

# CAPÍTULO 1

## CONSIDERACIONES GENERALES DE LA EMPRESA

### “Agip Oil Ecuador B.V.”

En este capítulo se pretende describir los aspectos básicos de la empresa Agip Oil Ecuador B.V., tales como su estructura administrativa, las instalaciones donde lleva a cabo su actividad económica, los procesos y métodos que intervienen en la extracción del crudo, en sí, presentar una visión general del campo del presente trabajo.

#### 1.1 AGIP OIL ECUADOR B.V.

Agip Oil Ecuador B.V. (AOE), es una empresa multinacional petrolera que forma parte del Grupo ENI – Italia, la mayor Compañía Italiana de Energía y una de las seis mas grandes del mundo, la cual se ha establecido en nuestro país desde Febrero del año 2000 como Contratista de Prestación de Servicios de Riesgos con Petroecuador.

Agip Oil Ecuador forma parte de las empresas que contribuyen a la explotación petrolera nacional, la cual entrega al SOTE (Sistema Oleoducto Transecuatoriano) y al OCP (Oleoducto de Crudo Pesados), el crudo extraído y procesado desde la localidad de Villano ubicada en el Bloque 10 con las especificaciones que se muestran en la tabla 1.1.

**TABLA 1.1 ESPECIFICACIONES DEL CRUDO PRODUCIDO POR AOE**

<i>Tipo de crudo</i>	<i>Grado API</i>	<i>Producción diaria</i>
Pesado	21	30.000 BPD

BPD = Barriles por día



### **1.1.2 OBJETIVO**

El objetivo principal de AOE es la de la Exploración, Perforación, Explotación y Producción de hidrocarburos desde el campo Villano ubicado en el Bloque 10 en la provincia de Pastaza, de acuerdo a normas y políticas, tanto ambientales como petrolíferas, establecidas por AOE y la Constitución ecuatoriana.

### **1.1.3 ESTRATEGIA**

Las principales estrategias que persigue la empresa son las siguientes:

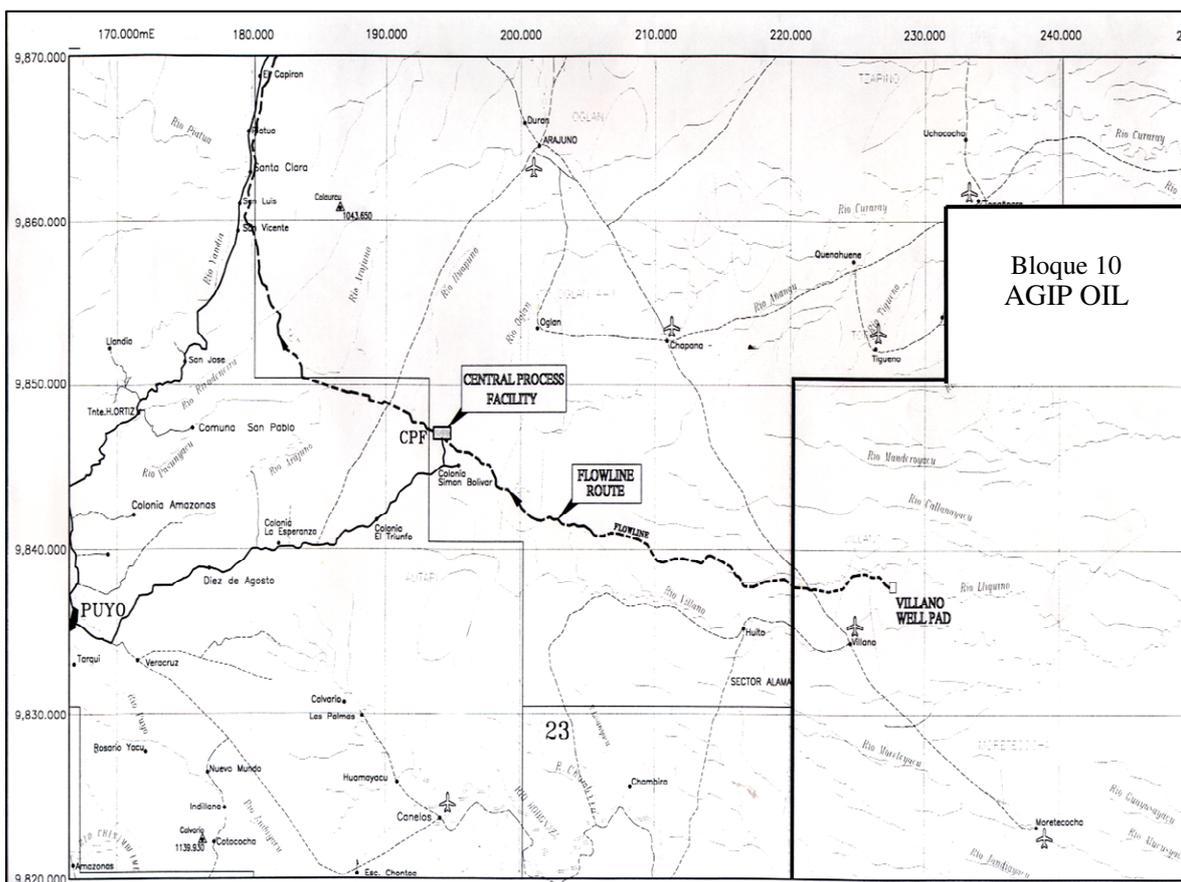
- Concentrar las operaciones en el campo Villano.
- Consolidar la posición de AOE en Ecuador creando y persiguiendo nuevas oportunidades de Exploración y Producción.
- Mejorar eficiente y efectivamente los costos de optimización y control.
- Promover y crear oportunidades crecientes para el personal de AOE dentro de la organización y de acuerdo con el grupo ENI.
- Cumplir los planes de Manejo Ambiental.

## **1.2 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA**

AGIP Oil Ecuador B.V. desarrolla procesos de exploración y explotación petrolera desde el campo Villano ubicado en el Bloque 10, para lo cual tiene sus oficinas principales en la ciudad de Quito, una oficina de Relaciones Comunitarias en la ciudad de Puyo y tiene instalaciones de explotación y producción petrolera en los siguientes sitios:

- **Plataforma de pozos de crudo - Villano A.** Constituida por una plataforma con 7 pozos de producción de crudo y un pozo para reinyección de agua, así como las instalaciones de bombeo y de control, una torre para perforación y mantenimiento de pozos denominado “workover”, un área de campamentos y helipuerto, todo en la misma plataforma.
- **Estación CPF.** Es la estación denominada Facilidades Centrales de Producción (CPF de las siglas en inglés Central Process Facilities), cuya ubicación geográfica se observa en la figura 1.2, y es donde se lleva a cabo las operaciones necesarias para la producción de crudo.

**FIGURA 1.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL CPF**



Fuente: Departamento Oleoductos – Agip Oil Ecuador B.V.

La estación CPF contiene entre las principales áreas a las siguientes: área de procesos, área de tanques de almacenamiento, área de pozos de reinyección de agua de formación, área de mantenimiento y materiales,

área helipuerto, área de tratamiento y transferencia de desechos sólidos (Landfarm) y finalmente el área de campamentos.

Estas áreas se pueden observar en el Anexo No 1.

- **TM Baeza.** Constituida fundamentalmente por las instalaciones de almacenamiento y transferencia de crudo desde el oleoducto de AGIP hacia el Sistema de Oleoducto Transecuatoriano (SOTE) y al Oleoducto de crudos pesados (OCP).
- **Línea de Flujo y Oleoducto Secundario.** Corresponde a la Línea de Flujo (Flow Line) entre la plataforma de Villano y el CPF, así como el Oleoducto Secundario (Secondary Line) construido entre el CPF y la estación de transferencia en Baeza, con todas sus instalaciones y elementos de control a lo largo del derecho de vía.

### **1.3 FILOSOFÍA DE AGIP OIL ECUADOR SOBRE SEGURIDAD, SALUD Y PROTECCION AMBIENTAL**

Como compañía operadora mantiene la filosofía de que:

*“No existe ninguna tarea tan importante que justifique arriesgar el recurso mas valioso, las personas”<sup>1</sup>*

La protección de la vida humana es de la más alta prioridad, y las acciones tomadas para proteger al medio ambiente o los bienes de la compañía deben reflejar esta filosofía.

---

<sup>1</sup> Agip Oil Ecuador B.V, Manual de Seguridad, Salud y Protección Ambiental, 2001.

### 1.3.1 POLÍTICAS AMBIENTALES

Las políticas ambientales que persigue Agip Oil Ecuador juegan un papel importante dentro de la estructura de la empresa ya que esto le permite mantenerse dentro de estándares internacionales de calidad.

A continuación se presentan los principales puntos de esta política ambiental:

- Ejecutar sus actividades de exploración y producción evaluando los impactos ambientales y llevando a cabo prácticas y procedimientos adecuados consistentes con las políticas de ENI y de acuerdo a las normas de la industria petrolera.
- Respetar y cumplir las leyes y regulaciones ambientales ecuatorianas aplicables.
- Identificar de manera oportuna, posibles preocupaciones de las comunidades directamente afectadas y a la manera apropiada de mitigarlas.
- Desarrollar y mantener planes de respuesta ante emergencias para asegurar acciones oportunas y eficaces para minimizar los impactos ambientales.
- Reparar o mitigar accidentes o condiciones que pondrían en peligro al medio ambiente.
- Usar sistemas eficientes de energía y minimizar las descargas de desechos al ambiente de acuerdo con la viabilidad económica y la tecnología apropiada.
- Efectuar regularmente evaluaciones ambientales de monitoreo, auditoría y del cumplimiento de esta política, medir su progreso y reportar a Gerencia.

- Mejorar sus sistemas de manejo ambiental y periódicamente reportar su progreso.
- Asegurar un ambiente de trabajo seguro y saludable para sus empleados, contratistas y visitantes.<sup>2</sup>

#### **1.4 BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE TRATAMIENTO Y SEPARACIÓN DE CRUDO.**

El crudo que se extrae desde los pozos tiene básicamente tres componentes principales: crudo, agua y gas.

Al crudo extraído con bombas electro sumergibles desde los pozos de la plataforma Villano se le hace un tratamiento previo, que consiste inyectar con demulsificante, anticorrosivo y antiescala al crudo a ser bombeado, con la finalidad de que estos químicos actúen sobre el mismo a lo largo de la línea de flujo desde Villano A hacia CPF; el crudo en estas condiciones llega a la planta para iniciar el proceso de separación.

El crudo ingresa a la estación CPF por una tubería de 12 pulgadas de diámetro, donde además se encuentra la SDV 201 (Shut Down Valve), que es una válvula de seguridad, la misma que se activa por baja o alta presión de la línea de flujo, cerrando el ingreso de crudo a la planta provocando que los pozos productores en Villano se apaguen, salgan de operación y paralice la producción en el CPF.

En la figura 1.3 se observa el receptor de crudo, que viene a formar parte del proceso inicial de separación del crudo.

---

<sup>2</sup> Agip Oil Ecuador B.V, Manual de Seguridad, Salud y Protección Ambiental, 2001.

**FIGURA 1.3 RECIBIDOR DE CRUDO DESDE POZOS EN VILLANO A**

El crudo que ingresa al CPF es llevado desde el receptor al intercambiador agua/crudo, en donde es calentado por el agua de producción, luego va a los intercambiadores de calor tipo crudo/crudo, produciéndose al igual que en el anterior proceso, la transferencia de calor desde el fluido caliente hacia el frío, ayudando de esta manera a que el crudo alcance una temperatura más alta, facilitando así su posterior separación, ya que la temperatura es un factor importante para la ruptura de la emulsión que se ha formado entre el crudo y el agua. En la figura 1.4 se observa los intercambiadores de calor que intervienen en el proceso.

**FIGURA 1.4 INTERCAMBIADORES DE CALOR TIPO AGUA/CRUDO**

A continuación, el crudo entra al separador de agua libre (FWKO de las siglas en inglés Free Water Knock Out) en el cual choca con placas metálicas produciéndose la separación de agua, crudo y gas debido a su diferencia de densidades. Este equipo se muestra en la figura 1.5.

**FIGURA 1.5 SEPARADOR DE AGUA LIBRE “FREE WATER KNOCK OUT (FWKO)**



En el interior del equipo FWKO existen compartimientos donde se acumula y se distribuye el crudo hacia los Calentadores-Tratadores (Heater-Treaters), el agua sale al intercambiador y el gas hacia el Cabezal de Enfriamiento (Over Head Cooler).

Es importante en el FWKO tener un control de los niveles de crudo y agua evitando que este se inunde y pueda entrar en una línea de gas afectando los dispositivos electrónicos de control del sistema. Aquí no se logra notablemente que el crudo baje su contenido de agua que entra aproximadamente con 48% y sale con un 25% de contenido de agua.

Luego del FWKO el crudo llega a los “Heater-Treaters” por líneas diferentes, produciéndose una deshidratación casi total del crudo, llegando este a un nivel menor al 1% de contenido de agua.

La figura 1.6 muestra el equipo “Heater-Treater” necesario para la deshidratación del crudo.

### **FIGURA 1.6 EQUIPO CALENTADOR-TRATADOR (HEATER -TREATER)**



Para la deshidratación se utilizan tubos de fuego (firtubes) que van por el interior del “Heater-Treater”, estos tubos son calentados por flama directa, utilizando quemadores con combustible de crudo procesado, previamente calentado y pulverizado, para que la combustión sea casi completa, es decir con liberación de CO<sub>2</sub> y vapor de agua. También se tiene quemadores con combustible gas, el cual se obtiene como producto del proceso mismo.

Al salir de los “Heater-Treaters”, se unen las cinco líneas de crudo y se dirigen a los intercambiadores de calor tipo crudo/crudo, para calentar el crudo que viene de los pozos de Villano. El agua de producción sale de los “Heater-Treaters” uniéndose en una sola línea y dirigiéndose al intercambiador de calor agua/crudo y el gas sale por la parte superior de cada uno, uniéndose con la línea de gas del FWKO para su procesamiento.

Este gas que sale del FWKO y de los “Heater-Treaters” se dirige al “Over Head Cooler” en donde se condensa y pasa al Tanque Separador de Gas Combustible (Fuel Gas Knock Out Drum) separándose las gasolinas existentes, una parte del gas se utiliza para consumo interno, el resto se dirige al Tanque Depurador de

gas (KO Drum Scrubber Gas), este cumple con la función de retener crudo que haya sido arrastrado en la línea para evitar que éste llegue a quemarse en la tea (Flare) causando grandes problemas; además puede mencionarse que a este dispositivo llegan gases de alta y baja presión, aquí se disminuye la presión del gas y se lo envía a la tea con una presión moderada.

En la figura 1.7 se ilustra la tea para la combustión del gas producido durante la separación del crudo.

### **FIGURA 1.7 TEA PARA COMBUSTIÓN DE GAS (FLARE)**



El agua de producción llega al Tanque Hidrociclón (Hydrociclón Drum), que sirve como succión para las bombas que llevan el agua a los hidrociclones en donde se separa el crudo aún existente en ésta mediante separadores centrífugos y se va hacia los Tanque de Agua de Producción (Produced Water Storage Tank), donde es almacenada para luego bombearla hacia los pozos inyectores de agua de formación.

En la figura 1.8 se muestra los cabezales de los pozos de inyección de agua de formación.

**FIGURA 1.8 POZO INYECTOR DE AGUA DE FORMACIÓN**

El crudo que cumple con las especificaciones de la tabla 1.1 es bombeado a la estación de transferencia en Baeza con ayuda de las bombas Despachadoras (Shipping pumps), mediante la tubería del Oleoducto Secundario (Secondary Pipeline).

En el siguiente diagrama de flujo de la figura 1.9, se puede observar con claridad el proceso antes mencionado.

En el diagrama de la figura 1.10 se muestra una distribución de los equipos mencionados, durante todo el proceso de separación de crudo.





## **CAPÍTULO 2**

# **EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO POR ANÁLISIS DE VIBRACIONES**

### **2.1 GENERALIDADES**

Los sistemas de mantenimiento han ido evolucionando con el tiempo, creándose varias formas y versiones que pretenden alcanzar una manufactura de clase mundial.

Probablemente, en los primeros tiempos del desarrollo de las industrias, las tareas de mantenimiento se hayan limitado a efectuar reparaciones o cambios de máquinas/elementos luego de que éstas fallaran o, en algunos casos, a realizarlas poco antes de que se presenten las mismas.

Actualmente existen variados sistemas para encarar el mantenimiento de las instalaciones en operación, algunos de ellos no solamente centran su atención en la tarea de corregir fallas, sino que también tratan de actuar antes de la aparición de las mismas haciéndolo tanto sobre los bienes, tal como fueron concebidos, como sobre los que se encuentran en etapa de diseño, para asegurar que todo activo continúe desempeñando las funciones deseadas y generando la competitividad de la empresa, lo cual garantiza la disponibilidad y confiabilidad planeadas.

### **2.2 TIPOS DE MANTENIMIENTO**

En la actualidad se puede encontrar varios tipos y técnicas de mantenimiento, entre los cuales se puede mencionar los más importantes:

- a.- Mantenimiento Correctivo
- b.- Mantenimiento Preventivo
- c.- Mantenimiento Predictivo
- d.- Mantenimiento Proactivo

### **2.2.1 MANTENIMIENTO CORRECTIVO**

El Mantenimiento Correctivo es el conjunto de procedimientos ejecutados en los equipos que han presentado averías o fallas. Mediante el mantenimiento correctivo no sólo se repara maquinaria ya deteriorada sino que se realizan ajustes de equipos cuyos procesos evidentemente tienen fallas.

Generalmente este tipo de mantenimiento se presenta de una manera no planificada, en la cual se deberá actuar lo más rápidamente posible, con el objetivo de evitar costos, daños materiales y/o humanos mayores. Un mantenimiento correctivo consiste en la reparación de un equipo o máquina cuando se dispone de personal, repuestos y documentos técnicos necesarios para efectuarlo.

Esta forma de Mantenimiento impide el diagnóstico fiable de las causas que provocan la falla, pues se ignora si falló por mal trato, por abandono, por desconocimiento del manejo, por desgaste natural, etc.

### **2.2.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO**

El Mantenimiento Preventivo es la inspección periódica de máquinas y equipos, para evaluar su estado de funcionamiento e identificar fallas, además de prevenir y poner en condiciones el equipo para su óptimo funcionamiento (limpieza, lubricación y ajuste). Es también en este tipo de mantenimiento, en el que se reemplazan piezas para las cuales el fabricante del equipo ha identificado que tienen un número específico de horas de servicio.

La base de información para la inspección periódica en el mantenimiento preventivo surge de fuentes internas constituidas por los registros o historiales de reparaciones existentes en la empresa, archivos de los equipos e instalaciones, especificaciones, y también de fuentes externas constituidas por las recomendaciones sobre el mantenimiento que efectúa el fabricante de cada bien.

### **2.2.3 MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

El mantenimiento predictivo es una técnica para pronosticar el punto futuro de falla de un componente de una máquina, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan, antes de que falle. Así, el tiempo muerto del equipo se minimiza y el tiempo de vida del componente se maximiza.

Más adelante se definirá en detalle este concepto.

### **2.2.4 MANTENIMIENTO PROACTIVO**

El mantenimiento Proactivo, es una filosofía de mantenimiento, dirigida fundamentalmente a la detección y corrección de las causas que generan el desgaste y que conducen a la falla de la maquinaria.

Una vez que las causas que generan el desgaste han sido localizadas, no se debe permitir que éstas continúen presentes en la maquinaria, ya que de hacerlo, su vida útil y desempeño se verán reducidos.

La longevidad de los componentes del sistema depende de que los parámetros de causas de falla sean mantenidos dentro de límites aceptables, utilizando una práctica de detección y corrección de las desviaciones según el programa de mantenimiento.

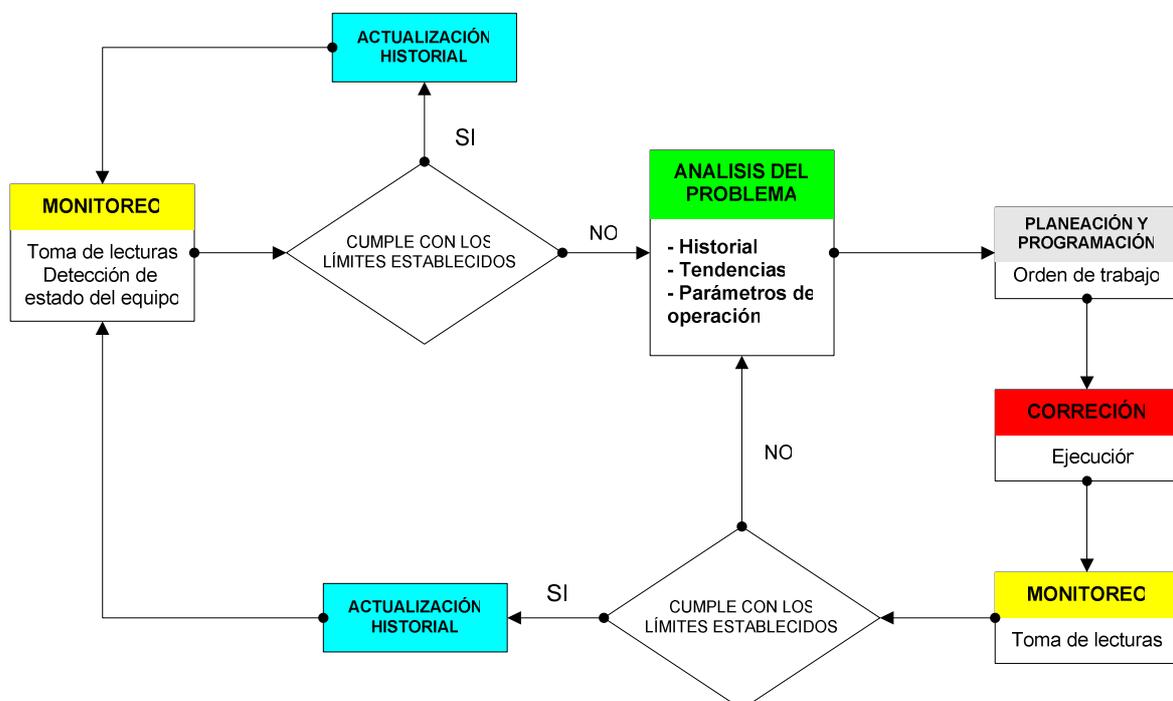
## 2.3 EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Esta técnica de mantenimiento consiste en el análisis de parámetros de funcionamiento cuya evolución permite detectar un fallo antes de que este tenga consecuencias más graves.

En general, el Mantenimiento Predictivo consiste en estudiar la evolución temporal de ciertos parámetros y asociarlos a la evolución de fallos, para así determinar en qué periodo de tiempo, ese paulatino deterioro de la máquina va a tomar una relevancia importante, de manera que se tenga una planificación de todas las intervenciones necesarias con tiempo suficiente, para que esos fallos nunca tengan graves consecuencias sobre la máquina.

En la figura 2.1 se ilustra el método de como el mantenimiento predictivo se desarrolla para el análisis de un equipo.

**FIGURA 2.1 EL CICLO DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO**



Fuente: [http:// mantenimientomundial.com](http://mantenimientomundial.com)

Una de las características más importantes de este tipo de mantenimiento es que no debe alterar el funcionamiento normal de la planta mientras se está aplicando.

La inspección de los parámetros se puede realizar de forma periódica o de forma continua, dependiendo de diversos factores como son: el tipo de planta, los tipos de fallos a diagnosticar y la inversión que se quiera realizar.

### **2.3.1 TÉCNICAS DEL MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

El mantenimiento Predictivo depende de una serie de técnicas (herramientas, equipos, conocimientos, métodos, procedimientos y filosofías) que aplicados en armonía logran con efectividad su objetivo.

Las técnicas que comúnmente son aplicadas al Mantenimiento Predictivo son:

- Monitoreo de la condición por análisis de vibraciones
- Tribología.
- Termografía
- Ensayos no destructivos
- Boroscopia

No es fácil definir cada una de estas técnicas ya que las mismas son áreas de especialización dentro del campo del Mantenimiento Predictivo por ello se hará una breve reseña de las mismas.

#### **2.3.1.1 Monitoreo de condición por Análisis de Vibraciones**

Este consiste en realizar un seguimiento de los movimientos oscilatorios (vibraciones) de las máquinas rotativas y recíprocas para estudiar su comportamiento, mediante un análisis vibracional. La figura 2.2 muestra el

monitoreo de vibraciones en una bomba centrífuga utilizando dispositivos de medición portátiles.

## FIGURA 2.2 MONITOREO DE UN EQUIPO POR ANÁLISIS DE VIBRACIONES



Fuente: [http:// pruftechnik.com](http://pruftechnik.com)

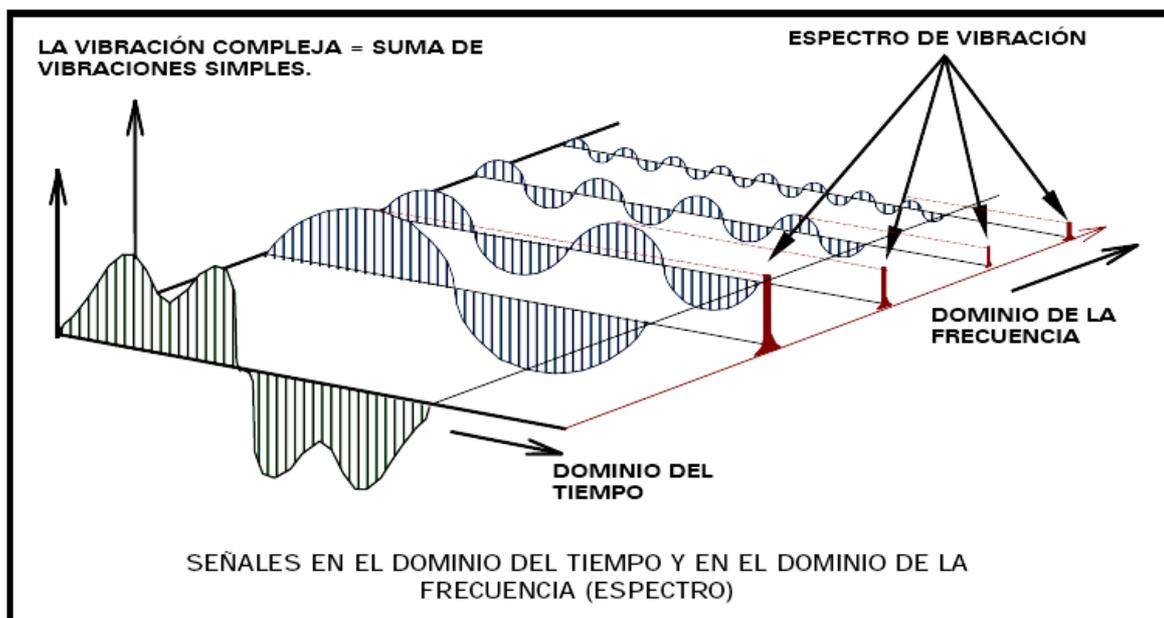
Dentro del monitoreo de vibraciones se utilizan dos indicadores del estado de una máquina, que permiten diagnosticar la posible falla, los cuales son:

- **La vibración global**, que es el total de energía medida dentro de un rango de frecuencia. La medida de una vibración global de una máquina o componente, un rotor en relación a una máquina, o la estructura de la máquina indica la salud actual de la máquina.
- **El espectro de vibración en dominio de frecuencia**, el cual es un proceso de descomposición de la “señal” de vibración en sus componentes, que significa pasar del dominio de tiempo al de frecuencia, dando como resultado un diagrama de amplitud de vibración versus frecuencia denominado **espectro en frecuencia**, que es la base del diagnóstico e identificación de las fuentes de vibración.

Fue precisamente el matemático francés Jean Baptiste Fourier (1768 – 1830) quien encontró la forma de interpretar una señal compleja en el dominio del tiempo por medio de series de curvas sinusoidales con valores de amplitud y frecuencia específicos.<sup>4</sup>

Entonces lo que hace un analizador de espectros que trabaja con la transformada rápida de Fourier (FFT, de las siglas en inglés Fast Fourier Transform), es capturar una señal desde una máquina, luego calcula todas las series de las señales sinusoidales que contiene la señal compleja y por último las muestra en forma individual en el eje X de la frecuencia.

**FIGURA 2.3 ESPECTRO DE VIBRACIÓN EN DOMINIO DE FRECUENCIA**



Fuente: [http:// a-maq.com](http://a-maq.com)

En la figura 2.3 se puede observar como funciona el paso del dominio del tiempo al dominio de frecuencia, basado en la técnica de desarrollo de la serie de Fourier de una función dada, donde cada término de la serie será un componente del espectro.

<sup>4</sup> A-MAQ (2005). Tutorial de vibraciones para mantenimiento mecánico  
[http:// a-maq.com](http://a-maq.com)

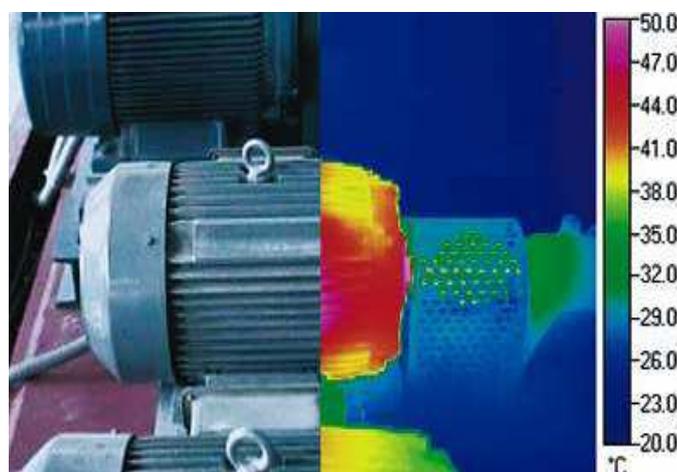
### 2.3.1.2 La Tribología

Analiza los fenómenos relacionados con la fricción y el desgaste obteniendo resultados del análisis físico-químico de los aceites lubricantes de las maquinarias, con los que se puede determinar qué componentes de la máquina están sometidos a desgaste severo.

### 2.3.1.3 La Termografía

Consiste en el monitoreo de las temperaturas de operación de los sistemas mecánicos y eléctricos a través de la radiación infrarroja que estos emiten. La figura 2.4 ilustra una termograma realizado con una cámara termográfica.

#### FIGURA 2.4 TERMOGRAMA DE UN MOTOR ELÉCTRICO



Fuente:[http:// www.flir.com](http://www.flir.com)

### 2.3.1.4 Los Ensayos No Destructivos (END)

Consisten en el análisis interno y superficial de los materiales que componen un equipo o sistemas basados en los análisis por Ultrasonido, aplicaciones químicas (líquidos penetrantes) y físicas (partículas magnéticas).

