

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS COMO BASE PARA LA EJECUCIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA LA MAQUINARIA PETROLERA (BLOQUE 15) DE OCCIDENTAL EXPLORATION & PRODUCTION COMPANY”

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

Por:

ISMAEL LEON CEDEÑO

DIRECTOR: ING. FERNANDO OLMEDO

CODIRECTOR: ING. JORGE CORREA

Sangolquí, 2006-02-22

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS COMO BASE PARA LA EJECUCIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA LA MAQUINARIA PETROLERA (BLOQUE 15) DE OCCIDENTAL EXPLORATION & PRODUCTION COMPANY” fue realizado en su totalidad por ISMAEL LEÓN CEDEÑO, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Ing. Fernando Olmedo
DIRECTOR

Ing. Jorge Correa
CODIRECTOR

Sangolquí, 2006-02-22

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

“ANÁLISIS DE VIBRACIONES MECÁNICAS COMO BASE PARA LA EJECUCIÓN DE UN PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO PARA LA MAQUINARIA PETROLERA (BLOQUE 15) DE OCCIDENTAL EXPLORATION & PRODUCTION COMPANY”

ELABORADO POR:

ISMAEL LEÓN CEDEÑO

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

EL DECANO

Sangolquí, 2006-02-22

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Certificación de la elaboración del proyecto.....	ii
Legalización del proyecto.....	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento.....	v
Índice de contenidos.....	vi
Listado de figuras.....	xi
Listado de tablas.....	xv
Listado diagramas.....	xvi
Listado de ecuaciones.....	xviii
Listado de Anexos.....	xix
Definición de variables.....	xx
Resumen.....	xxii
Prólogo.....	xxvi

CAPÍTULO 1

Introducción.

1.1 Antecedentes.....	1
1.1.1 Mantenimiento Correctivo.....	3
1.1.2 Mantenimiento Preventivo.....	3
1.1.3 Mantenimiento Predictivo.....	5
1.2 Objetivos	
1.2.1 General.....	8
1.2.2 Específicos.....	8
1.3 Justificación.....	9
1.4 Metodología a emplear.....	10

CAPITULO 2

Fundamento Teórico.

2.1 Estudio de vibraciones en condiciones normales

2.1.1 Vibración.....	12
2.1.2 Movimiento Armónico Simple.....	13
2.1.3 Amplitud.....	14
2.1.3.1 Desplazamiento.....	14
2.1.3.2 Velocidad.....	15
2.1.3.3 Aceleración.....	16
2.1.3.4 Amplitud RMS.....	18
2.1.3.5 Comparación de los parámetros de amplitud.....	19
2.1.4 Frecuencia.....	22
2.1.5 Fase.....	23
2.2 Toma de datos.....	25
2.2.1 Transductores de vibración.....	25
2.2.1.1 Sensor de no contacto.....	26
2.2.1.2 Sensor de velocidad (Sísmico).....	29
2.2.1.3 Acelerómetros.....	31
2.2.2 Selección de transductores.....	32
2.2.3 Diseño de la documentación necesaria.....	36
2.2.3.1 Conocimiento de la máquina.....	36
2.2.3.2 Configuración de la maquinaria.....	38
2.2.3.3 Recopilación de la información dinámica.....	38
2.3 Criterios y normas sobre el análisis de vibraciones.....	39
2.4 Análisis de vibraciones.....	40
2.4.1 Tendencias.....	40

2.4.1.1 El espectro de referencia.....	42
2.4.1.2 Firmas de vibración promedias.....	43
2.4.1.3 Frecuencias forzadas.....	43
2.4.2 Análisis de la gravedad de los cambios de condición.....	45
2.4.3 Diagnostico de problemas.....	45
2.4.3.1 Desalineación.....	48
2.4.3.1.1 Desalineación paralela.....	49
2.4.3.1.2 Desalineación angular.....	50
2.4.3.2 Desbalanceo.....	52
2.4.3.2.1 Desbalanceo estático.....	53
2.4.3.2.2 Desbalanceo dinámico.....	54
2.4.3.2.3 Rotor colgante.....	54
2.4.3.2.4 Excentricidad.....	55
2.4.3.2.5 Pandeo del eje.....	55
2.4.3.3 Aflojamiento mecánico.....	56
2.4.3.3.1 Soltura estructural.....	56
2.4.3.3.2 Soltura en pedestales o chumaceras.....	57
2.4.3.3.3 Soltura de eje o componentes asociados.....	58
2.4.3.3.4 Soft foot.....	59
2.4.3.4 Fallas en rodamientos.....	60
2.4.3.5 Fallas en chumaceras.....	65
2.4.3.5.1 Remolino de aceite.....	66
2.4.3.5.2 Latigazo de aceite.....	66
2.4.3.6 Fallas en engranes.....	67
2.4.3.6.1 Desgaste de dientes.....	70
2.4.3.6.2 Carga excesiva.....	71

2.4.3.6.3 Ajuste entre dientes inadecuado.....	72
2.4.3.6.4 Dientes con problemas de manufactura.....	73
2.4.3.6.5 Desalineación entre piñones.....	74
2.4.3.7 Fallas en bandas y poleas.....	75
2.4.3.7.1 Bandas mal emparejadas.....	76
2.4.3.7.2 Poleas excéntricas.....	77
2.4.3.7.3 Desalineación entre poleas.....	78
2.4.3.7.4 Resonancia de banda.....	78
2.4.3.8 Fallas eléctricas.....	79
2.4.3.8.1 Entrehierro desigual.....	80
2.4.3.8.2 Rotor excéntrico.....	81
2.4.3.8.3 Barras del rotor defectuosas.....	82
2.4.3.8.4 Laminillas del rotor en corto.....	82
2.4.3.8.5 Estator suelto o flojo.....	83
2.4.3.8.6 Monitoreo de la corriente del motor.....	83
2.4.3.9 Fallas en bombas y turbinas.....	84

CAPITULO 3

Clasificación y recopilación de información de la maquinaria.

3.1 Criterios para la clasificación.....	89
3.1.1 Criterios de funcionamiento.....	93
3.1.2 Criterios de entorno.....	94
3.1.3 Criterios económicos.....	95
3.2 Características del bloque 15.....	96
3.3 Características específicas de la maquinaria a ser analizada.....	98
3.4 Clasificación de la maquinaria.....	99

CAPITULO 4

Metodología para la recopilación de datos.

4.1 Selección de los puntos para medir la vibración.....	109
4.2 Señalización de los puntos para medir la vibración.....	112
4.3 Establecimiento de rutas e intervalos de medición.....	120
4.3.1 características del equipo de medición.....	120
4.4 Planos para la recolección de datos.....	121

CAPITULO 5

Programa de mantenimiento predictivo y análisis de resultados.

5.1 Organización del Plan de Mantenimiento Predictivo.....	137
5.2 Registros del monitoreo y análisis vibracional para cada maquina....	138

Conclusiones.....	307
Recomendaciones.....	310
Glosario de Términos.....	313
Bibliografía y referencias.....	319

Anexo A. Normas para el Análisis de Vibraciones.....	I
--	---

Anexo B. Calculo de las Frecuencias de Defectos en Rodamientos.....	XI
---	----

Anexo C. Cuadro para el Diagnostico de Vibración.....	XIV
---	-----

Anexo D. Limites de Vibración y Niveles de Alarma.....	XXIII
--	-------

Anexo E. Cronograma para la Recopilación Mensual de Datos.....	XXVII
--	-------

RESUMEN

Toda empresa o industria en donde existe maquinaria involucrada en la producción tiene personal dedicado únicamente a prestar servicio a esta maquinaria, en la gran mayoría de empresas estas personas forman parte de un departamento de mantenimiento, el que debe encargarse de que, en lo posible, las máquinas estén disponibles en todo momento.

La meta más importante de cualquier programa de mantenimiento es la eliminación de cualquier falla de la maquinaria. Una eliminación completa no es posible en la práctica en este momento, pero se le puede acercar con una atención sistemática en el mantenimiento.

Los departamentos de mantenimiento en todo el mundo se han preocupado en crear e implementar nuevas técnicas para mejorar la utilización de los recursos que maneja, como son el personal de mantenimiento, los inventarios de repuestos, etc., y para poder ser ellos quienes tengan el control de la planta gracias a un conocimiento, en todo momento, sobre el estado de cada una de las máquinas.

Podemos decir que una gran parte de las empresas utiliza el mantenimiento correctivo o de emergencia como su principal herramienta para eliminar fallas en la maquinaria, pero esta es una técnica muy poco económica cuando la producción de la planta depende directamente de la disponibilidad de esta maquinaria. Con este tipo de mantenimiento la empresa dedica mucho dinero para poder tener inventarios de repuestos con la suficiente cantidad de ellos para responder a cualquier situación, además, el personal involucrado trabaja en el momento que ocurre la falla, lo que también implica costos extras muy elevados.

Otra parte importante de las empresas utiliza el mantenimiento preventivo, el cual, por medio de estadísticas y los historiales de fallas de cada máquina o cada tipo de máquinas, realiza sustituciones o reacondicionamientos periódicos. Pero aquí todavía se está cometiendo un costoso error al interferir con máquinas sin tomar en cuenta su estado en ese momento. Este tipo de mantenimiento es muy importante para realizar los reacondicionamientos como son el cambio de aceite y filtros, revisiones generales del estado de la máquina, etc., pero debe estar acompañado de otras técnicas.

Este proyecto trata sobre la aplicación del mantenimiento predictivo, técnica que se basa en la aplicación de tecnología en el proceso de detección temprana, para detectar y verificar cambios de condiciones, lo que permite intervenciones más oportunas y precisas. Una de las muchas herramientas utilizadas por el mantenimiento predictivo, pero la que nos informa de mejor manera el estado de una máquina en funcionamiento es el análisis de vibraciones mecánicas, que forman una herramienta de planeación de mantenimiento usada para determinar la necesidad de realizar acciones preventivas y correctivas. Los datos obtenidos en un programa de mantenimiento predictivo, proporcionan información que permite aumentar la capacidad de producción y efectividad de los equipos.

El análisis de vibraciones nos permite conocer el estado de los rodamientos en todo momento, puede detectar desalineación, desbalanceo, problemas de sujeción, exceso de tolerancias, problemas de encendido en motores de combustión, problemas de aspas en bombas, problemas eléctricos en motores, fallas en los trenes de engranajes y muchas otras fallas de la maquinaria. Pero lo más importante es que nos permite diagnosticar estas fallas sin intervenir con el funcionamiento de la máquina, es decir, mientras la máquina está trabajando, lo que ayuda a aumentar la disponibilidad de la maquinaria en general.

El estudio, diseño e implementación del plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones, se lo realizó a todos los generadores, bombas y muchos de los compresores que forman parte del campamento petrolero llamado CPF de Occidental Exploration & Production Company, en el Bloque 15 del Oriente Ecuatoriano.

Se empezó recopilando toda la información funcional, operacional e histórica de la maquinaria seleccionada, tema que tiene vital importancia el momento de identificar y diagnosticar los problemas de cada máquina y además nos sirve para seleccionar los lugares en donde se pueden realizar las mediciones de vibración para obtener los mejores resultados posibles.

Luego toda la información sobre la maquinaria y los puntos de medición fueron ingresados al equipo analizador de vibraciones, DCX Watchman, para que después de analizar tomando en cuenta cada uno de los factores específicos de maquinaria, entorno y recursos disponibles, poder seleccionar los mejores intervalos y rutas de medición posibles, y así empezar a recopilar la información dinámica. El primer paso aquí fue el de seleccionar los espectros de referencia que nos servirán para detectar los futuros cambios en la condición de las máquinas. Otra actividad importante, luego de realizadas algunas mediciones, es la de graficar las curvas de tendencia, las mismas que nos sirven para planificar las paradas de la maquinaria según los niveles que vayan adquiriendo los valores de las vibraciones.

El análisis de vibraciones como herramienta para diagnosticar fallas en la maquinaria es una técnica nueva que está empezando a surgir en el Ecuador. Existen muy pocas empresas dedicadas a esto y es difícil encontrar literatura especializada en el tema dentro del país. Para realizar este trabajo fue necesario utilizar otros medios para la recolección de información como son el Internet, manuales del equipo utilizado para la recolección de datos y cursos dictados por expertos en el tema. Pero el aspecto más importante para lograr un entendimiento más amplio sobre el tema es la experiencia que se alcanza

con el tiempo al familiarizarse con todo lo que rodea al plan de mantenimiento predictivo.

