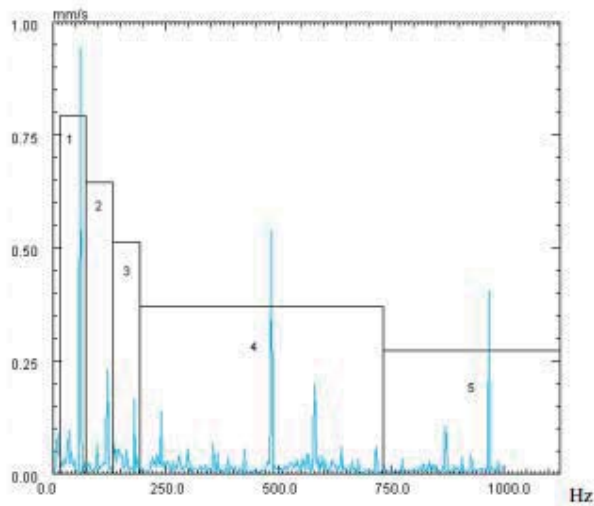
Al observar los valores registrados por el vibrometro y el analizador de vibraciones nos da como resultado puntos de severidad vibracional altos, esto quiere decir que en las distintas bombas se encuentran fallas que no se pueden establecer solo por los valores, por tanto se tiene que realizar conversiones que nos ayudaran a construir graficas de los espectros, y se ha de notar en nuestros resultados que un equipo tiene varias mediciones en las distintas partidas de motor y bomba.

Por lo tanto realizaremos el análisis e interpretación de los espectros mas representativos de los problemas hallados en las diversas mediciones, es decir pueden mostrarse espectros de una medición hasta de tres mediciones.

En las gráficas de espectros veremos las características en fallas mas frecuentes que tienen los equipos de bombeo. Estas graficas están en función de su velocidad/frecuencia o aceleración de onda/frecuencia.

#### **4.1.3.1. Niveles de alarma de bandas espectrales**

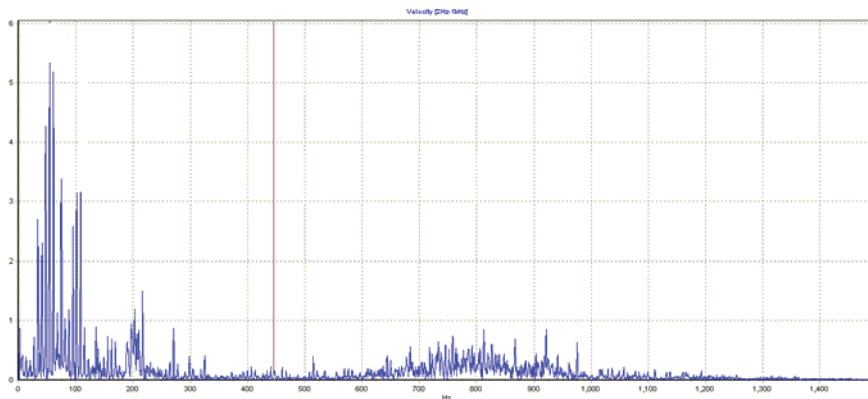
Las bandas de frecuencias espectrales ayudan a la identificación de los problemas comunes en las máquinas mediante la descomposición de los valores overall en zonas en las que normalmente se manifiestan estos problemas. En la figura se muestra las bandas determinadas para las bombas centrifugas motores eléctricos.



**Gráfico.1. Las bandas determinadas para las bombas centrífugas y motores eléctricos. Fuente elaborada por GROUP SKF CMAS 100-SL.**

- En la banda 1: Se van a detectar problemas de bajas frecuencias tales como desequilibrio, desalineación, torbellinos de aceite.
- En las bandas 2 y 3: Se detectaran desalineación, holgura mecánica y roce entre partes.
- En la banda 4: Se detectaran las frecuencias fundamentales de defectos.
- En las bandas 5 y 6: Se van a detectar los armónicos de las frecuencias de defecto en rodamientos.