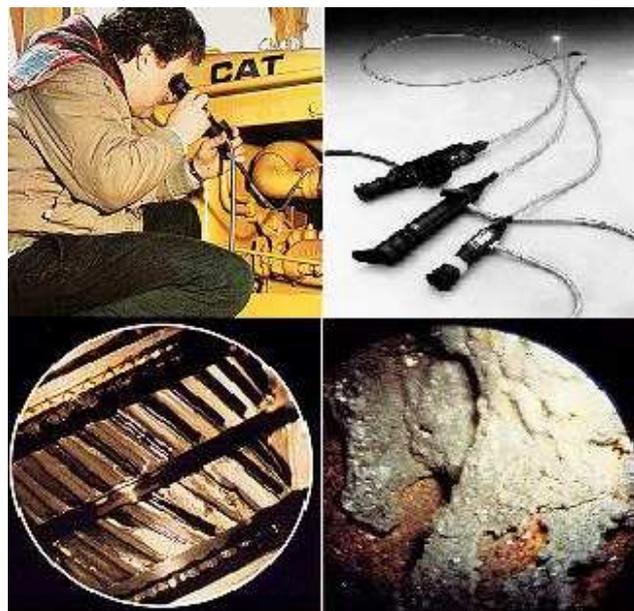
### 2.3.1.5 La Boroscopía

La boroscopía consiste en la ampliación de las imágenes que no se pueden visualizar a simple vista, para así alcanzar espacios diminutos durante cualquier inspección.

Estas inspecciones se realizan con la ayuda de microscopios o con boroscopios, sin que haya la necesidad de desmantelar el equipo.

La figura 2.5 ilustra una boroscopía realizada a un motor diesel.

#### FIGURA 2.5 INSPECCIÓN DE ELEMENTOS INTERNOS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA MEDIANTE UN BOROSCOPIO



<http://www.mantenimientomundial.com>

## 2.4 DISPOSITIVOS PARA MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Para poder cuantificar una vibración de un elemento mecánico, es necesario utilizar dispositivos de medición capaces de transformar estas vibraciones en

magnitudes que sean proporcionales a la excitación que produzcan sobre estos. A continuación se describen los más utilizados para este propósito.

### **2.4.1 TRANSDUCTORES**

Para poder medir una vibración, cuantificarla y analizarla, es necesario contar con “sensores” capaces de recibir el movimiento oscilatorio y transformarlo en una magnitud física proporcional que pueda ser procesada. La solución más práctica a este problema es el contar con una variación de voltaje que sea proporcional a las variaciones de la amplitud de la vibración. Estos dispositivos son los transductores.

#### **2.4.1.1 Transductores sísmicos de velocidad**

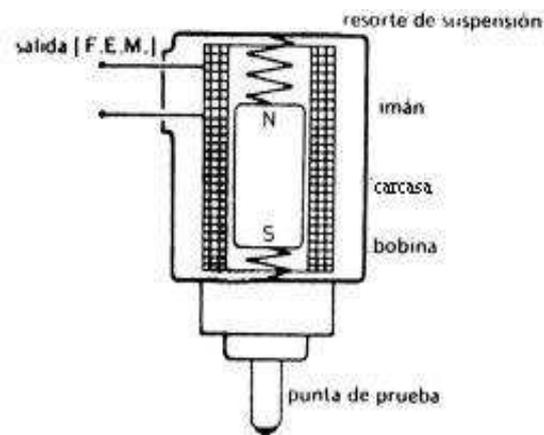
Estos dispositivos poseen una masa suspendida respecto de una carcasa, con características tales que, en el rango de frecuencia a medir, esa masa se comporta como un sistema inercial de referencia sin movimiento. Así, la carcasa acompaña al cuerpo vibrante y el desplazamiento relativo entre ésta y la masa suspendida dará una indicación de la vibración.

Estos instrumentos poseen pulsaciones propias muy bajas, menores a 6 Hz y el rango de frecuencia de aplicación es de 10 Hz en adelante. Teóricamente no tienen limitaciones en cuanto a frecuencias altas de trabajo, pero como a medida que aumenta la frecuencia de vibración de un cuerpo, la amplitud de desplazamiento y de velocidad disminuyen (esta última en menor grado), no hay indicaciones significativas, por lo tanto en la práctica 500 Hz es un límite superior razonable.

El movimiento relativo entre la masa y la carcasa se utiliza para obtener una señal eléctrica proporcional al desplazamiento o velocidad de vibración.

Si una bobina fija a la carcasa es excitada por un núcleo magnético (imán permanente) que se mueve relativamente dentro de ella (masa suspendida) se genera una fuerza electromotriz (f.e.m.) proporcional a la velocidad de la vibración. Esta configuración se muestra en la figura 2.6.

**FIGURA 2.6 TRANSDUCTOR SÍSMICO DE VELOCIDAD**



La importancia de la velocidad de vibración como parámetro indicativo de la misma, en el rango de frecuencias más comunes de las máquinas rotativas, lo ha dado la experiencia, al mostrar con ella características que no se encuentran claramente al medir desplazamiento o aceleración (por ejemplo: desbalanceos y desalineaciones menores).

#### 2.4.2 ACELERÓMETROS

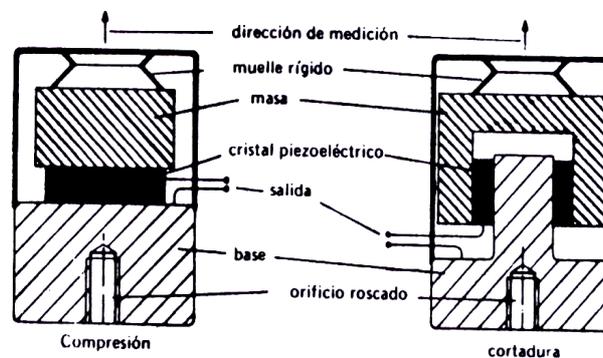
En este instrumento sísmico se tiene ahora un desplazamiento relativo entre la masa suspendida y la carcasa proporcional a la aceleración. Se necesita en este instrumento una alta rigidez  $K$  y una baja masa  $M$  suspendida para que la frecuencia natural sea elevada. Los cristales piezoeléctricos de elevada frecuencia natural optimizaron los acelerómetros.

En la actualidad éstos son ampliamente usados no sólo por su frecuencia natural (40 a 70 kHz) sino también por su pequeña masa que no interfiere sobre el cuerpo vibrante a medir.

La piezoelectricidad es un fenómeno natural por el cual se generan en un cristal cargas eléctricas al ser deformado. La tensión así producida es proporcional a la aceleración de la deformación.

Una masa que actúa sobre el cristal lo deforma o bien por compresión, o por corte de acuerdo a la forma constructiva utilizada. Esta última, denominada de “cortadura”, es más complicada pero tiene la ventaja de minimizar la sensibilidad a las vibraciones en dirección transversal. La figura 2.7 muestra lo anteriormente mencionado.

**FIGURA 2.7 ACELERÓMETRO PIEZOELÉCTRICO**



### 2.4.3 TRANSDUCTORES DE PROXIMIDAD

Estos se basan en efectos electromagnéticos que varían al modificarse la distancia entre la punta de prueba y el cuerpo vibrante metálico.

Tienen la ventaja de no interferir por contacto en el cuerpo, pero generalmente requieren un montaje rígido y pesado.

Se los usa para medir ejes en movimiento y están difundidos en el monitoreo permanente de vibraciones de grandes equipos críticos.

#### **2.4.4 DISPOSITIVOS DIGITALES DE MEDICIÓN MÚLTIPLE**

Son instrumentos de medición portátiles, los cuales poseen varios sensores incorporados de medición para vibración, velocidad, temperatura, estado de rodamientos, cavitación en bombas, etc., los cuales permiten obtener resultados de mediciones en tiempo real de operación de la máquina en estudio.

Uno de este tipo de dispositivos es el VIBSCANNER, el cual se describe a continuación.

##### **2.4.4.1 El analizador / colector de vibraciones: VIBSCANNER**

VIBSCANNER® es un sistema portátil de supervisión de máquinas para mantenimiento predictivo. Sus funciones de medición y análisis, junto con la palanca de navegación, hacen de este dispositivo el instrumento ideal para las rutinas de inspección frecuentes. El VIBSCANNER se muestra en la figura 2.8.

**FIGURA 2.8 VIBSCANNER: COLECTOR / ANALIZADOR DE VIBRACIONES**



Fuente: [http:// pruftechnik.com](http://pruftechnik.com)

Totalmente compatible con el software de PC OMNITREND®, el VIBSCANNER® proporciona funciones de análisis y funciones de reporte con formatos fáciles de entender, para de esta manera poder prevenir fallas catastróficas de máquinas, tiempo muerto imprevisto de producción y daños consecuentes en el equipo de proceso.

Consta de varios sensores incorporados dentro del dispositivo, los que nos permite realizar mediciones de:

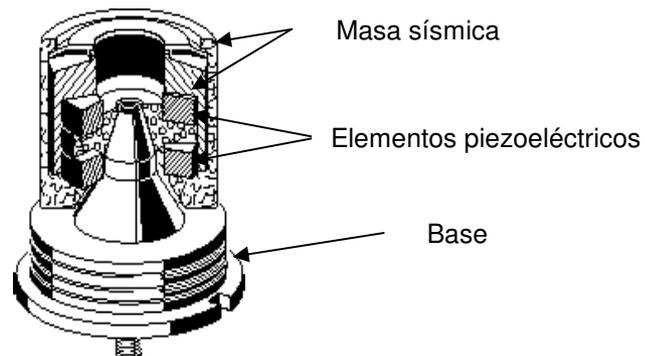
- Vibraciones 
- Estado rodamientos por impulsos de choque 
- Espectros FFT 
- Temperatura 
- Velocidad 
- Cavitación 
- Balanceo dinámico 
- Parámetros de proceso 

Posee un robusto acelerómetro patentado, el cual mide simultáneamente tres señales diferentes en las máquinas: las vibraciones, los impulsos de choque de alta frecuencia emitido por rodamientos y cavitación en bombas. Los detalles acerca de este dispositivo de medición portátil, así como sus especificaciones técnicas se muestran en el Anexo No 2.

Además del acelerómetro que posee como parte del mismo equipo, se puede instalar otros transductores externos que cumplen con las mismas funciones, tal

como los acelerómetros patentados Tandem-Piezo, que se observa en la figura 2.9, los cuales vienen fabricados bajo nuevos estándares de confiabilidad, versatilidad, fácil montaje y sobre todo económicos.

### FIGURA 2.9 ACELERÓMETRO TANDEM – PIEZO



Fuente: PRÜFTECHNIK, Product Catalog – Sensors & Accessories, 2005

Su diseño único prácticamente elimina varios problemas causados por temperatura, el que igualmente permite medir tres señales diferentes en las máquinas, gracias a su amplio rango lineal y a una definida característica de pulso de resonancia a 36 kHz.

En la figura 2.10 se muestra el acelerómetro VIB 6.146, que es uno de los que abarca un rango de máquinas mayor. Las especificaciones de este acelerómetro se muestran en el Anexo No 3.

### FIGURA 2.10 ACELERÓMETRO VIB 6.146



Fuente: PRÜFTECHNIK, Product Catalog – Sensors & Accessories, 2005

## **2.5 SEVERIDAD DE VIBRACIÓN**

Para establecer la severidad de una vibración es necesario definirla respecto al daño específico que ella puede generar.

Por ejemplo, un valor de una vibración medido en una máquina con movimiento alternativo (motor diesel o compresor alternativo) puede ser de muy baja severidad para el daño que ella puede generar en los elementos de la máquina misma, sin embargo ese mismo valor puede ser muy severo o dañino para los elementos unidos a la máquina, como pueden ser cañerías, fundaciones, instrumentos de medición.

Los estándares de severidad vibratoria en este tipo de máquinas limitan el nivel vibratorio de la máquina, no sólo para evitar el daño en la máquina misma, sino que limitan las vibraciones de la máquina para evitar daño de los componentes montados o de los conectados a ella.

Respecto al daño que se quiera evaluar, o de acuerdo a los objetivos para los cuales fueron confeccionados, existen numerosos estándares para la severidad vibratoria o valores admisibles para la vibración.

Algunos estándares son publicados por grupos de industrias tales como: American Petroleum Institute (API), American Gear Manufactures Association (AGMA), Nacional Electric Manufacturers Association (NEMA), etc. Además hay estándares publicados por organizaciones tales como American National Standard Institute (ANSI), Internacional Standard Organization (ISO).

Entre las normas más utilizadas están las determinadas por la ISO, las que consideran varios aspectos de funcionamiento de las máquinas y diferencian entre un tipo y otra para establecer los distintos niveles de vibración, las mismas que se describen en la tabla 2.1.

**TABLA 2.1 NORMAS ISO UTILIZADAS PARA DETERMINAR SEVERIDAD DE VIBRACIÓN**

NORMA	DESCRIPCIÓN	ASPECTOS GENERALES
ISO 2372	Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s. Basis for specifying evaluation standards.	Estándar general para máquinas rotatorias diseñado para evaluar principalmente la severidad vibratoria de máquinas en el taller o en ensayos de aceptación de máquinas. Las especificaciones vibratorias para ensayos de aceptación de máquinas nuevas o reparadas garantizan al comprador que el equipo está estadísticamente normal o con buena salud inicial.
ISO 3945	Mechanical vibration of large rotating machines with speed range from 10 to 200 rev/s. Measurement and evaluation of vibration severity in situ.	Estándar similar al anterior, es para un tipo más específico de máquinas, para máquinas rotatorias grandes, es decir, sobre 300 kW y está diseñado para evaluar la severidad vibratoria de máquinas tomadas en campo.
ISO 2373	Mechanical vibration of certain rotating electrical machinery with shaft heights between 80 and 400 mm. Measurement and evaluation of the vibration severity.	Estándar aplicable a máquinas eléctricas trifásicas de corriente alterna y a máquinas de corriente continua.
ISO 10816	Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurement on non-rotating parts. Part 1: General guidelines Part 2: Large land-based steam turbine generator sets in excess of 50 MW. Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 rpm and 15 000 r/min when measured in situ. Part 4: Gas turbine driven sets excluding aircraft derivatives. Part 5: Machine sets in hydraulic power generating and pumping plants. Part 6: Reciprocating machines with power rating above 100 MW.	Estándar que evalúa la severidad vibratoria de máquinas rotatorias a través de mediciones efectuadas en terreno en partes no giratorias de ellas. Envuelve y amplía los estándares citados anteriormente. Provee guías específicas para evaluar la severidad vibracional medidas sobre rodamientos, cajas de rodamientos o sobre carcasas de maquinaria industrial cuando las mediciones son hechas en campo. Dos criterios son provistos para evaluar la vibración de una máquina: un criterio considera la magnitud observada de la vibración y un segundo criterio considera los cambios de la magnitud. Estos criterios no es la única base para juzgar la severidad de vibración, para algunos tipos de máquinas también es común juzgar la severidad de vibración basados en las medidas tomadas en los ejes rotativos.

**TABLA 2.1 CONTINUACIÓN**

<b>NORMA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>ASPECTOS GENERALES</b>
<b>ISO 7919</b>	Mechanical vibration of non-reciprocating machines - Measurements on rotating shafts and evaluation criteria	Existen máquinas, tales como aquellas que tienen rotores flexibles montados en cojinetes hidrodinámicos, para los cuales las mediciones en la caja de cojinetes pueden no ser totalmente adecuadas como criterio de evaluación. En tales casos puede ser necesario monitorear la máquina usando más mediciones directamente al eje de los rotores. Este es un estándar complementario a los requerimientos establecidos en ISO 10816.
<b>ISO 2631</b>	Evaluation of human exposure to whole-body vibration.	Estándar que limita las vibraciones de las superficies que están en contacto con el ser humano. La severidad vibratoria es cuantificada midiendo aceleración vibratoria en el rango de 1 a 80 Hz

Fuente: Laboratorio de vibraciones mecánicas (2002), Evaluación de la severidad Vibratoria, Universidad de Concepción – Chile <http://dim.udec.cl/lvm>

### 2.5.1 CLASIFICACIÓN DE LA SEVERIDAD DE VIBRACIÓN DE UNA MÁQUINA

Para determinar la severidad de una vibración se toma como referencia el valor pico de la velocidad de vibración, medidos en valor RMS de la misma. La simplicidad del uso del valor pico para evaluar el estado de una máquina rotante se ve en el sistema de clasificación de la Tabla 2.2, válido en el rango de 20 a 1000 cps.

**TABLA 2.2 CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS DIAGNÓSTICOS DE UNA MÁQUINA DE ACUERDO A LA VELOCIDAD DE VIBRACIÓN**

<i>Clasificación</i>	<i>Velocidad pico (mm/s)</i>
Peligro	50
Falla	16
Buen funcionamiento	5
Suave	1.6

Fuente: Bianchi – Falcinelli; Diagnóstico de fallas mediante análisis de vibraciones; 1986.

Cuando aparecen defectos que producen choques e impulsos vibratorios durante el funcionamiento de un equipo, el nivel pico de la vibración aumenta sensiblemente en contraposición con el nivel RMS que permanece insensible.

La medición de la velocidad realizada en tres ejes ortogonales sobre el porta cojinete es utilizada para obtener el RMS definido por la ISO 10816-3 como “Severidad de vibración”.

Para conocer el rango de calidad de vibración se debe establecer si los soportes de la máquina son “rígidos” o “flexibles”.

- Un soporte es “flexible” si la frecuencia natural de la máquina sobre el mismo es menor que la correspondiente a la velocidad de rotación.
- Un soporte es “rígido”, si la frecuencia fundamental de la máquina sobre sus soportes es mayor que la frecuencia de rotación.

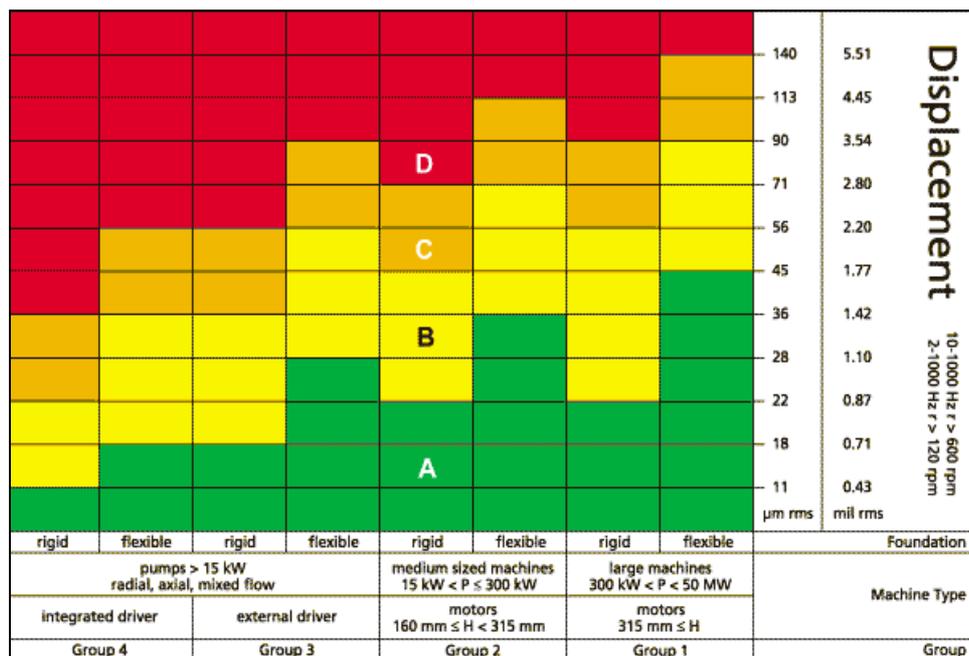
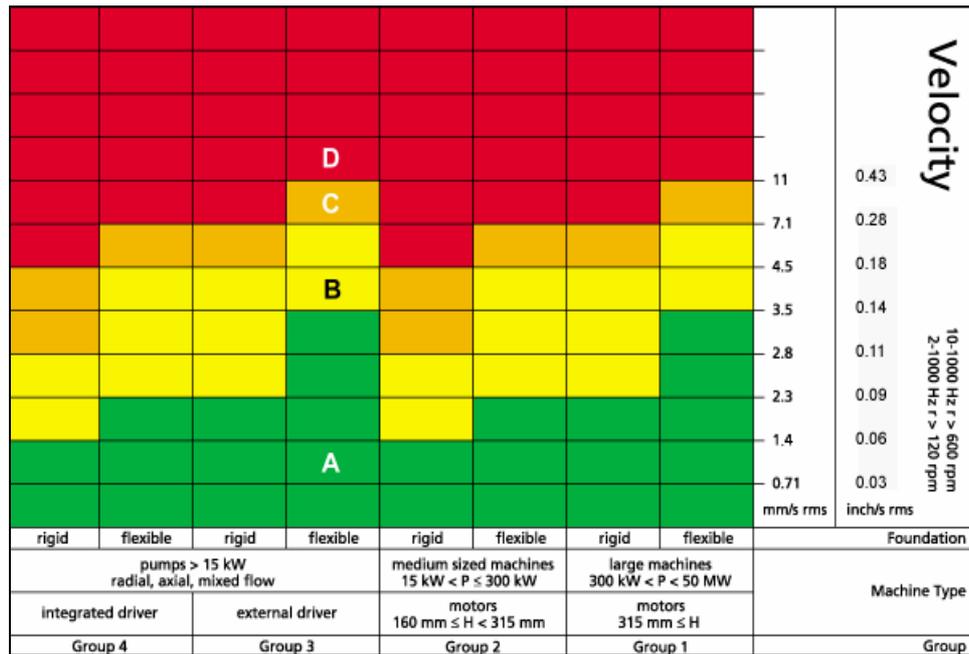
Las significativas diferencias en el diseño, tipos de rodamientos y estructuras soportantes de la máquina, requieren una separación de ellas en diferentes grupos. Las máquinas de estos grupos pueden tener eje horizontal, vertical o inclinado y además pueden estar montados en soportes rígidos o flexibles. De acuerdo con lo antes mencionado se tiene los grupos que se muestran en la tabla 2.3.

**TABLA 2.3 CLASIFICACIÓN DE ACUERDO AL TIPO DE MÁQUINA ISO 10816**

CLASIFICACIÓN	TIPO DE MÁQUINA
<i>GRUPO 1</i>	Máquinas rotativas grandes con potencias sobre los 300 kW. Máquinas eléctricas con altura del eje $H \geq 315$ mm
<i>GRUPO 2</i>	Máquinas rotativas medianas con potencia entre 15 y 300 kW. Máquinas eléctricas con altura de eje $H$ entre 160 y 315 mm
<i>GRUPO 3</i>	Bombas con impulsor multipaletas y con motor separado (flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia sobre los 15 kW
<i>GRUPO 4</i>	Bombas con impulsor multipaletas y con motor integrado con potencia sobre los 15 kW

Un estándar para clasificar la vibración de grandes máquinas in situ, se muestra en las Tablas 2.4.

**TABLA 2.4 SEVERIDAD DE VIBRACIÓN DE ACUERDO AL TIPO DE SOPORTE SEGÚN NORMA ISO 10816-3**



Fuente: <http://pruftechnik.com>

La tabla 2.4 muestra también zonas de tolerancia que son definidas para permitir una evaluación cualitativa de una máquina dada y proveer guías sobre las posibles acciones a tomar.

Estas zonas describen la vibración de las máquinas de la siguiente manera:

**Zona A:** La vibración de máquinas nuevas o recientemente reacondicionadas puestas en servicio, normalmente debería estar en esta zona.

**Zona B:** Máquinas con vibración en esta zona son normalmente consideradas aceptables para operar sin restricción en un periodo largo de tiempo.

**Zona C:** Máquinas con vibración en esta zona son normalmente consideradas insatisfactorias para una operación continua de un periodo prolongado.

Generalmente estas máquinas pueden operar por un periodo limitado en esta condición, hasta que se presente una oportunidad conveniente para reparar la máquina.

**Zona D:** Los valores de vibración de esta zona son considerados normalmente como suficientemente severos para causar daños a la máquina.

Más detalles sobre esta norma se puede observar en el Anexo No 4.

Si una fundación adecuada comienza a oscilar con valores mayores es un indicio de deficiencia de la máquina pues de alguna manera se incrementó la fuente de vibración, por lo que estos valores sirven también al mantenimiento predictivo.

Pueden aparecer vibraciones de grandes amplitudes debido a resonancias estructurales de las bancadas o pedestales de la máquina, para lo cual se hace necesario conocer los modos de vibrar de la estructura de sostén de la máquina, para asegurar un funcionamiento alejado de resonancia.

## 2.6 PUNTOS DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES EN MÁQUINAS ROTATIVAS

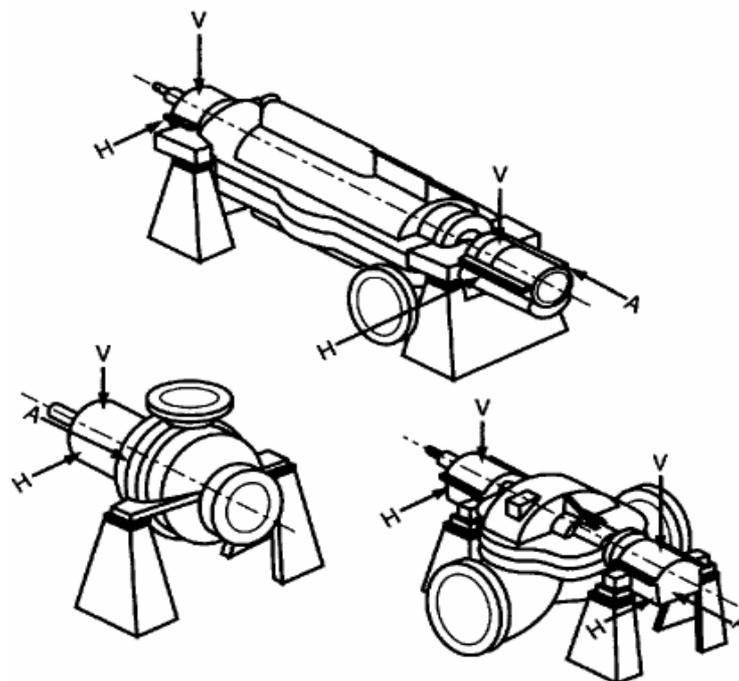
Decidir donde podrían ser tomadas las lecturas en cada diferente máquina, es fundamentalmente un problema de sentido común y lógica.

Las lecturas de vibración pueden ser tomadas en los puntos más cercanos posibles a los rodamientos de cualquier máquina, ya que es en estos donde las fuerzas internas dinámicas de la máquina son transmitidas a toda su carcasa.

Básicamente se tienen dos direcciones en las que se puede tomar una lectura de vibración: axial y radial. Para la dirección radial se puede tomar lecturas de vibración en posición horizontal y vertical.

Estas direcciones se muestran en la figura 2.11, en las que **A** significa dirección axial, **H** dirección radial horizontal y **V** dirección radial vertical.

**FIGURA 2.11 DIRECCIONES PARA LECTURAS DE VIBRACIONES**

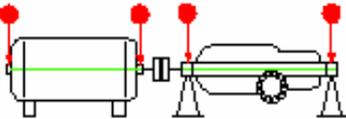
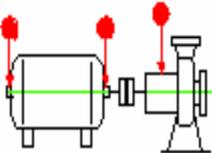
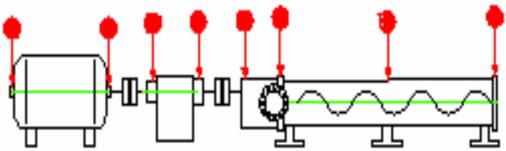
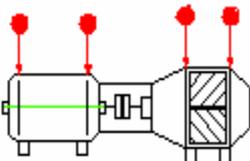
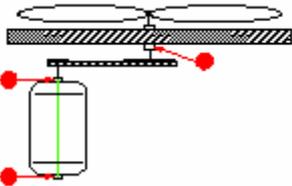


Fuente: Normas API 610, Figura 2.8

Las lecturas radiales más comúnmente realizadas son en puntos verticales y horizontales de una máquina, lo cual no es regla, ya que se puede obtener valores más elevados en otros puntos de dirección radial, los cuales nos darían una mayor sensibilidad de las vibraciones internas.

En la tabla 2.5 se puede observar los distintos arreglos de máquinas y los puntos donde deben ser tomadas las mediciones de vibración, siempre y cuando el espacio físico de la máquina a ser inspeccionada lo permita.

**TABLA 2.5 ESQUEMA DE LOS PUNTOS DE MEDICIÓN DE VIBRACIÓN PARA MÁQUINAS ROTATIVAS**

N°	TREN DE MÁQUINA	ESQUEMA
1	<b>Motor eléctrico – bomba centrífuga multietapa</b>	
2	<b>Motor eléctrico – bomba centrífuga</b>	
3	<b>Motor eléctrico – reductor – Caja de rodamientos – Bomba de tornillo</b>	
4	<b>Motor eléctrico – Compresor</b>	
5	<b>Motor eléctrico – Ventilador / Radiador</b>	

 Localización del punto de medición.

En el Anexo No 5 se puede observar en detalle los esquemas de los diferentes arreglos de máquinas y puntos de medición comunes aplicables a las mismas.

## **2.7 LECTURAS GLOBALES DE TENDENCIAS DE VIBRACIÓN**

La tendencia se puede definir como una representación gráfica de alguna variable respecto al tiempo. Para este caso, la variable es el nivel general de vibración de los puntos de una máquina.

Probablemente lo más eficiente y el método más confiable de evaluación de severidad de vibración es comparar la más reciente lectura global a través de previas lecturas para la misma medición, lo cual permite visualizar como las medidas de las vibraciones van evolucionando, presentando diferentes tendencias sobre el tiempo. Esta comparación de tendencias entre lecturas presentes y pasadas es fácil analizar cuando los valores son graficados.

Siempre y cuando la pendiente sea suave, la tendencia permanecerá estable, pero si llega a presentarse un crecimiento significativo, acercándose a una elevación exponencial, en la mayoría de los casos es por que se acerca una falla física de la máquina.

Los niveles de vibración globales a través de la historia de la máquina variarán entre periodos, esto se debe a que el nivel de vibración es inferido a través de promedios. Esto será normal siempre y cuando no haya un cambio abrupto en el nivel de vibración de manera que la pendiente se incremente considerablemente.

## **2.8 CAUSAS COMUNES DE VIBRACIÓN**

Existen varios factores y causas que influyen directamente en el estado de una máquina, los cuales elevan los niveles de vibración de estos.

Entre los más comunes, tenemos los que se enlistan en la tabla 2.6.

**TABLA 2.6 CAUSAS COMUNES DE VIBRACIÓN**

<b>Causa de vibración</b>	<b>Tipo de Causa</b>
<b>Desbalanceo</b>	✓ <i>Estático</i>
	✓ <i>Dinámico</i>
<b>Desalineación</b>	✓ <i>Paralela</i>
	✓ <i>Angular</i>
	✓ <i>Combinada</i>
<b>Componentes mecánicos en mal estado</b>	✓ <i>Rodamientos defectuosos</i>
	✓ <i>Aflojamiento u holgura mecánica</i>
	✓ <i>Engranajes defectuosos</i>
<b>Problemas en motores eléctricos</b>	✓ <i>Excentricidad del rotor</i>
	✓ <i>Tensión de alimentación desbalanceada</i>
	✓ <i>Calentamiento y cortos en el estator</i>

### 2.8.1 DESBALANCEO

De una forma sencilla se dirá que el desbalanceo es una condición donde el centro de masa no coincide con el centroide, el cual se produce por una mala distribución de masa alrededor del centro de giro de un elemento.

La incorrecta distribución de la masa del elemento que está girando causa una fuerza centrífuga ubicada en el exceso de masa y que tiene una dirección radial al eje de giro.

El desbalanceo es uno de los problemas más comunes encontrados en las máquinas rotativas con altos índices de vibración.