La mas importante de las conclusiones sacadas de este proyecto es que el análisis de vibraciones es una herramienta que puede lograr ahorros muy importantes en todos los aspectos referentes al mantenimiento de máquinas, pero estos ahorros no se pueden ver inmediatamente, los resultados óptimos solo se darán después de que se realicen suficientes mediciones y se cree una base de datos lo suficientemente importante como para saber con seguridad cuales son los limites de cada máquina y se pueda realizar un diagnóstico exacto basado en las experiencias anteriores.

CAPITULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES.

Las técnicas de mantenimiento de máquinas cambiaron mucho y han evolucionado los últimos 15 años y es necesario el estudiar ese desarrollo. Antes de empezar a hablar del mantenimiento en si, conoceremos ha donde se quiere llegar con cualquier sistema o tipo de mantenimiento:

La meta más importante de cualquier programa de mantenimiento es la eliminación de los paros de la maquinaria. Una eliminación completa de las averías no es posible en la práctica.

El segundo propósito del mantenimiento es de poder anticipar y planificar con precisión los requerimientos de las máquinas. Las reparaciones a los sistemas mecánicos se pueden planificar de manera ideal durante los paros programados de la planta.

El tercer propósito es de incrementar la disponibilidad para la producción de la planta, por medio de la reducción importante de la posibilidad de algún paro durante el funcionamiento de la planta, y de mantener la capacidad operacional del sistema a través de la reducción del tiempo de inactividad de las máquinas críticas.

En resumen, el objetivo del departamento de mantenimiento en una empresa es el de asegurar la disponibilidad de las máquinas que necesita la empresa para su diaria operación y hacer rendir al máximo los recursos de que dispone, sean estos las mismas máquinas, los repuestos o el personal de mantenimiento.

Existen tres tipos de mantenimiento, el primero era el de “funcionar hasta fallar”, en donde la máquina funcionaba hasta que una falla venía a interrumpir el servicio, obviamente una política costosa. La mayor parte del costo está representada por la impredecibilidad del estado de la máquina, que causa paros indeterminados de la planta y costos muy elevados en inventarios y horas extras del personal de mantenimiento.

Después llegó la idea del mantenimiento periódico preventivo, en donde las máquinas son desarmadas y reacondicionadas según programas regulares. La teoría es que si se reacondicionan las máquinas antes de que se termine su duración de vida esperada, no presentarán fallas en servicio, pero aquí también existen altos costos y muchas veces se interviene a máquinas en buen estado, lo que implica un desperdicio de recursos

En los últimos diez años, el mantenimiento predictivo se hizo muy popular. Esto es el mantenimiento en que solamente se va a intervenir en una máquina cuando se sabe que presenta una falla. No se interfiere con máquinas que no han sido diagnosticadas e identificados sus problemas.

La técnica esta basada en el hecho que la mayoría de las partes de la máquina darán un tipo de aviso antes de que fallen. Para percibir los

síntomas con que la máquina nos esta advirtiendo requiere varias pruebas no destructivas, tal como análisis de aceite, análisis de desgaste de partículas, análisis de vibraciones y medición de temperaturas.

La más importante de estas es el análisis periódico de vibraciones. Se ha demostrado varias veces que de todas las pruebas no destructivas, que se pueden llevar a cabo en una máquina, la firma de vibraciones proporciona la cantidad de información más importante acerca de su funcionamiento interno.

1.1.1 MANTENIMIENTO CORRECTIVO.

El mantenimiento correctivo es aquel que se realiza a una máquina luego de que esta ha fallado. Este tipo de mantenimiento es el encargado de reparar o cambiar partes después de que el mal estado de estas ha producido un paro de la maquinaria.

Por mucho tiempo este fue la forma dominante de mantenimiento y sus costos son relativamente elevados, debido a los tiempos de inactividad no programados, maquinaria dañada, y gastos de tiempo extra.

Debido a esto, la gerencia y el departamento de mantenimiento son controlados por los caprichos de sus máquinas, y el estado actual del parque de máquinas de la planta solamente se conoce de una manera imprecisa. Esto hace casi imposible planificar las necesidades de mantenimiento, y lo que es peor, predecir el estado general de disponibilidad del sistema.

El mantenimiento correctivo debería representar una pequeña parte de un programa de mantenimiento moderno, pero hay algunas situaciones donde tiene sentido como por ejemplo cuando es fácil reemplazar una máquina dañada por otra en buen estado sin que exista pérdida de tiempo o producción.

1.1.2 MANTENIMIENTO PREVENTIVO.

En este tipo de mantenimiento se analizan las historias de cada máquina y se programan reacondicionamientos periódicos antes de que ocurran los problemas que estadísticamente se pueden esperar.

Los métodos de mantenimiento han progresado mucho desde la técnica del "funcionar hasta fallar", y el siguiente paso es el mantenimiento periódico preventivo que a veces es llamado "mantenimiento histórico". Ya se sabe

desde hace mucho que grupos de máquinas similares van a tener proporciones de fallas que se pueden predecir hasta cierto punto, si se toman promedios durante un tiempo largo. Esto produce "la curva de la tina" que relaciona la proporción de fallas al tiempo de operación de la manera siguiente:

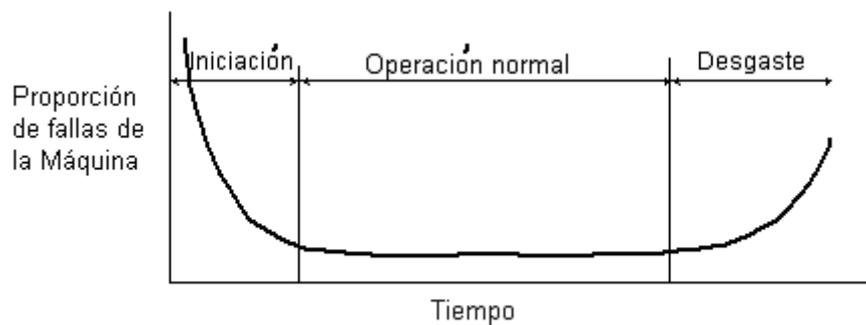


Fig. 1.1 Curva de la Tina¹.

Si esta curva es aplicable a todas las máquinas del grupo, y si la forma de la curva es conocida, se podría usar el mantenimiento preventivo de manera ventajosa. Lamentablemente eso no es el caso en la práctica.

El mantenimiento preventivo también incluye actividades como el cambio del aceite y de los filtros y la limpieza e inspección periódica. El mantenimiento preventivo se hizo muy popular al principio de la década de los 80 cuando se empezó a usar pequeñas computadoras para la planificación y el registro de las actividades de mantenimiento.

En un estudio famoso acerca de mantenimiento preventivo, encontraron que para un gran tipo de máquinas giratorias, la proporción de fallas se incrementaba de manera importante inmediatamente después de los reacondicionamientos, en otras palabras, el reacondicionamiento provocaba una reducción de la confiabilidad de las máquinas. De este estudio y de

¹ Ilustración tomada de: **Ron Bodre**, *Introduction to Machine Vibration*, DLI Engineering Corp. Estados Unidos de América,

observaciones posteriores, se dedujo que los reacondicionamientos periódicos causaron desde el 20% al 25% de las fallas al arrancar.

Según las afirmaciones anteriores, es obvio, que el mantenimiento preventivo hace un uso ineficiente de los recursos para la mayoría de las máquinas, pero hay casos en que se le puede usar con buenos resultados.

1.1.3 MANTENIMIENTO PREDICTIVO.

El mantenimiento predictivo es la aplicación de tecnologías de punta para diagnosticar el estado de una máquina mientras esta se encuentra en operación.

El siguiente paso en la tecnología de mantenimiento fue la llegada del mantenimiento predictivo, basado en la determinación del estado de la máquina en operación: La técnica esta basada en el hecho que la mayoría de las partes de la máquina darán un tipo de aviso antes de que fallen. Para percibir los síntomas con que la máquina advierte de estas fallas se requiere de varias pruebas no destructivas, tal como análisis de aceite, análisis de desgaste de partículas, análisis de vibraciones y medición de temperaturas.

El uso de estas técnicas, para determinar el estado de la máquina dará como resultado un mantenimiento mucho más eficiente, en comparación con los tipos de mantenimiento anteriores.

El mantenimiento predictivo permite que la gerencia de la planta tenga el control de las máquinas y de los programas de mantenimiento y no al revés. En una planta donde se usa el mantenimiento predictivo el estado general de las máquinas esta conocido en cualquier momento y una planificación más precisa será posible.

Los principales éxitos del Mantenimiento Predictivo en la gran mayoría de las plantas industriales, han sido los significativos ahorros que ha logrado, al evitar paradas de planta por fallas imprevistas en las máquinas principales en las líneas de producción, luego su área de responsabilidad se ha extendido a los demás equipos de la planta industrial, eliminándose paulatinamente el Mantenimiento Preventivo en la mayoría de los equipos rotativos y ejecutándose los mantenimientos para solucionar fallas específicas que presenta cada máquina en particular.

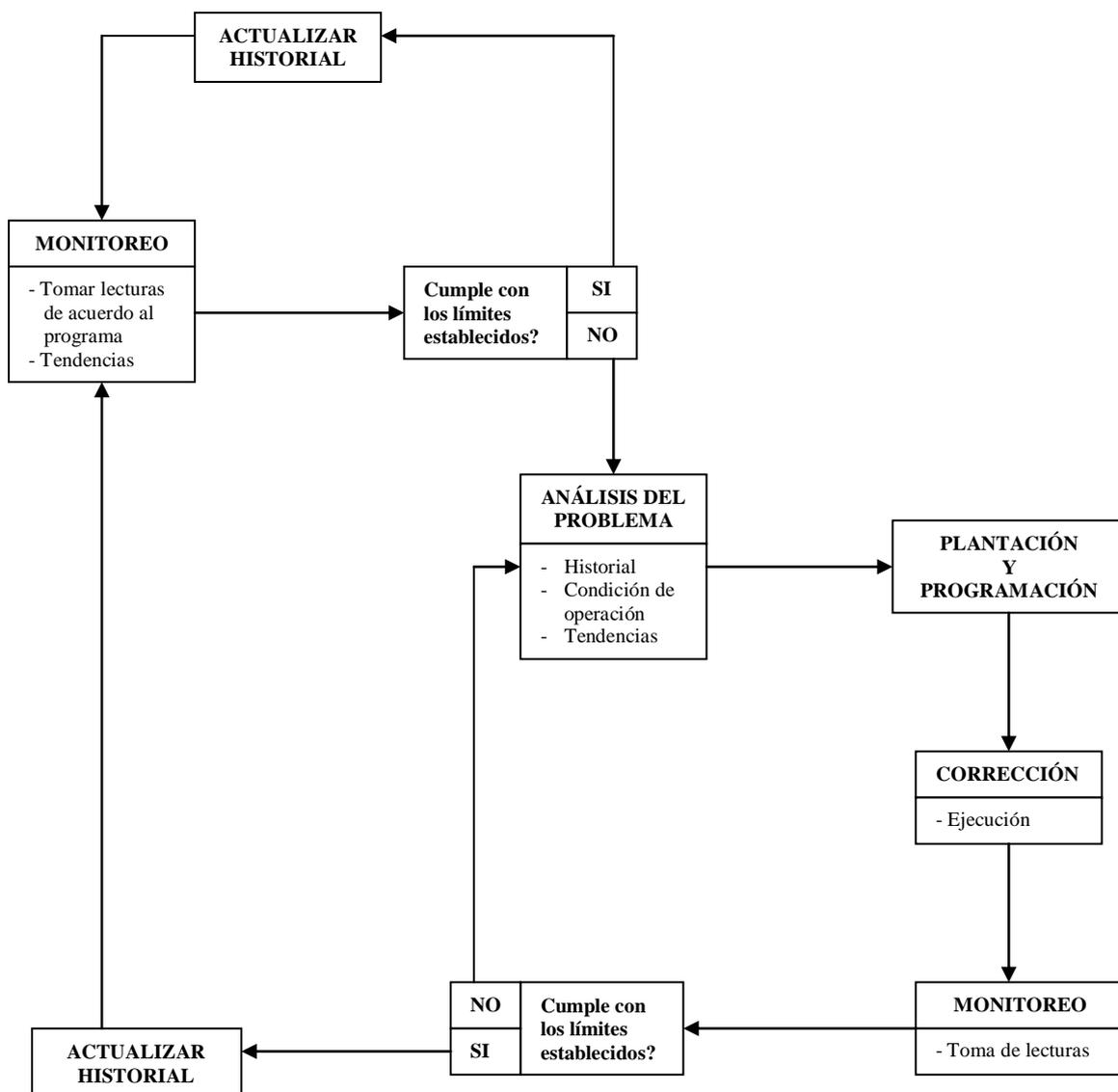


Fig. 1.2 Ciclo Del Mantenimiento Predictivo

El mantenimiento predictivo usa varias disciplinas. La más importante de estas es el análisis periódico de vibraciones. Se ha demostrado varias veces que de todas las pruebas no destructivas, que se pueden llevar a cabo en una máquina, el espectro de vibraciones proporciona la cantidad de información más importante acerca de su funcionamiento interno.