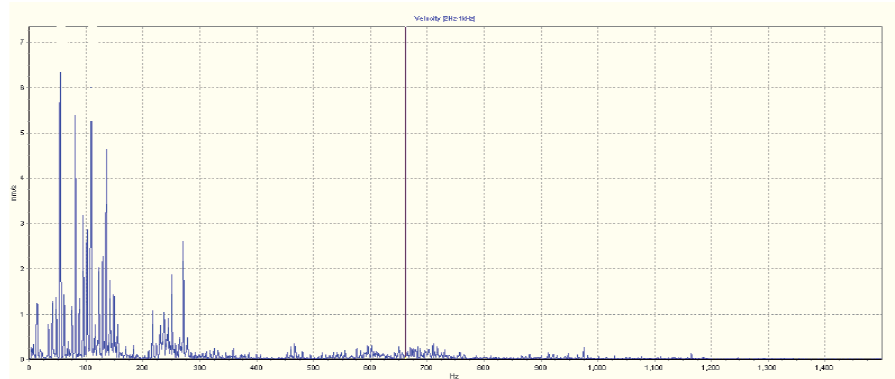
➤ **Equipo: 291-PP-738**



**Gráfico.2. Espectro de punto horizontal de la bomba**

3H: La bomba presenta como insatisfactoria según el ISO 10816 y tiene problemas de bajas frecuencias, desequilibrio y desalineación, se recomienda realizar alineamiento y cambio de lana.

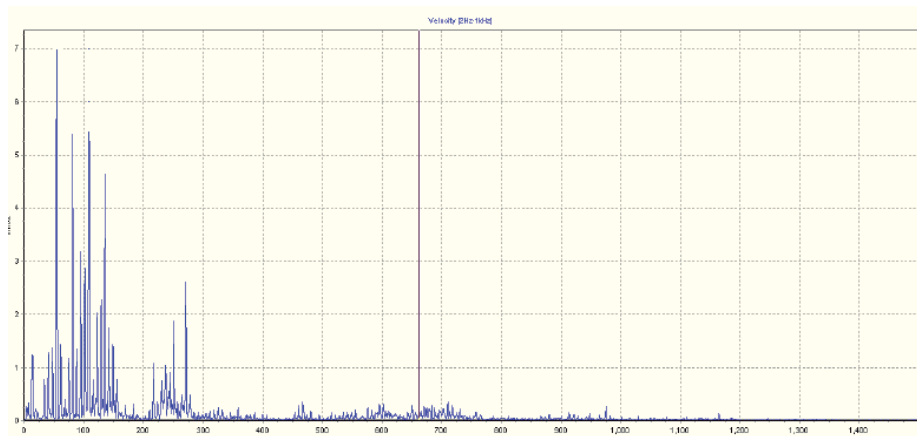
➤ **Equipo: 291-PP-738**



**Gráfico.3. Espectro de punto vertical de la bomba**

3V: La bomba está siendo evaluada como insatisfactorio y baja frecuencia (2x), tiene problemas de desalineamiento y holgura mecánicas, se recomienda alineamiento por sistema laser o reloj comparador, y en este caso realizar tratamiento en holgura estructural.

➤ **Equipo: 292-PP-710**

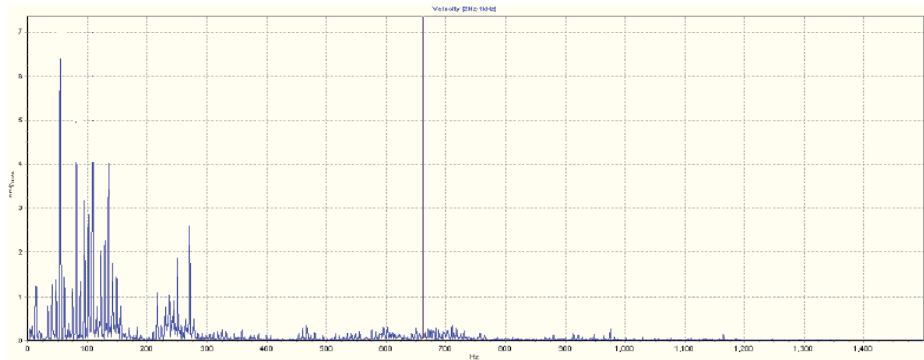


**Gráfico.4. Espectro de punto vertical del motor**

2V: El motor según la ISO 10816 es inaceptable por tener una frecuencia muy baja y una amplitud muy alta, esto quiere decir que, que el motor necesita

efectuar un mantenimiento correctivo e incluso cambio de cojinetes, por tener torbellinos de aceite y posiblemente cambio de rodamiento.