Las posibles causas del desbalanceo son:

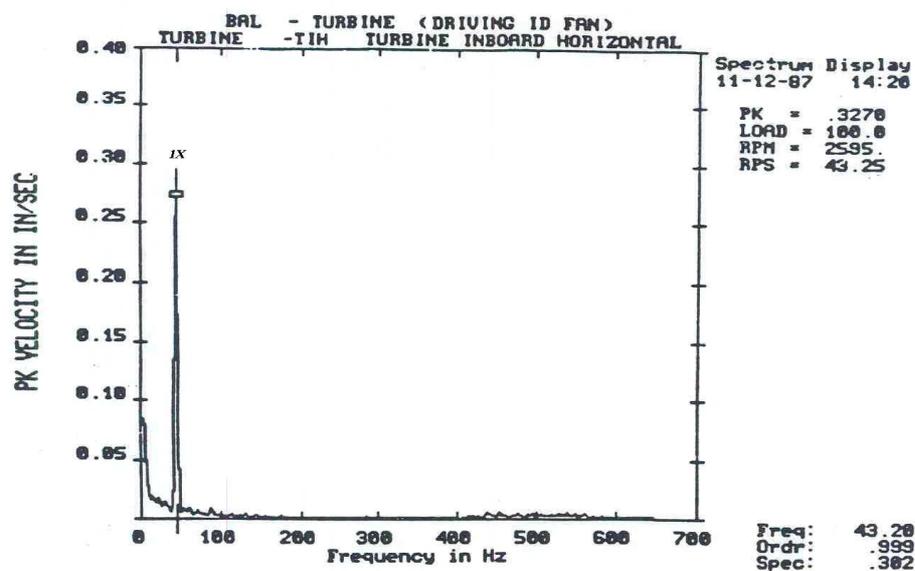
- a) Porosidad en la fundición

- b) Desigualdad en la densidad del material
- c) Tolerancia de fabricación
- d) Ganancia o pérdida de material durante la operación
- e) Acciones de mantenimiento (limpieza o reemplazo de repuestos)
- f) Cambio de pernos de sujeción (común en ventiladores)
- g) Montaje inadecuado de piezas y partes
- h) Adición de elementos en un conjunto mecánico sin un apropiado procedimiento de balanceo.

Las características comunes que se presenta en el espectro de vibración, muestran niveles altos de vibración en el orden 1X, tanto en dirección radial como en axial, siendo en la primera más notoria en posición horizontal.

En la figura 2.12 se observa un caso típico de desbalanceo, en la que se ilustra el diagnóstico para una turbina impulsora de un ventilador de aire inducido; en este espectro no aparecen más niveles altos de vibración en frecuencias armónicas, únicamente en el orden de frecuencia 1X.

**FIGURA 2.12 ESPECTRO DE VIBRACIÓN – DESBALANCEO DE UNA TURBINA IMPULSORA DE UN VENTILADOR**



Fuente: CSI; Diagnóstico de problemas de Vibración de maquinaria;1994

Se pueden producir dos tipos de desbalance:

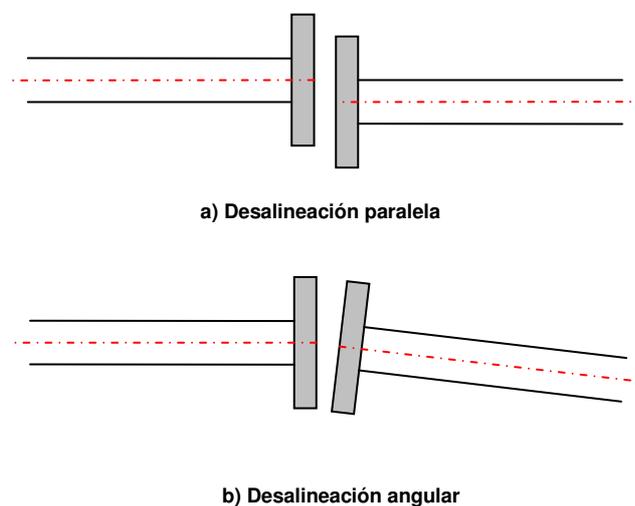
- **Estático:** Producido generalmente por desgaste radial superficial no uniforme en rotores en los cuales su largo es despreciable en comparación con su diámetro. El espectro presenta vibración dominante con una frecuencia igual a 1X rpm del rotor.
- **Dinámico:** Ocurre en rotores medianos y largo. Es debido principalmente a desgastes radiales y axiales simultáneos en la superficie del rotor. El espectro presenta vibración dominante y vaivén a frecuencia igual a 1X rpm del rotor.

## 2.8.2 DESALINEACIÓN

La desalineación es una falla en donde los ejes de flechas acopladas (conductora y conducida), no coinciden o no están en la misma línea de centro.

Las formas más generales para describir la desalineación entre los ejes de dos máquinas son las que muestra la figura 2.13.

**FIGURA 2.13 TIPOS DE DESALINEACIÓN EN EJES**

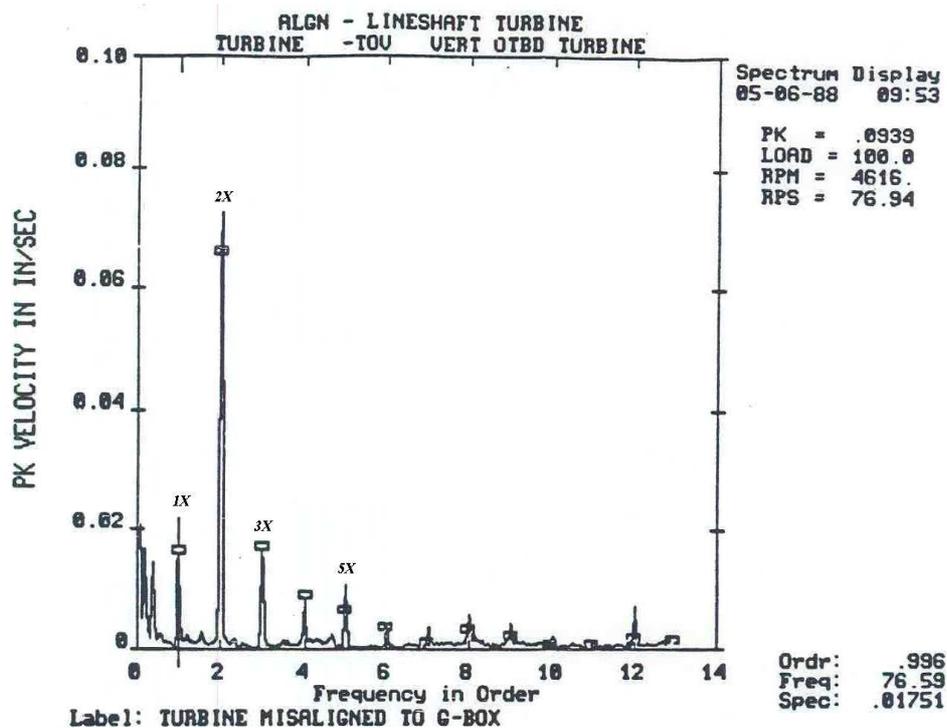


- **Desalineación paralela:** Se produce cuando los ejes del motor y del rotor conducido están paralelos, pero no son colineales.
- **Desalineación angular:** Ocurre cuando el eje del motor y el eje conducido unidos en el acople, no son paralelos.

El espectro de vibración en dominio de frecuencia del desalineamiento es caracterizado por altas vibraciones axiales en 1X y/o en 2X con un desfase de 180 grados a través del acople. En ocasiones la vibración radial vertical puede ser mayor a la radial horizontal.

En la figura 2.14 se muestra un espectro de vibración para el caso de un desalineamiento de una turbina y una caja de engranajes. Se observa un nivel pico importante en el orden 2X, que es la principal fuente de vibración.

**FIGURA 2.14 ESPECTRO DE VIBRACIÓN - CASO DESALINEAMIENTO DE TURBINA CON CAJA DE ENGRANAJES**



Fuente: CSI; Diagnóstico de problemas de Vibración de maquinaria;1994

Las causas más comunes de desalineación son:

- Defecto de acoplamiento de máquinas durante el montaje
- Expansiones térmicas en el proceso de trabajo
- Fuerzas transmitidas a la máquina desde tuberías y miembros de soporte
- Fundaciones irregulares o que han cedido
- Bases débiles

### **2.8.3 COMPONENTES MECÁNICOS EN MAL ESTADO**

Una de las mayores causas de vibración en la maquinaria industrial se da por problemas en componentes mecánicos de transmisión, soporte, etc., debido a que estos están sometidos a fricción, desgaste, fuerzas externas que modifican de distintas maneras su diseño original, lo cual varía las condiciones operativas de la máquina.

A continuación se describen los problemas más comunes catalogados como problemas de componentes mecánicos en mal estado.

#### **2.8.3.1 Rodamientos defectuosos**

Los rodamientos pueden dañarse tanto en sus pistas interna y externa, así como en sus elementos rodantes.

Los daños se producen en general por las siguientes razones:

- Carga excesiva causada por desalineación y/o desbalanceo.
- Problemas de lubricación, que puede ser: falta de lubricante, lubricación no adecuada, excesiva lubricación o lubricante contaminado.
- Tolerancia eje – agujero no recomendada.
- Defectos en los lugares de asentamiento en ejes y alojamientos.

- Fallas de montaje / golpes.
- Paso de corriente eléctrica a través del rodamiento durante soldaduras.

En la tabla 2.7 se muestra el porcentaje de causas comunes del origen de fallas en rodamientos.

**TABLA 2.7 CAUSAS DE FALLAS EN RODAMIENTOS**

<b>CAUSA</b>	<b>PORCENTAJE DE INCIDENCIA</b>
Lubricación inadecuada (Arriba y abajo)	43%
Montaje indebido (Martillo, soldadura, etc.)	27%
Otros orígenes (Por ejemplo: aplicación indebida, defectos de fabricación, vibración excesiva antes y/o después de la instalación)	21%
Desgaste de vida útil normal	9%

Fuente: CSI. Diagnóstico de Problemas de vibración de maquinaria, 1994

Los rodamientos presentan una vibración compleja debido a la interacción de los elementos rodantes y las pistas, que al igual que cualquier otro elemento mecánico tiene imperfecciones que generan vibraciones con el contacto continuo entre sus componentes, por lo cual, es necesario definir la relación entre el tamaño de los rodamientos y sus elementos rodantes, que permitirán al analista calcular la frecuencia de defecto de los rodamientos en un espectro de vibración.

Las fallas de rodamientos producen una vibración con frecuencia mucho más elevada que la velocidad de giro, son bastante inestables en intensidad y fase, esto se produce por que los golpes que se originan entre los elementos del rodamiento a causa del daño de una de sus partes, no tiene una frecuencia rígidamente ligada a la velocidad de rotación, además los golpes pueden excitar vibraciones de resonancia en los anillos del cojinete, el soporte, el rotor y en otras partes cercanas.

Las ecuaciones que determinan las frecuencias de fallas de un rodamiento son las que se muestran a continuación:

- Para frecuencias de falla en pistas internas del rodamiento, es válida la ecuación 2.1.

$$f_{BI} = \frac{nN \left[ 1 + \frac{d}{D} (\cos \phi) \right]}{120} \quad (2.1)$$

- Para frecuencias de falla en pistas externas del rodamiento, es válida la ecuación 2.2.

$$f_{BO} = \frac{nN \left[ 1 - \frac{d}{D} (\cos \phi) \right]}{120} \quad (2.2)$$

- Para frecuencias de falla en los elementos rodantes, es válida la ecuación 2.3.

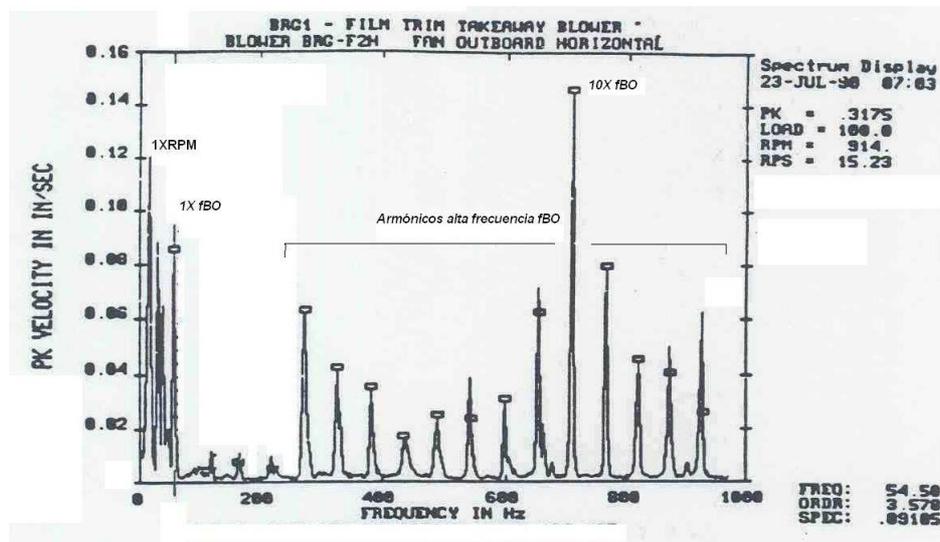
$$f_{BB} = \frac{DN}{d} \frac{\left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 (\cos \phi)^2 \right]}{120} \quad (2.3)$$

Donde,

$f_{BI}$	es la frecuencia de falla de rodamiento en pista interna	[Hz]
$f_{BO}$	es la frecuencia de falla de rodamiento en pista externa	[Hz]
$f_{BB}$	es la frecuencia de falla de rodamiento en sus elementos rodantes	[Hz]
$n$	es el número de elementos rodantes	
$N$	es la velocidad de giro de la pista interna	[rpm]
$d$	es el diámetro del elemento rodante	[mm]
$D$	es el diámetro primitivo del rodamiento	[mm]
$\phi$	es el ángulo de contacto del rodamiento	[grados]

En la figura 2.15 se muestra un espectro de un rodamiento de ventilador que tiene una falla en la pista externa, ya que al calcular las frecuencias de falla de este rodamiento, el valor de la frecuencia  $f_{BO}$  coincide con uno de los picos mostrados en el espectro de vibración.

**FIGURA 2.15 ESPECTRO DE VIBRACIÓN PARA UN RODAMIENTO DE VENTILADOR**



Fuente: CSI; Diagnóstico de problemas de Vibración de maquinaria;1994

El ventilador tiene rodamientos de bolas de contacto angular tipo FAG 7310B, por lo que las frecuencias de falla, calculadas por medio de las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 son las que se muestran en la tabla 2.8.

**TABLA 2.8 FRECUENCIAS DE FALLA PARA UN RODAMIENTO FAG 7310B**

Frecuencia de falla	Valor
$f_{BI}$	99.66 Hz
$f_{BO}$	67.89 Hz
$f_{BB}$	29.67 Hz

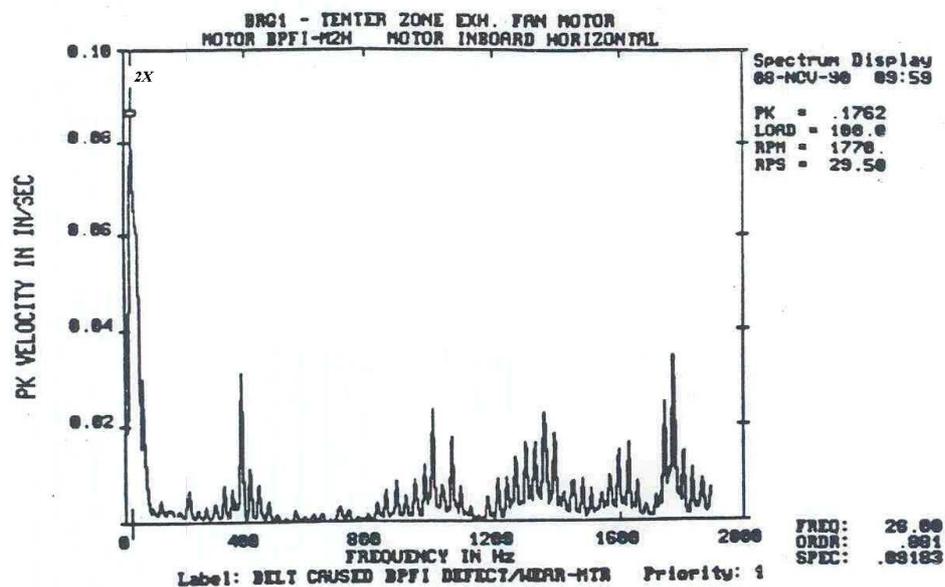
Fuente: CSI; Diagnóstico de problemas de Vibración de maquinaria;1994

Es interesante también notar que el espectro muestra varios valores pico en altas frecuencias múltiplos de  $f_{BO}$ , lo que nos indica que el daño en el rodamiento es grave y amerita un cambio urgente.

Es necesario distinguir las frecuencias que no estén asociadas al rodamiento, ya que estas también darán las fuentes que originaron la falla en el rodamiento.

Esto se observa en el ejemplo de la figura 2.16, en el que se nota un valor pico a 2X y luego una variedad de picos en altas frecuencias no armónicas, en la que se puede concluir que el desalineamiento del ventilador influyó sobre el deterioro del rodamiento.

**FIGURA 2.16 ESPECTRO DE VIBRACIÓN PARA UN VENTILADOR CON DESALINEACIÓN Y RODAMIENTO DEFECTUOSO**



Fuente: CSI; Diagnóstico de problemas de Vibración de maquinaria;1994

### 2.8.3.2 Aflojamientos u holguras mecánicas

Las holguras mecánicas o el impropio ajuste entre partes de componentes, producen los mismos efectos que un desbalanceo, solamente más severos.

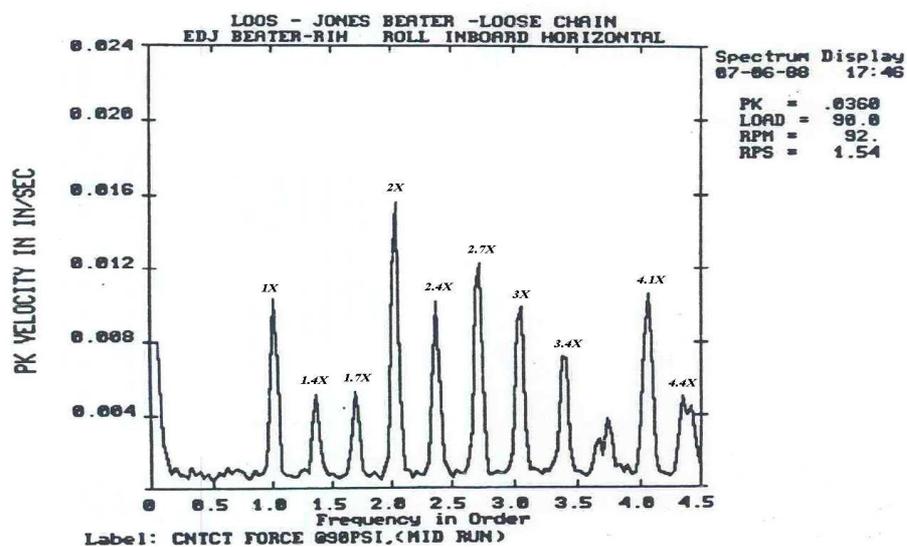
Las posibles causas de desgaste u holguras son:

- La máquina ha venido con holgura desde su montaje.
- Los componentes de la máquina han venido holgados o sueltos.
- La presión ha desarrollado una falla que ha desgastado los elementos del cojinete o los asientos del cojinete.

Las características de un espectro de vibración de componentes con excesiva holgura mecánica muestran muchos armónicos y subarmónicos de 1X, destacándose los armónicos fraccionarios 1/2X, 1/3X, 1.5X, 2.5X....en la que las amplitudes de estos indican la cantidad de holgura. Frecuentemente la fase es inestable y el nivel máximo tiende a una dirección notable realizando lecturas espaciadas 30 grados entre sí.

En el espectro de vibración ilustrado en la figura 2.17 pertenece a una máquina impulsada por cadena que se había estirado y salido a un lado de la rueda dentada de baja velocidad, en la que el número extremadamente alto de armónicas confirma el aflojamiento grave que experimenta esta máquina.

**FIGURA 2.17 ESPECTRO DE VIBRACIÓN PARA AFLOJAMIENTO EXCESIVO DE UNA MÁQUINA**



Fuente: CSI; Diagnóstico de problemas de Vibración de maquinaria;1994

Note que no sólo se tienen picos en múltiplos enteros de la frecuencia de velocidad de giro, sino también picos en frecuencias fraccionarias entre cada múltiplo entero de velocidad de giro, lo que indica roce o componentes que rozan.

### **2.8.3.3 Engranajes defectuosos**

Al entrar en contacto los dientes de dos engranajes, se produce vibración. Cuando los engranajes están en buen estado y la carga no es elevada, la vibración producida en la frecuencia de paso de dientes, llamada también de contacto entre dientes es baja, pero existe.

Cuando se desgasta un engranaje, la curva envolvente de sus dientes cambia en los lados de contacto, esta deformación del diente genera vibración.

Las causas de un engranaje defectuoso pueden ser:

- Golpe general de los dientes.
- Interferencia no justa.
- Dientes no rectificadas o con acabados de mala calidad.
- Lubricación defectuosa.
- Material extraño entre los dientes
- Desgaste
- Desbalanceo, desalineación, excentricidad.

Los defectos de los engranajes producen vibración de baja amplitud en frecuencias altas, similares a los efectos en los rodamientos, con la diferencias que los problemas de engranaje son sincrónicos y los de un rodamiento son no sincrónicos.

Los defectos de engranajes se analizan en la denominada frecuencia de enlace de engranajes, la cual se obtiene multiplicando el número de dientes de un

engranaje dado por su velocidad de giro o la frecuencia, tal como se muestra en la ecuación 2.4.

$$f_{GMF} = z \times N \quad (2.4)$$

Donde,

$f_{GMF}$  es la frecuencia de enlace de engranajes [cpm] ó [Hz]

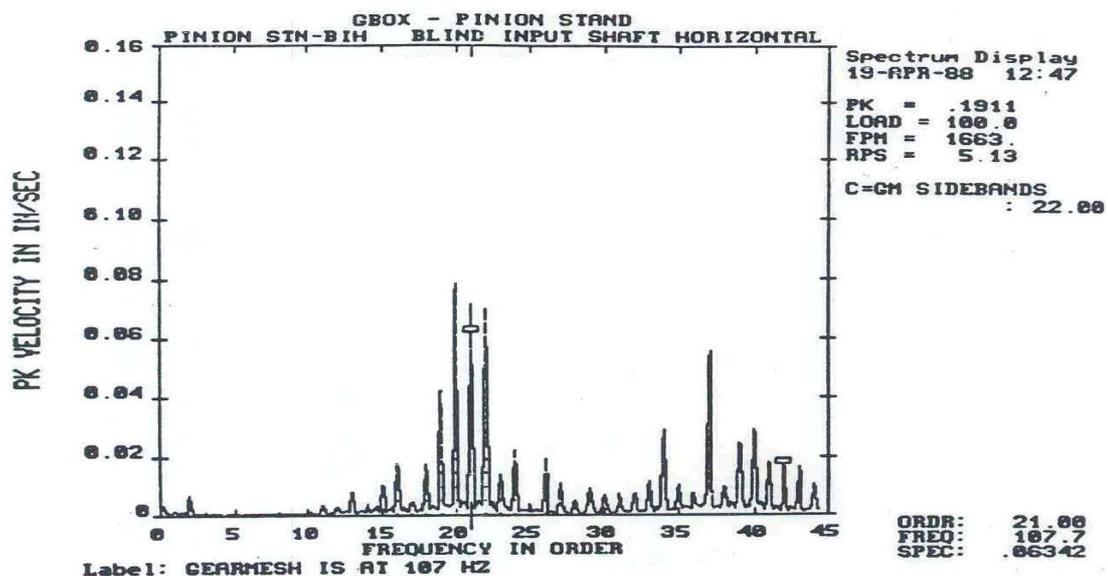
$z$  es el número de dientes de engranaje

$N$  es la velocidad de giro o la frecuencia [rpm] ó [Hz]

La amplitud y la cantidad de bandas laterales a la frecuencia de enlace del engranaje indica cuan excesivo es el aflojamiento entre engranajes.

En la figura 2.18 se muestra un caso típico de un engranaje en mal estado, en la que el espectro de vibración fue medido en el punto que registró mayor vibración en la caja de engranajes.

**FIGURA 2.18 ESPECTRO DE VIBRACIÓN PARA ENGRANAJES DEFECTUOSOS**



Fuente: CSI; Diagnóstico de problemas de Vibración de maquinaria;1994

La frecuencia de enlace de engranajes para el caso de la figura 2.18, está en  $21X$  y se observa que la amplitud de la primera banda lateral superior y la primera banda lateral inferior sobrepasan a la frecuencia real de enlace de engranaje, indicando que se debe realizar una reparación al engranaje.

#### **2.8.4 PROBLEMAS EN MOTORES ELÉCTRICOS**

Se han establecido un número importante de estándares para clasificar la vibración admisible en motores eléctricos, algunos de los cuales se basan en el valor pico a pico de desplazamiento, otros en la velocidad pico o en el RMS de la amplitud de velocidad. Normalmente, las normas especifican el método de prueba y dan una guía de los procedimientos a seguir.

Un problema eléctrico puede producir fuerzas magnéticas diametrales diferentes que varían con la carga, por lo tanto la amplitud de vibración debido a problemas eléctricos depende de la variación de la carga del equipo, y desaparece cuando el suministro eléctrico es suspendido.

Los problemas más comunes en motores eléctricos son:

- Excentricidad en el rotor
- Fases desbalanceadas
- Arrollamientos en cortocircuito

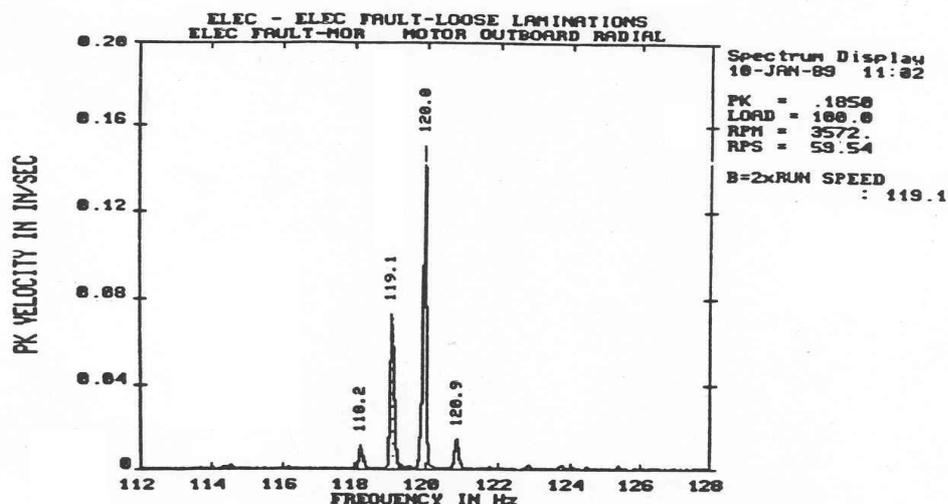
En general un defecto en un motor eléctrico producirá una vibración en la frecuencia  $2X$  en un espectro de vibración, no obstante otros puntos característicos de espectro pueden ser de origen mecánico exclusivamente, como desbalanceo, desalineación, cojinetes, etc.

Las frecuencias eléctricas y mecánicas pueden mostrarse muy cerca una de otra en un espectro de vibración, por lo que un espectro con alta resolución y con el

correcto rango de frecuencias deberían ser usados para diferenciarlos el uno del otro.

En la figura 2.19 se ilustra el espectro de vibración para un motor eléctrico que presenta una falla eléctrica en el rotor.

**FIGURA 2.19 ESPECTRO VIBRACIÓN – FALLA EN MOTOR ELÉCTRICO.**



Fuente: CSI; Diagnóstico de problemas de Vibración de maquinaria; 1994

Ante la sospecha de problemas vibratorios de origen eléctrico, puede realizarse una medición desconectando la alimentación una vez alcanzada la condición de funcionamiento normal del motor; si desaparece la vibración, queda confirmada la sospecha y si no, descartada la causa.

## **2.9 CONSIDERACIONES GENERALES PARA LA PLANIFICACIÓN DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO POR ANÁLISIS DE VIBRACIONES**

El siguiente análisis abarca los principales temas a tener en cuenta sin que ello signifique la exclusión de otros que pueden ser trascendentales en casos específicos.

Así se tiene los siguientes puntos que deben considerarse para la planificación del mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones:

a.- Definir qué máquinas deben incluirse en el plan, ya que resultaría antieconómico realizar el seguimiento a todas las máquinas e inclusive de aquellas en estado avanzado de desgaste. Como primer paso se deben considerar aquellos equipos esenciales y críticos en la línea de producción.

b.- Determinar los niveles normales y límites aceptables de vibración; en máquinas nuevas, recién reparadas, o en aquellas en las que la experiencia dice que funcionan correctamente, se debe medir la vibración normal o estándar de la misma.

c.- Escoger adecuadamente los puntos en que se realizarán las mediciones asegurando que realmente el nivel de vibración presente en los mismos sea sensible a la aparición de los desperfectos típicos de cada máquina.

d.- Fijar los intervalos entre mediciones. Si no se tiene experiencia previa, se recomienda realizar mediciones a intervalos relativamente cortos, hasta que aparezcan los primeros síntomas de falla.

e.- Adoptar un correcto sistema de archivo de las mediciones para facilitar el análisis y agilizar decisiones.

f.- Entrenar al personal que realizará las mediciones es tan importante como contar con el equipamiento de medición apropiado.

## **CAPÍTULO 3**

### **PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO POR ANÁLISIS DE VIBRACIONES EN LAS INSTALACIONES DE LA ESTACIÓN C.P.F. – AOE**

El mantenimiento Predictivo hoy en día es una herramienta complementaria dentro de la estructura del mantenimiento planificado, el cual permite poder optimizar las frecuencias con que se realiza un mantenimiento preventivo, distribuir de una manera optimizada los recursos materiales y humanos en una planta industrial, por lo que a continuación se desarrolla en este capítulo un programa que tendrá esa finalidad.

#### **3.1 ESTRUCTURA DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO EN LAS FACILIDADES CPF - AOE**

El personal encargado del mantenimiento dentro de instalaciones industriales cumple un papel importante para una normal actividad de la misma, por lo que en la mayoría de las facilidades, existe un departamento exclusivamente para esta actividad.