El análisis de aceite y el análisis de partículas de desgaste son partes importantes de los programas predictivos modernos, especialmente en equipo crítico o muy caro.

La termografía es la medición de temperaturas de superficie por detección infrarroja. Es muy útil en la detección de problemas en interruptores y áreas de acceso difícil.

La última innovación en el campo del mantenimiento predictivo es el Mantenimiento Proactivo, que usa gran cantidad de técnicas para alargar la duración de operación de las máquinas. La parte mayor de un programa pro activo es el análisis de las causas fundamentales de las fallas en máquinas. Esas causas fundamentales se pueden remediar y los mecanismos de falla se pueden eliminar gradualmente en cada máquina.

El desbalanceo y la desalineación son las causas fundamentales de la mayoría de las fallas en máquinas. Ambos fenómenos provocan una carga en los rodamientos con fuerzas indebidas y acortan su vida útil. En lugar de reemplazar continuamente rodamientos gastados en una máquina que presenta una falla, una mejor política sería de llevar a cabo un balanceo y alineación de precisión en la máquina y de verificar los resultados por medio de un análisis de la firma o espectro de vibraciones.

Muchas máquinas recién instaladas tienen defectos. Estos van desde instalaciones incorrectas debido a una colocación defectuosa de las patas y una alineación incorrecta, hasta partes defectuosas en la máquina, como rodamientos, flechas con flexión, etc. Un programa de mantenimiento pro activo incluirá el probar las nuevas instalaciones con el propósito de la

certificación y de la comprobación de que la marcha de la máquina se haga según normas estrictas. Las mismas normas se aplican a maquinaria reconstruida o reacondicionada. Este tipo de pruebas puede llevar al establecimiento de especificaciones de funcionamiento que en varios casos son más estrictas que las especificaciones y tolerancias del constructor de la maquinaria.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 GENERAL.

La meta de este proyecto es el: Estudio, Desarrollo e implementación de un plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones para la maquinaria rotativa del bloque 15 de OCCIDENTAL EXPLORATION & PRODUCTION COMPANY.

1.2.2 ESPECÍFICOS.

Después de terminado este proyecto de grado se espera obtener los siguientes resultados y efectos:

- Estudio del impacto y nivel de las vibraciones en el funcionamiento de las máquinas rotativas del bloque 15.
- Diseño del plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones para el campamento petrolero del bloque 15.
- Implementación del plan de mantenimiento predictivo basado en el análisis de vibraciones para el campamento petrolero del bloque 15.
- Probar la efectividad del análisis de vibraciones como base de un programa de mantenimiento predictivo.

1.3 JUSTIFICACIÓN.

En un mundo globalizado y sumamente competitivo, las empresas deben reducir sus costos de producción al mínimo. Una empresa petrolera como OCCIDENTAL EXPLORATION & PRODUCTION COMPANY, depende en gran parte de la maquinaria y equipo utilizados para la extracción, almacenamiento y transporte del crudo. Además conociendo que la disponibilidad y la fiabilidad de esta maquinaria son vitales, la compañía se ha propuesto implementar un sistema de mantenimiento nuevo, que disminuya los costos de mantenimiento y de las horas improductivas.

Estas razones han dado lugar a la idea de implementar un Plan de Mantenimiento Predictivo basado en el análisis de las vibraciones mecánicas, que consiste en emitir un criterio en base a ensayos de medición. En el mantenimiento predictivo existen básicamente tres técnicas: Análisis de aceites, Termografía y el Análisis de Vibraciones, de estas el análisis de vibraciones es la que mejor refleja el estado de la maquinaria rotativa, que es lo que se busca en el proyecto. Las vibraciones mecánicas del equipo rotativo, son el mejor parámetro para juzgar las buenas condiciones de funcionamiento, mediante esta técnica se encuentran problemas como desbalanceo, desalineamiento, fallas en las bases, fallas en las cimentaciones, holguras mecánicas, resonancia estructural, fallas de rodamientos, fallas de engranajes, etc.

Otras ventajas del mantenimiento predictivo tenemos que reduce los tiempos de parada, permite seguir la evolución de un defecto en el tiempo, optimiza la gestión del personal de mantenimiento, la verificación del estado de la maquinaria, tanto realizada de forma periódica como de forma accidental, permite confeccionar un archivo histórico del comportamiento mecánico, permite conocer con exactitud el tiempo límite de actuación que no implique el desarrollo de un fallo imprevisto, confección de formas internas de funcionamiento o compra de nuevos equipos, permitir el conocimiento del historial de actuaciones, para ser utilizada por el

mantenimiento correctivo, facilita el análisis de las averías y permite el análisis estadístico del sistema.

Además este sistema de mantenimiento es individualizado, lo que impide interferir con la marcha de las máquinas que se encuentran en un buen estado por tener el mismo plan de mantenimiento para todas las máquinas de un mismo tipo, ahorrando a la compañía dinero y tiempo. Otra virtud de este tipo de mantenimiento es que, con los datos y mediciones tomados, se puede predecir cuando se alcanzaran niveles de vibración inaceptables y por ende cuando se debe revisar la máquina.

1.4 METODOLOGÍA A EMPLEAR.

Para alcanzar las metas propuestas en el diseño de este proyecto utilizaremos todos los conocimientos adquiridos por el estudiante durante la carrera y los aportes profesionales de los ingenieros colaboradores. Además de esto se utilizaran los conceptos, técnicas y normas de punta luego de una investigación profunda en el tema del mantenimiento predictivo y el análisis de vibraciones.

Se realizará primeramente una clasificación de las máquinas, en la misma que tomaremos en cuenta la importancia de la máquina en el funcionamiento del campo petrolero, pero a mas de centrarnos en este criterio para la clasificación, no debemos olvidar los factores de entorno como la seguridad del personal, la rapidez con que el daño pueda avanzar, etc. Luego de esta clasificación, se realizara un estudio basado en los catálogos del fabricante, sobre esta maquinaria, para seleccionar los puntos críticos y seleccionar los puntos donde se realizara la toma de medidas.

Posteriormente con el equipo para la toma de datos, se dispone de un analizador de vibraciones DCX HAMMERHEAD, se realizara un monitoreo de la condición actual de los equipos, para luego periódicamente, de

acuerdo a los criterios que se estudiarán más adelante, realizar un seguimiento de cada máquina para poder diagnosticar, bajo criterios y normas que también serán detallados posteriormente, los eventuales problemas que puedan ir apareciendo. Luego se presentará un plan de mantenimiento preventivo para los equipos en análisis, detallando las actividades y la frecuencia con que se debe realizar cada una de ellas. Finalmente se implementarán las recomendaciones obtenidas del proyecto.

CAPITULO 2

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 ESTUDIO DE VIBRACIONES EN CONDICIONES NORMALES.

2.1.1 VIBRACIÓN

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

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

Vibración es una forma de energía que se desperdicia, por lo tanto una máquina ideal no produciría vibración porque toda la energía sería canalizada hacia el trabajo que realiza. En la práctica, la vibración ocurre como producto de la transmisión normal de fuerzas cíclicas a través de los mecanismos. Los elementos de una máquina reaccionan unos contra otros y disipan energía a través de la estructura en la forma de vibración.

Un buen diseño producirá bajos niveles de vibración inherentes; sin embargo, como las máquinas se desgastan, las bases se asientan y las partes se deforman y se generan cambios en las propiedades dinámicas de las máquinas. Los ejes se desalinean, las partes comienzan a sufrir desgaste, los rotores se desbalancean y las tolerancias se incrementan. Todos estos factores son reflejados en un incremento de la energía de vibración, la cual, cuando es disipada a través de la máquina crea en los

soportes cargas dinámicas adicionales considerables. Causa y efecto se refuerzan uno a otro hasta que la máquina finalmente falla.

2.1.2 MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE

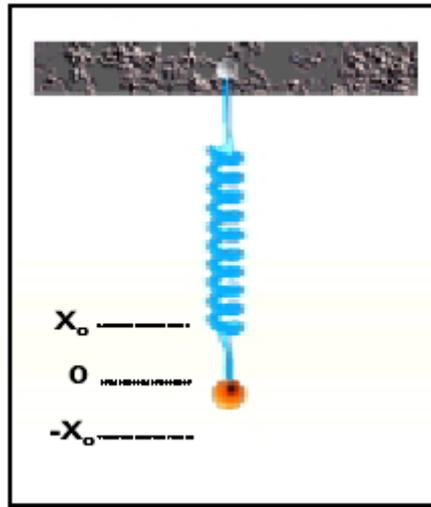


Fig. 2.1 Sistema Masa-Resorte².

El movimiento más sencillo que pueda existir es el movimiento en una dirección, de una masa controlada por un resorte único. Este sistema mecánico se llama sistema resorte-masa, con un grado único de libertad. Si se desplaza la masa, hasta una cierta distancia del punto de equilibrio, y después se suelta, el resorte la regresará al equilibrio. Para entonces, la masa tendrá algo de energía cinética y rebasará la posición de descanso y desviará el resorte en la dirección opuesta. Perderá velocidad hasta pararse en el otro extremo de su desplazamiento donde el resorte volverá a empezar el regreso hacia su punto de equilibrio. El mismo proceso se volverá a repetir con la energía transfiriéndose entre la masa y el resorte, desde energía cinética en la masa hasta energía potencial en el resorte, y regresando. La ilustración siguiente enseña una gráfica de la amplitud de la masa contra el tiempo:

² Ilustración tomada de: **A-Maq S.A.**, Tutorial de Vibraciones para Mantenimiento Mecánico, Enero 2005

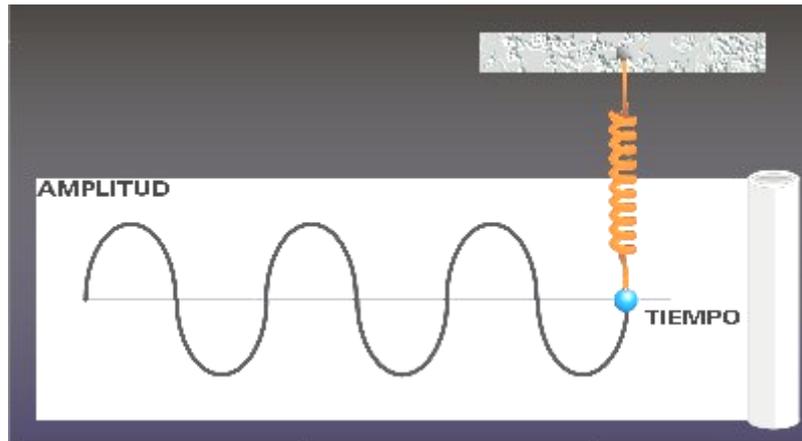


Fig. 2.2 Gráfica Amplitud vs. Tiempo en Movimiento Armónico Simple³.

El uso de la medición de vibración como una herramienta requiere la comprensión de sus características. Estas son: Amplitud, Frecuencia y Fase.

2.1.3 AMPLITUD

Amplitud es solamente otra palabra para cantidad. La amplitud o "cantidad" de vibración puede ser descrita de tres maneras: Desplazamiento, Velocidad y Aceleración.

2.1.3.1 Desplazamiento

Desplazamiento es la distancia que viaja un objeto. La distancia que el peso de la Fig. 2.3 se mueve hacia arriba y hacia abajo cuando vibra, es también un desplazamiento. Si el peso se mueve arriba y abajo 4μ , se está describiendo su desplazamiento pico a pico (Peak-to-Peak) que representa la distancia que viaja desde su posición límite superior hasta su posición

³ Ilustración tomada de: **A-Maq S.A.**, Tutorial de Vibraciones para Mantenimiento Mecánico, Enero 2005

límite inferior; su representación gráfica en el tiempo corresponde a una vibración armónica (Curva sinusoidal).