➤ **Equipo: 292-PP-710**



**Gráfico.5. Espectro de punto axial del motor**

2A: Según la ISO 10816, el motor es tolerante a realizarse un mantenimiento preventivo, por la frecuencia y amplitud que presenta se diagnostica una alineación y apriete de partes rotatorias, con su respectivo monitoreo.

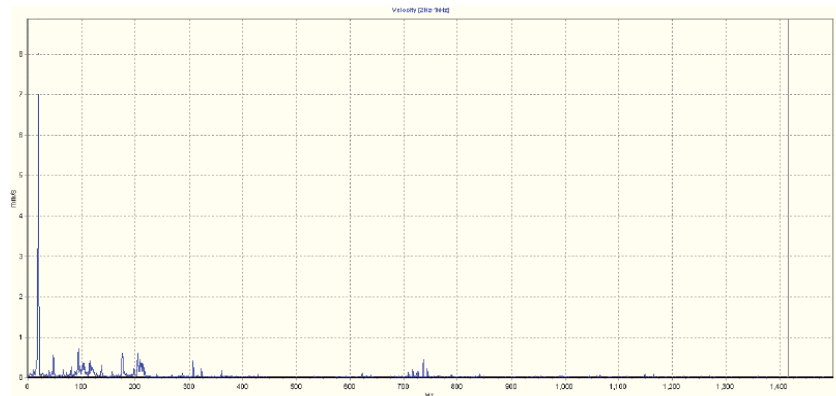
➤ **Equipo 291-PP-714**



**Gráfico.6. Espectro de punto horizontal del motor**

2H: En el motor es necesario realizar un mantenimiento preventivo, la evaluación vibracional nos dice que el equipo es insatisfactorio y tiene problemas de desalineamiento, desequilibrio, y de aceite; se recomienda realizar cambio de láminas, alineamiento y limpieza.

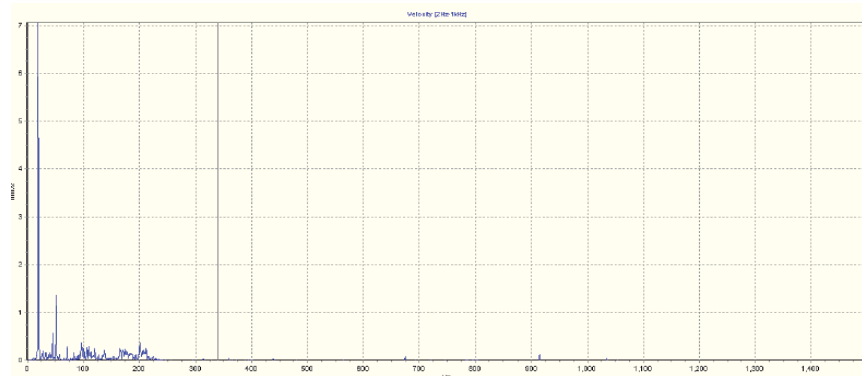
➤ **Equipo 291-PP-714**



**Gráfico.7. Espectro de punto axial del motor**

2A: El motor es necesario realizar un mantenimiento correctivo u overol, por ser inaceptable por la ISO 10816 que contempla que inhabilita el equipo para seguir produciendo, preservando la seguridad del personal y las perdidas en el proceso.

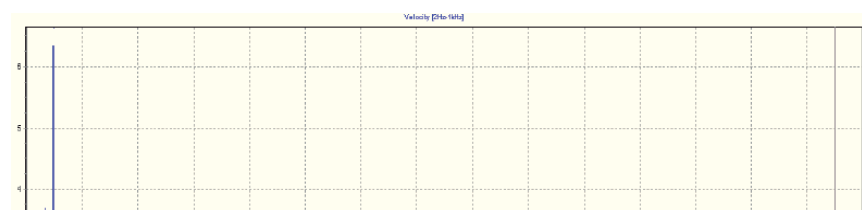
➤ **Equipo 291-PP-714**



**Gráfico.8. Espectro de punto vertical de la bomba**

3V: en la bomba prese ta problemas de desalineamiento, desequilibrio, esto puede estar ocasionando calentamiento en el rodete del motor afectando a este; el sello mecanico tiene problemas de filtracion, se recomienda desmontar la bomba y realizar mantenimiento.