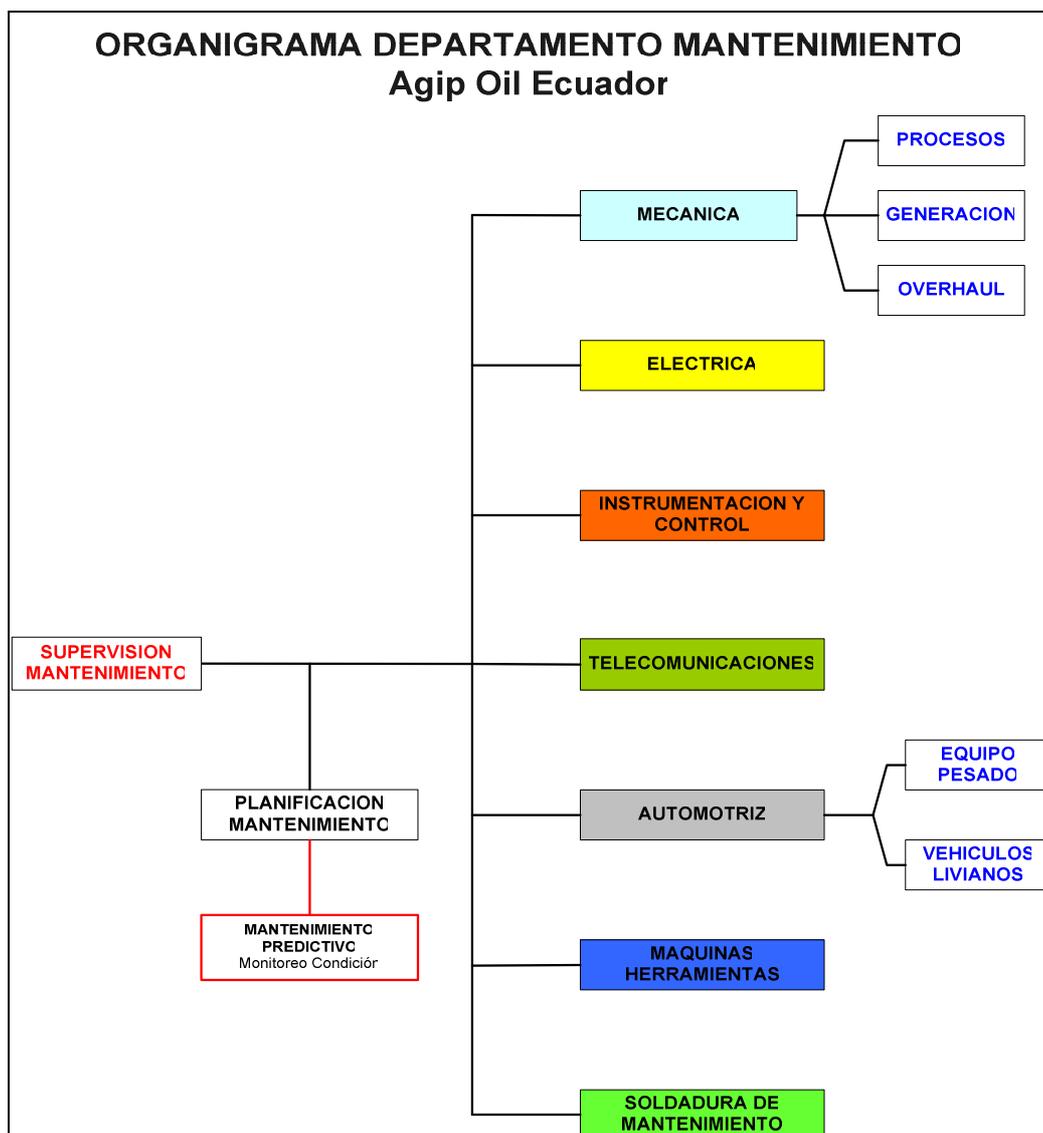
El Departamento de Mantenimiento de AOE esta conformado por las siguientes áreas:

1. Área de Supervisión de Mantenimiento
2. Área de Planificación y Administración MAXIMO
3. Área Mecánica
4. Área Eléctrica
5. Área Instrumentación y Control

6. Área de Telecomunicaciones
7. Área Automotriz
8. Área Máquinas Herramientas
9. Área Soldadura de Mantenimiento

En la figura 3.1 se muestra el organigrama del Departamento de mantenimiento de AOE, en la cual se incluye al Mantenimiento Predictivo como parte del área de Planificación de Mantenimiento.

**FIGURA 3.1 ESTRUCTURA DEL DEPARTAMENTO DE MANTENIMIENTO DE AGIP OIL ECUADOR**



Como la implantación del Mantenimiento Predictivo influye directamente sobre los tiempos de planificación de parada de sistemas y equipos, lo ideal es que este se incluya como parte del área de Planificación de Mantenimiento, de manera que el Planificador pueda tomar decisiones sobre la programación de los trabajos de mantenimiento preventivo y/o correctivos a medida en que los síntomas que presente una máquina lo ameriten, pudiendo éste aumentar o disminuir los tiempos de la frecuencia con que se realizan los mantenimientos preventivos o en su defecto si el equipo se ve en la necesidad de una parada larga para un mantenimiento mayor, poder planificar y disponer de todos los materiales y recursos necesarios para este trabajo.

Los trabajos que se realizan actualmente en la estación CPF se basan en tres tipos de mantenimiento:

- Mantenimiento correctivo (CM)
- Mantenimiento preventivo (PM)
- Mantenimiento eventual o pequeños proyectos (EV)

Todos estos trabajos se los canalizan y se administran por medio de un software especializado en la administración del mantenimiento, llamado MAXIMO 5.2, el cual es una herramienta con el cual se puede planificar y programar todos los mantenimientos antes mencionados y sobre todo permite coleccionar diferentes datos sobre los trabajos realizados sobre un equipo, su historial de funcionamiento, los parámetros que influyen sobre su comportamiento en los sistemas a los que pertenecen, etc.

### **3.2 BREVE DESCRIPCION DEL SOFTWARE MAXIMO 5.2**

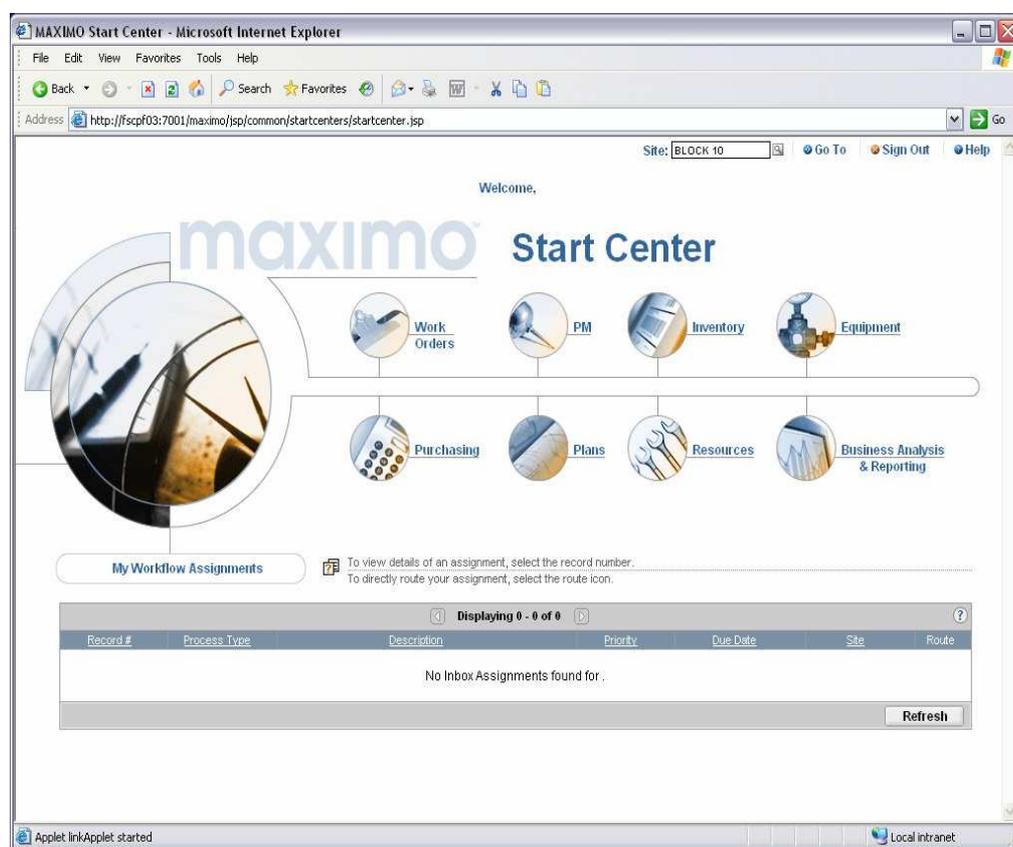
En la actualidad existen varios programas que sirven de herramienta para la administración y gestión de mantenimiento; uno de ellos es MAXIMO 5.2, un software desarrollado por MRO, U.S.A., el cual es un programa completo basado

en programación de páginas Web, que permite realizar gestión en la administración del mantenimiento.

MAXIMO 5.2 está diseñado para ayudar a las empresas a mejorar la disponibilidad y el rendimiento de activos que generan ingresos a la empresa, mientras reducen los tiempos de parada operacionales, sin aumentar los riesgos de seguridad

En la figura 3.2 se observa la página de inicio del software MAXIMO 5.2 en la que se muestran todos los módulos que se aplican para la administración del mantenimiento, al cual accede cualquier persona de la empresa que posea un nombre de usuario del sistema con su respectivo clave de ingreso, para que pueda revisar información que le permita ejecutar sus actividades diarias.

**FIGURA 3.2 MAXIMO 5.2 – PANTALLA DE INICIO**



Fuente: Software MAXIMO 5.2

Este software diseñado para la administración y gestión del mantenimiento contiene los siguientes módulos:

1. Ordenes de trabajo (Work Orders)
2. Mantenimiento Preventivo (Preventive Maintenance)
3. Inventario (Inventory)
4. Equipos (Equipment)
5. Compras (Purchasing)
6. Planes (Plans)
7. Recursos (Resources)
8. Reportes y Análisis de negocios (Business Analysis and Reporting)

### **3.2.1 ÓRDENES DE TRABAJO (WORK ORDERS)**

Las órdenes de trabajo son el núcleo de la administración del mantenimiento, ya que mediante ésta se especifica una tarea en particular que se cumplirá y la mano de obra, materiales y herramientas necesarias para realizar el trabajo.

Mediante este módulo, el usuario del sistema puede generar órdenes de trabajo, especificando el o las áreas técnicas involucradas, el equipo a ser revisado y su ubicación, el tipo de trabajo que aplica esta petición, etc.

Dentro de este módulo el usuario tiene la facilidad de realizar el seguimiento a su orden de trabajo, generar trabajos emergentes no planificados, los técnicos asignados a los diferentes trabajos tengan la facilidad de conocer sus actividades diarias por prioridades, para luego reportar novedades y tiempos de trabajo, todo esto mediante las siguientes aplicaciones:

- Seguimiento órdenes de trabajos (Work Order Tracking)
- Trabajos emergentes (Quick Reporting)
- Requisiciones de trabajo (Work Requests)
- Informes Mano de Obra (Labor Reporting)

El formato de orden de trabajo (WO) contiene algunos campos que permiten describir la solicitud de trabajo, enumerar los trabajos secuencial y automáticamente, identificar el tipo de trabajo, la prioridad, la ubicación y sistema donde se realizará el trabajo, el equipo a inspeccionarse, los códigos de fallas más comunes, el usuario iniciador de la orden, los recursos asignados a ese trabajo, el status actual del trabajo, los planes de trabajo que se han asignado a esta solicitud, etc.

El formato que despliega el sistema MAXIMO para la solicitud de una orden de trabajo se lo muestra en la figura 3.3.

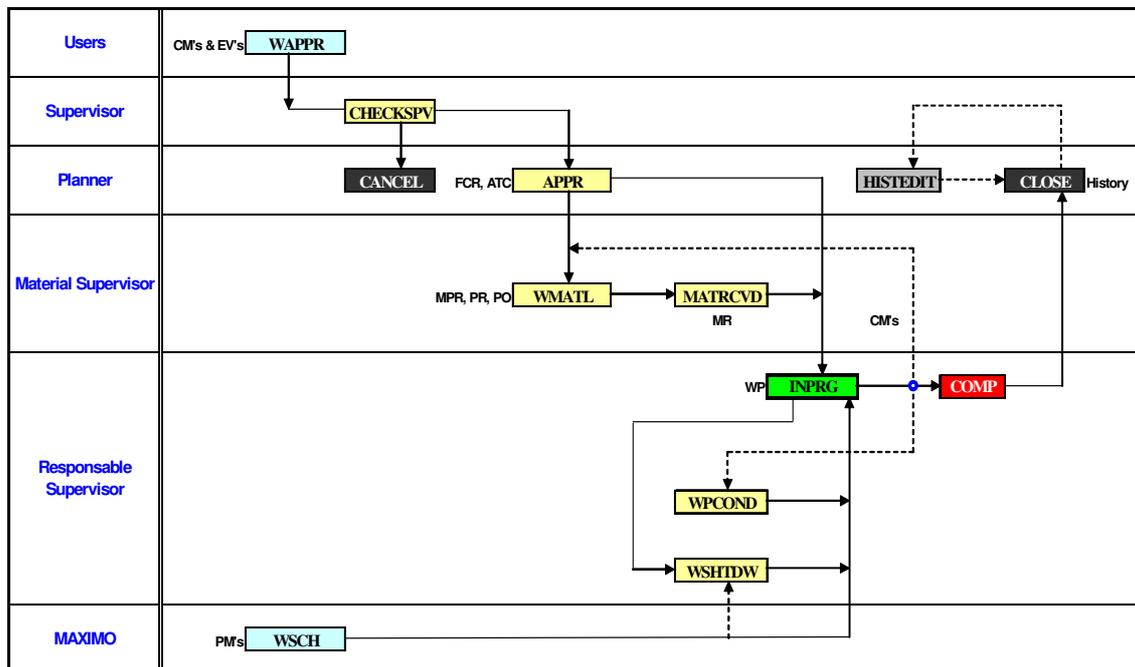
**FIGURA 3.3 FORMATO SOLICITUD ORDEN DE TRABAJO (WO)**

Fuente: Software MAXIMO 5.2

El Departamento de Mantenimiento AOE con sus diferentes áreas, se encarga de realizar los trabajos que el usuario solicita mediante la orden de trabajo (WO), las cuales siguen un flujo jerárquico de los diferentes status que ofrece el sistema

MAXIMO, como se muestra en la figura 3.4, con la finalidad de que el Supervisor de Mantenimiento conjuntamente con el Planificador puedan tener un control sobre todas las órdenes de trabajo (WO) para que los técnicos estén prevenidos de la actividad diaria para el mantenimiento de la estación.

**FIGURA 3.4 DIAGRAMA DE FLUJO DEL STATUS DE TRABAJOS (WORK ORDERS)**



Los diferentes status con que se maneja las órdenes de trabajo son los que se muestran en la tabla 3.1.

**TABLA 3.1 STATUS PARA ÓRDENES DE TRABAJO (WO) EN EL SISTEMA MAXIMO**

Siglas	Status	Descripción
<b>WAPPR</b>	<i>Esperando aprobación</i>	Status primario con que se genera una WO por parte de un usuario.
<b>CHECKSPV</b>	<i>Verificado por Supervisor de Departamento</i>	Status en el que el Supervisor del departamento del usuario que solicita el trabajo confirma la ejecución de la WO.
<b>CAN</b>	<i>Cancelado</i>	Status con el que se termina una WO sin ejecución del trabajo solicitado.

TABLA 3.1 CONTINUACIÓN

<b>APPR</b>	<b><i>Aprobado</i></b>	Status en el que el Planificador asume la responsabilidad de registrar y programar el trabajo correctamente
<b>WSCH</b>	<b><i>Esperando programación</i></b>	Status primario con se genera las WO para mantenimiento preventivo, directamente del sistema.
<b>WMATL</b>	<b><i>Esperando materiales</i></b>	Status en el que la WO espera por los materiales necesarios para la ejecución de la misma.
<b>WPCOND</b>	<b><i>Esperando condiciones</i></b>	Status en el que la WO espera su ejecución por cuestiones operativas de alguna índole.
<b>WSHTDW</b>	<b><i>Esperando parada</i></b>	Status en el que la WO permanece en espera de su ejecución hasta que se planifique una parada larga del equipo.
<b>MATRCVD</b>	<b><i>Material recibido</i></b>	Status en el que se confirma el arribo de los materiales solicitados para la ejecución de la WO.
<b>INPRG</b>	<b><i>En progreso</i></b>	Status con el que se inicia la realización de la WO.
<b>COMP</b>	<b><i>Completado</i></b>	Status en el cual se confirma la finalización de los trabajos solicitados en la WO
<b>CLOSE</b>	<b><i>Cerrado</i></b>	Status con el que se ingresa al historial del equipo después que todos los reportes y novedades se hayan reportado.
<b>HISTEDIT</b>	<b><i>Edición de historial</i></b>	Status que permite modificar comentarios de los historiales registrados en la WO.

Fuente: Guía de inicio MAXIMO 5.2

Las órdenes de trabajo vienen a ser el documento con el cual se tiene un registro del historial de una máquina, equipo y sistema, todo esto con el afán de poder conocer cuales han sido las correcciones, cambios, reposiciones y chequeos que se hayan realizado.

### 3.2.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO (PREVENTIVE MAINTENANCE – PM)

El módulo PM permite programar el mantenimiento preventivo, en los que el sistema automáticamente genera órdenes de trabajo del tipo preventivo de acuerdo a la frecuencia con que ha especificado el fabricante del equipo y también bajo criterios de experiencia de los técnicos.

Las aplicaciones disponibles para el módulo PM son:

- Mantenimiento Preventivo (Preventive Maintenance)

- Visualizador mantenimiento preventivo (Visual PM)

Mediante estas aplicaciones, el Planificador organiza, controla y ejecuta el programa de Mantenimiento Preventivo para las instalaciones de la estación CPF. La aplicación Visual PM permite realizar lo antes mencionado, pero de una forma más dinámica y gráfica, a manera de cronograma de trabajo.

De igual manera tiene un formato, el mismo que se muestra en la figura 3.5, el cual debe ser seteado en el sistema para que periódicamente y de acuerdo a la frecuencia planificada, genere las respectivas órdenes de trabajo con las que se cumplirá el mantenimiento preventivo.

**FIGURA 3.5 FORMATO MANTENIMIENTO PREVENTIVO (PM)**

The screenshot displays the MAXIMO Preventive Maintenance (PM) form within a Microsoft Internet Explorer browser window. The browser title is 'MAXIMO - Preventive Maintenance - PM - Microsoft Internet Explorer'. The address bar shows the URL 'http://151.96.45.250:7001/maximo/jsp/app/pm/main.jsp'. The form itself is titled 'Preventive Maintenance' and is for 'BLOCK 10'. It features a navigation bar with tabs for 'Search', 'PM', 'Frequency', 'Job Plan Sequence', 'PM Hierarchy', 'Master PM', and 'Attached Documents'. The main form area is divided into several sections: 'Work Assets' with fields for 'Location', 'Equipment' (CF43-CM1-001), and 'Route'; 'Details' with fields for 'Next Job Plan' (AIRPACAN), 'Supervisor' (MAINTSUP), 'Crew', 'GL Account', 'Work Order Status' (WSCH), 'WO Priority' (2), 'Work Type' (PM), 'Storer room' (1), 'Lead Time Active?' (checked), and 'Lead Time (Days)' (0); and 'Source' with a 'Master PM' field and an 'Override Master PM Updates?' checkbox. The browser status bar at the bottom indicates 'Applet: linkApplet started' and 'Internet'.

Fuente: Software MAXIMO 5.2

Este formato consta con los siguientes campos: Descripción de trabajo, prioridad de trabajo, frecuencia de ejecución de trabajo, identificación del equipo a ser

mantenido, plan de trabajo (Job plan), recursos y/o personal técnico asignados, etc.

El módulo de mantenimiento preventivo (PM) es una parte muy importante para administrar eficientemente los recursos, prolongar la vida útil de una máquina o en cualquier caso poder planificar y programar paradas de equipos. Con frecuencia, el trabajo de Mantenimiento preventivo son actividades repetitivas que se realizan para mantener el equipo trabajando en forma eficiente.

### **3.2.3 INVENTARIOS (INVENTORY)**

La administración del inventario de repuestos es una parte importante del mantenimiento de cualquier local.

El módulo Inventario en MAXIMO realiza un seguimiento de los materiales y repuestos necesarios para el mantenimiento teniendo un registro de las partes en existencia, indicando cuándo la existencia alcanza puntos de reordenamiento definidos por el usuario, crea requisiciones de compra u órdenes de compra para reponer la existencia de partes necesarias y lleva la cuenta de las partes recibidas.

Inventario es uno de los módulos centrales de MAXIMO. Funciona con una relación dinámica con los módulos Mantenimiento preventivo, Órdenes de trabajo, Compras y Equipos, y con la aplicación Empresas del módulo Recursos.

Estos otros módulos afectan la cantidad de partes en el inventario, identifican dónde se utilizan esas partes, así como quién las vende a su empresa.

Las aplicaciones disponibles para el módulo de Inventarios son:

- Inventarios (Inventory)
- Almacenes y Bodegas (Storerooms)
- Maestro de partes (Item master)

- Despachos y Transferencias (Issues and Transfers)

### 3.2.4 EQUIPO (EQUIPMENT)

Este módulo de MAXIMO permite realizar un seguimiento de los equipos desde que se compran o instalan, hasta que sean desechados, en fin a lo largo de toda su vida útil.

Los equipos que son necesarios para el normal funcionamiento de la planta deben ser registrados dentro de la base de datos del sistema MAXIMO para establecer un orden que permita hacer un seguimiento a los equipos que se encuentran en ubicaciones permanentes, temporales e inclusive de los equipos que se encuentren en tránsito por cualquier ubicación.

El módulo Equipo contiene aplicaciones diseñadas para hacer seguimiento a los equipos y ubicaciones utilizados por la empresa.

- Equipos (Equipment)
- Ubicaciones (Locations)
- Códigos de Fallas (Failure Codes)
- Monitoreo de Condición (Condition Monitoring)

El módulo Equipos, tiene dentro de sus aplicaciones la opción de poder realizar el *MONITOREO DE CONDICIÓN* de los equipos en los cuales haya como evaluar su estado dependiendo de los parámetros operativos más relevantes, donde se especifica los límites para la activación de alarmas y definir el trabajo asociado que se efectuará al alcanzar estos límites, en este caso son las medidas de las vibraciones con que se encuentra determinado equipo, el cual dará la pauta para la aplicación de un Mantenimiento Predictivo a la estación CPF.

En la figura 3.6 se muestra el formato para establecer el registro los diferentes puntos a ser monitoreados en los equipos registrados en la base de datos.

**FIGURA 3.6 FORMATO MONITOREO DE CONDICIÓN**

Fuente: Software MAXIMO 5.2

### 3.2.5 COMPRAS (PURCHASING)

Una parte importante del proceso de mantenimiento es obtener los materiales y servicios requeridos para realizar el trabajo.

Cuando los balances de inventario descienden en los almacenes, es necesario volver a llenar estos balances.

El módulo Compras proporciona una manera de hacer seguimiento a requisiciones, compras de materiales y servicios mediante las siguientes aplicaciones:

- Requisiciones de compras (Purchase Requisitions)
- Ordenes de Compra (Purchase Orders)
- Recibos (Invoices)

### **3.2.6 PLANES (PLANS)**

El módulo Planes le permite crear plantillas estándar para tareas, mano de obra, materiales, herramientas e información de seguridad necesarios para completar un trabajo.

El uso de estas plantillas elimina la necesidad de ingresar en repetidas ocasiones información relacionada con el trabajo y la seguridad.

Las aplicaciones que se dispone en este módulo son:

- Planes de Trabajo (Job Plans)
- Rutas (Routes)
- Planes de Seguridad (Safety Plans)
- Riesgos de Seguridad (Safety Precautions)
- Desconexión / Rotulación de Seguridad (Lock out /Tag out)

Los planes de trabajo para un mantenimiento predictivo son similares a los aplicados a un mantenimiento preventivo, ya que siempre es necesario registrar los parámetros de funcionamiento del equipo, la diferencia está en que estos datos deben ser interpretados mediante un análisis con técnicas empleadas dentro del mantenimiento predictivo, para así racionalizar el mantenimiento preventivo.

Los planes de trabajo siguen un delineamiento general, pudiendo diferir unos de otros en la cantidad de actividades propias y definidas que contengan cada uno de estos, los que se desarrollan a partir de tres puntos:

- ✓ Inspección visual general del equipo y sus alrededores.
- ✓ Monitoreo de parámetros de operación.
- ✓ Limpieza o cambio de elementos de lubricación y filtrado.

En un plan de trabajo para mantenimiento predictivo, el punto más importante a ser considerado es el monitoreo de los parámetros de operación y hay que tener un especial cuidado en establecer claramente los tipos de parámetros y los lugares de inspección, para que los resultados de los análisis realizados reflejen un diagnóstico real del estado de la máquina.

### **3.2.7 RECURSOS (RESOURCES)**

El módulo Recursos permite a MAXIMO hacer seguimiento a los recursos internos y externos que emplea la empresa para efectuar trabajo de mantenimiento. Estos recursos incluyen el personal, las herramientas y las empresas que realizan contratos con su empresa.

Las aplicaciones que el módulo Recursos contiene son:

- Empresas (Companies)
- Herramientas (Tools)
- Contratos de Servicios (Services Contract)
- Mano de Obra (Labor)
- Especialidades (Craft)
- Grupos de mano de Obra (Labor Groups)

### **3.2.8 INFORMES Y ANÁLISIS DE NEGOCIOS (BUSINESS ANALYSIS & REPORTING)**

La planta o empresa puede crear informes personalizados o el Administrador de archivos puede crear informes adicionales. Las opciones que se instalan como

configuración por omisión en MAXIMO incluyen informes de aplicación e informes de Indicador clave de desempeño (KPI).

Las aplicaciones de MAXIMO proporcionan una extensa variedad de informes, los cuales se muestran en la tabla 3.2.

**TABLA 3.2 INFORMES DISPONIBLES PARA MAXIMO 5.2**

<b>APLICACION</b>	<b>TIPO DE INFORME</b>
Seguimiento órdenes de trabajo	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <i>Informe de detalles de la orden de trabajo</i></li> <li>✓ <i>Informe de listado de órdenes de trabajo</i></li> <li>✓ <i>Informe de costos de órdenes de trabajo, estimados y actuales.</i></li> </ul>
Mantenimiento preventivo	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <i>Informe listado de mantenimientos preventivos</i></li> </ul>
Inventario	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <i>Informe del listado de inventario</i></li> <li>✓ <i>Informe de balance del inventario</i></li> <li>✓ <i>Informe transacciones de inventario</i></li> <li>✓ <i>Informe disponibilidad de partes</i></li> </ul>
Maestro de partes	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <i>Informe listado de partes</i></li> </ul>
Equipo	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <i>Resumen de fallas de equipo por ubicación</i></li> <li>✓ <i>Detalle de fallas de un equipo</i></li> <li>✓ <i>Informe listado de los equipos</i></li> </ul>
Ubicaciones	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <i>Informe listado de ubicaciones</i></li> </ul>
Códigos de falla	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <i>Informe listado de códigos de falla</i></li> </ul>
Monitoreo de condición	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ <i>Informe listado del monitoreo de condiciones</i></li> </ul>

Fuente: Guía de inicio MAXIMO 5.2

### **3.3 MAXIMO 5.2 COMO PARTE DEL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

El software MAXIMO y sus módulos de: Seguimiento de órdenes de trabajo, Mantenimiento Preventivo y Monitoreo de Condición, permite principalmente

llevar un registro estandarizado para la aplicación del Mantenimiento Predictivo por análisis de vibraciones en todos los equipos, sistemas y ubicaciones de la estación CPF, en las que sea necesario e imprescindible ejecutarlo, al cual también tendrán acceso cualquier usuario del sistema, con la finalidad de que los resultados de los respectivos análisis y tendencias de falla de determinado equipo sean accesibles.

### **3.4 ANÁLISIS DE TENDENCIAS Y ESPECTROS DE VIBRACIÓN**

Para el análisis de las tendencias y espectros de vibración de una máquina, se utiliza el software OMNITREND, el cual nos permite visualizar la evolución de las vibraciones en las máquinas, así como poder realizar un análisis de sus espectros de vibración global, cuando las tendencias hayan pasado los niveles de vibración permitidos.

#### **3.4.1 DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE OMNITREND 2.03**

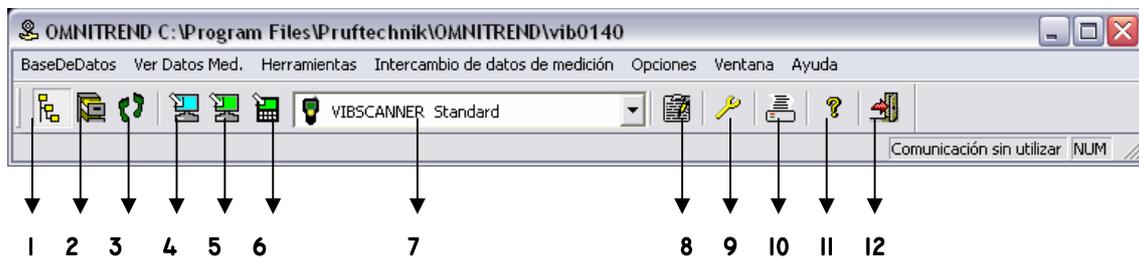
OMNITREND es uno de los últimos programas de PC para el monitoreo y diagnóstico de equipos rotativos en condiciones operativas, es decir sin tener que parar o apagar el equipo.

El software OMNITREND permite:

- Monitorear valores característicos y señales en las tendencias de máquinas específicas.
- Analizar los diferentes síntomas que presente la máquina.
- Obtener y diagnosticar el estado de un rodamiento antifricción.

En su ventana de inicio se tiene accesos rápidos a las diferentes funciones que permite administrar el monitoreo de los equipos, tal como lo muestra la figura 3.7.

**FIGURA 3.7 SOFTWARE OMNITREND – VENTANA DE INICIO**



Las diferentes funciones de estos íconos se muestran en la tabla 3.3

**TABLA 3.3 DESCRIPCIÓN DE LAS FUNCIONES DE LOS ÍCONOS DEL SOFTWARE OMNITREND**

No	ÍCONO	FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
1		<b>Visualizador de datos medidos</b>	Permite visualizar las tendencias y los diferentes espectros de vibración dentro de la base de datos del software
2		<b>Directorio de maquinaria</b>	Permite crear o modificar los diferentes equipos, parámetros, puntos de medición, etc.
3		<b>Editor de rutas:</b>	Función principal el crear o modificar rutas de medición de vibraciones de los equipos, las mismas que serán cargadas al dispositivo de medición
4		<b>Carga multimodo a PC</b>	Permite descargar diversos datos que se hayan tomado y grabado en el dispositivo de medición de vibraciones
5		<b>Descargar rutas</b>	Permite obtener los datos de vibración obtenidos de una ruta de medición de determinado equipo
6		<b>Cargar ruta</b>	Permite cargar rutas de medición de vibraciones para los equipos a ser monitoreados
7		<b>Selector de dispositivo de medición</b>	Para seleccionar de entre varios dispositivos de medición
8		<b>Selector de informes</b>	El cual despliega informes visuales y de datos de los equipos que se encuentran dentro de la base de datos del software
9		<b>Ajustes generales</b>	Donde el usuario puede configurar parámetros de medición, visualización de datos, unidades de medida, etc.

**TABLA 3.3 CONTINUACIÓN**

10		<b><i>Imprimir</i></b>	Permite realizar una impresión rápida de la página que el usuario esté visualizando en ese momento
11		<b><i>Ayuda</i></b>	Guía general de las aplicaciones de OMNITREND
12		<b><i>Salida o finalización de la aplicación</i></b>	Para salir de la aplicación

#### 3.4.1.1 La Base de Datos OMNITREND

Toda la información de un parque de máquinas y de los puntos de medición obtenidos mediante los dispositivos de medición, son administrados mediante una base de datos propia del programa.