Las unidades en que normalmente es medido el desplazamiento, son: mils (1 mil = 0.001 plg) o micrones ($1\mu = 0.001$ mm).

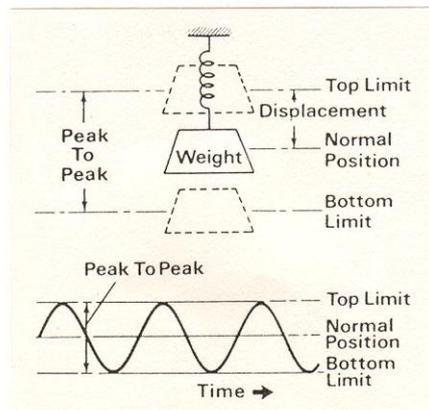


Fig. 2.3 Amplitud descrita como Desplazamiento⁴.

2.1.3.2 Velocidad

La segunda manera en que la amplitud de vibración puede ser medida, es en Velocidad de vibración. Velocidad es la rata de cambio del desplazamiento con respecto al tiempo y es la mejor indicación de la energía destructiva total.

⁴ Ilustración tomada de: **Asociación Colombiana de Ingenieros, Cundinamarca**, Seminario Taller: Mantenimiento Predictivo Basado en Vibraciones y Termografía, Colombia 2003.

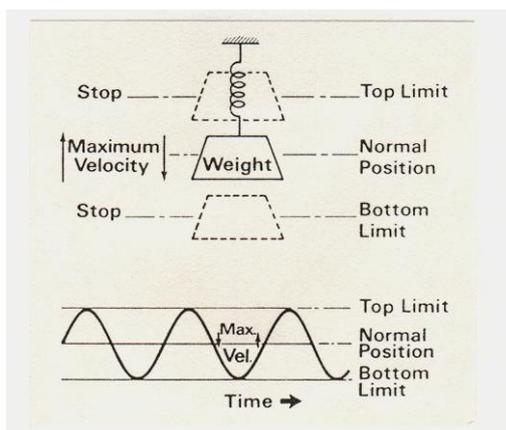


Fig. 2.4 Amplitud descrita como Velocidad⁵.

La velocidad máxima del objeto se tiene cuando él pasa por su posición de referencia (Normal position). Cuando el objeto alcanza sus límites superior e inferior, su velocidad es cero. En mediciones de vibración, normalmente se usa la velocidad pico (Peak).

Las unidades en que normalmente es medida la velocidad, son: plg/seg. o mm/seg.

2.1.3.3 Aceleración

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

En referencia a la Fig. 2.5 se observa ver que la aceleración no es constante sino que varía a través del ciclo en forma sinusoidal también. Cuando el objeto pasa por su posición de referencia (Normal position), su aceleración es cero, mientras que los extremos de su recorrido la aceleración es máxima y es donde ocurren físicamente los máximos esfuerzos dentro de la máquina. Si la fuerza requerida para detener el

⁵ Ilustración tomada de: **Asociación Colombiana de Ingenieros, Cundinamarca**, Seminario Taller: Mantenimiento Predictivo Basado en Vibraciones y Termografía, Colombia 2003.

movimiento vibratorio excede la resistencia de la carcasa del rotor, la máquina se rompe.

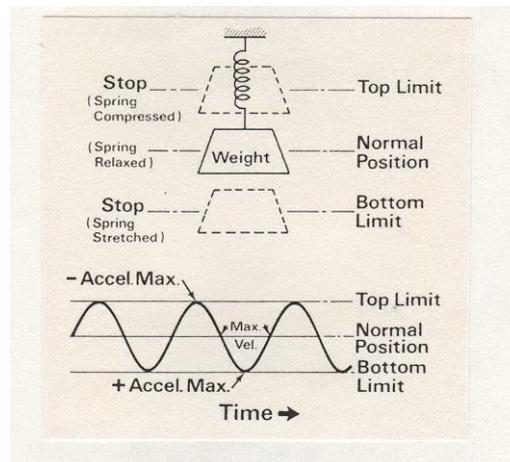


Fig. 2.5 Amplitud descrita como Aceleración⁶.

De las gráficas anteriores se puede ver que la forma y el período de vibración se mantienen, sean en desplazamiento, velocidad o aceleración; sin embargo, la velocidad se adelanta al desplazamiento por un ángulo de fase de 90 grados y la aceleración se adelanta a la velocidad por un ángulo de fase de 90 grados.

Las unidades normalmente usadas para describir la aceleración de la vibración, son: G's ($1G = 9.8 \text{ m/seg}^2$) o m/seg^2 .

Hasta el momento se ha descrito la magnitud o amplitud, en términos de valores picos (Peak Value) que son de inmensa utilidad cuando se considera vibración armónica. Pero si son vibraciones más complejas las que están siendo estudiadas, se pueden utilizar otras cantidades descriptivas de magnitud.

⁶ Ilustración tomada de: **Asociación Colombiana de Ingenieros, Cundinamarca**, Seminario Taller: Mantenimiento Predictivo Basado en Vibraciones y Termografía, Colombia 2003.

2.1.3.4 Amplitud RMS (Root Mean Square)

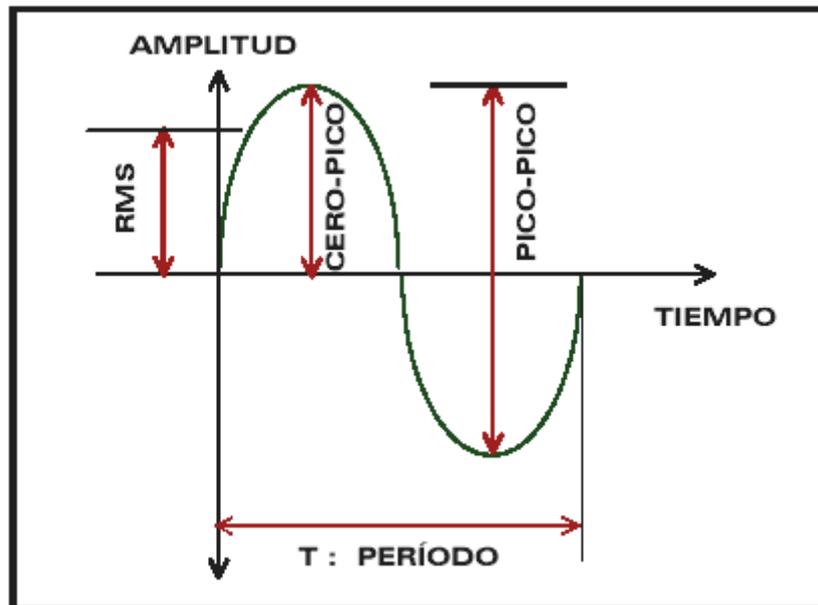


Fig. 2.6 Amplitud RMS⁷.

El valor de la amplitud RMS es una cantidad descriptiva que se relaciona con el contenido energético de las vibraciones.

Para movimiento armónico puro:

$$X_{\text{RMS}} = X_{\text{Peak}} / \sqrt{2} \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

Una forma más general para esta relación, es:

$$X_{\text{RMS}} = X_{\text{Peak}} / F_c \quad \text{Ecuación (2.2)}$$

$$F_c = X_{\text{Peak}} / X_{\text{RMS}} \quad \text{Ecuación (2.3)}$$

Donde:

X_{RMS} = Amplitud RMS

X_{Peak} = Amplitud Pico

⁷ Ilustración tomada de: **A-Maq S.A.**, Tutorial de Vibraciones para Mantenimiento Mecánico, Enero 2005

El factor F_c es llamado "Crest Factor" y es una indicación del perfil de la onda bajo consideración.

Para movimiento armónico puro:

$$F_c = \sqrt{2} = 1.414 \quad \text{Ecuación (2.4)}$$

De hecho, la gran mayoría de los instrumentos disponibles actualmente realizan mediciones RMS y las convierten en mediciones Peak (Pico) para mostrar en sus displays o pantallas, simplemente multiplicando la amplitud RMS para cada frecuencia por 1.414.

2.1.3.5 Comparación de Parámetros de Amplitud

Dos ítems importantes deben ser entendidos cuando se establecen alarmas espectrales para máquinas. Primero, uno debe conocer qué frecuencias forzantes serán generadas por problemas como: desgaste en rodamientos, desgaste en cojinetes, problemas de engrane, problemas eléctricos, desbalanceo, desalineación, etc. Segundo, se debe saber que parámetro de vibración (Desplazamiento, velocidad o aceleración) detectará mejor aquellos problemas que se verán en una máquina en particular.

La Fig. 2.7 muestra que mientras el desplazamiento hace un buen trabajo en mediciones de baja frecuencia, sobre todo por debajo de 600 CPM, para problemas detectados a mayores frecuencias su respuesta es inadecuada, tales como problemas de rodamientos y engranajes.

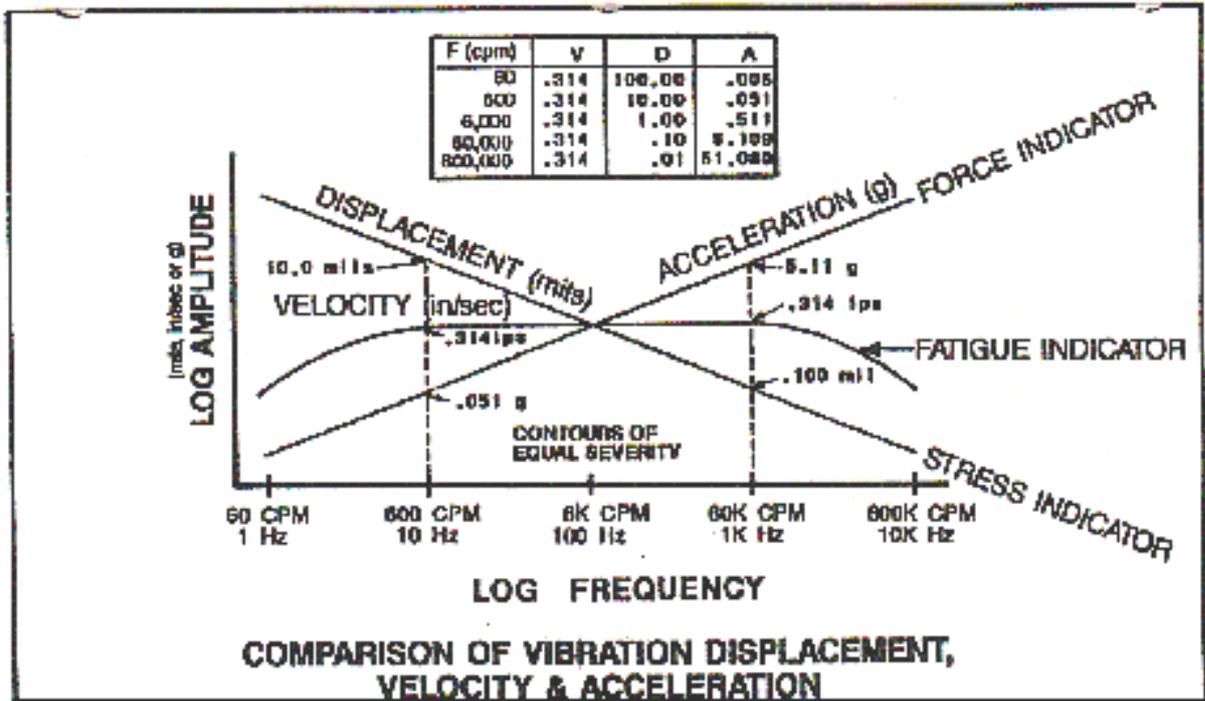


Fig. 2.7 Comparación de Parámetros de Amplitud 1⁸.

Aunque el desplazamiento sería el mejor indicador de desbalanceo o desalineación en una máquina girando a 300 RPM, si el interés primario fuera la condición de sus engranajes, la velocidad nuevamente sería el mejor parámetro a emplear. Este es comúnmente el caso en máquinas de la industria del papel y otras máquinas grandes y de muy baja velocidad.

El mejor indicador de problemas que son generados por frecuencias forzantes en regiones de alta frecuencia, particularmente por encima de 300.000 CPM, es la aceleración.