➤ **Equipo 292-PP-720**



### Gráfico.9. Espectro de punto horizontal de la bomba

3H: La bomba necesita un mantenimiento preventivo por tener problemas de alineamiento y desequilibrio, esto se observa en la banda que se encuentra en el análisis espectral de baja frecuencia, dando como resultados que el equipo es insatisfactorio para la ISO 10816. Se recomienda un monitoreo mensual.

#### ➤ Equipo 291-PP-701

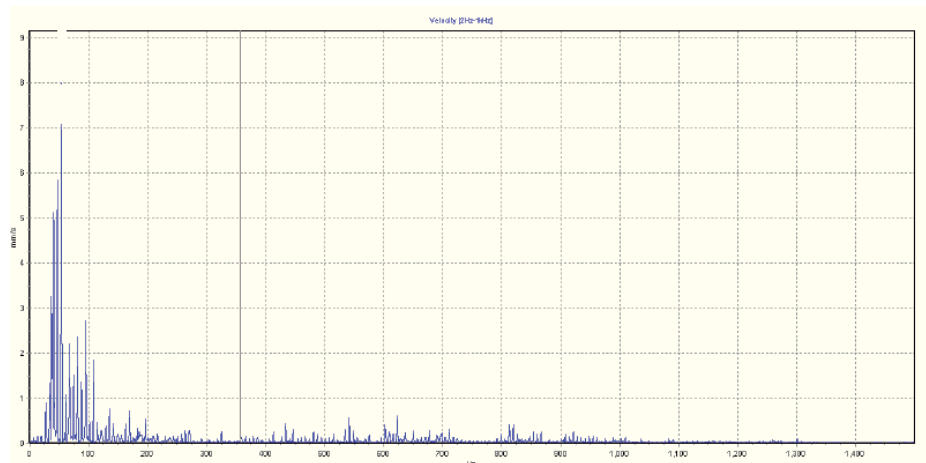


Gráfico.10. Espectro de punto horizontal del motor

2H: Holgura mecánica → Por los picos altos desde 3X T y por armónicos de 1X en el sentido tangencial, esta evaluación es por ser la única motor de transmisión por poleas, es necesario un mantenimiento correctivo, incluso desmontar el sistema, por tener desgaste de faja,



desequilibrio, y desalineamiento; el alineamiento se efectúa con una regla que alinea la polea transmisora y la conductora, como también el uso del tensiómetro, y las pruebas operativas deben realizarse al vacío, según la norma ISO 10816 la bomba de poleas es inaceptable y no debe seguir operando hasta su reparación.

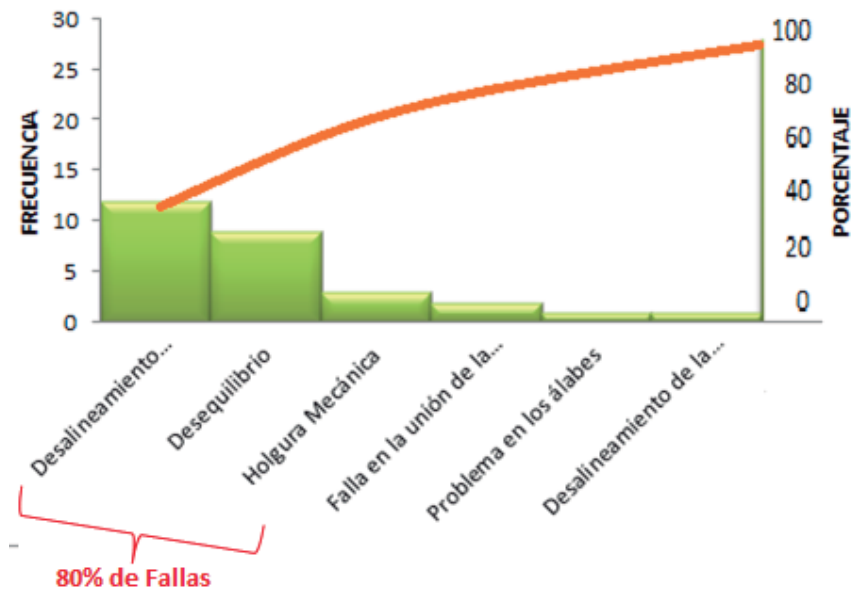
#### 4.1.4. Análisis de falla según el diagrama de Pareto

Al realizar el análisis espectral de los valores de vibración de los equipos nos dio como resultado tres variables que se aplica a la causa de los problemas de fallas operacionales, siendo el causal de las frecuentes paradas de los equipos de bombeo y por ende de la producción.