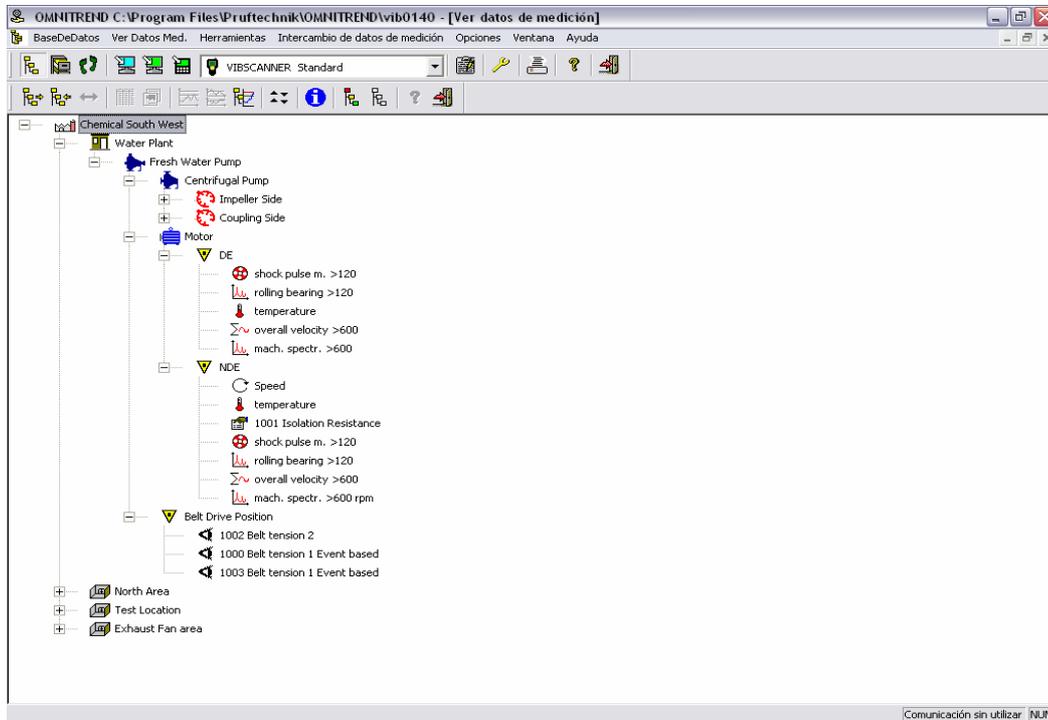
Esta base de datos está administrada mediante el icono de Directorio de maquinaria, en el cual se puede realizar modificaciones de acuerdo al nivel de usuario asignado.

Los usuarios que pueden modificar esta base de datos son aquellos catalogados como nivel **Supervisor**, no así los usuarios **Cliente**, **Técnico** y **Especialista** que no poseen ningún derecho sobre la base de datos.

Por razones de seguridad se aconseja tener un número limitado de personas, las cuales posean derechos de administrar esta base de datos, ya que por desconocimiento se pueden variar algún parámetro, lo cual podría causar malas interpretaciones de los resultados.

La base de datos tiene un arreglo jerárquico de seis niveles, en la que cada nivel caracteriza el lugar donde se encuentra la máquina, el tipo de máquina a ser monitoreado, la ubicación del punto de medición, el tipo de medición, los parámetros de medida, tal como se muestra en la figura 3.8.

**FIGURA 3.8 ARREGLO JERÁRQUICO PARA UNA BASE DE DATOS DE EQUIPOS – OMNITREND**



Fuente: Software Omnitrend

Los niveles para el arreglo jerárquico de los equipos son los siguientes:

1. **Parque de máquinas.** El cual es el nivel más alto, en donde se describe la facilidad o facilidades a ser monitoreados.
2. **Planta.** Nombre del tren de máquinas que pertenecen a la facilidad.
3. **Tren de máquinas.** Es en conjunto de máquinas conductoras y conducidas (Ej. Bomba y su motor eléctrico).
4. **Máquina.** Unidad vibracional básica (Ej. Un eje y sus dos rodamientos).
5. **Localización del sensor.** Define la posición del sensor en la máquina.

6. **Tipo de medición:** Define la configuración de la medición y tipo de sensor a ser utilizado. Los tipos de medición que pueden ser seteados en este nivel jerárquico son los mostrados en la tabla 3.4.

**TABLA 3.4 TIPOS DE MEDICIÓN – SOFTWARE OMNITREND**

Tipo de medición	Descripción
	Vibración global
	Espectro de vibración
	Temperatura
	Velocidad
	Cavitación
	Pulsos de choque
	Inspección visual

### 3.4.1.2 El Editor de Rutas

Con el editor de rutas se puede crear sistemas de medición de vibraciones en las máquinas, mediante las cuales se puedan realizar una toma de datos más rápida y confiable.

Una ruta debe contener la siguiente información:

1. Nombre de la ruta o equipo a ser monitoreado.
2. Nombre y localización del punto de la máquina a ser medido.
3. Tipo de medición a realizarse.

Una ruta puede o no contener todos los puntos de medición seteados en un parque de máquinas, todo depende de cómo el analista desee y considere de la mejor manera de monitorear los parámetros de las máquinas.

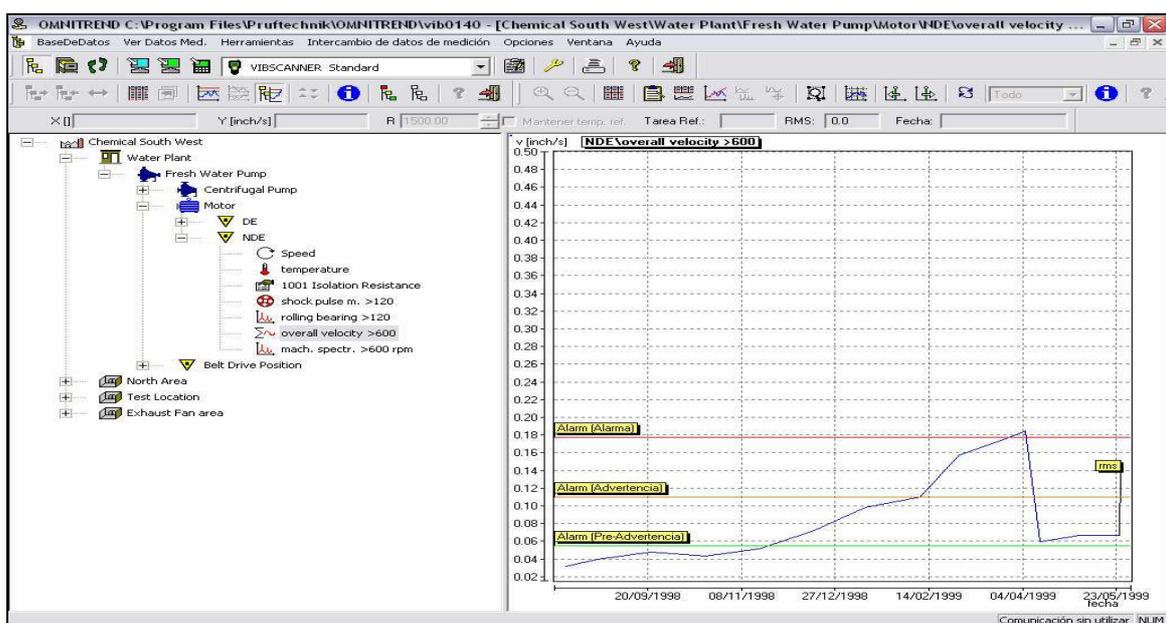
Una vez que las rutas de medición de vibraciones han sido creadas, éstas se pueden cargar al dispositivo VIBSCANNER, en el cual se podrá identificar claramente los pasos a seguir para la toma de datos necesarios para el análisis de la tendencia de las vibraciones de la máquina en monitoreo.

Al finalizar las mediciones de todos los puntos especificados dentro de una ruta determinada, el dispositivo VIBSCANNER guarda estos para que puedan ser descargados al PC.

### 3.4.1.3 El Visualizador de Datos

Cuando los datos de las mediciones de vibración han sido descargados a la base de datos de OMNITREND, se puede observar estos de manera gráfica, tal como se muestra en la figura 3.9, lo cual permitirá al analista tener una apreciación de la evolución de las vibraciones durante intervalos de tiempo determinados de la máquina monitoreada.

**FIGURA 3.9 VISUALIZACIÓN DE DATOS DE VIBRACIÓN MEDIDOS POR DISPOSITIVO VIBSCANNER EN SOFTWARE OMNITREND**



Fuente: Software Omnitrend

Dentro de esta función tenemos algunas herramientas que ayudan a obtener un mejor diagnóstico del punto de medición de la máquina en estudio, tales como: calcular tendencias gráficas, visualizar un reporte, ampliar áreas, mover cursores, imprimir reportes, etc.

### **3.5 EVALUACIÓN DE EQUIPOS Y SISTEMAS A IMPLANTAR EL MANTENIMIENTO PREDICTIVO POR ANÁLISIS DE VIBRACIONES**

Como anteriormente se lo mencionó en el Capítulo 1, el CPF es una planta procesadora y estación primaria de bombeo de crudo, en cuya producción intervienen varios sistemas y equipos, los cuales cumplen con diferentes propósitos.

Todos estos equipos y sistemas tienen su grado de criticidad de acuerdo a su función, su ubicación, si es que tienen equipos de reemplazo (Back-up), sus niveles permitidos de vibraciones, la disponibilidad de repuestos, etc.; es decir, una vez evaluado todos estos criterios se clasificará a los equipos de acuerdo a clasificación que se muestra en la tabla 3.5.

**TABLA 3.5 CLASIFICACIÓN DE EQUIPOS POR PRIORIDADES**

<b>Equipo</b>	<b>Descripción</b>
Equipo A +	<i>Equipos críticos y primordiales para el normal desempeño de las instalaciones.</i>
Equipo A	<i>Equipos importantes dentro de un sistema y/o proceso.</i>
Equipo B	<i>Equipos de función secundaria dentro de un sistema y/o proceso.</i>
Equipo C	<i>Equipos con bajo riesgo dentro del sistema y/o proceso.</i>

Para evaluar y clasificar por prioridades a los equipos que se aplicará al programa de mantenimiento preventivo por análisis de vibraciones se utilizará el “Método GUT”.

Este método consiste en evaluar los diferentes criterios del personal involucrado directa o indirectamente con los equipos y máquinas, mediante la calificación de tres ítems (G, U y T) dentro de una escala de valores del 1 al 5.

El valor GUT del equipo evaluado se obtiene sumando los valores (producto de la multiplicación de los valores de los tres ítems evaluados) obtenidos por cada encuestado, tal como lo muestra la ecuación 3.1.

$$GUT = \sum_1^n G \times U \times T \quad (3.1)$$

“En este método, la letra G significa la "Gravedad" del problema, o sea, si la ocurrencia es de naturaleza que puede perjudicar el equipo o instalación o aún, colocar en riesgo vidas humanas o al medio ambiente. La letra U representa la "Urgencia", es decir, si el problema genera o puede generar perjuicios al proceso o al servicio, comprometiendo las obligaciones de la empresa de plazo, costos o calidad y la letra T simboliza la "Tendencia", o sea, como el problema puede desarrollarse o degenerar con el tiempo.”<sup>6</sup>

Una vez que se evalúe todos los equipos, estos deberán ordenarse de manera descendente desde aquel que obtuvo el mayor puntaje hasta el de menor puntaje, todo esto para que se establezca los rangos de clasificación de los equipos por prioridades de acuerdo a los porcentajes obtenidos por los equipos con respecto al valor GUT máximo de la evaluación.

Estos rangos de porcentajes se muestran en la tabla 3.6.

---

<sup>6</sup> TAVARES, L. Administración Moderna de Mantenimiento. Cap 2, Pág 25.

**TABLA 3.6 RANGOS DE CLASIFICACIÓN DE EQUIPOS POR PRIORIDADES CON RESPECTO AL VALOR  $GUT_{MAX}$**

<b>Equipos Prioridad</b>	<b>Rango</b>
A+	Mayores al <b>60%</b> del $GUT_{MAX}$
A	Entre el <b>60%</b> y el <b>30%</b> del $GUT_{MAX}$
B	Entre el <b>30%</b> y el <b>15%</b> del $GUT_{MAX}$
C	Menores al <b>15 %</b> del $GUT_{MAX}$

A manera de ejemplo se muestra en la tabla 3.7 la evaluación realizada a una bomba de inyección de agua mediante el método GUT.

**TABLA 3.7 EVALUACIÓN DE BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA POR MÉTODO GUT**

<b>Equipo</b>	<b>Bombas de inyección de agua</b>			
	<b>G</b>	<b>U</b>	<b>T</b>	<b>G x U x T</b>
<i>Superintendente Campo</i>	3	5	3	45
<i>Supervisor de Procesos</i>	3	5	2	30
<i>Supervisor de Mantenimiento</i>	4	5	3	60
<i>Técnico Mecánico Líder</i>	4	5	4	80
<i>Técnico Eléctrico Líder</i>	3	4	3	36
<i>Técnico Instrumentista Líder</i>	3	5	2	30
			<b>TOTAL</b>	<b>281</b>

La evaluación mediante el método GUT, realizada al resto de equipos que son considerados dentro del programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones, se muestra en el Anexo No 6.

Una vez evaluados los equipos que intervienen dentro del proceso de separación de crudo en la estación CPF y que serán monitoreados dentro del programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones, se obtiene la siguiente clasificación mostrada en la tabla 3.8.

**TABLA 3.8 CLASIFICACIÓN DE EQUIPOS A SER MONITOREADOS DE ACUERDO A EVALUACIÓN “MÉTODO GUT”**

<b>N°</b>	<b>TAG</b>	<b>Equipo</b>	<b>Puntaje GUT</b>	<b>Prioridad</b>
1	P110-PU1-001C	Water Injection pump C	<b>281</b>	<b>A+</b>
2	CF17-PU1-001A	Water Injection pump A	<b>281</b>	
3	CF17-PU1-001B	Water Injection pump B	<b>281</b>	
4	P110-PU1-001A	Shipping pump A	<b>218</b>	
5	P110-PU1-001A	Shipping pump B	<b>218</b>	
6	CF18-CMI-001A	Gas Compressor A	<b>214</b>	
7	CF18-CMI-001B	Gas Compressor A	<b>214</b>	
8	CF56-BL1-001A	Flare Blower	<b>158</b>	<b>A</b>
9	CF10-PU1-001A	Oil Booster pump A	<b>147</b>	
10	CF10-PU1-001B	Oil Booster pump B	<b>147</b>	
11	CF10-PU1-001C	Oil Booster pump C	<b>147</b>	
12	CF10-PU1-001D	Oil Booster pump D	<b>147</b>	
13	CF55-PU1-002A	Firewater pump A	<b>115</b>	
14	CF55-PU1-002B	Firewater pump B	<b>115</b>	
15	CF56-PU1-001A	Flare KO pump A	<b>83</b>	<b>B</b>
16	CF56-PU1-001B	Flare KO pump B	<b>83</b>	
17	CF43-CM1-001A	Air Compressor A	<b>80</b>	
18	CF43-CM1-001B	Air Compressor B	<b>80</b>	
19	CF23-PU1-001A	1st Booster pump A	<b>72</b>	
20	CF23-PU1-001B	1st Booster pump B	<b>72</b>	
21	CF23-PU1-001C	1st Booster pump C	<b>72</b>	
22	CF18-EX1-001A	Recovery Gas Cooler A	<b>40</b>	<b>C</b>
23	CF18-EX1-001B	Recovery Gas Cooler B	<b>40</b>	
24	CF18-EX1-001C	Recovery Gas Cooler C	<b>40</b>	
25	CF46-PU1-001A	Diesel Transfer pump A	<b>19</b>	
26	CF46-PU1-001B	Diesel Transfer pump B	<b>19</b>	
27	CF58-PU1-001A	Gasoline Transfer pump A	<b>19</b>	
28	CF79-PU1-001A	JP-1 Transfer pump A	<b>19</b>	
29	CF79-PU1-001B	JP-1 Transfer pump B	<b>19</b>	
30	CF23-PU1-002A	2nd Booster pump A	<b>12</b>	
31	CF23-PU1-002B	2nd Booster pump B	<b>12</b>	

Total de equipos evaluados = 31

### **3.6 PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN LA ESTACIÓN CPF DE AGIP OIL ECUADOR B.V.**

Una vez que se ha dado las herramientas con las que se pretende manejar el mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones en la estación CPF, es necesario establecer y estructurar la manera con la que se ejecutará este programa.

El programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones se estructura en la siguiente secuencia de eventos:

- 1) Obtención de información de equipos a monitorear.
- 2) Establecimiento de los niveles permitidos de vibración.
- 3) Registro de información en software MAXIMO y OMNITREND.
- 4) Planes de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones.
- 5) Establecimiento de cronograma de mantenimiento preventivo-predictivo.
- 6) Aplicación del programa de mantenimiento predictivo a los equipos seleccionados.

A continuación se describen los puntos con los que se desarrollará el programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones dentro de las facilidades de la estación CPF de Agip Oil Ecuador B.V.

#### **3.6.1 OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN DE EQUIPOS A MONITOREAR**

La obtención de la información de los equipos que serán monitoreados es esencial para el desarrollo del programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones, ya que es en este punto de inicio donde la recopilación de esta valiosa información delinearán la manera de realizar el seguimiento de los parámetros de vibración.

La información que es necesaria recopilar es la siguiente:

- ✓ Datos, planos y especificaciones del fabricante del equipo.
- ✓ Datos y especificaciones de la funcionalidad del equipo dentro del proceso de separación de crudo.

Por ejemplo para la bomba “Shipping” de crudo A, se tiene la siguiente información mostrada en la tabla 3.9, la cual fue recopilada de los catálogos de instalación y operación.

**TABLA 3.9 DATOS TÉCNICOS DE LA BOMBA “SHIPPING” DE CRUDO A**

Equipo: BOMBA “SHIPPING” DE CRUDO A

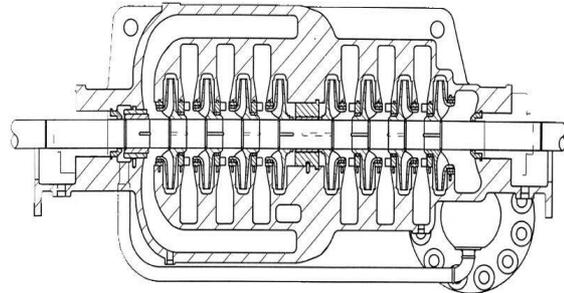
Prioridad: **A+**

<b>Motor eléctrico</b>	
<b>Marca:</b>	Westinghouse
<b>Tipo:</b>	Eléctrico / 3 Fases
<b>Potencia:</b>	1250 HP / 932.13 kW.
<b>V:</b>	6.600
<b>A:</b>	95
<b>N:</b>	3560 rpm
<b>Bomba centrífuga</b>	
<b>Marca:</b>	Sulzer Bingham Pumps Co.
<b>Tipo:</b>	Centrífuga Multietapa (7)
<b>BHP:</b>	1100 HP / 820 kW
<b>Fluido de trabajo:</b>	Crudo
<b>Presión Descarga:</b>	1400 psi
<b>rpm:</b>	3560
<b>Caudal:</b>	1170 GPM
<b>Tag:</b>	P110-PU1-001A

Fuente: Catálogo de Instalación y operación - Sulzer

Las fotografías, planos y/o esquemas, también proporcionan una valiosa información del equipo que será monitoreado. Para el ejemplo anterior se tiene la siguiente información gráfica, mostrada en la figura 3.10.

### FIGURA 3.10 INFORMACIÓN GRÁFICA DE LA BOMBA “SHIPPING” DE CRUDO A



TYPICAL PUMP CROSS SECTION

La información recopilada permite delinear el monitoreo de los parámetros de vibración para que se pueda efectuar un análisis correcto de los datos obtenidos.

#### 3.6.2 ESTABLECIMIENTO DE NIVELES PERMITIDOS DE VIBRACIÓN

Cuando ha sido recopilada la información necesaria y suficiente como para que el analista conozca al equipo que va a monitorear, es necesario establecer los niveles de vibraciones permitidas y definir las acciones a tomar en el caso de que los valores de éstas superen los niveles establecidos.

Para el efecto el analista debe considerar bajo qué normas de operación se considera el equipo a monitorear, así podrá establecer los niveles que se determinarán de acuerdo a tres clases de niveles:

1. Nivel de Preadvertencia
2. Nivel de Advertencia
3. Nivel de Alarma

En el nivel de ***preadvertencia***, el equipo puede mantenerse operando sin restricciones y será el punto de inicio para que el analista comience a verificar y especular las posibles fuentes de incremento de vibración.

En el nivel de **advertencia**, el equipo pasa a ser monitoreado con más frecuencia y es cuando el analista debe recopilar datos de los espectros de vibración que confirmen la futura falla en el equipo.

En el nivel de **alarma**, el equipo opera bajo condiciones críticas y es cuando el analista junto con el planificador de mantenimiento debe planificar una parada del equipo para realizar las correcciones necesarias.

Debido que el dispositivo de medición de vibraciones, Vibscanner, permite evaluar la severidad de vibración de una máquina mediante la norma ISO 10816-3, el establecimiento de los niveles de vibración estará regido por la misma. Para este fin se utilizará la tabla 2.4 mostrada en el capítulo 2.

Para la bomba Shipping de crudo A, tomada como ejemplo, se establece los niveles de vibración de la manera que se muestra en la tabla 3.10.

**TABLA 3.10 NIVELES DE VIBRACIÓN PARA LA BOMBA “SHIPPING” DE CRUDO A**

<b>Equipo:</b> Bomba “Shipping” de crudo A			
<b>Potencia:</b> 1.100 BHP			
<b>Rev.:</b> 3560 rpm			
<b>Tipo de fundación:</b> Rígida			
<b>Clasificación ISO:</b> Grupo 3			
<i>Niveles de vibración:</i>			
Vibración operación RMS [ inch/s]	Rango preadvertencia RMS [inch/s]	Rango Advertencia RMS [inchs/s]	Rango Alarma y parada de equipo RMS [inch/s]
0.01 – 0.09	0.09 – 0.18	0.18-0.28	> 0.29

Los niveles de vibración para los demás equipos del proceso de separación del crudo, considerados dentro del programa de manteniendo Predictivo, se puede observar en el Anexo No 7.

### 3.6.3 REGISTRO DE INFORMACIÓN EN SOFTWARE MAXIMO Y OMNITREND.

El ingreso de la información de las características y de los parámetros de funcionamiento de los equipos de la estación CPF dentro de la base de datos del software MAXIMO así como el registro de los niveles permitidos de vibración para estos equipos dentro del software OMNITREND, permitirán mantener un estándar de registros cada vez que el analista realice un estudio, de esta manera los resultados de los monitoreos y evaluaciones de las máquinas estarán a disposición de cualquier técnico que desee tener información historial de una máquina.

La información recopilada para los equipos se registran en la aplicación Equipos del software MAXIMO. El ejemplo de la bomba “Shipping” de crudo A se muestra en la figura 3.11.

**FIGURA 3.11 REGISTRO DATOS INFORMATIVOS DE LA BOMBA “SHIPPING” DE CRUDO A**

The screenshot shows the MAXIMO Equipment registration interface. The browser window title is "MAXIMO - Equipment - Equipment - Microsoft Internet Explorer". The address bar shows "http://fscpf03:7001/maximo/jsp/app/equipmnt/main.jsp". The interface includes a navigation menu with tabs for "Equipment", "Spare Parts", "Measurement", "Safety", "Meters", and "Specifications". The main content area is divided into several sections:

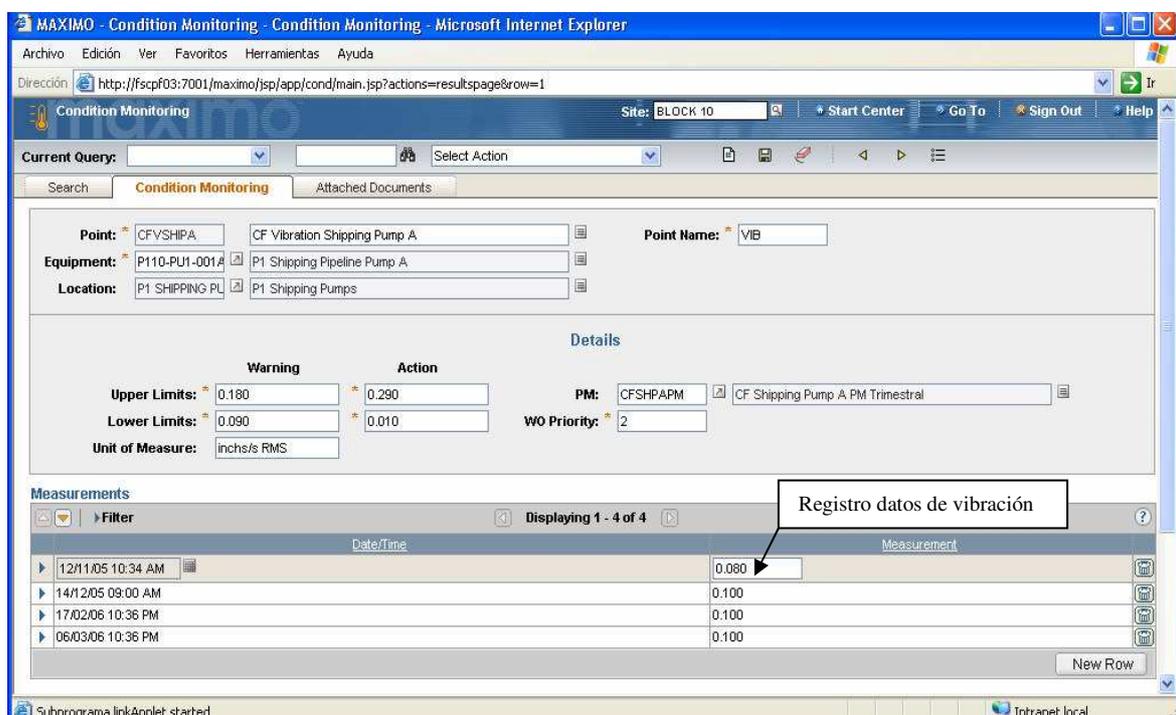
- Equipment:**
  - Equipment: P110-PU1-001 A
  - Belongs To: P1 Shipping Pipeline Pump A
  - Location: P1 SHIPPING PU
  - Bin:
  - Item:
- Purchase Information:**
  - Vendor: SULZER
  - Manufacturer: SULZER
  - Installation Date:
  - Warranty Date:
  - Purchase Price: 0.00
  - Replacement Cost: 0.00
- Costs:**
  - Total: 0.00
  - YTD: 0.00
  - Budgeted: 0.00
  - Inventory: 0.00
- Downtime:**
  - Up?
  - Date: 30/07/04 06:28 PM
  - Total Downtime: 0:00
- Details:**
  - Calendar:
  - Asset:
  - Serial#:
  - Priority: 1
  - Failure Class:

Annotations in the image point to the "Registro datos de vibración" button and the "Información adicional" section.

Fuente: Aplicación Equipos – Software MAXIMO

Para registrar los valores máximos obtenidos en el monitoreo de vibraciones para un equipo determinado se utilizará la aplicación Monitoreo de condición del módulo Equipos de MAXIMO. En la figura 3.12 se muestra de igual manera, los registros del monitoreo de vibraciones realizado a la bomba “Shipping” de crudo A.

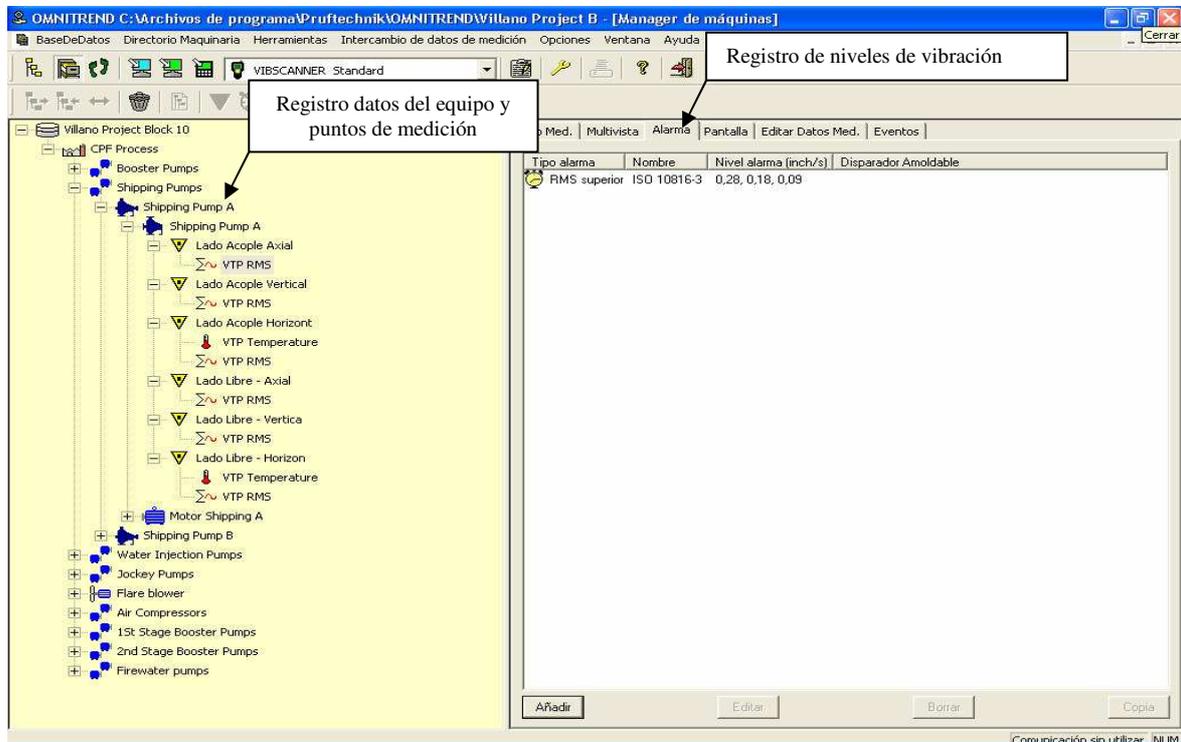
**FIGURA 3.12 REGISTRO DEL MONITOREO DE LA VIBRACIÓN DE LA BOMBA “SHIPPING” DE CRUDO A**



Fuente: Aplicación Monitoreo de Condición – Software MAXIMO

Los niveles de vibración de los equipos a ser monitoreados, establecidos de acuerdo a lo mencionado en el punto anterior, se deben registrar en el software OMNITREND, tomando las precauciones respectivas en el ingreso de los datos, ya que si alguna información suministrada al programa es errónea, ésta repercutiría sobre el análisis de las tendencias de vibración o sobre la interpretación de los espectros de vibración de los equipos considerados para el programa de mantenimiento predictivo. Para el ejemplo de la bomba “Shipping” de crudo A, el registro de los datos necesarios para el análisis de vibraciones, se muestra en la figura 3.13.

**FIGURA 3.13 REGISTRO DE NIVELES DE VIBRACIÓN PARA LA BOMBA “SHIPPING” DE CRUDO A - SOFTWARE OMNITREND**



Fuente: Aplicación Manager de máquinas – Software Omnitrend

### 3.6.4 PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO POR ANÁLISIS DE VIBRACIONES

El mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones será incluido dentro de los planes de mantenimiento preventivo de cada máquina o equipo considerado para el programa, todo con la finalidad de optimizar los recursos técnicos y humanos disponibles para estos trabajos.

Es importante mencionar que las actividades de mantenimiento predictivo que se incluyan en los planes de mantenimientos preventivos mensuales, trimestrales, semestrales y anuales, están elaboradas para poder realizarlas con el equipo en condiciones normales de operación.