Sin embargo, los espectros en velocidad han probado ser los mejores indicadores en la inmensa mayoría de problemas (80-90%) relacionados con maquinaria rotativa. Si se observa el gráfico de la Fig.2.7 se darán cuenta que para severidades similares, la velocidad es el único parámetro

⁸ Ilustración tomada de: **Asociación Colombiana de Ingenieros, Cundinamarca**, Seminario Taller: Mantenimiento Predictivo Basado en Vibraciones y Termografía, Colombia 2003.

que se mantiene constante entre 10 (600 CPM) y 1K Hz (60.000 CPM). El mantenerse constante determina que la velocidad es un directo indicador de la severidad de la vibración en dicho rango y en ese rango es justamente donde se presentan la gran mayoría de problemas relacionados con maquinaria rotativa industrial convencional.

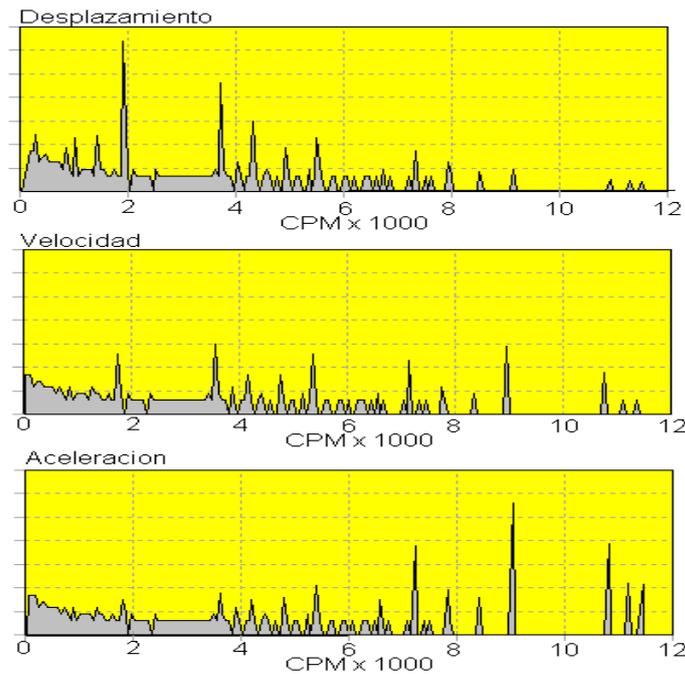


Fig. 2.8 Comparación de Parámetros de Amplitud 2⁹.

Estas tres curvas que se muestran arriba, proporcionan la misma información, pero la eficacia de cada una ha cambiado. Nótese que la curva de desplazamiento es más difícil de leer en las frecuencias más altas. La curva de velocidad es la más uniforme en nivel sobre frecuencia. Eso es típico para la mayoría de la maquinaria rotativa pero en algunos casos, las curvas de desplazamiento y aceleración serán las más uniformes. Es una buena idea seleccionar las unidades de tal manera que se obtenga la curva la más plana. Eso proporciona la mayor cantidad de información visual al observador. El parámetro de vibración que se usa más comúnmente en trabajos de diagnóstico de maquinaria es la velocidad.

⁹ Ilustración tomada de: **Ron Bodre**, Introduction to Machine Vibration, DLI Engineering Corp. Estados Unidos de América,

2.1.4 FRECUENCIA

Frecuencia es definida como el número de ciclos por unidad de tiempo, usualmente descrita como ciclos por segundo (Hz) o ciclos por minuto (CPM). Este es un concepto muy importante y será usado extensivamente en el análisis de vibraciones. El período es el tiempo necesario para completar un ciclo de movimiento:

La Fig. 2.9 ayuda a ilustrar el concepto de frecuencia. Como se ve en la figura, definimos un ciclo de vibración, como el movimiento del objeto oscilante de su posición de referencia (Normal position) al límite superior de la trayectoria (Top limit), al límite inferior (Bottom limit) y de regreso a su posición de referencia.

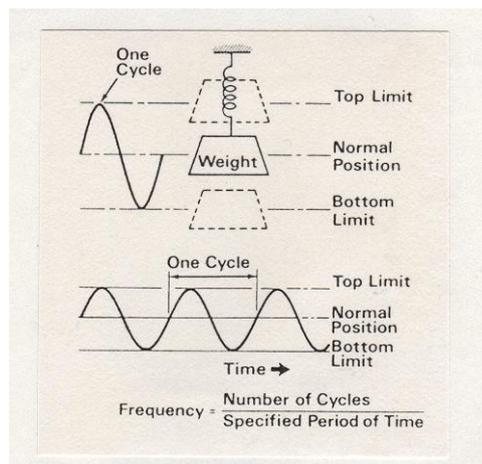


Fig. 2.9 Frecuencia¹⁰.

¹⁰ Ilustración tomada de: **Asociación Colombiana de Ingenieros, Cundinamarca**, Seminario Taller: Mantenimiento Predictivo Basado en Vibraciones y Termografía, Colombia 2003.

2.1.5 FASE

Otra característica importante de la vibración es la Fase. Se define Fase como "la posición de una pieza que vibra en un instante dado con relación a un punto fijo o a otra pieza que vibra".

En la práctica, las medidas tomadas de fase constituyen un modo conveniente de comparar un movimiento vibracional con otro, o de determinar como vibra una pieza con respecto a otra. Por ejemplo, los dos pesos de la Fig. 2.10 se encuentran vibrando a la misma frecuencia y desplazamiento, pero el peso A se halla al límite superior del movimiento mientras que el B está al límite inferior.

Trazando un ciclo completo del movimiento de dichos pesos y empezando por el mismo momento, vemos que los puntos de desplazamiento pico están separados por 180 grados.

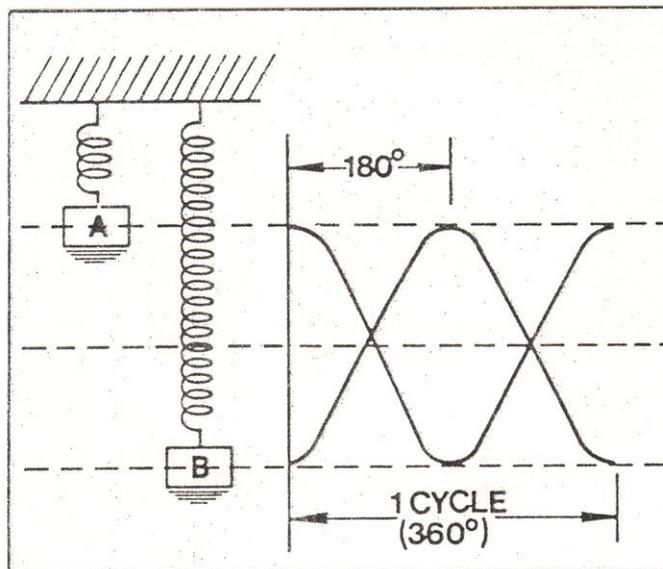


Fig. 2.10 Sistema con desfase de 180 grados¹¹.

¹¹ Ilustración tomada de: **Asociación Colombiana de Ingenieros, Cundinamarca**, Seminario Taller: Mantenimiento Predictivo Basado en Vibraciones y Termografía, Colombia 2003.

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

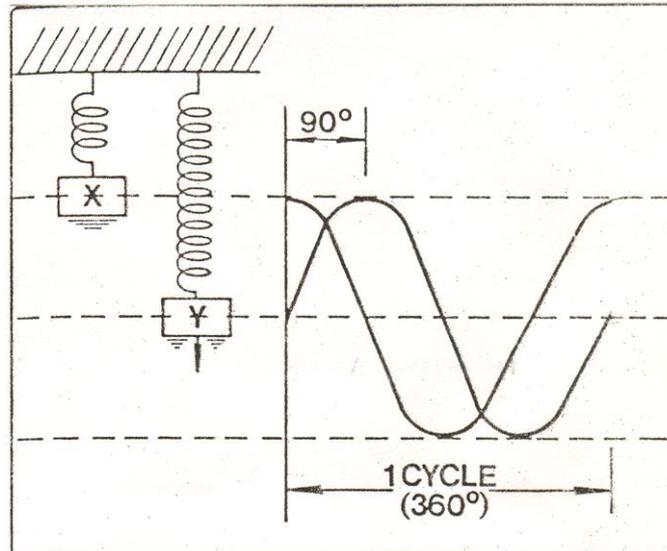


Fig. 2.11 Sistema con desfase de 90 grados¹².

En la Fig. 2.11 el peso X se halla en el límite superior de su trayectoria, mientras que el peso Y se halla en la posición de referencia. Estos dos pesos están vibrando con un desfase de 90 grados.

Las lecturas de fase se expresan normalmente en grados, de 0 a 360 grados, siendo un ciclo completo de vibración igual a 360 grados.

¹² Ilustración tomada de: **Asociación Colombiana de Ingenieros, Cundinamarca**, Seminario Taller: Mantenimiento Predictivo Basado en Vibraciones y Termografía, Colombia 2003.

2.2 TOMA DE DATOS

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

La instrumentación requerida para medir vibración puede ser clasificada básicamente, así:

- Transductores
- Medidores
- Monitores
- Analizadores
- Colectores

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

2.2.1 TRANSDUCTORES DE VIBRACIÓN

Un transductor de vibración es un elemento que convierte una señal mecánica (vibración) en una señal eléctrica (voltaje). Los transductores de vibración disponibles se clasifican en: 1) Sensor de no contacto, 2) Transductor de velocidad (sísmico) y 3) Acelerómetro. Estos tres tipos de transductores son los usados normalmente para medir vibración. Enseguida se describe cada uno de estos transductores en términos de su principio de operación, su aplicación y sus limitaciones.

Tabla 2.1 Transductores de Vibración mas Utilizados.

Nombre:	Sensible a
Sensor de no Contacto	Desplazamiento
Sensor de Velocidad	Velocidad
Acelerometro	Acceleracion

2.2.1.1 Sensor de no Contacto

El sensor de no contacto (a menudo referido como sensor de proximidad, sonda de desplazamiento o sonda de corrientes de EDDY) es un elemento generador de corrientes de Eddy que "siente" el cambio en la distancia entre la punta del sensor y el objeto medido. Es por lo tanto, un instrumento para captar desplazamiento, el cual se mide más comúnmente en Mils o μm .

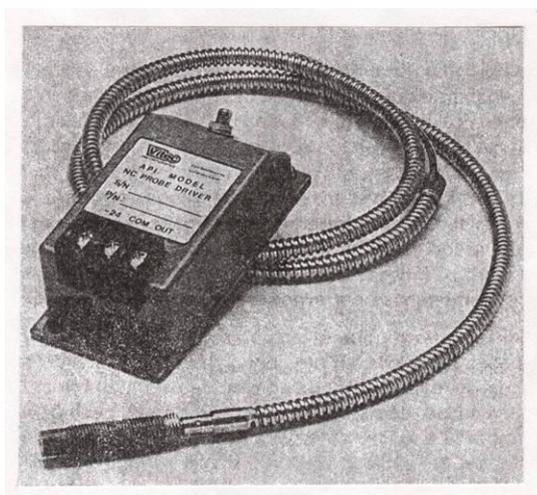


Fig. 2.12 Sensor de no Contacto¹³.

Aunque es bastante exacto, el principio de operación de este tipo de sensor es simple. El driver produce una señal de radio frecuencia que alimenta a una bobina en la punta de la sonda, la cual genera un campo magnético alrededor de ella. Cuando un material conductor se acerca a la punta de la

¹³ Ilustración tomada de: **Asociación Colombiana de Ingenieros, Cundinamarca**, Seminario Taller: Mantenimiento Predictivo Basado en Vibraciones y Termografía, Colombia 2003.

sonda, se producen corrientes de Eddy sobre la superficie del material y la potencia es absorbida por interferencia del campo magnético, Fig. 2.13. La cantidad en que el campo es afectado (Potencia absorbida) es inversamente proporcional a la distancia entre el objeto y la punta de la sonda. Entre mas cercano esté el objeto (menor distancia), más potencia es absorbida. Luego el driver mide el cambio en la fuerza del campo magnético y la convierte en una salida estándar calibrada. Esta salida normalmente es de 200 mV/mil (Norma API 670) de vibración o cambio de distancia pico a pico entre el objeto medido y la punta de la sonda.