Por ello aplicaremos el análisis según Pareto para fortalecer el resultado obtenido en el procedimiento anterior.

<b>TIPO DE FALLA</b>	<b>MINITOREO</b>	<b>F</b>	<b>%RED</b>	<b>%F.ACUM</b>
Desalineamiento Angular	Tres semanas	12	41	41
Desequilibrio	Tres semanas	9	32	73
Holgura Mecánica	Tres semanas	3	12	85
Falla de la unión de la bomba	Mensual	2	7	92
Problema en los alabes	Mensual	1	4	96
Desalineamiento de la polea	Mensual	1	4	100
<b>TOTAL</b>		<b>28</b>	<b>100</b>	

**Tabla.8. Tabla de frecuencia de fallas (Diagrama de Pareto). Fuente de elaboración propia.**



**Gráfico.11. Frecuencia de fallas (Diagrama de Pareto). Fuente de elaboración propia.**

Lo obtenido en el análisis de Pareto coincide con el resultado de las gráficas espectrales de cada equipo; concluyendo que el 20% de las causas se atribuye al mantenimiento actual, la cual producen alrededor del 80% de los problemas de tiempo de paradas.

**4.1.5. Indicadores de Gestión de Mantenimiento**

**4.1.5.1. Tiempo promedio entre fallas (MTBF)**

$$MTBF = \text{N}^\circ \text{ de horas de operación} / \text{N}^\circ \text{ de paradas correctivas}$$

$$MTBF \text{ (Hrs/Falla)}$$

EQUIPO	MANT. ACTUAL		MPd
	Hrs. Oper.	N° de Paradas correctivas	N° de Paradas correctivas
291-PP-738	300		1
291-PP-738	300		1
292-PP-710	250		1
292-PP-710	250	1	2
291-PP-714	500	2	3
291-PP-714	500	3	5
291-PP-714	500		
292-PP-720	320	1	3
292-PP-720	320		
291-PP-701	400	1	2
291-PP-701	400	1	2
Total		9	20
MTBF		448.8888	202

**Tabla.9. Tiempo promedio entre fallas. Fuente de elaboración propia.**

Este indicador de gestión nos mide el promedio entre fallas, que nos da la relación de horas de operación de la máquina con el número de paradas correctivas.

## **4.2. Discusión.**

### **4.2.1. Discusión de vibración causada por desbalance**

Para este equipo se invirtió mucho tiempo y trabajo con el fin de descifrar la causa que originaba la vibración, pero desafortunadamente no se lograba identificar el origen de la falla, en base a la experiencia del jefe de mantenimiento y algunos mecánicos se tenía la sospecha de un desbalance, pero debido que anteriormente no se presentó esa falla se descartó esa posibilidad.

Cuando se realizó el mantenimiento predictivo en base a la interpretación del espectro, determino que la vibración era causada por un desbalance del impulsor, se continuo dudando que el problema era por desbalance, por lo cual el jefe de mantenimiento, como medida correctiva a la alta vibración mando reforzar la base del pedestal de la bomba.

Desafortunadamente después de la conclusión del trabajo de refuerzo en la base de la bomba-pedestal se vio que no disminuyó la vibración, por lo que finalmente se determinó realizar el balance del impulsor en base a las sugerencias del mantenimiento predictivo.

#### **4.2.2. Discusión de vibración causada por holgura**

En esta situación se determina la falla en equipos en base al análisis espectral, porque el motor presenta una vibración anormal y la frecuencia de vibración era ascendente, se pensó realizar un cambio de repuesto de motor lo cual hubiera repercutido realizar una maniobra para trasladarlo al taller para su compostura, además de un paro de producción.

Todo esto fue evitado al realizar un análisis espectral como respuesta de las vibraciones, concluyendo que el problema consistía solamente en un aflojamiento mecánico del anclaje del motor, solucionándose el problema con un ajuste del motor, sin necesidad de llegar a parar la producción. También se logró evitar con la detección del tiempo del problema, una posible futura desalineación lo que traería como consecuencia una pérdida de 2 horas.