En el caso de que el monitoreo de las vibraciones no se lo realice en conjunto con los mantenimientos preventivos, debido a que los niveles de vibración hayan superado los niveles de advertencia, se aplicará un plan de trabajo exclusivo para realizar únicamente el análisis de vibraciones. Las actividades que se incluirán en este plan de trabajo serán:

- Inspección visual preliminar del estado del equipo.
- Cargar ruta de medición a dispositivo VIBSCANNER.
- Monitoreo de vibraciones.
- Descarga de datos a PC y análisis de tendencias.
- Recopilación de espectros de vibración.
- Registro de diagnóstico preliminar.

En la figura 3.14 se muestra el registro del plan de trabajo PREDIC-VIB, en el software MAXIMO.

### FIGURA 3.14 PLAN DE TRABAJO PARA MANTENIMIENTO PREDICTIVO POR ANÁLISIS DE VIBRACIONES

The screenshot displays the MAXIMO Job Plans interface. The top navigation bar includes 'Job Plans', 'Work Assets', and 'Attached Documents'. The main form shows the following details for Job Plan PREDIC-VIB:

- Job Plan: PREDIC-VIB (Mantenimiento Predictivo - Monitoreo Vibraciones)
- Supervisor: MAINTSUP
- Lead Craft: PLANNER
- Duration: 1:00
- WO Priority: 1
- Crew: (empty)
- Interruptible?:

The Job Plan Tasks table is as follows:

Sequence	Task ID	Description	Duration	Point Name
10		Inspección visual preliminar del equipo	10:00	
20		Cargar ruta de medición a Vibscanner	5:00	
30		Monitoreo de vibraciones	20:00	
40		Descarga de datos a PC y análisis de tendencia	5:00	
50		Recopilación de espectros de vibración	15:00	
60		Registro de diagnóstico preliminar	10:00	

The Labor section shows the following details:

Task ID	Labor/Craft	Description	Quantity	Hours	Rate	Line Cost
	PLANNER	MAINT MAXIMO Planner	1	1:00	0.00	0.00

Fuente: Aplicación Planes de trabajo – Software MAXIMO

La recopilación de los espectros de vibración y el registro de un diagnóstico preliminar son actividades que no necesariamente se deben realizar cada vez que se tenga un mantenimiento preventivo; serán de carácter obligatorio únicamente cuando los valores de vibración hayan sobrepasado los niveles de advertencia.

### **3.6.5 ESTABLECIMIENTO DE CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO-PREDICTIVO**

El cronograma de mantenimiento preventivo-predictivo se establecerá de acuerdo con la periodicidad con que se realice el monitoreo de las vibraciones de un equipo, determinado por la frecuencia del mantenimiento preventivo, con la particularidad de que se pueda variar los mismos dependiendo de la condición de monitoreo que sea necesario aplicar al equipo.

En la tabla 3.11 se muestra la manera con que se establece la frecuencia de monitoreo de acuerdo a los niveles de vibración con que se encuentre el equipo.

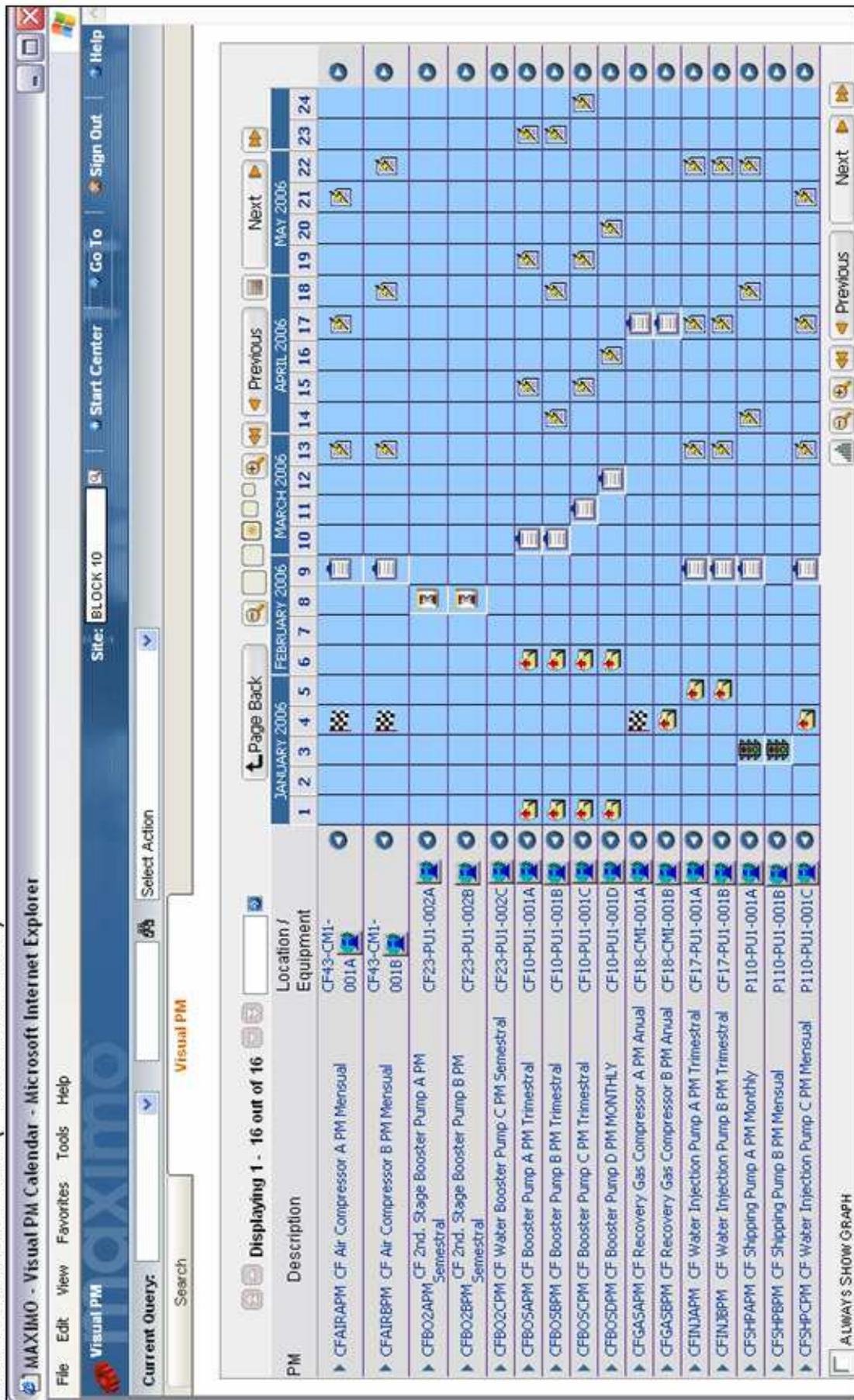
**TABLA 3.11 FRECUENCIAS PARA CONDICIÓN DE MONITOREO DE VIBRACIONES**

<b>Nivel de vibración</b>	<b>Condición de monitoreo</b>	<b>Plan de trabajo</b>
Operación normal	Establecido en mantenimientos preventivos	Mantenimiento preventivo
Preadvertencia	Cada 1 mes	Mantenimiento preventivo
Advertencia	Cada 15 días	Mantenimiento predictivo
Alarma	Cada 3 o 7 días	Mantenimiento predictivo

La herramienta visual de este cronograma será la aplicación de MAXIMO, el Visual PM, donde se tendrá la flexibilidad de poder planificar y variar los mantenimientos de acuerdo a las frecuencias de condición de monitoreo.

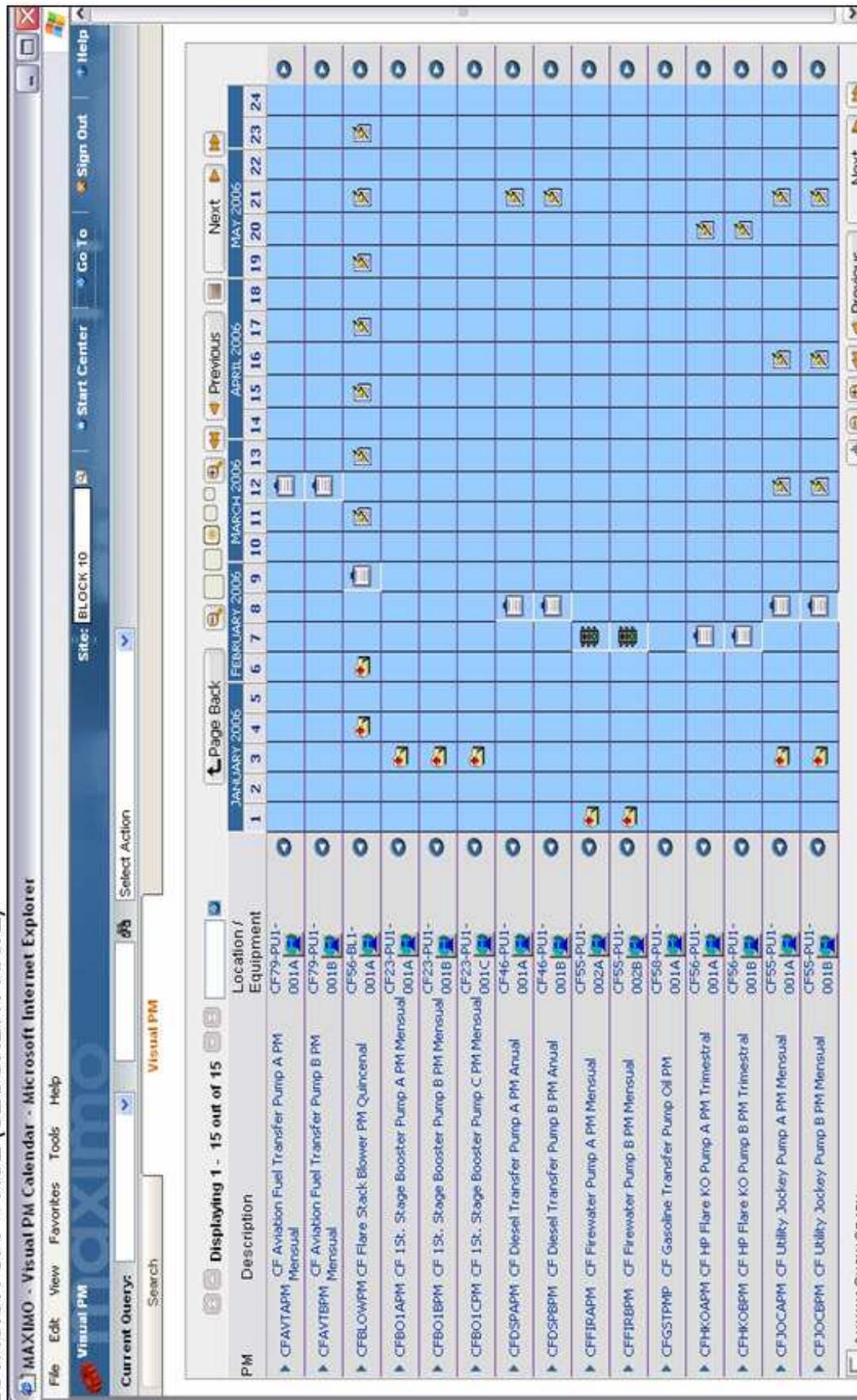
El cronograma en ejecución del programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones se lo muestra en las figuras 3.15 y 3.16.

FIGURA 3.15 CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO-PREDICTIVO EN LAS INSTALACIONES DE LA ESTACION CPF – AOE (PRIMERA PARTE)



Fuente: Aplicación Visual PM- Software MAXIMO

FIGURA 3.16 CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO-PREDICTIVO EN LAS INSTALACIONES DE LA ESTACION CPF – AOE (SEGUNDA PARTE)



Fuente: Aplicación Visual PM- Software MAXIMO

Mediante el Visual PM se puede visualizar las distintas programaciones de trabajo para los equipos de la estación CPF, el cual es un indicativo de cómo se encuentra la carga de trabajo asignada a las distintas áreas del Departamento de Mantenimiento de AOE.

En la tabla 3.12 se muestra el significado de los íconos que se utilizan dentro del cronograma de mantenimiento preventivo-predictivo visualizado mediante Visual PM.

**TABLA 3.12 SIMBOLOGÍA UTILIZADA PARA CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO-PREDICTIVO**

<b>Icono</b>	<b>Descripción</b>
	Trabajo en espera de aprobación
	Trabajo aprobado
	Trabajo en espera de programación
	Próxima fecha de vencimiento de PM
	Siguientes fechas de vencimiento de PM
	Trabajo en espera de materiales
	Trabajo en progreso
	Trabajo completado
	Trabajo cerrado
	Trabajo cancelado

Fuente: Aplicación Visual PM – Software MAXIMO

### **3.6.6 APLICACIÓN DEL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO A LOS EQUIPOS SELECCIONADOS**

La puesta en marcha del programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones es inmediata una vez que se ha establecido todos los puntos anteriormente mencionados, con la finalidad de conocer el estado general de los

equipos y tener valores de medición de vibración de referencia para análisis posteriores.

### **3.7 ASPECTOS DE SEGURIDAD A TOMAR EN CUENTA EN EL MONITOREO DE VIBRACIONES**

Es importante recordar que para el mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones, el monitoreo de estos valores se lo realiza mientras la máquina se encuentra en operación, por lo que se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos mostrados en la tabla 3.13, para realizar una toma de datos, en la que se garantice la seguridad del operario, así como evitar daños en el equipo de medición.

**TABLA 3.13 ASPECTOS DE SEGURIDAD PARA EL MONITOREO DE VIBRACIONES**

<b>N°</b>	<b>ASPECTO DE SEGURIDAD</b>
1	Realizar una inspección general del sitio donde se va a realizar el monitoreo de las vibraciones.
2	Estar seguro de adoptar una posición cómoda y ergonómica antes de colocar el transductor de vibración en el punto de medición.
3	Prestar mucha atención a los elementos rotativos de las máquinas, como por ejemplo las aspas de ventilación de un motor eléctrico, el eje y acoplamiento de una bomba, etc. con la finalidad de evitar un contacto directo del operario y/o del equipo de medición.
4	Notificar al operador de la máquina que se va a realizar lecturas de vibraciones.

## **CAPÍTULO 4**

### **PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO POR ANÁLISIS DE VIBRACIONES: CASOS DE ESTUDIO**

En el presente capítulo se muestra los resultados obtenidos, producto de la aplicación del programa de mantenimiento Predictivo por análisis de vibraciones en las instalaciones de la estación CPF de Agip Oil Ecuador, el cual ha permitido realizar el análisis de dos casos específicos:

1. Caso bomba de inyección de agua de formación.
2. Caso bomba de sobrealimentación “booster” de crudo.

A continuación se muestra como influyó la correcta implantación del programa en la planificación y detección de fallas en los equipos mencionados antes de que estos sufran una parada inesperada, lo cual permitió que la producción no disminuya significativamente, que los repuestos necesarios para la reparación estén a tiempo y que los recursos y el personal técnico esté prevenido del trabajo a realizar.

#### **4.1- CASO BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN P110-PU1-001C**

La bomba de inyección de agua de formación (prioridad A+) es considerada como importante dentro del proceso de inyección de agua de formación, ya que es el que completa todo el ciclo del agua dentro del proceso de extracción de crudo y no se dispone de otro equipo de reemplazo de las mismas características, en el caso de que se presente alguna falla. La figura 4.1 muestra el equipo en análisis.

**FIGURA 4.1 BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN**

El equipo en estudio es una bomba centrífuga multietapa, cuyas especificaciones se muestran en la tabla 4.1 Mayor información de las especificaciones de esta bomba se muestra en el Anexo No 8.

**TABLA 4.1 ESPECIFICACIONES DE LA BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN**

<b>Motor eléctrico</b>	
<b>Marca:</b>	Westinghouse
<b>Tipo:</b>	Eléctrico / 3 Fases
<b>Potencia:</b>	1250 HP / 932.13 kW
<b>V:</b>	6.600 V
<b>A:</b>	95 A
<b>N:</b>	3560 rpm
<b>Bomba centrífuga</b>	
<b>Marca:</b>	Sulzer Bingham Pumps Co.
<b>Tipo:</b>	Centrífuga Multietapa (7)
<b>BHP:</b>	1150 HP / 857.55 kW
<b>Fluido de trabajo:</b>	Agua de formación
<b>Presión Descarga:</b>	1300 psi
<b>RPM:</b>	3560
<b>Caudal:</b>	8600 BPH
<b>Tag:</b>	P110-PU1-001C
<b>Prioridad:</b>	A+

Fuente: Catálogo de Instalación y operación - Sulzer

Cabe mencionar que la bomba motivo de este análisis de caso, anteriormente fue destinada para trabajar como bomba Shipping de crudo, pero por cuestiones logísticas y operativas, fue instalada en el sistema de inyección de agua de formación.

Los niveles de vibración, en los que se considera que el equipo esta operando dentro de los parámetros indicados por la norma ISO 10816-3 son los que se muestran en la tabla 4.2, tanto para la bomba que está clasificada dentro del Grupo 3, así como para el motor eléctrico que es del Grupo 1 de máquinas.

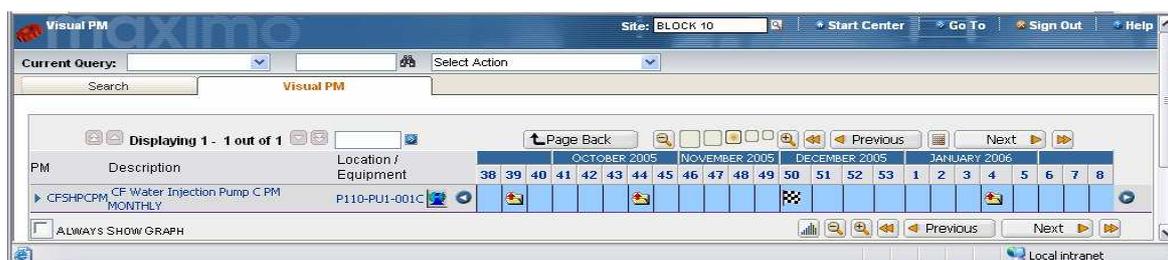
**TABLA 4.2 NIVELES DE VIBRACIÓN PARA LA BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN – P110-PU1-001C**

Equipo	Vibración operación RMS [ inch/s]	Rango preadvertencia RMS [inch/s]	Rango Advertencia RMS [inchs/s]	Rango Alarma y parada de equipo RMS [inch/s]
Bomba centrífuga	0.01 – 0.09	0.09 – 0.18	0.18-0.28	> 0.29
Motor eléctrico	0.01 – 0.09	0.09 – 0.18	0.18-.028	> 0.29

Basado en norma ISO 10816-3

De acuerdo al cronograma de mantenimiento preventivo-predictivo, mostrado en la figura 4.2, a este equipo se realiza trabajos preventivos-predictivos con una frecuencia de 1 al mes, en el que, dentro de las actividades que especifica el plan de trabajo, se incluye el monitoreo de los parámetros de vibración tanto de la bomba como del motor eléctrico.

**FIGURA 4.2 CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO-PREDICTIVO PARA LA BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN – P110-PU1-001C**



Fuente: Aplicación Visual PM – Software MAXIMO

El plan de trabajo mencionado se muestra en la tabla 4.3, el cual se basa principalmente en la inspección completa de la bomba de inyección de agua de formación, para lo cual no es necesario parar el equipo como anteriormente se lo realizaba.

**TABLA 4.3 PLAN DE TRABAJO MENSUAL PARA BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA P110-PU1-001C**

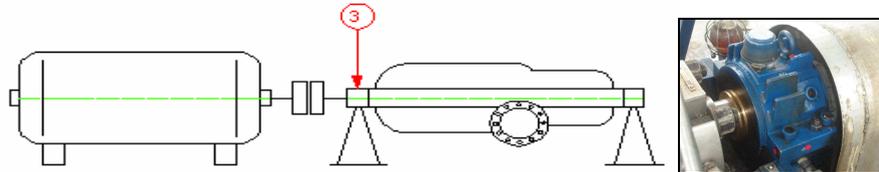
Task ID	DESCRIPTION ( Descripción)
10	Get the Unit Work Permit ( <i>Obtener permiso de trabajo</i> )
20	Seal Monitoring. There should be no leakage ( <i>Monitoreo de sellos. No debe haber fugas</i> )
30	Pressure monitoring ( <i>Monitoreo de presión</i> )
40	Temperature monitoring ( <i>Monitoreo de temperaturas</i> )
50	Check for unusual noise or vibration ( <i>Chequear por sonidos inusuales o vibración</i> )
51	<b>Vibration monitoring: Pump &amp; Motor</b> <b>( <i>Monitoreo de vibración Bomba &amp; Motor</i>)</b>
56	Verify bearings conditions ( <i>Verificación de estado de rodamientos</i> )
60	Check the oil level. Look for leakage. ( <i>Chequear nivel de aceite. Inspeccionar fugas</i> )
80	Inspect pump and piping for leaks ( <i>Inspeccionar fugas en bomba y tuberías</i> )
90	Seal Flush: check the orifice plate and clean lines ( <i>Enjuague del sello: Chequear placa orificio y limpiar sus líneas</i> )
93	Cleaning lubrication pump oil filter ( <i>Limpieza del filtro de aceite de lubricación de la bomba</i> )
100	Close work permit and notify to operator ( <i>Cerrar permiso de trabajo y notificar a operador</i> )
110	Report of work ( <i>Reporte de trabajo</i> )

Fuente: Aplicación Planes de trabajo-Software MAXIMO 5.2

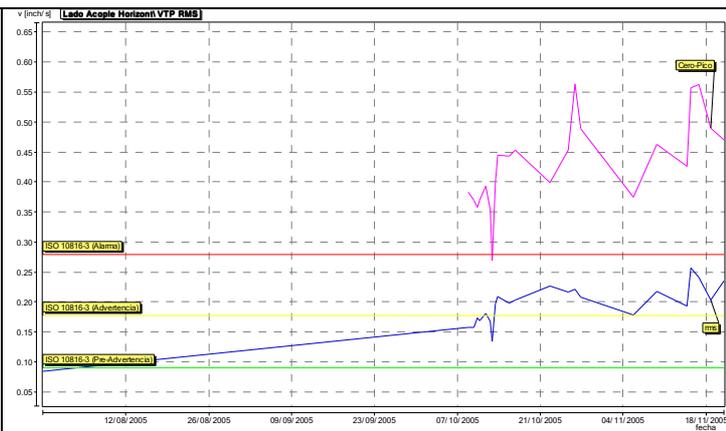
Como resultado del monitoreo de vibraciones realizado a la bomba se obtuvo como resultado las siguientes tendencias de vibración, mostradas en las figuras 4.3 y 4.4, que permitirán determinar en que niveles se encuentra operando la misma.

**FIGURA 4.3 TENDENCIAS DE VIBRACIÓN: LADO ACOPLE DE LA BOMBA DE INYECCIÓN P110-PU1-001C**

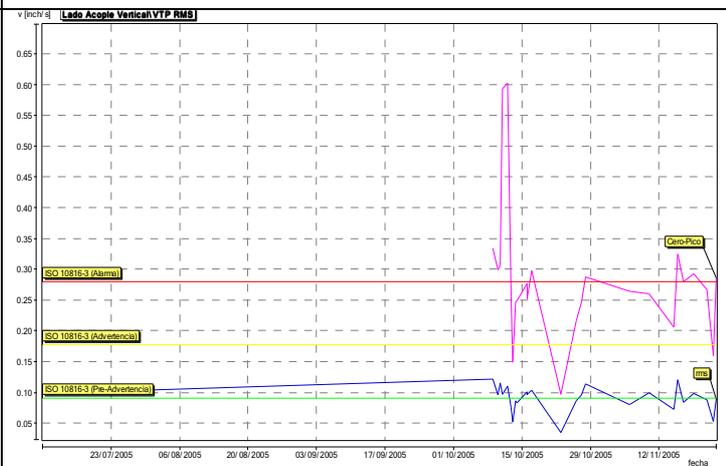
**Puntos de medición:** Lado acople bomba-motor eléctrico



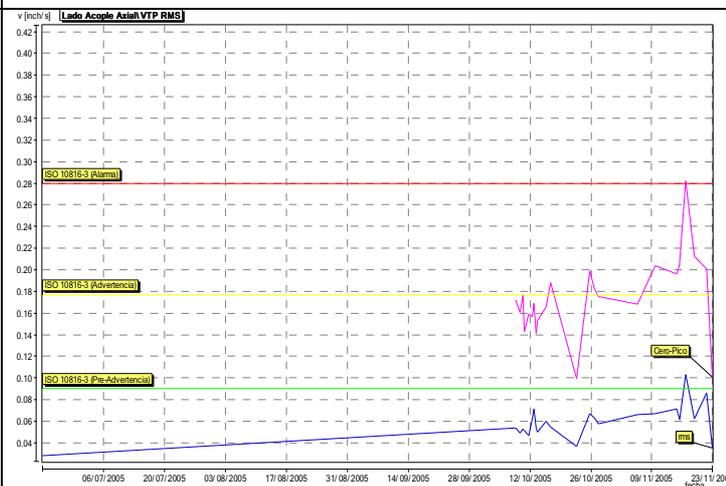
Punto: Lado acople radial horizontal



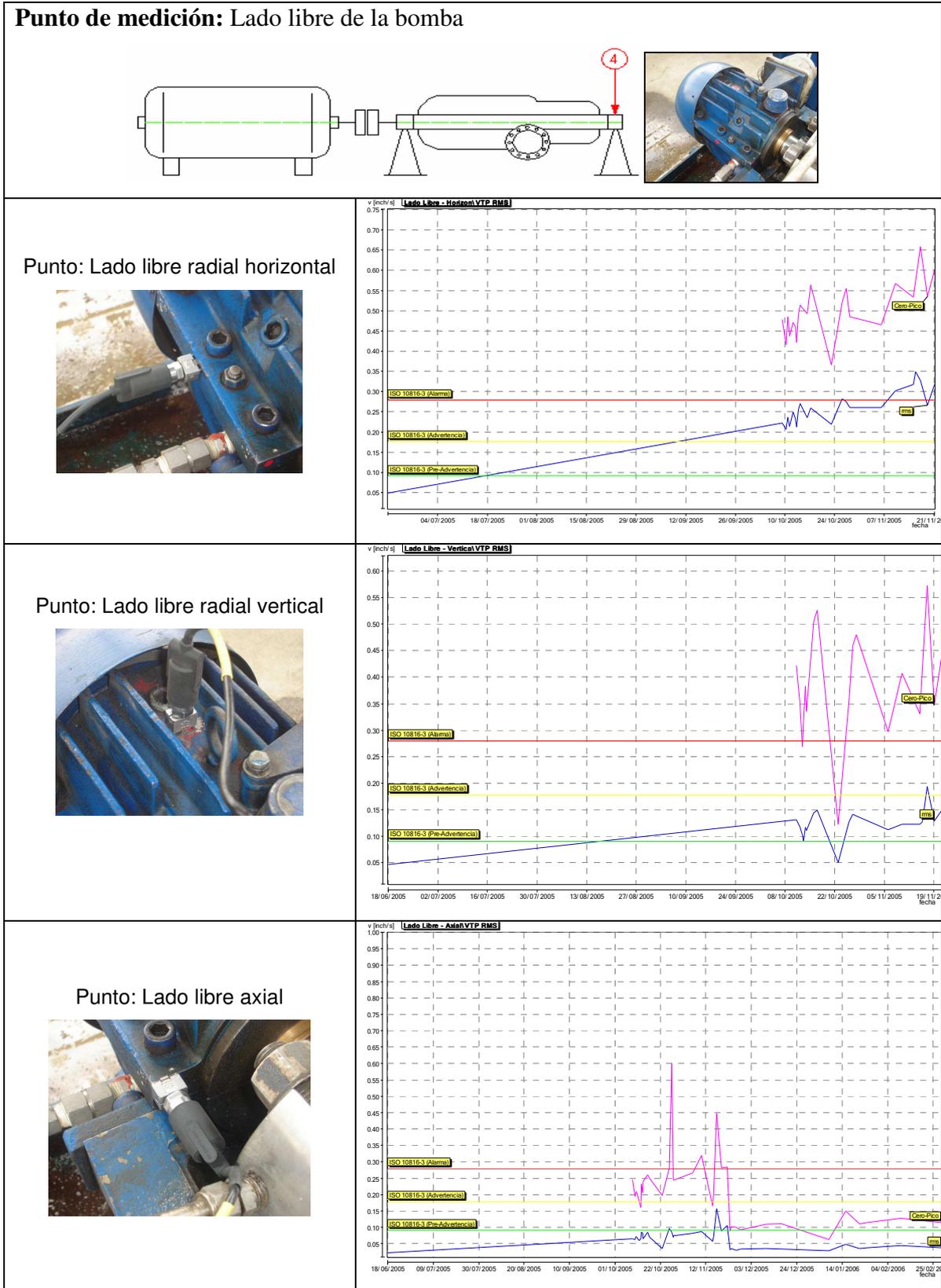
Punto: Lado acople radial vertical



Punto: Lado acople axial



**FIGURA 4.4 TENDENCIAS DE VIBRACIÓN: LADO LIBRE DE LA BOMBA DE INYECCIÓN P110-PU1-001C**



Como se puede observar en las figuras 4.3 y 4.4, las tendencias de las vibraciones radiales tienen un incremento paulatino, tanto en las mediciones verticales así como en las mediciones radiales horizontales, teniendo valores de medición elevados en las últimas e inclusive sobrepasan los niveles de alarma establecidos, lo cual indica que la bomba está trabajando con elementos mecánicos defectuosos o que algo puede estar sucediendo en el interior de la misma. En la tabla 4.4 se puede observar los valores de la vibración tomadas en el punto de la caja de rodamientos del lado libre radial horizontal.

**TABLA 4.4 VALORES DE VIBRACIÓN TOMADOS EN EL LADO LIBRE DE LA BOMBA, MEDIDOS EN EL PUNTO RADIAL-HORIZONTAL**

Fecha	Hora	Cero-Pico [inch/s]	RMS [inch/s]	Nivel
09/10/2005	17:37:46	0.48	0.22	ADVERTENCIA
10/10/2005	17:02:52	0.41	0.21	
11/10/2005	7:05:52	0.49	0.24	
12/10/2005	17:52:30	0.47	0.25	
13/10/2005	10:52:56	0.46	0.23	
14/10/2005	17:33:28	0.51	0.27	
16/10/2005	17:45:42	0.49	0.23	
17/10/2005	16:45:04	0.56	0.26	
23/10/2005	14:09:40	0.37	0.22	
26/10/2005	17:03:30	0.52	0.28	
27/10/2005	17:40:10	0.55	0.27	
28/10/2005	17:34:16	0.49	0.26	
06/11/2005	16:20:06	0.47	0.26	
10/11/2005	15:52:08	0.57	0.30	
15/11/2005	17:16:42	0.53	0.32	
16/11/2005	9:47:36	0.57	0.35	
17/11/2005	16:44:26	0.66	0.33	
19/11/2005	16:55:46	0.54	0.27	
22/11/2005	10:30:54	0.63	0.34	

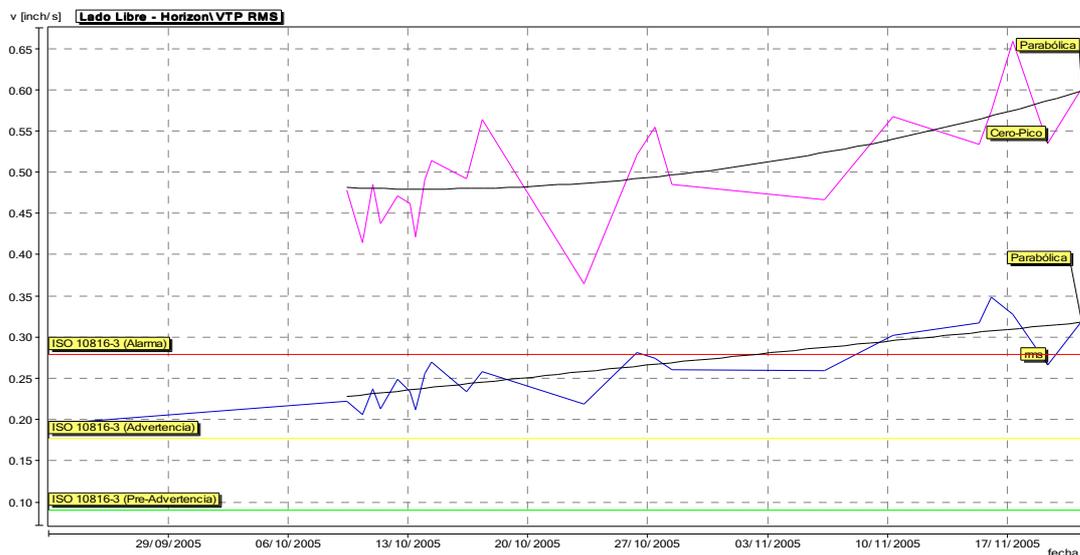
Fuente: Base datos – Software Omnitrend

A partir del 9 de octubre se registra un valor de vibración RMS que sobrepasa los niveles de alarma de advertencia, razón por la cual se cambia la frecuencia del

monitoreo de las vibraciones para poder determinar cual es la tendencia de los valores de nivel de severidad de la vibración.