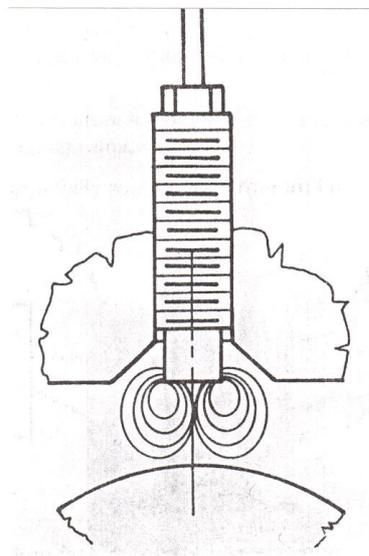


Fig. 2.13 Funcionamiento de un Sensor de no Contacto¹⁴.

El sensor de no contacto tiene las siguientes ventajas:

- El sistema es obviamente muy sensible y muy seguro (0.2 Volt de salida por un cambio de distancia de 0.001 pulgadas).
- Puede medir con exactitud vibraciones tan rápidas como 10K Hz, o tan lentas como 0 Hz.

¹⁴ Ilustración tomada de: **Asociación Colombiana de Ingenieros, Cundinamarca**, Seminario Taller: Mantenimiento Predictivo Basado en Vibraciones y Termografía, Colombia 2003.

- Mide simultáneamente la posición media del eje o componente DC y el movimiento del eje (Vibración) o componente AC.
- Es de fácil calibración.

Las limitaciones normalmente asociadas con sensores de no contacto son las siguientes:

- Instalación complicada, ya que exige maquinados especiales para la fijación de la sonda; además, el campo de energía desarrollado es de 1 1/2 a 2 veces el diámetro de la sonda, por lo tanto, si existen materiales conductivos en la zona de influencia del campo, se afectará la exactitud de la medición.
- La zona alrededor de la punta de la sonda debe ser chaflanada o barrenada a dos veces su diámetro.
- Cualquier variable que pueda afectar la cantidad de potencia absorbida por el objeto puede ser falsamente sentida como vibración. Esto incluye:
 - Marcas, mellas o superficies imperfectas o irregulares.
 - Componentes desiguales sobre el eje o materiales químicamente no homogéneos.
 - Corrientes eléctricas y/o campos magnéticos en la zona de observación del sensor.
- La vibración medida resulta ser la vibración del eje, relativa a su carcasa (Sitio de fijación de la sonda). Si la carcasa no esta en capacidad de amortiguar la vibración del eje, la medición obtenida tiende a cero.
- Requiere fuente de energía externa.

2.2.1.2 Transductor de Velocidad (Sísmico)

El sensor de no contacto mide desplazamiento o distancia. Sin embargo, esa distancia puede ser atravesada a diferentes velocidades. El transductor de velocidad es llamado así porque su salida es proporcional (dentro de sus límites) a la velocidad de vibración. Las unidades usadas para medir velocidad de vibración son in/seg, mm/seg o cm/seg.

Así como el sensor de no contacto, el principio de operación del transductor de velocidad es simple. Un típico transductor de velocidad es mostrado en la Fig. 2.14. El sistema consta de una bobina de alambre fino soportada por resortes de baja rigidez. Un magneto permanente se hace solidario con la caja del sensor y aquel, genera un campo magnético alrededor de la bobina suspendida. Cuando el transductor es colocado contra un componente vibrante, el magneto permanente vibra junto con el componente mientras que la bobina de alambre soportada por resortes de baja rigidez permanece estacionaria en el espacio. Bajo estas condiciones, el movimiento relativo entre el campo magnético y el conductor enrollado (bobina) es el mismo movimiento relativo del componente vibrante con respecto a un punto en el espacio; y el voltaje inducido en la bobina es directamente proporcional a este movimiento. A mayor movimiento, el voltaje inducido será mayor.

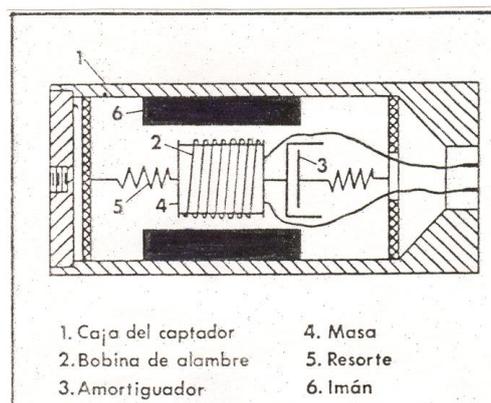


Fig. 2.14 Transductor de Velocidad (Sísmico)¹⁵.

¹⁵ Ilustración tomada de: **Asociación Colombiana de Ingenieros, Cundinamarca, Seminario Taller: Mantenimiento Predictivo Basado en Vibraciones y Termografía, Colombia 2003.**

La señal dinámica generada identifica la vibración de la máquina sólo en la dirección del eje longitudinal del sensor, en el punto que se colocó. Para tener una mejor información de vibración del punto que se está midiendo, se deben tomar lecturas en dirección Horizontal, Vertical y Axial al eje rotante. El transductor deberá colocarse sobre los cojinetes (chumaceras) o en los puntos más cercanos a ellos.

Las ventajas del transductor de velocidad son:

- Muy fácil de instalar temporal o permanentemente sobre la carcasa de una máquina.
- No requiere de fuente externa de energía.
- Genera una señal muy confiable y fuerte en el rango de frecuencia donde es posible encontrar un alto porcentaje de problemas vibracionalmente asociables a maquinaria rotativa de uso común en la industria (10 - 2K Hz).

Las limitaciones incluyen:

- A causa de que la unidad debe vencer fuerzas internas de amortiguación y está sujeta a limitaciones de fuerzas dinámicas, es normalmente seguro solamente dentro de un rango de frecuencia de 10 - 2K Hz.
- Los transductores de velocidad están limitados en su posición de montaje. No pueden ser instalados hacia abajo.
- Los transductores de velocidad son usualmente más grandes y pesados que los acelerómetros. Por lo tanto, tiende a amplificar más la vibración en sentido transversal y el transductor no está diseñado para soportar grandes cargas transversales.

- Como su funcionamiento se basa en componentes móviles es de esperar un deterioro más acelerado que los otros transductores.
- El fabricante entrega el transductor calibrado, cualquier descalibración del mismo obliga al usuario a la reposición del instrumento.

2.2.1.3 Acelerómetros

El tercer tipo de transductor normalmente usado para medir vibración es el acelerómetro. El principio de operación de un acelerómetro está basado en las propiedades de los cristales piezoeléctricos. El cristal genera una carga eléctrica cuando es deformado o cuando una fuerza mecánica es aplicada a él. Inspeccionando la construcción de un acelerómetro típico se encontrará un cristal piezoeléctrico montado dentro del cuerpo del acelerómetro y una masa sísmica, como se observa en la Fig. 2.15. Cuando el transductor vibra, las fuerzas gravitacionales sobre la masa deforman el cristal produciendo una carga de energía eléctrica. Esta energía es proporcional a la aceleración de la vibración absoluta de la carcasa y se mide comúnmente en G's.

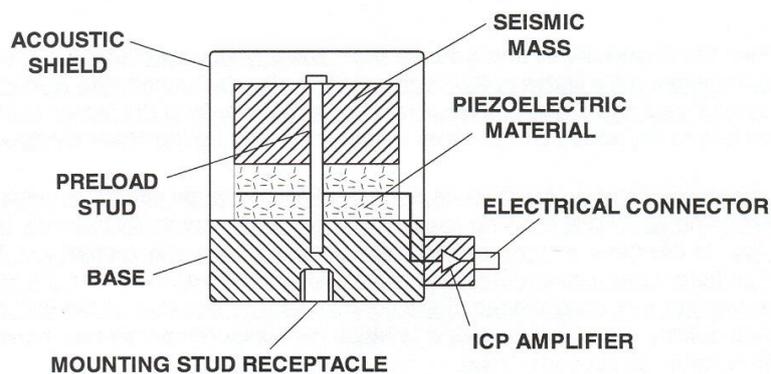


Fig. 2.15 Esquema de un Acelerómetro¹⁶.

¹⁶ Ilustración tomada de: Asociación Colombiana de Ingenieros, Cundinamarca, Seminario Taller: Mantenimiento Predictivo Basado en Vibraciones y Termografía, Colombia 2003.

Las ventajas del acelerómetro son:

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

Las limitaciones son:

- La señal generada por el transductor es muy susceptible a una deficiente sujeción del transductor, sobretodo cuando estamos frente a una condición de alta amplitud y alta frecuencia.
- El fabricante entrega el transductor calibrado, cualquier descalibración del mismo obliga al usuario a la reposición del instrumento.

2.2.2 SELECCIÓN DE TRANSDUCTORES

Muchos usuarios de equipos de vibración se han decepcionado ante los resultados de sus esfuerzos para establecer un programa de control de vibraciones. El fracaso de beneficiarse de un programa de vibraciones puede ser trazado por fallas o datos incorrectos causados por una selección inapropiada del transductor de vibración. El transductor de vibración debe transformar confiablemente la vibración de una máquina en una señal eléctrica que pueda ser leída por un analizador de vibraciones o un sistema

de monitoreo. Si la señal eléctrica generada no es representativa de una vibración real, el más sofisticado medidor o analizador disponible, entregará falsa o incorrecta información.

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

1. Modo de Medición

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

2. Tipo de Cojinete

- Este parámetro tiene un efecto significativo en la selección del transductor. En general, los ejes vibran con desplazamientos relativamente grandes en los cojinetes de fricción, pero debido al efecto de amortiguación del aceite y el cojinete, la fuerza transmitida desde el eje a la carcasa puede ser baja. Por lo tanto, las vibraciones del eje pueden ser fuertemente amortiguadas y las lecturas de vibración de un sensor sísmico o un acelerómetro montados en la carcasa de la máquina no reproducen confiablemente la verdadera

señal dinámica del rotor. En este caso se prefiere un sensor de No Contacto.

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

3. Velocidad de la Máquina o Frecuencias Dominantes a ser Medidas

- Este parámetro sirve básicamente para indicar la limitante del sensor sísmico y su insensibilidad a vibraciones de baja y muy alta frecuencia. Varios problemas dentro de una máquina pueden generar frecuencias de vibración desde 0.5 a 50 veces la velocidad de rotación.

4. Temperatura en el Punto de Montaje

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

5. Longitud del Cable, Fuerza de la Señal

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

6. Requerimientos de Instalación

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

7. Masa Relativa, Rotor a Carcaza

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

8. Limitaciones y Antecedentes de la Máquina

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

9. Problemas Inusuales de Instalación

- Los factores ambientales pueden afectar la selección del transductor. Está la máquina localizada en un lugar inusual como una plataforma muy flexible? Está la máquina sujeta a muchos arranques y paradas? El transductor estará expuesto a ambientes químicos, corrosivos u otras sustancias inusuales? Necesitan los transductores estar

protegidos contra daños físicos? Estas son preguntas importantes aplicadas a la selección de transductores.

10. Experiencia del Usuario

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

2.2.3 DISEÑO DE LA DOCUMENTACIÓN NECESARIA

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

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

2.2.3.1 Conocimiento de la Máquina

Cuando existe un excesivo incremento de la vibración, se puede obtener muy buena información si revisamos la hoja de vida o historial de la máquina. Por ejemplo: si han sido reemplazadas partes, como: poleas, acoples, rodamientos, existe una buena posibilidad de que hayan sido afectados, tanto el balanceo como la alineación. Máquinas que han sido adicionadas a una estructura pueden fácilmente cambiar su frecuencia natural y causar resonancia. Cambios en condiciones normales de operación, como velocidad, carga, temperatura o presión, pueden producir cambios significativos en la vibración de la máquina.

En cualquier caso, cuando la vibración de una máquina se incrementa, la causa será por desgaste o deterioro de la condición mecánica de la máquina o por cambios que han sido hechos a la máquina, su estructura o sus condiciones operacionales.

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

Dicho conocimiento determinará la eficiencia y exactitud del diagnóstico. Las características físicas de diseño se asocian con frecuencias de vibración que podrían representar un problema. Tales características, como: Velocidad de rotación, tipo de chumaceras, número de dientes en engranajes, en acoples o en piñones de cadena, número de bolas o rodillos en rodamientos, número de aletas, alabes, cuchillas, etc., deben ser en lo posible recopiladas y almacenadas para cada máquina.

Resumiendo, gracias a la recopilación de la información se puede determinar el procedimiento de obtención de la información dinámica apropiada y hacer mucho más eficiente y exacto su respectivo análisis.