Si se hubiera querido reemplazar el motor, seguramente el problema se hubiera solucionado, pero al realizarse la revisión en el taller, no se le hubiera encontrado ninguna falla, por la cual se hubiera perdido tiempo y dinero en el replazo no necesario del motor.

#### **4.2.1. Discusión de vibración causada por desalineamiento**

En este caso la vibración es ocasionada por la mala alineación del motor con la bomba, una vez más se comprobó que gracias a la correcta interpretación del espectro de vibraciones, se evitó el cambio del motor o de la bomba, ya que de inicio tenía alta vibración, a lo que el personal de planta suponía algún problema de fabricación del mismo.

El problema de vibración anormal estuvo presente durante mucho tiempo, dañándose en varias ocasiones el acoplamiento que une el motor y la bomba, lo que traía como consecuencia la pérdida de 2 o 3 horas, ya que al tener que realizarse un trabajo emergente, los técnicos electricistas y mecánicos debían en ocasiones trabajar horas extras para realizar los trabajos de corrección llevándose al paro de la producción del área afectada por la falla del equipo.

En casos donde la desalineación es muy alta, la flecha del motor llega a sufrir un desgaste provocando una holgura excesiva en los ajustes de los rodamientos con la flecha del motor, en la cual es necesario mandar a fabricar otra flecha, lo que repercute en pérdida de tiempo y dinero.

## CONCLUSIONES

1. El mantenimiento propuesto obtuvo como resultado un 44,5 % más efectivo que el mantenimiento actual que nos da respuesta a nuestro problema y logra la disminución de tiempo de paradas en los equipos.
2. Se establecieron los puntos críticos de medición en los equipos de acuerdo a los elementos que los conforman según su configuración interna, tratando siempre de posicionarlo lo más cercanos a los apoyos, obteniendo un mejor resultado en valores de vibración.
3. Se establecieron niveles de alarma a través de la norma ISO 10816, los cuales permitirán conocer el estado vibracional de los equipos al inicio del programa del mantenimiento, obteniendo tolerancias según norma.
4. Las bandas de frecuencias espectrales dividen los espectros de vibración en zonas en donde normalmente se originan los problemas a bajas frecuencias, ayudando a su rápida identificación, y dando respuesta inmediata a la falla del equipo.  
  
En la comparación y análisis de los espectros obtenidos en el monitoreo con espectros típicos de fallas se diagnosticaron problemas de desbalance, desalineación y soltura mecánica en los equipos de bombeo siendo los problemas mas frecuentes en este tipo de equipos
5. Mediante criterios de severidad se establecieron frecuencias de monitoreo cada 6 meses y un año, viendo que el 20% de causas que originan un 80% de fallas en los equipos
6. El mantenimiento preventivo es potencialmente mejorado por medio de la incorporación de un programa de Mantenimiento Predictivo a través de la técnica de análisis vibracional en la cual se refleja en un incremento alrededor de 24% de ahorro anual.

## **RECOMENDACIONES**

1. Ajustar la frecuencia de monitoreo de los equipos, de acuerdo a los cambios en los niveles de vibración, para evitar paradas inesperadas.
2. Adiestrar al personal de mantenimiento en materia de mantenimientos predictivos, de manera de hacer más eficiente al grupo al evitar trabajos mal realizados.
3. Adquirir dispositivos confiables para la alineación de los ejes, desequilibrio, holguras mecánicas, que son las fallas mas representativas de los equipos, con el propósito de evitar daños en los elementos mecánicos.
4. Se recomienda el uso de otra técnica predictiva como al análisis de aceite, termografía, ultrasonido, etc., e incorporación de herramientas de calidad como el diagrama de Pareto, el análisis de Poka Yoke e indicadores de mantenimiento como el MTBF, el MTTR y la disponibilidad (A).