Con la ayuda del software Omnitrend se determina que aproximadamente a mediados del mes de noviembre la bomba sobrepasaría los niveles de vibración, lo cual se observa en la figura 4.5

**FIGURA 4.5 TENDENCIA DE VIBRACIÓN: LADO LIBRE HORIZONTAL DE LA BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA P110-PU1-001C**



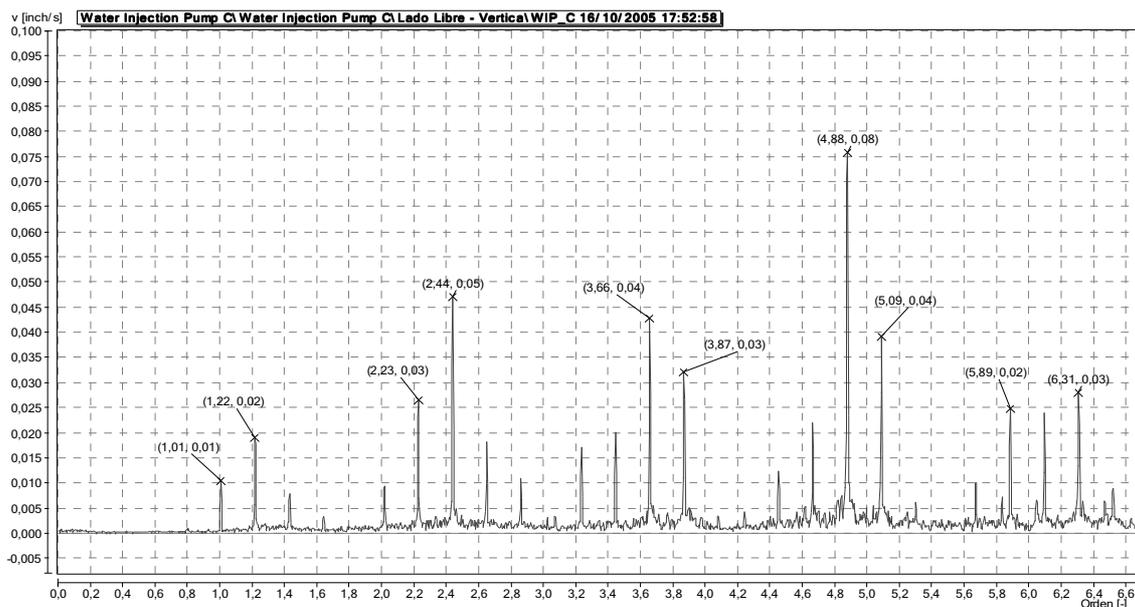
Fuente: Base de datos – Software Omnitrend

Debido a que los niveles de vibración de la bomba han superado los niveles normales de operación, es necesario investigar más profundamente cual es la causa para que las vibraciones se estén incrementando con el tiempo de operación de la máquina, para lo que es necesario revisar qué nos muestra un espectro de vibración FFT, tomados en los puntos de medición que muestran mayor nivel de vibración. Para este caso es necesario tomar datos del espectro de vibración en dominio de frecuencia para los puntos del lado libre de la bomba.

En la figura 4.6 se observa que los picos del espectro de vibración, cuyos valores se muestran en la tabla 4.5, se presentan en las frecuencias más altas del espectro, por lo que nos indica que algún elemento mecánico presenta demasiada

holgura. Posiblemente la falla se presenta en el eje impulsor, que se trate de los anillos de desgaste de los impulsores o desgaste de los cojinetes de la bomba.

**FIGURA 4.6 ESPECTRO DE VIBRACIÓN DE LA BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA P110-PU1-001C – PUNTO RADIAL VERTICAL**



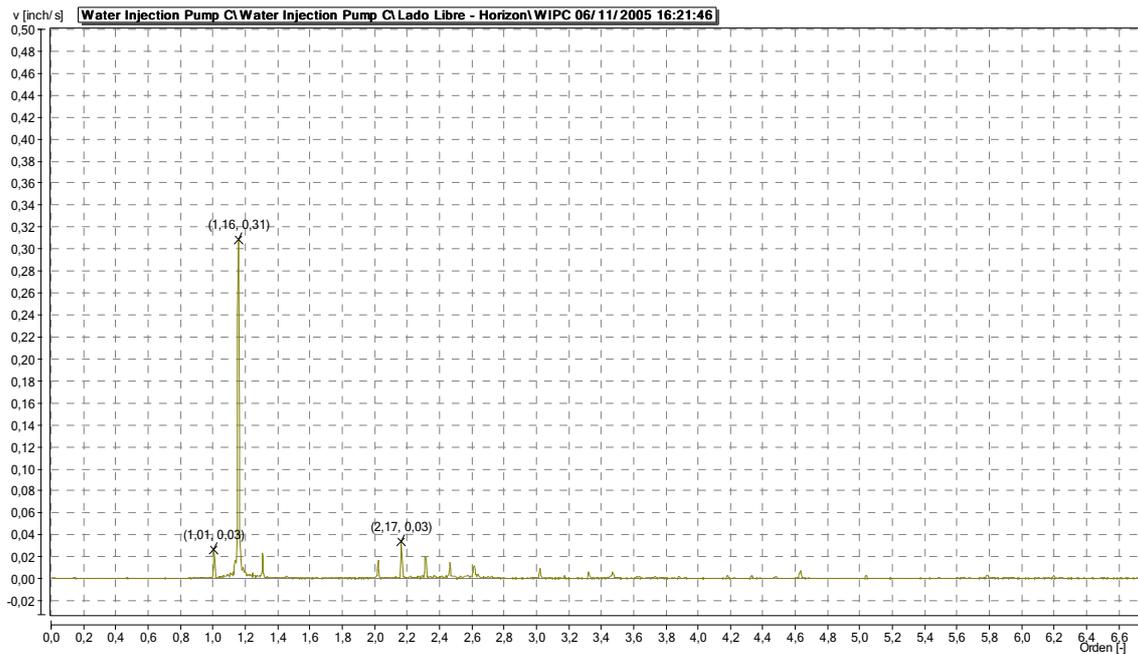
**TABLA 4.5 DIEZ VALORES MÁXIMOS DE VIBRACIÓN DEL ESPECTRO TOMADO EN EL PUNTO DEL LADO LIBRE VERTICAL DE LA BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA P110-PU1-001C**

#	Orden nX	Vel Vibr. [inch/s]
1	4,88	0,08
2	2,44	0,05
3	3,66	0,04
4	5,09	0,04
5	3,87	0,03
6	6,31	0,03
7	2,23	0,03
8	5,89	0,02
9	6,10	0,02
10	4,66	0,02

Fuente: Base datos – Software Omnitrend

La figura 4.7 muestra el espectro de vibración tomado en el lado libre radial horizontal de la bomba de inyección de agua.

#### FIGURA 4.7 ESPECTRO DE VIBRACIÓN DE LA BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA P110-PU1-001C – PUNTO RADIAL HORIZONTAL



**TABLA 4.6 DIEZ VALORES MÁXIMOS DE VIBRACIÓN DEL ESPECTRO TOMADO EN EL LADO LIBRE RADIAL HORIZONTAL DE LA BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA P110-PU1-001C**

#	Orden nX	Vel Vibr. [inch/s]
1	1,16	0,31
2	2,17	0,03
3	1,01	0,03
4	1,31	0,02
5	2,31	0,02
6	2,02	0,02
7	1,14	0,02
8	2,46	0,01
9	2,62	0,01
10	1,19	0,01

Fuente: Base datos – Software Omnitrend

#### **4.1.1 DIAGNÓSTICO DE LOS DATOS OBTENIDOS DE LA BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA P110-PU1-001C**

En la bomba de inyección de agua de formación, el espectro de frecuencia tomado tanto en dirección radial vertical, así como el horizontal, no presentan sus valores máximos de velocidad de vibración en el orden de frecuencia armónicas de la bomba (1x, 2x, 3x,...etc.), sino dentro de subarmónicas y/o en múltiplos armónicos fraccionarios de alta frecuencia, lo cual es un índice típico para holguras en ejes de máquinas rotativas. Además algunos autores consideran que los picos de vibración mostrados en el espectro en altas frecuencias, también es característico para una bomba que presenta cavitación en su interior.

En resumen es necesario el cambio del conjunto eje impulsor, cojinete central, rodamientos del lado libre y lado acople.

En conclusión, de lo expuesto en este caso, se puede mencionar que las causas o las fuentes de mantener alta vibración en la bomba son:

1. Holgura mecánica entre eje impulsor y cojinete central.
2. Desbalance hidráulico entre cámara de alta presión y cámara de baja presión en la bomba.
3. Leve cavitación en la bomba.

Una vez que se ha determina la causa para que se originen altas vibraciones en la bomba, se notifica al Supervisor de Mantenimiento, para que se pueda planificar una parada del equipo y poder realizar las correcciones respectivas en la máquina antes de que puedan fallar otros elementos mecánicos principales para la operación normal de la bomba.

Cuando la orden de trabajo fue planificada y aprobada, verificando la existencia de los repuestos necesarios para la reparación de la bomba según el diagnóstico dado por el análisis del espectro de vibración en frecuencia (FFT), se procede a desmontar la carcasa superior de la bomba mostrada en la figura 4.8, para

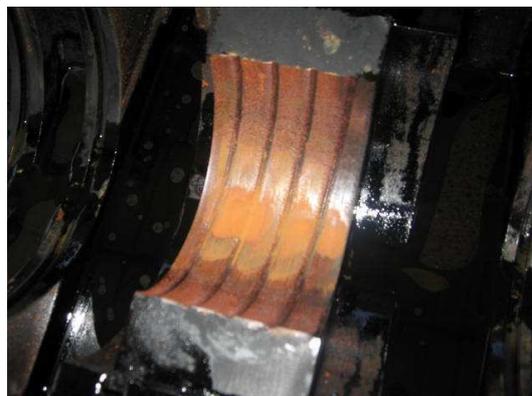
realizar un inspección preliminar de los elementos que posiblemente son los causantes de alta vibración en la bomba.

**FIGURA 4.8 BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN P110-PU1-001C – DESMONTAJE DE CARCASA SUPERIOR**

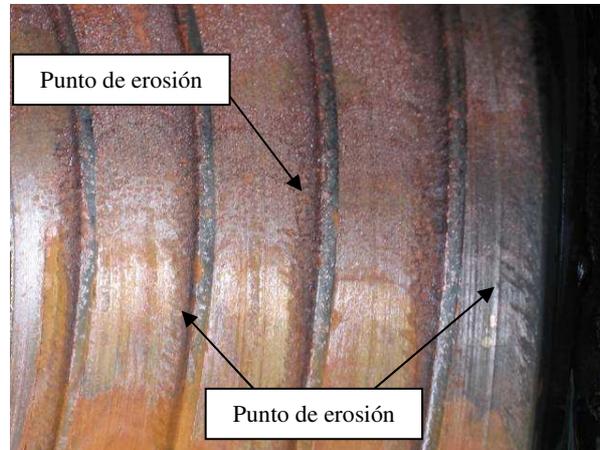


La inspección preliminar muestra lo que anteriormente se diagnosticó; el cojinete central se encuentra desgastado, como se puede observar en la figura 4.9, además, debido al desgaste de este cojinete, el fluido (agua de formación) empezó erosionar los canales de lubricación del cojinete (figura 4.10), causando además un desbalance hidráulico en la bomba, ya que el fluido empezó a circular desde la cámara de etapa de alta presión hacia la cámara de baja presión, a través de estos pequeños conductos.

**FIGURA 4.9 COJINETE CENTRAL EN MAL ESTADO – BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA P110-PU1-001C**



**FIGURA 4.10 PUNTOS DE EROSIÓN EN COJINETE CENTRAL – BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA P110-PU1-001C**



En la figura 4.11 se puede observar la comparación entre un cojinete en buen estado y el cojinete con el que se encontraba operando la bomba.

**FIGURA 4.11 COJINETES CENTRALES DE BOMBA DE INYECCIÓN P110-PU1-001C**



Sacados de operación (izquierda), nuevos para reposición (derecha)

Debido al desgaste en los cojinetes, existía una holgura mecánica entre el eje y el cojinete, lo que también influyó para que el asiento del cojinete en la carcasa sufra daños y se erosione de igual manera que los cojinetes, esto se puede observar en la figura 4.12.

#### **FIGURA 4.12 ASIENTO DE COJINETE CENTRAL EN LA CARCASA DE LA BOMBA**



Con todos estos antecedentes, es necesario revisar el conjunto impulsor (eje-impulsores), los cuales presentan daños en algunos de sus componentes: álabes de impulsores, collarín, etc. Uno de estos daños se ilustra claramente en la figura 4.13.

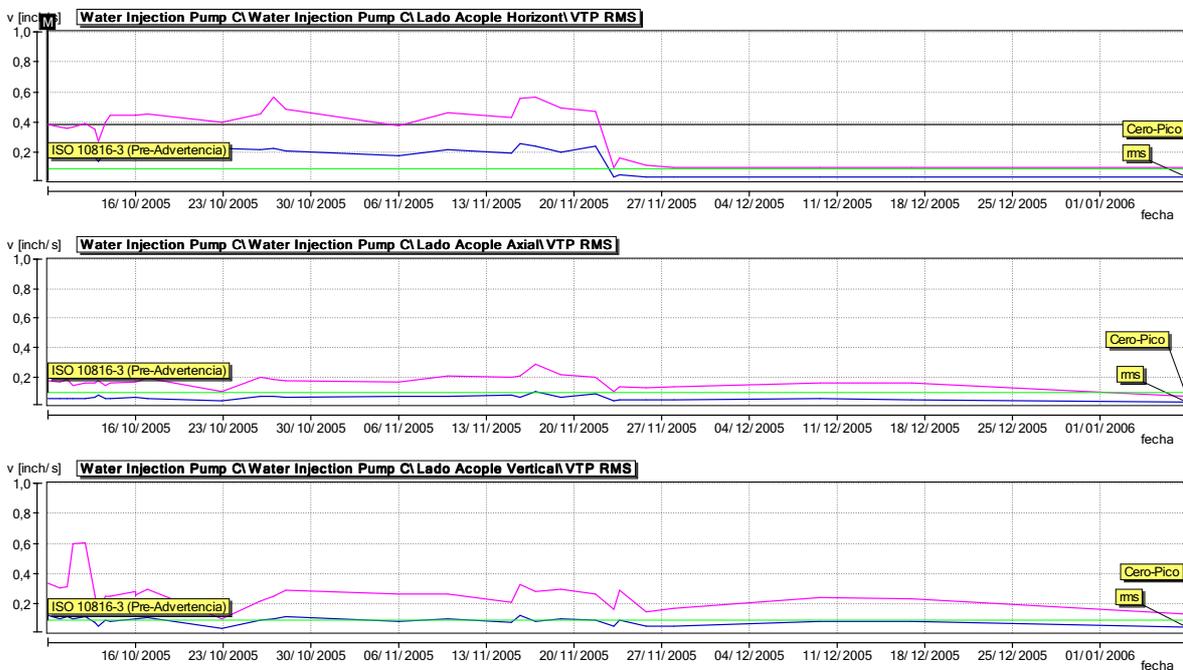
#### **FIGURA 4.13 COLLARÍN DEL CONJUNTO EJE IMPULSOR**



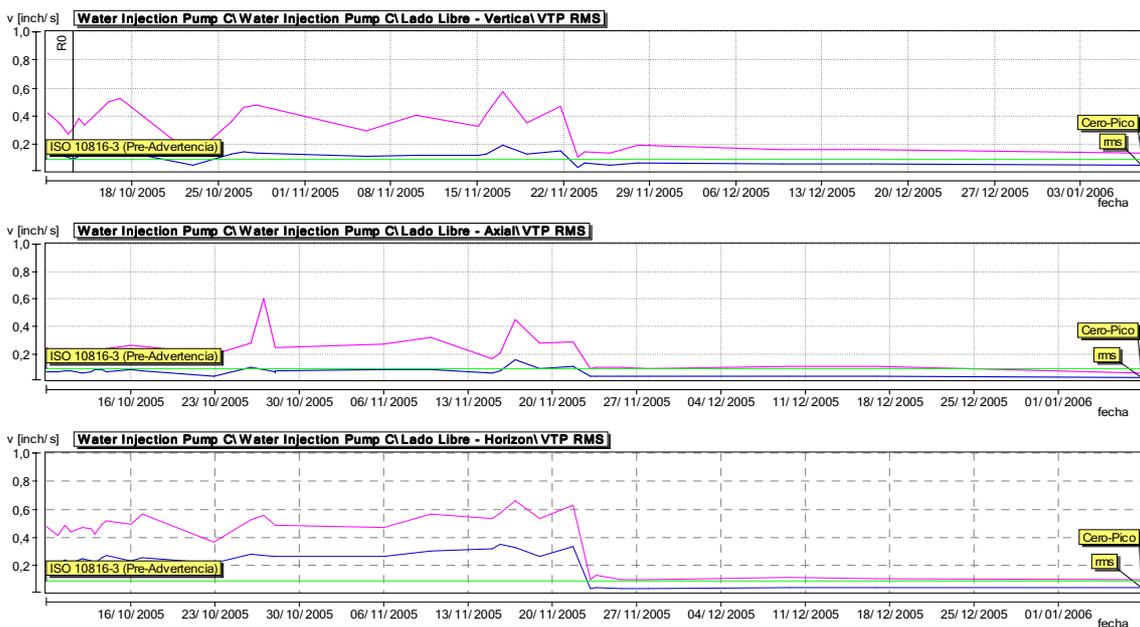
Luego de la reparación, es necesario monitorear la máquina para asegurar de que la reparación produjo los resultados esperados.

Se puede observar en la figura 4.14 y 4.15, como los valores de velocidad de vibración de la bomba disminuyen y se mantienen constantes en todos los puntos de medición, después de la reparación realizada.

**FIGURA 4.14 TENDENCIA DE VELOCIDAD DE VIBRACIÓN LUEGO DE REPARACIÓN DE BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN P110-PU1-001C- LADO ACOPLE**



**FIGURA 4.15 TENDENCIA DE VELOCIDAD DE VIBRACIÓN LUEGO DE REPARACIÓN DE BOMBA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN P110-PU1-001C – LADO LIBRE**



Los registros de los trabajos realizados en la bomba de inyección de agua se muestran en el Anexo No 9, los mismos que se encuentran almacenados en la base de datos de MAXIMO así como en la base de datos de Omnitrend.

#### 4.2. CASO BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B

La bomba “booster” de crudo cumple la función de extraer el crudo ya procesado que se encuentra almacenado en los tanques y de elevar la presión para la succión de las bombas Shipping A/B que enviarán el crudo hacia la estación de transferencia en Baeza.

Se dispone de 4 máquinas o bombas de las cuales, el proceso de envío de crudo necesita que solamente se encuentren en operación 3 de las bombas, manteniéndose una de ellas en espera (stand by) para la inmediata reposición en el caso de que una de estas se averíe o falle. La figura 4.16 muestra la bomba “booster” de crudo CF10-PU1-001B.

**FIGURA 4.16 BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B**



Fuente: [www.moyno.com](http://www.moyno.com)

Todas las bombas son del tipo horizontales de tornillo sin fin y de similares características dimensionales así como operacionales, siendo estas las que se muestran en la tabla 4.7. Mayor información de la bomba “booster” se muestra en el Anexo No 10.

**TABLA 4.7 ESPECIFICACIONES DE LA BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B**

<b>Motor eléctrico</b>	
<b>Marca:</b>	Reliance Electric
<b>Tipo:</b>	Eléctrico / 3 Fases
<b>Potencia:</b>	50 HP / 37.29 kW
<b>V:</b>	230 / 460 V
<b>A:</b>	117 / 58.8 A
<b>N:</b>	1775 rpm
<b>Reductor de velocidad</b>	
<b>Marca:</b>	Dodge MAXUM
<b>Serie:</b>	DCR4
<b>Input rpm:</b>	1775
<b>Output rpm:</b>	424
<b>Bomba horizontal</b>	
<b>Marca:</b>	MOYNO Pumps.
<b>Tipo:</b>	Progressive Cavity Pump.
<b>BHP:</b>	200 HP / 150 kW
<b>Fluido de trabajo:</b>	Crudo
<b>Presión Descarga:</b>	115 psi
<b>Presión Succión:</b>	5 psi
<b>Caudal:</b>	875 GPM
<b>Tag:</b>	CF10-PU1-001B
<b>Prioridad:</b>	A

Fuente: Catálogo Moyno 2000.

Los niveles de vibración, en los que se considera que el equipo esta operando dentro de los parámetros indicados por la norma ISO 10816-3 son los que se muestra en la tabla 4.8, tanto para la bomba horizontal de tornillo, así como para el motor eléctrico los cuales están clasificados dentro de la norma como parte del Grupo 2 de máquinas.

**TABLA 4.8 NIVELES DE VIBRACIÓN PARA BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B**

Equipo	Vibración operación RMS [ inch/s]	Rango Preadvertencia RMS [inch/s]	Rango Advertencia RMS [inch/s]	Rango Alarma RMS [inch/s]
Bomba	0.01 – 0.06	0.06 – 0.11	0.11-0.18	> 0.19
Motor eléctrico	0.01 – 0.06	0.06 – 0.11	0.11-0.18	> 0.19

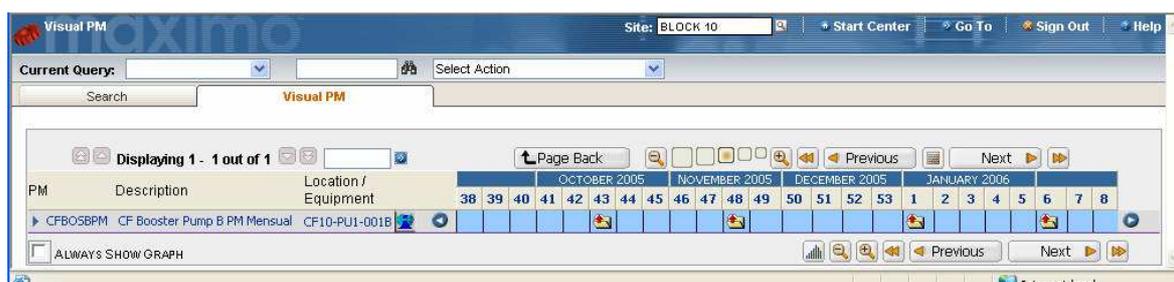
Basado en norma ISO 10816-3

Es importante recalcar que esta bomba ha venido presentando una respuesta totalmente diferente a las demás bombas, ya que la misma opera con niveles altos de vibración, lo que causa que muchas de la veces permanezca fuera de línea de operación.

De acuerdo con el cronograma de mantenimiento preventivo-predictivo, a este equipo se realiza mantenimientos preventivos con una frecuencia de 1 mes, en el que, dentro de las actividades que especifica el plan de trabajo, se debe efectuar un monitoreo de los parámetros de vibración de todo el tren de la máquina, en la que consta: la bomba horizontal de tornillo, la caja de rodamientos, el reductor de velocidad y el motor eléctrico.

La figura 4.17 muestra el cronograma de los mantenimientos preventivos-predictivos planificados para la bomba “booster” de crudo.

**FIGURA 4.17 CRONOGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO-PREDICTIVO PARA LA BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B**



Fuente: Aplicación Visual PM – Software MAXIMO

El plan de trabajo para el mantenimiento mensual de la bomba “booster” en su mayoría de actividades consta de inspecciones de los parámetros de funcionamiento de la máquina y también de limpieza del filtro (strainer) de la succión que es el que evita que objetos extraños ingresen a la bomba. Lo mencionado se muestra en la tabla 4.9.

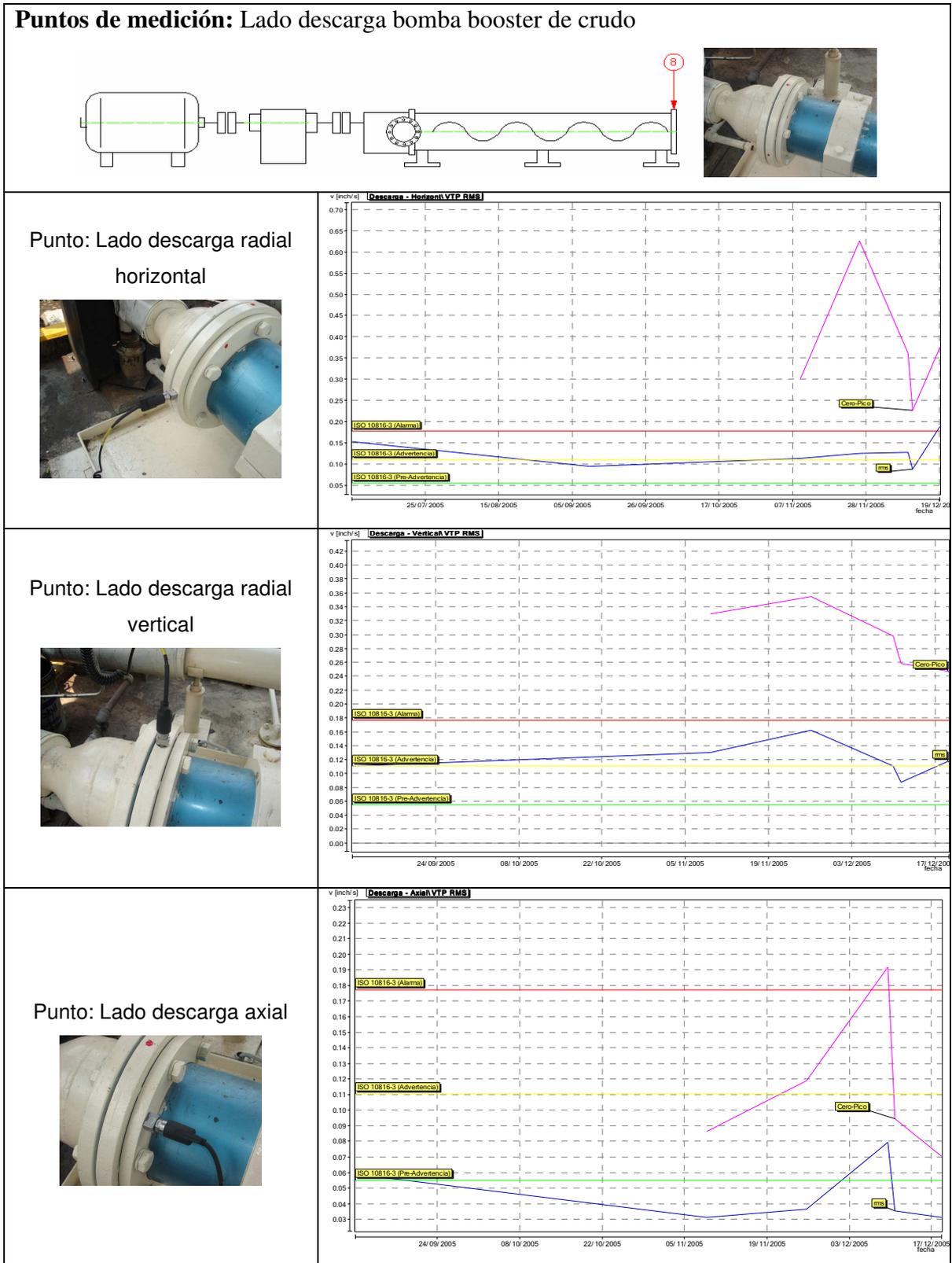
**TABLA 4.9 PLAN DE TRABAJO MENSUAL PARA LA BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B**

Task ID	DESCRIPTION (Descripción)
10	Get the unit work permit ( <i>Obtener permiso de trabajo</i> )
20	Seal Monitoring. There should be no leakage ( <i>Monitoreo sello. No debe haber fugas</i> )
30	Discharge pressure monitoring ( <i>Monitoreo presión de descarga</i> )
40	Temperature monitoring ( <i>Monitoreo de temperaturas</i> )
60	Look for unusual noise or vibration ( <i>Inspeccionar por ruidos inusuales o vibración</i> )
70	Vibration analysis. Take vibration measurements ( <i>Análisis de vibración. Tomar lecturas de vibración</i> )
80	Check oil level. Complete if necessary (Gear box) ( <i>Verificar nivel de aceite en caja reductora, completar si es necesario</i> )
90	Inspect pump and piping for leaks ( <i>Inspeccionar fugas en la bomba y tubería</i> )
100	Seal Flush: check the line temp.for normal work ( <i>Enjuague de sello: Chequeo de temperatura de trabajo de las líneas del sello</i> )
110	Clean suction strainer ( <i>Limpieza del filtro de succión</i> )
120	Close the work permit and notify the operator ( <i>Cerrar permiso de trabajo y notificar a Operador</i> )
130	Report of work ( <i>Reporte de trabajo</i> )

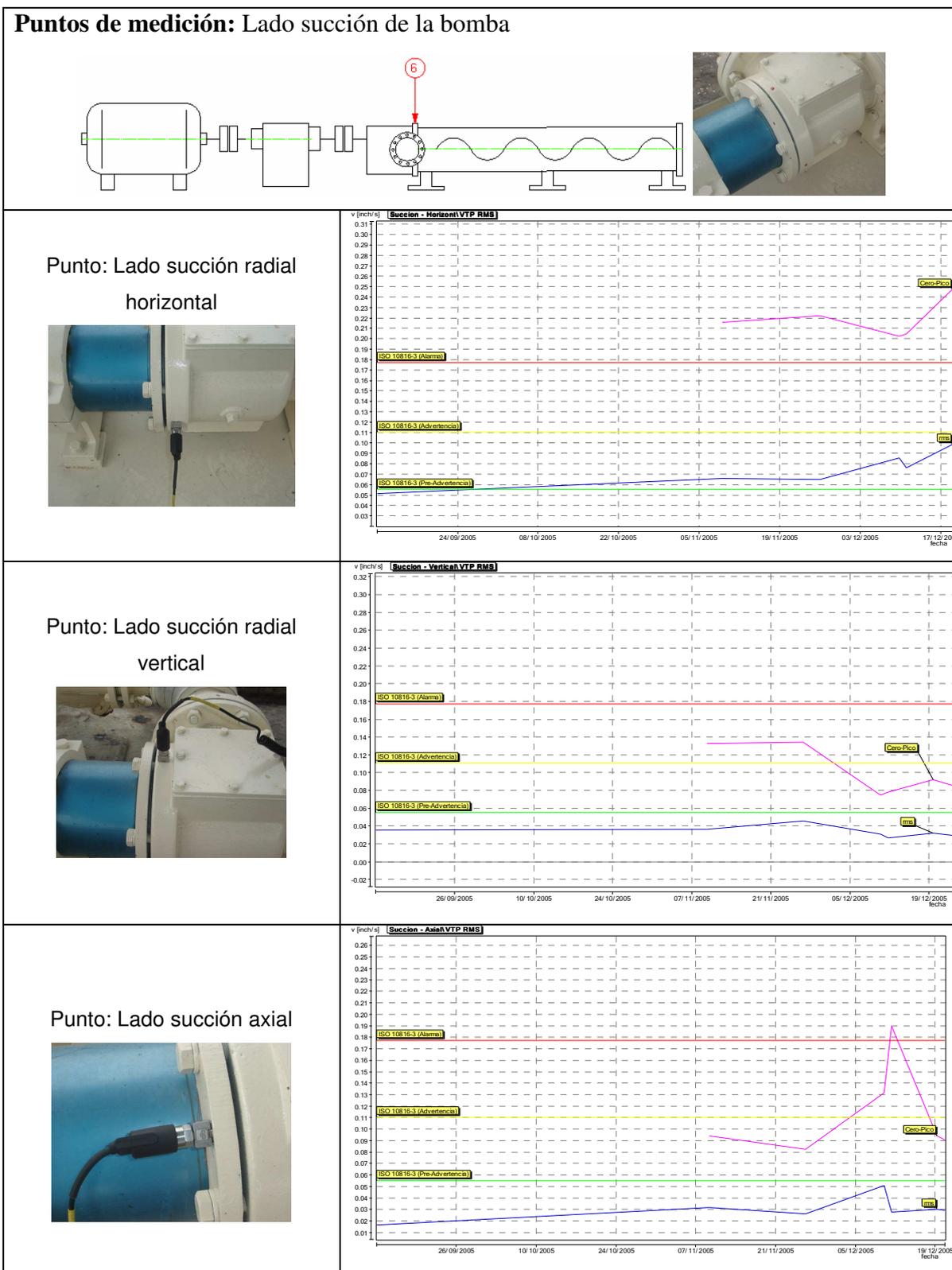
Fuente: Aplicación Planes de trabajo-Software MAXIMO 5.2

La recolección de datos de vibración de la bomba, permite realizar un análisis de la tendencia de este parámetro de esta bomba y conocer en que niveles se encuentra operando, obteniéndose los siguientes resultados mostrados en la figura 4.18 y 4.19.