2.2.3.2 Configuración de la Maquinaria

Cualquier software dedicado al mantenimiento predictivo por vibraciones trabaja con base en información almacenada de cada una de las máquinas que conforman el programa de mantenimiento; por lo tanto, el conocimiento de la maquinaria permite configurar los correspondientes archivos de acuerdo con los requerimientos de cada software.

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

Una vez creada la base de datos y configurados los archivos dentro del software, aquella es transferida al hardware o analizador de campo para la correspondiente recopilación de información dinámica en cada una de las máquinas.

2.2.3.3 Recopilación de la Información Dinámica

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

Es importante iniciar un programa de monitoreo de vibración de un tamaño manejable, y después que se tenga la experiencia irlo incrementando. Las máquinas más importantes que se deben monitorear son las principales para la productividad de la planta, y las que tienen una historia negativa de

mantenimiento. Al principio no se deben incluir máquinas de velocidad variable, máquinas muy complejas y máquinas recíprocas.

Para que el programa de monitoreo tenga éxito, las mediciones se tienen que hacer según un programa. La mayoría del equipo debe de probarse mensualmente, y algunas máquinas menos importantes cada tres meses. Una prueba semanal es normal para máquinas críticas. De todos modos, es importante adaptar su programa de mediciones a las máquinas y a su estado. A medida que se adquiere experiencia, será fácil revisar el programa.

2.3 CRITERIOS Y NORMAS SOBRE EL ANÁLISIS VIBRACIONAL

Una vez que un problema específico de máquina ha sido identificado por su firma de vibración, la pregunta siguiente debe ser: "El problema es lo suficientemente grave para requerir mantenimiento?" No hay un acuerdo general sobre como hacer esto por lo que se estudiará varias rutas que han comprobado ser exitosas en la práctica.

El estado de una máquina se determina mejor por una serie de mediciones de vibración hecho en un largo tiempo. Las normas absolutas, que se muestran en el Anexo A, se pueden usar como guía si no hay datos históricos.

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

Existen algunas normas internacionales que proponen unos estándares generales para varios tipos de máquinas y niveles de alarma. Estos niveles pueden aplicarse a una gran cantidad de máquinas, pero hay excepciones que exigen estudiar otras herramientas para poder llegar a una conclusión del estado de máquina.

En el Anexo A, se presentan estas normas, que en el proyecto han sido utilizadas únicamente para obtener valores críticos del funcionamiento de la maquinaria y obtener referencias para emitir criterios sobre el estado general de la maquinaria. Como ya se mencionó anteriormente, el principal criterio que debe ser tomado en cuenta el momento de emitir diagnósticos son los gráficos de tendencias, ya que estos nos indican el nivel de deterioro y fallas en las partes de la maquinaria que se está analizando.

2.4 ANÁLISIS DE VIBRACIONES

2.4.1 TENDENCIAS

La elaboración de tendencias consiste en almacenar las firmas de vibración grabadas a tiempos específicos y de apuntar los cambios en los niveles de vibración a las frecuencias forzadas vs. tiempo.

La manera más sencilla de utilizar las tendencias en el análisis de vibraciones es el establecer un espectro de vibración representativo de una máquina operando normalmente como punto de referencia, y comparar esta referencia con espectros que se grabaron más tarde en la misma máquina. La comparación de espectros es posible por la normalización de orden. Cuando se hace la comparación, hay varios puntos importantes que se tienen que tomar en cuenta:

- Las condiciones en las que opera la máquina, cuando se graba el nuevo espectro deben ser lo más similares a las condiciones en que operaba cuando se grabó el espectro de referencia. Si no, los espectros no son comparables y se pueden cometer errores importantes.
- Los datos de las vibraciones deben ser obtenidos de manera exactamente igual que los datos de referencia. El transductor debe ser montado en el mismo lugar y su calibración debe ser lo más precisa posible.
- Cuando se toman datos de las vibraciones con un analizador TRF o con un recopilador de datos, es importante realizar un promedio de varios espectros instantáneos, para reducir las variaciones aleatorias y los efectos de ruido extraño en la señal medida. La cantidad de promedios espectrales que se graban para producir los espectros deben ser suficientes para producir una firma uniforme y constante. Según la metrología se debe analizar el tiempo de la toma de datos y los beneficios que ofrece cada nuevo promedio y se debe escoger un número de promedios entre 8 y 14.
- En algunas máquinas como turbinas, motores reciprocantes, con un contenido de ruido aleatorio relativamente alto en sus firmas es posible que se necesite tiempos de promedio más largos. Una regla general es grabar un espectro con varios promedios e inmediatamente después grabar otro con la doble cantidad de promedios. Si hay una diferencia significativa, mayor al 5%, entre los espectros la cantidad de promedios se debe duplicar otra vez y se debe grabar otro espectro. Si los dos últimos espectros son similares, entonces la cantidad anterior de promedios es adecuada para la máquina.

2.4.1.1 El Espectro de Referencia

Cuando se lleva a cabo las gráficas de tendencias, es extremadamente importante de estar seguro que el espectro de referencia con que se van a comparar los datos de pruebas posteriores sea realmente representativo de la máquina.

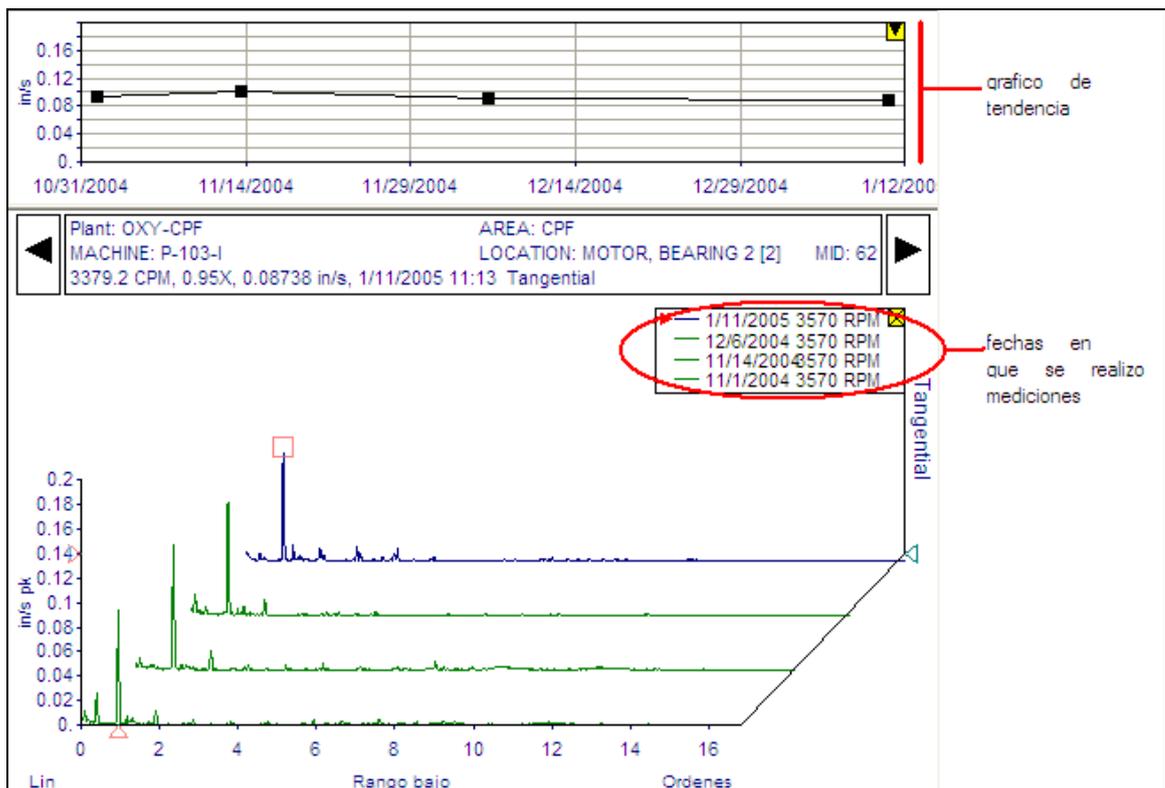


Fig. 2.16 Espectro de Referencia y Gráfica de Tendencia Real

2.4.1.2 Firmas de Vibración Promediadas

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

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

Cuando se hace el promedio de espectros de un grupo de máquinas se debe tener cuidado de verificar que los espectros a promediar sean válidos y que las máquinas de las que provengan no estén defectuosas. Una de las tareas más importantes del analista de vibraciones es de asegurarse que los espectros promedios son válidos y representativos de las máquinas.

2.4.1.3 Frecuencias Forzadas

El valor del análisis de las vibraciones de maquinaria está basado en el hecho que elementos específicos en las partes rotativas de cualquier máquina producirán fuerzas que causarán vibraciones a frecuencias específicas. Una de las más importantes frecuencias forzadas son las RPM de la flecha, y eso proviene del hecho que cualquier rotor siempre presenta una cierta cantidad de desbalanceo residual. Esto imparte una fuerza

centrífuga radial en los rodamientos y causa la vibración de la estructura a la frecuencia fundamental o 1x. Los llamados tonos de rodamientos, que son característicos de cada geometría de rodamiento son fuerzas generadas por defectos en los anillos del rodamiento y en los mismos elementos de rodantes. Las frecuencias de engranaje de los engranes provienen de los impactos individuales de los dientes de un engrane unos contra otros y la frecuencia de engranaje es igual al número de dientes en el engrane multiplicado por las RPM del engrane. Las frecuencias de paso de aspas o de alabes son similares al engranaje y son igual al número de alabes en una impulsora, multiplicado por las RPM. Cada frecuencia forzada va a crear un pico en el espectro de vibración. La amplitud del pico depende de la gravedad de la condición que lo causa. De esa manera, la frecuencia indica el tipo de problema, y la amplitud indica su gravedad.

La figura presenta un ejemplo de una bomba que llevaba una tendencia relativamente constante, pero tuvo un incremento abrupto en la penúltima medición. A través del monitoreo de vibraciones se pudo predecir y corregir la falla que hubiera podido causar daños mas graves.

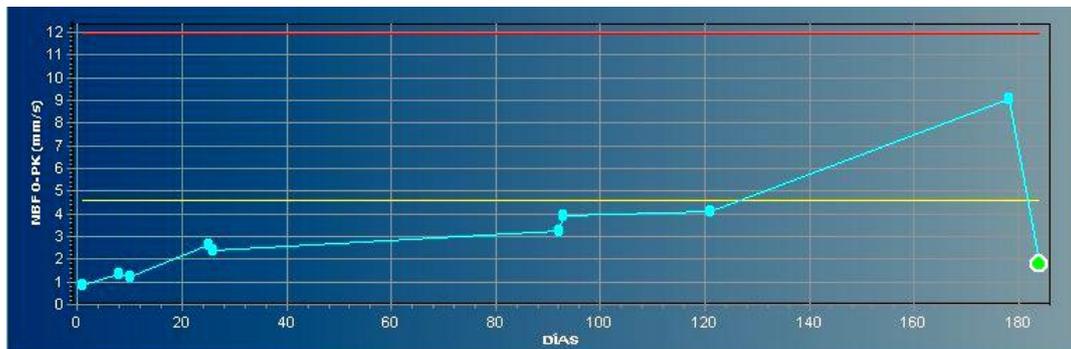


Fig. 2.17 Curva de Tendencias¹⁷.

¹⁷ Ilustración tomada de: **A-Maq S.A.**, Tutorial de Vibraciones para Mantenimiento Mecánico, Enero 2005

2.4.2 ANÁLISIS DE LA GRAVEDAD DE LOS CAMBIOS DE CONDICIÓN

Determinar cuando la vibración de una máquina es excesiva, al punto que exija pararla y repararla, es una de las decisiones más difíciles que tiene que enfrentar el analista de vibraciones. La razón obvia es porque no existen unos parámetros absolutos en cuanto a la tolerancia de vibración, que nos diga cuando la falla es inminente.

Las máquinas difieren considerablemente entre sí, en cuanto a tamaño (Masa), rigidez y amortiguamiento, y por ello muestran diferentes niveles de vibración bajo condiciones operacionales similares. Un nivel de vibración que puede representar un problema serio en una máquina, puede ser normal para otra. Por ello, en la sección siguiente se ofrecen algunas guías prácticas y sugerencias, como ayuda al analista en la selección de los límites de vibración.