## **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Techint Ingeniería y Construcción (2013). Informe anual de mantenimiento preventivo.
- SKF Chilena S.A.I.C (2013). Capacitación de alineación de precisión de ejes en sistema laser.
- Pirelli (2013). Informe de mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones.
- Curso de mantenimiento campus virtual TEPSUP (2012).
- Ing. Carlos Gonzalo (2010). Capacitación de mantenimiento mecánico planta concentradora (2010)
- Tesis “Propuesta de estrategias para el mejoramiento del comportamiento de equipos rotativos críticos basado en el mantenimiento en acción”. caso: equipos rotativos de la ruta 11-a, unidad de urea, fertinitro, José- edo. anzoátegui. (2009). Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas Departamento de Mecánica.
- Santiago García Garrido, Director Técnico de RENOVETEC. Web ingeniería del mantenimiento.
- Proyecto Apremat (2000). Manual de Funciones y Guía de Implantación de un Sistema de Mantenimiento Preventivo Programado




## ANEXOS

ITEM	VARIABLES	CONCEPTO	PONDERACION	OBSERVACIONES
<b>1</b>	<b>Efecto sobre el servicio que proporciona :</b>			
		Para	4	
		Reduce	2	
		No para	0	
<b>2</b>	<b>Valor técnico - Económico:</b>			
	Considerar el costo de adquisición, operación y mantenimiento	Alto	3	Más de \$2000
		Medio	2	
		Bajo	1	Menos de \$1000
<b>3</b>	<b>La falla afecta:</b>			
	El equipo en si	Si	1	deteriora otros componentes
		No	0	
	Al servicio	Si	1	Origina problemas a otros equipos
		No	0	
	Al operador	Riesgo	1	Posibilidad de accidente del operador
		Sin riesgo	0	
	A la seguridad en general	Si	1	Posibilidad de accidente a otras personas u otros equipos cercanos
		No	0	
<b>4</b>	<b>Probabilidad de falla (Confiabilidad)</b>			
		Alta	2	Se puede asegurar que el equipo va trabajar correctamente
		Baja	0	
<b>5</b>	<b>Flexibilidad de equipo en el sistema:</b>			
		Único	2	No existe otro igual o similar
		By pass	1	El sistema puede seguir funcionando
		Stand By	0	Existe otro igual o similar no instalado.
<b>6</b>	<b>Dependencia logística</b>			
		Extranjero	2	Repuestos se tienen que importar
		Local/ext	1	Algunos repuestos se compran localmente
		Local	0	Repuestos se consiguen


				localmente
<b>7</b>	<b>Dependencia de la mano de obra</b>			
		Terceros	2	El mantenimiento requiere contratar a terceros
		Propia	0	El mantenimiento requiere personal propio.
<b>8</b>	<b>Facilidad de reparación:</b>			
		Baja	1	Mantenimiento difícil
		Alta	0	Mantenimiento fácil.

	ESCALA DE REFERENCIA	
A	CRITICA	16 a 20
B	IMPORTANTE	11 a 15
C	REGULAR	06 a 10
D	OPCIONAL	00 a 5

**Fig.a. Tabla de prioridades para evaluar el equipo. Fuente elaborado por área de mantenimiento Tecsup.**

	<b>PROYECTO TOROMOCHO AREA DE MANTENIMIENTO</b>		<b>AREA DE ESPESADORES HIDROMET</b>				
			MES DE ENERO				
	DÍA	1	2	3	4	5	
<b>292-PP-710</b>	HT inicial						
	HT diarias						
	ACUMULADO						
<b>291-PP-701</b>	HT inicial						
	HT diarias						
	ACUMULADO						
<b>291-PP-714</b>	HT inicial						
	HT diarias						
	ACUMULADO						

**Fig.b. Registro de las HT de los grupos de bombeo Fuente elaborado por Techint Ingeniería y Construcción**

 <b>INGENIERIA Y CONTRUCCION</b>		<b>PROYECTO TOROMOCHO</b> <b>AREA DE MANTENIMIENTO</b>				<b>ESPESADORES</b> <b>HIDROMET</b>			
PROGRAMACIÓN DE TAREAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO									
TAREA	GRUPOS	FRECUENCIA	ÚLTIMA MEDICIÓN				PRÓXIMA MEDICIÓN		
			HT	FECHA	HT (Real)	FECHA (Real)	HT	FECHA	
Medición de vibraciones	MOTOR								
Medición de vibraciones	BOMBA								
Medición de vibraciones	MOTOR								
Medición de vibraciones	BOMBA								

**Fig.c. Programación de las tareas de mantenimiento predictivo. Fuente elaborado por Techint Ingeniería y Construcción**