**FIGURA 4.18 TENDENCIAS DE VIBRACIÓN: LADO DESCARGA DE LA BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B**

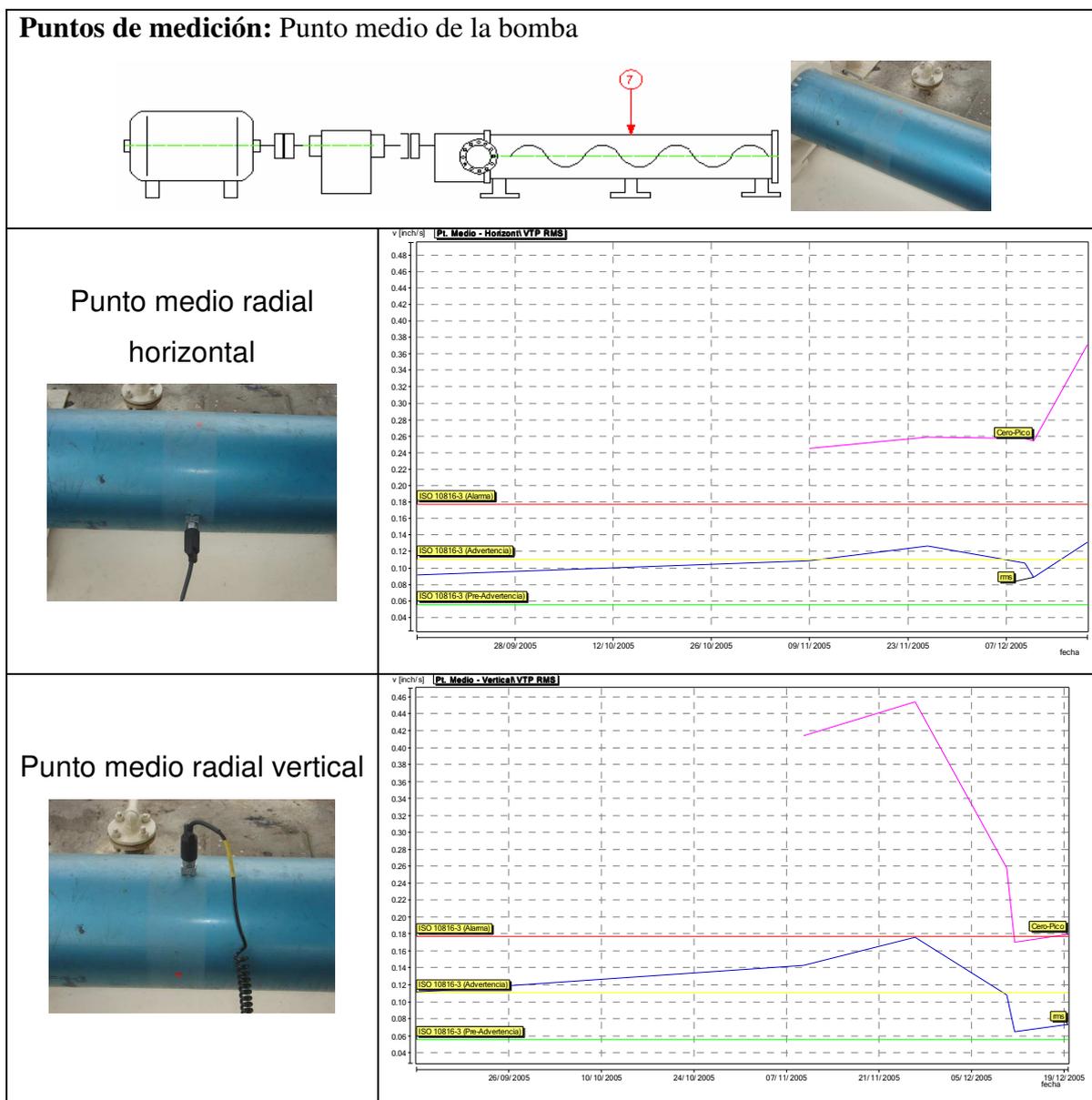


**FIGURA 4.19 TENDENCIAS DE VIBRACIÓN: LADO SUCCIÓN DE LA BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B**



Las figuras 4.18 y 4.19 nos muestran las tendencias de vibración en los extremos de la bomba, tanto de succión como de descarga, notándose un incremento de vibraciones sobre todo en el lado de descarga radial horizontal. Es importante mencionar también que este aumento del nivel de vibración en la bomba incrementó el ruido de operación de la bomba, lo cual se podía notar en el momento del monitoreo, este es otro índice de que la bomba estaría a punto de colapsar.

**FIGURA 4.20 TENDENCIAS DE VIBRACIÓN: PUNTO MEDIO DE LA BOMBA “BOOSTER” CF10-PU1-001B**



En la figura 4.20 se puede notar que en el punto medio vertical se detectó anteriormente un punto de vibración, por lo que posiblemente en ese punto ya existió un desprendimiento de material del estator de la bomba.

Se puede notar de igual manera que la bomba se encuentra operando sobre los niveles de alarma de advertencia en los puntos medio y de descarga, por algún tiempo considerable, esto se muestra en la tabla 4.10, que son los valores de vibración medidos en los puntos radiales horizontales de la descarga y punto medio.

**TABLA 4.10 VALORES DE VIBRACIÓN TOMADOS EN LA BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B**

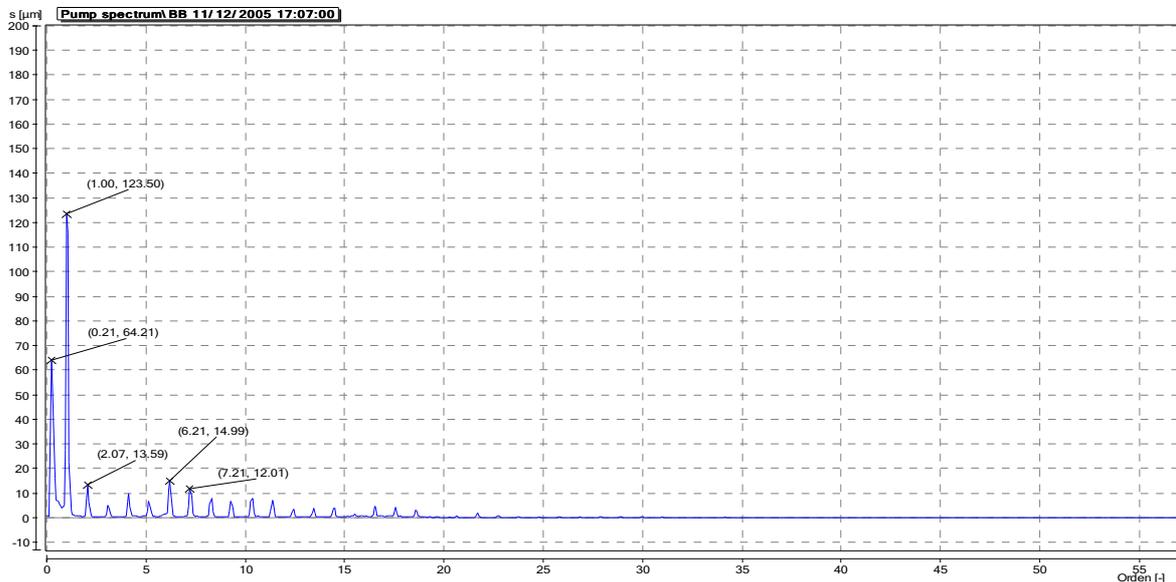
Fecha	Hora	Descarga radial horizontal		Punto medio horizontal		Nivel
		Cero-Pico [inch/s]	RMS [inch/s]	Cero-Pico [inch/s]	RMS [inch/s]	
02/07/2005	14:00:00	—	0.15	—	0.13	Orange
10/09/2005	8:00:00	—	0.09	—	0.09	Yellow
09/11/2005	16:48:18	0.30	0.11	0.25	0.11	Orange
26/11/2005	15:44:02	0.63	0.12	0.26	0.13	
10/12/2005	11:35:24	0.36	0.13	0.26	0.11	
11/12/2005	16:51:38	0.23	0.09	0.25	0.09	Yellow
19/12/2005	16:10:00	0.38	0.19	0.37	0.13	Red

Fuente: Base de datos-Software Omnitrend

En vista de los resultados reflejados en las tendencias de vibración, es necesario tomar datos de los espectros de vibración de la bomba para diagnosticar la causa de la falla de la bomba, ya cuando se realizó la última medición de vibración, la bomba ya no elevaba presión.

En la figura 4.21 se muestra el espectro de vibración de la bomba, éste está tomado los valores de amplitud de vibración en desplazamiento, debido a que esta bomba opera a baja revoluciones.

**FIGURA 4.21 ESPECTRO DE VIBRACIÓN DE LA BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B**



En la tabla 4.11 se puede observar los diez valores más altos en el espectro de vibración tomado en el lado de la descarga horizontal de la bomba “booster” de crudo.

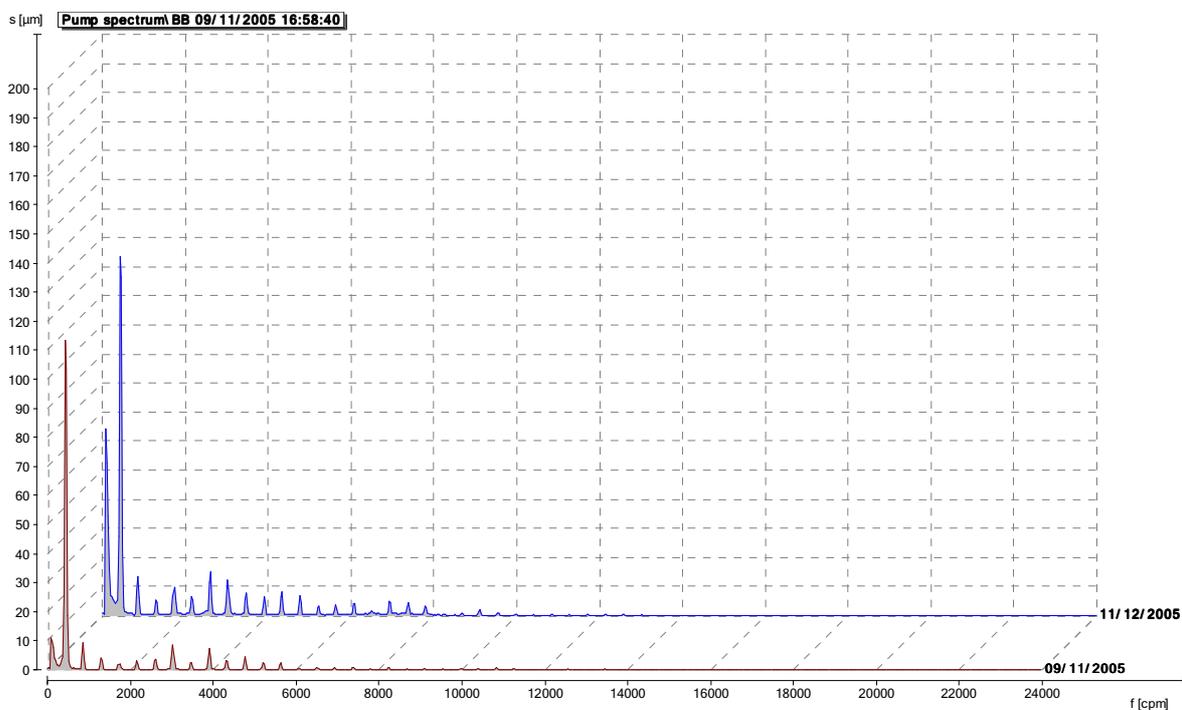
**TABLA 4.11 DIEZ VALORES MÁXIMOS DE AMPLITUD DE VIBRACIÓN PARA LA BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B – LADO DESCARGA HORIZONTAL**

#	Orden nX	Vel. Vib [inch/s]
1	1	123.50
2	0.21	64.21
3	6.21	14.99
4	2.07	13.59
5	7.21	12.01
6	4.14	9.86
7	10.36	8.10
8	8.29	7.83
9	11.36	7.01
10	5.14	6.70

Fuente: Base de datos-Software Omnitrend

En la figura 4.22 se puede observar el espectro de vibración de la bomba tomado un mes atrás y el espectro de vibración de la bomba cuando ya falló, los mismos que fueron tomados sobre el mismo punto que presenta alta vibración en el análisis de tendencias registrado para este equipo, de ahí la importancia de tener registros de espectros de vibración en condiciones normales operativas de las máquinas.

**FIGURA 4.22 ESPECTRO DE VIBRACIÓN DE LA BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B – DATOS COMPARATIVOS**



Espectro color rojo tomado el 9/11/05 y espectro color azul tomado el día de fallo de la bomba.

#### 4.2.1 DIAGNÓSTICO DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LA BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B

De acuerdo a los datos obtenidos en el espectro de vibración realizado el 9 de noviembre, la bomba presenta un pico máximo en el orden 1X, lo que da a

entender que se encuentra frente a un caso con síntoma característico de desbalance del rotor de la bomba.

Si se observa en la figura 4.16, se puede distinguir que el rotor de esta bomba está constituido por acero inoxidable, el cual gira sobre un estator polimérico por lo que se descarta que el rotor de la bomba sufra algún desbalance, que sea el causante de la alta vibración en la bomba.

Por otro lado se puede determinar que el rotor de la bomba tiene un solo punto de apoyo en el extremo de la succión de la bomba, el resto del rotor se asienta sobre el estator polimérico, por lo que la excentricidad de este rotor va a producir que la bomba presente en su espectro de vibración un pico en 1X, o sea, a la velocidad de giro de la bomba.

Es interesante observar en este espectro también, los picos que presenta las armónicas de vibración 2X, 3X, 4X, etc., que son producto de los pulsos del movimiento relativo del rotor con el estator.

El mismo espectro tomado el 9 de noviembre también revela un pico subsincrónico a 0.21X, que nos indica que existe una fuente externa de vibración, el cual hace que nuestro sistema entre en resonancia, aumentando los niveles de vibración de esta bomba.

En el lapso de un mes la bomba falla y deja de elevar presión; los niveles de vibración superan los límites establecidos por la norma ISO 10816-3 y el espectro de vibración muestra un incremento equitativo en los picos 1X, 2X, 3X, etc., de manera que se diagnostica que el estator polimérico está completamente averiado y ya no cumple con su función, no obstante se observa que en el punto 0.21X el nivel pico se incrementa abruptamente, lo cual indica que es importante encontrar esta fuente de vibración.

En conclusión, el diagnóstico de falla de la bomba “booster” de crudo, se tienen las siguientes causas:

1. Altos niveles de vibración de operación de la bomba producida por resonancia del sistema estructural, ya que se pudo verificar que las fundaciones donde está asentada esta bomba son defectuosas.
2. Aumento de cavidades del estator producto del desprendimiento del material polimérico.

Una vez que se ha notificado acerca de este problema al Supervisor de Mantenimiento y que se ha generado la orden de trabajo respectiva, se debe proceder a cambiar el estator de la bomba.

Para comprobar el diagnóstico de falla del estator de la bomba “booster” de crudo, se procede con la apertura del mismo para comprobar qué tan grave fue el daño. Esto se puede observar en la figura 4.23, como claramente se observa el desprendimiento de secciones de material polimérico, lo cual produce que la presión de la bomba disminuya.

**FIGURA 4.23 ESTATOR POLIMÉRICO AVERIADO DE LA BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B**



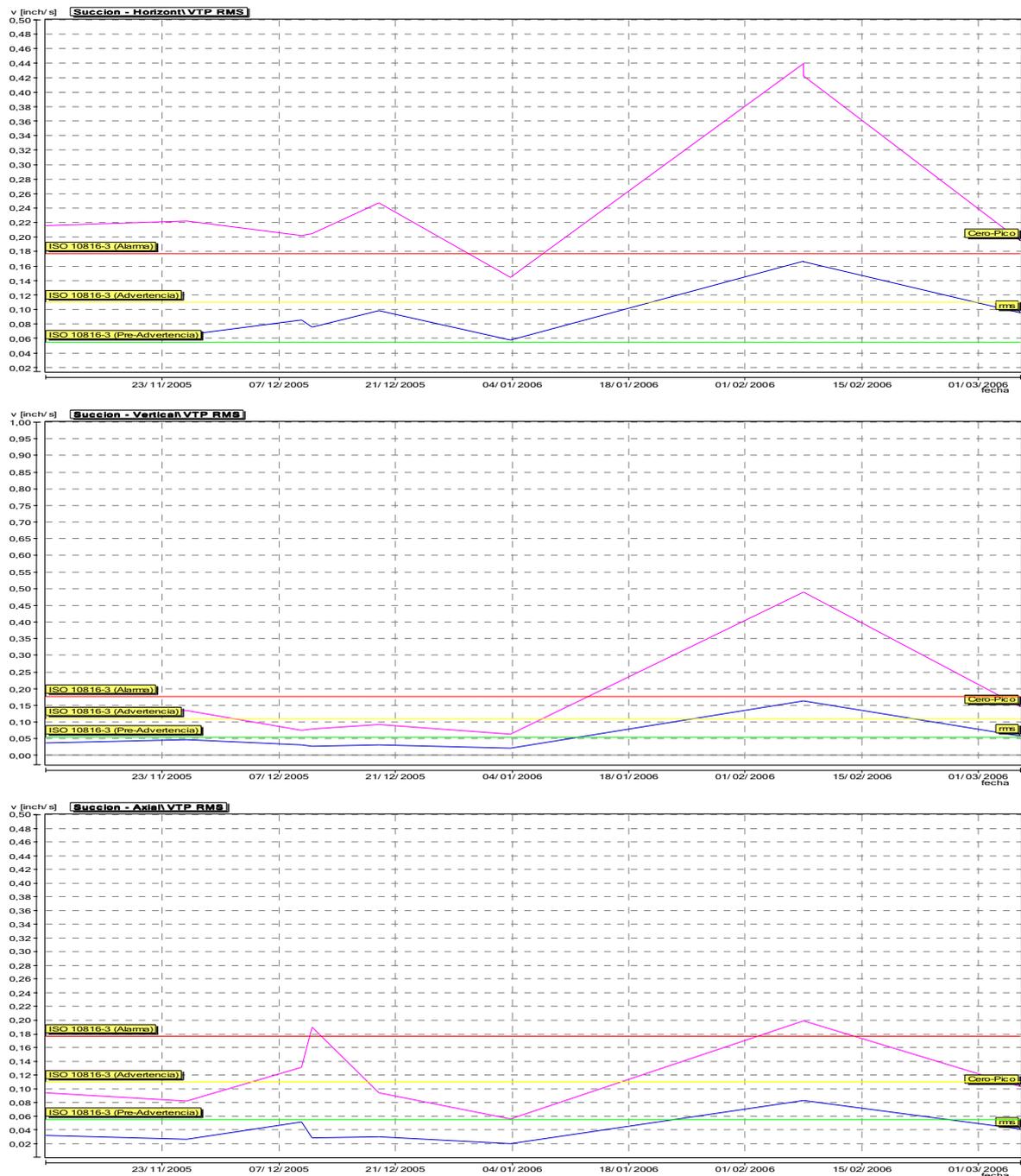
Los daños del estator polimérico se observan principalmente en el extremo de la descarga, ya que esta sección se encuentra sometida a mayores esfuerzos de fatiga.

Una vez que se ha realizado el cambio del estator y verificado la alineación de la misma, es necesario monitorear el nivel de vibración de la bomba comprobar cuales son los resultados obtenidos. En las figuras 4.24 y 4.25 se observa el comportamiento de la bomba luego que fue reparada.

**FIGURA 4.24 TENDENCIA DE VELOCIDAD DE VIBRACIÓN LUEGO DEL CAMBIO DEL ESTATOR DE LA BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B – LADO DESCARGA**



**FIGURA 4.25 TENDENCIA DE VELOCIDAD DE VIBRACIÓN LUEGO DE CAMBIO DE ESTATOR DE LA BOMBA “BOOSTER” DE CRUDO CF10-PU1-001B – LADO SUCCIÓN**



Como se observa en las figuras 4.24 y 4.25, el nivel de vibración y el ruido disminuye con el cambio del estator, pero aún así no se mantiene bajo los niveles aceptables establecidos, por lo que se compara con las otras bombas de las

mismas características físicas y de operación, comprobándose que efectivamente que las otras bombas trabajan sobre los niveles permitidos.

Se recomienda que se busque lo más pronto posible la manera de aislar la fuente de vibración que causa resonancia en el sistema, para evitar el cambio del estator muy frecuentemente.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Una vez establecida la manera con la que se llevará a cabo el Mantenimiento Predictivo por análisis de vibraciones en la estación CPF de Agip Oil Ecuador y encontrándose el presente proyecto en pleno desarrollo, es necesario tener una visión de los resultados del trabajo realizado, para que los técnicos involucrados sigan capacitándose y adquiriendo mayor destreza con esta técnica de mantenimiento.

#### **5.1 CONCLUSIONES**

Como conclusiones del presente proyecto tenemos los siguientes puntos:

- El mantenimiento Predictivo por análisis de vibraciones permite inspeccionar equipos en intervalos regulares y tomar acciones para prevenir las fallas o evitar las consecuencias de las mismas.
- Hoy en día la utilización de programas informáticos dentro de la planificación del mantenimiento de una planta, permiten tener un acceso más rápido a los historiales de un equipo. En el caso de Agip Oil Ecuador B.V. el uso de los programas MAXIMO y OMNITREND como complemento el uno del otro, permiten que los técnicos tengan acceso a una mejor información de los registros históricos de los equipos.
- La evaluación de prioridades realizada a los equipos del proceso de separación de crudo permite que el técnico analista tenga presente el nivel crítico del equipo que se está analizando. Para el caso del programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones aplicado a la empresa

Agip Oil Ecuador, los equipos catalogados como prioridad A+, son aquellos en que se deben tener especial cuidado cuando se realice un análisis de diagnóstico de falla.

- El análisis de las tendencias de vibración en los equipos monitoreados, además de permitir establecer a futuro las posibles fallas de una determinada máquina, son un indicativo para poder tener una flexibilidad en la programación de mantenimiento preventivo, ya que si una máquina está operando bajo los niveles establecidos de funcionamiento normal, la planificación del mantenimiento preventivo puede esperar y viceversa.
- Las tendencias de vibración que se mostró como resultado de la aplicación del programa de mantenimiento predictivo en la bomba de inyección de agua de formación P110-PU1-001C, permitió tomar acciones correctivas a tiempo y correctamente planificadas, lo cual indica que el objetivo que persigue el mantenimiento predictivo es válido para la técnica de monitoreo de las vibraciones.
- Para el caso de la bomba “booster” de crudo CF10-PU1-001B, la aplicación del programa de mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones tiene un delineamiento diferente al del caso anterior, ya que el monitoreo de la vibración indicó niveles altos, sobrepasando los niveles de alarma, lo cual indica que existió alguna anomalía en la bomba, pero la bomba seguía operando dentro de sus parámetros de operación normales. En este punto los niveles de vibración de la bomba disminuyen y se mantienen en el rango de advertencia, por lo que se decidió mantener operando a la bomba hasta que falle, ya que lo único que se puede predecir para este equipo es el tiempo aproximado de vida útil para el estator de la bomba, cualquier otra acción correctiva no impediría el fallo de la bomba “booster”.
- El buen conocimiento y el correcto manejo de las técnicas y métodos del análisis de vibraciones como parte del Mantenimiento Predictivo, permite explotar de manera eficiente y confiable este tipo de mantenimiento como

parte de la organización y planificación de las actividades diarias del Departamento de Mantenimiento de Agip Oil Ecuador B.V.

- Para el correcto monitoreo de los niveles de vibración no es suficiente tener un solo tipo de dispositivo de medición, por lo que se puede mencionar como un alcance más de este proyecto, la adquisición del equipo Colector / Analizador de vibraciones Vibscanner, el cual permitió diagnosticar fallas sobre equipos críticos, tales como la bomba de inyección de agua de formación, sin tener la necesidad de acudir a la contratación de empresas externas.
- La aplicación de las normas ISO 10816 para la evaluación de la severidad de vibración, establecen parámetros y técnicas adaptables a la mayor parte de equipos que intervienen en el proceso de separación de crudo, lo cual permite que las instalaciones de Agip Oil Ecuador B.V. mantengan altos estándares de calidad en la industria ecuatoriana.
- El análisis de los espectros de vibración, tanto en desplazamiento, velocidad y aceleración, tomados a los equipos con niveles de vibración altos, permiten que los técnicos que van a realizar una reparación estén listos y tengan presente el tipo de trabajo que van a realizar, reduciendo así los tiempos de inspección de la falla.
- Los picos característicos que presenta un espectro de vibración dan una guía muy aproximada a los factores y fuentes que influyen en el aumento de las vibraciones de una máquina, por lo que a continuación se presenta la tabla 5.1 como un resumen de éstas a manera de guía rápida de diagnóstico.



## 5.2 RECOMENDACIONES

- La información técnica y operativa de los equipos que se encuentran bajo el monitoreo de vibraciones es un factor importante para el correcto análisis de una falla por vibración. En lo posible se debe disponer de los catálogos de los equipos, planos esquemáticos, planos constitutivos o de componentes, parámetros de operación al momento del análisis, en sí, todo lo que pueda dar al técnico analista una mejor visión del equipo en estudio.
- Para obtener mejores resultados, el técnico que inspeccione los equipos, deberá seguir las rutas establecidas sobre los puntos marcados sobre cada máquina con la finalidad de que se pueda evaluar valores de vibración en puntos similares.
- La seguridad del operador cuenta sobre cualquier otro aspecto, por lo que se recomienda seguir las recomendaciones realizadas en el capítulo 3 cuando se esté monitoreando los equipos en operación normal.
- La experiencia para el análisis de los espectros de vibración, juegan un papel importante para el diagnóstico de fallas, por lo que es recomendable que el técnico analista se entrene y adquiera estas habilidades tomando datos de espectros en cualquier equipo, sin que necesariamente esté con niveles altos de severidad de vibración.
- Los resultados del monitoreo de las vibraciones demuestran que el mantenimiento predictivo es importante para la conservación de los activos de una empresa, en este caso Agip Oil Ecuador puede adoptar este esquema de mantenimiento e implantarlo en sus otras instalaciones, como es el caso de las facilidades de Villano A – Well Site, ya que también encontramos equipos críticos en este sitio.

- Para el caso presentado de la bomba “booster” de crudo CF10-PU1-001B, es necesario buscar una solución inmediata para corregir las bases de la fundación de esta bomba, para evitar cambios periódicos del estator de la misma.
- El servicio técnico adicional que proporciona Prüftechnik, fabricante del dispositivo Vibscanner, mediante su página web, proporciona consejos prácticos aplicados a la medición de vibraciones y a la interpretación de los espectros de vibración. En el Anexo No 11 se presentan algunas publicaciones que son aplicables al programa de Mantenimiento Predictivo por análisis de vibraciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### LIBROS Y MANUALES

- AGIP OIL ECUADOR B.V. Manual de Seguridad, Salud y Protección Ambiental. Qualityprint. Quito, Ecuador. 2001.
- AVALLONE E.; T. BAUMEISTER. Manual del Ingeniero Mecánico – MARKS. Novena Edición. Mc Graw Hill. México DF, México. 1995.
- BIANCHI; FALCINELLI. Diagnóstico de Fallas mediante el Análisis de Vibraciones. Primera Edición. Nueva Librería. Buenos Aires, Argentina. 1986.
- CSI. Diagnóstico de Problemas de Vibración de Maquinaria. México. 1994.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARIZATION. International Standard ISO 10816-3: Mechanical Vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts. First edition. ISO Ginebra, Suiza. 1998.
- MRO SOFTWARE. Guía del usuario MAXIMO. U.S.A. 2002.
- PRÜFTECHNIK. Getting Started Omnitrend. Alemania. 2004.
- TAVARES, L. Administración Moderna de Mantenimiento. Edit: NAT. 1999.
- VITEC. Vibration Technology – An Introduction to Vibration Analysis. VITEC INC. Cleveland, U.S.A. 2000.

## DIRECCIONES ELECTRÓNICAS

- <http://www.a-maq.com/tutoriales.html>
- <http://www.iso.org/iso/en/ISOOnline.frontpage>
- <http://www.mantenimientomundial.com/sites/mmnew/>
- <http://www.menergia.gov.ec/secciones/ambiental/dinapaMapas.html>
- <http://www.pruftechnik.com/index .htm>
- <http://www.dim.udec.cl/lvm/>