2.4.3 DIAGNÓSTICO DE PROBLEMAS

La información dinámica de maquinaria se fundamenta en las características de la vibración (Amplitud, Frecuencia y Fase), y de su interpretación. Podemos identificar y diagnosticar los problemas, ya que cada uno de ellos tiene características propias.

La característica de la vibración, clave en el diagnóstico de problemas es la Frecuencia.

El análisis de espectros que se define como la transformación de una señal en el dominio del tiempo hacia la representación en el dominio de la frecuencia, tiene sus raíces a principio del siglo XIX, cuando varios matemáticos lo investigaron desde una base teórica. Pero fue un hombre práctico, un ingeniero con una educación matemática, quien desarrolló la teoría en que están basadas casi todas nuestras técnicas modernas de análisis de espectro. Este ingeniero era Jean Baptiste Fourier (1768-1830).

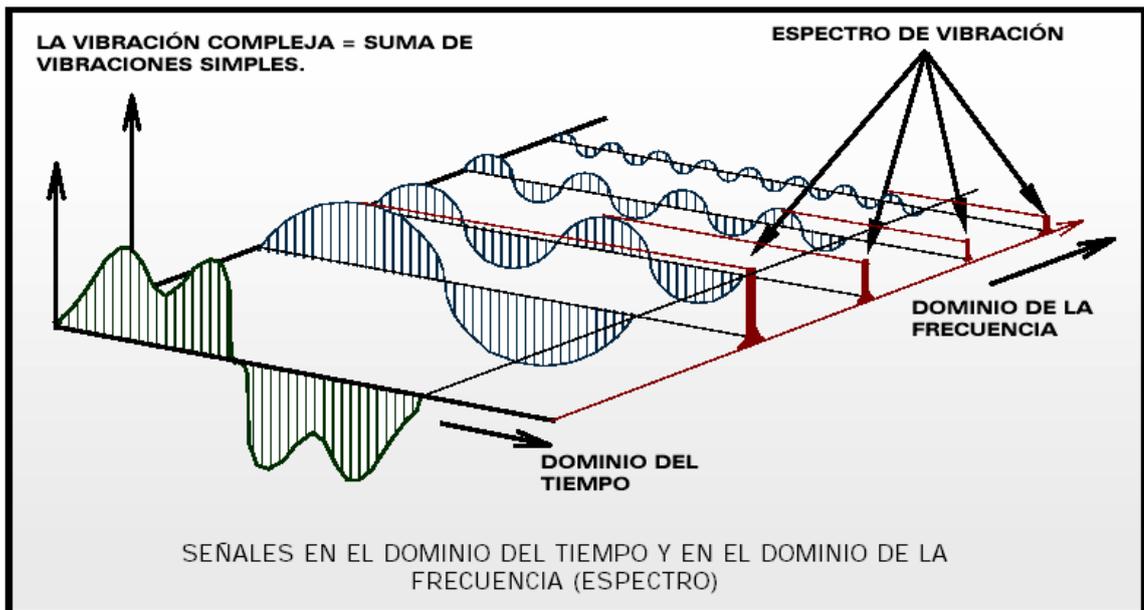


Fig. 2.18 Función de la Transformada Rápida de Fourier¹⁸.

Entonces lo que hace un analizador de espectros que trabaja con la transformada rápida de Fourier es capturar una señal desde una máquina, luego calcula todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y por último las muestra en forma individual en el eje X de la frecuencia. En la Fig. 2.18 puede notarse claramente la señal compleja (en color verde), capturada desde una máquina. A dicha señal se le calculan todas las series de señales sinusoidales en el dominio del tiempo (vistas en azul) y por último se muestra cada una en el dominio de la frecuencia (vistas en rojo).

Ahora que se tiene una idea de las técnicas que utiliza el equipo para la medición de vibraciones para transformar en espectros con el dominio de frecuencia a las lecturas de vibración, podemos empezar a descifrar estos espectros para saber el tipo de problemas que la maquinaria presenta.

El primer paso en el análisis de vibración de máquina es la identificación del pico espectral que corresponde a la velocidad de rotación de la flecha, o sea el llamado pico 1x, también se llama el pico de primera orden.

¹⁸ Ilustración tomada de: **A-Maq S.A.**, Tutorial de Vibraciones para Mantenimiento Mecánico, Enero 2005

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

Los tipos más comunes de máquinas recíprocas son bombas a pistón, compresores y motores a combustión interna. En todas estas máquinas el ritmo del pistón (Por lo general 1x) es dominante, junto con el ritmo de ignición de los motores con 4 ciclos. No es fuera de lo común encontrar niveles de vibración tan altos como 125 VdB (7 pulgadas por segundo pico) en máquinas sanas como estas. El analista juzgará el estado de la máquina comparando con niveles anteriores, en lugar de aplicar niveles de referencia absolutos.

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

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

Después de la verificación de la validez de los espectros y de la identificación positiva de los picos espectrales especialmente los componentes 1x, el diagnóstico de los problemas de máquinas puede empezar. La sección siguiente hace la relación entre los problemas de máquina y sus firmas de vibración correspondientes.

2.4.3.1 Desalineación

La desalineación es una de las principales causas de fallas de componentes y se la considera la segunda fuente que prevalece en vibraciones. Se ha encontrado que la desalineación ocurre más frecuentemente que el desbalanceo¹⁹.

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

La desalineación es una condición en la que las líneas centrales de flechas acopladas no coinciden. Si las líneas centrales de las flechas desalineadas están paralelas pero no coinciden, entonces se dice que la desalineación es una desalineación paralela (Offset). Si las flechas desalineadas se juntan pero no son paralelas, entonces la desalineación se llama desalineación angular. Casi todas las desalineaciones que se observan en la práctica son una combinación de estos dos tipos.

¹⁹ **Ron Bodre**, Introduction to Machine Vibration, DLI Engineering Corp. Estados Unidos de América

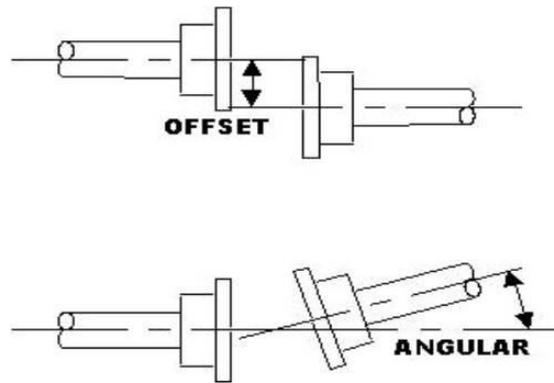


Fig. 2.19 Formas de Desalineamiento^a

2.4.3.1.1 Desalineación Paralela

La desalineación paralela produce una fuerza de cizallamiento y un momento de flexión en la extremidad acoplada de cada flecha, niveles de vibración altos en 2x y en 1x. Se producen en las direcciones radiales o tangenciales en los rodamientos en cada lado del acoplamiento, y son de fase opuesta. En la mayoría de los casos, los componentes 2x estarán más altos que los 1x. Los niveles axiales 1x y 2x estarán bajos solamente en desalineación paralela y su fase estará opuesta.

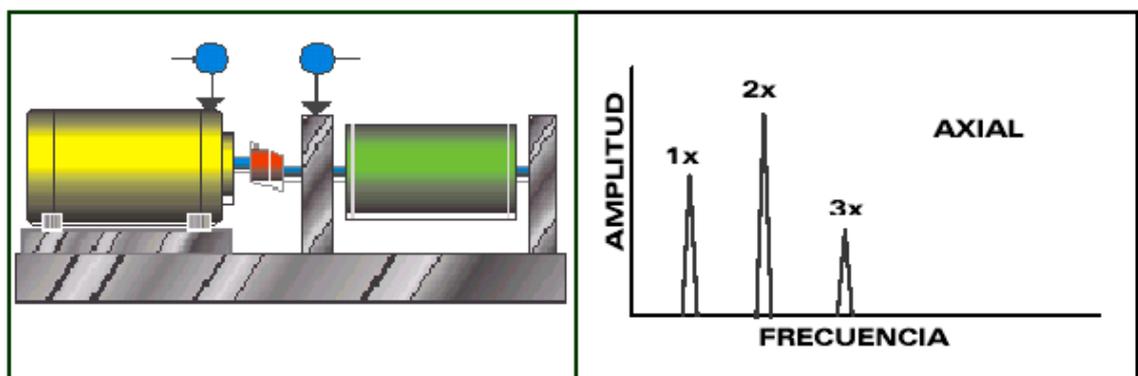


Fig. 2.20 Espectro de Desalineación Paralela^b

^a Ilustraciones tomadas de: **Asociación Colombiana de Ingenieros, Cundinamarca**, Seminario Taller: Mantenimiento Predictivo Basado en Vibraciones y Termografía, Colombia 2003.

^b Ilustraciones tomadas de: **A-Maq S.A.**, Tutorial de Vibraciones para Mantenimiento Mecánico, Enero 2005

Si la velocidad de la máquina puede variar, la vibración, debido al desbalanceo también variará según el cuadrado de la velocidad. Si se duplica la velocidad, el nivel del componente de desbalanceo se incrementará por un factor de cuatro, pero la vibración debida a la desalineación no cambiará de nivel.

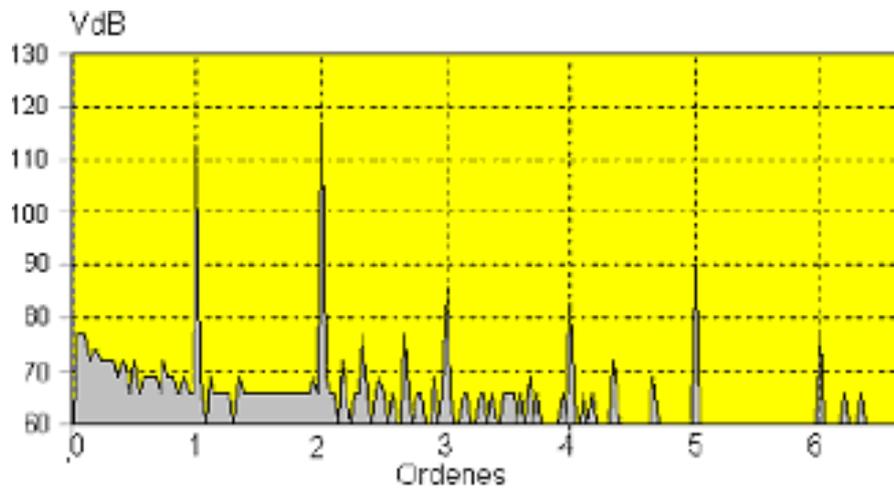


Fig. 2.21 Espectro típico de una máquina desalineada^c.

2.4.3.1.2 Desalineación Angular

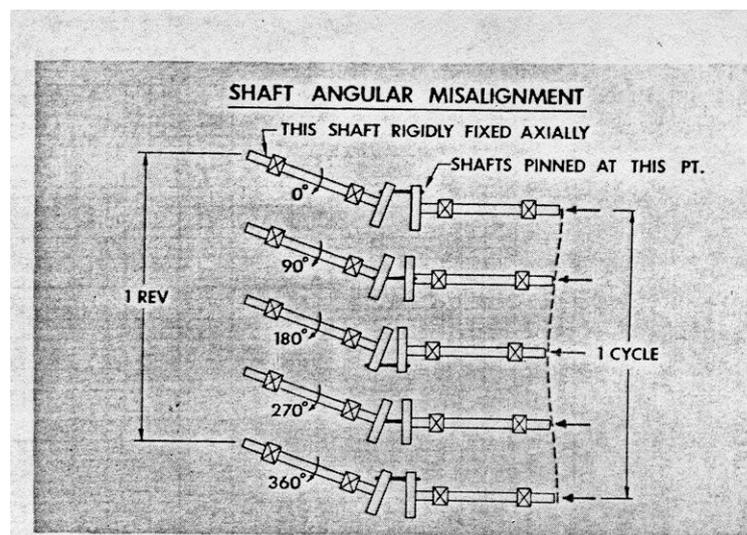


Fig. 2.22 Desalineamiento Angular^a.

^c Ilustraciones tomadas de: **Ron Bodre**, *Introduction to Machine Vibration*, DLI Engineering Corp. Estados Unidos de América

La desalineación angular produce un momento de flexión en cada flecha, y esto genera una fuerte vibración en 1x, y algo de vibración en 2x en la dirección axial en ambos rodamientos y de fase opuesta. También habrá niveles relativamente fuertes en direcciones radiales y/o transversales 1x y 2x, pero en fase.

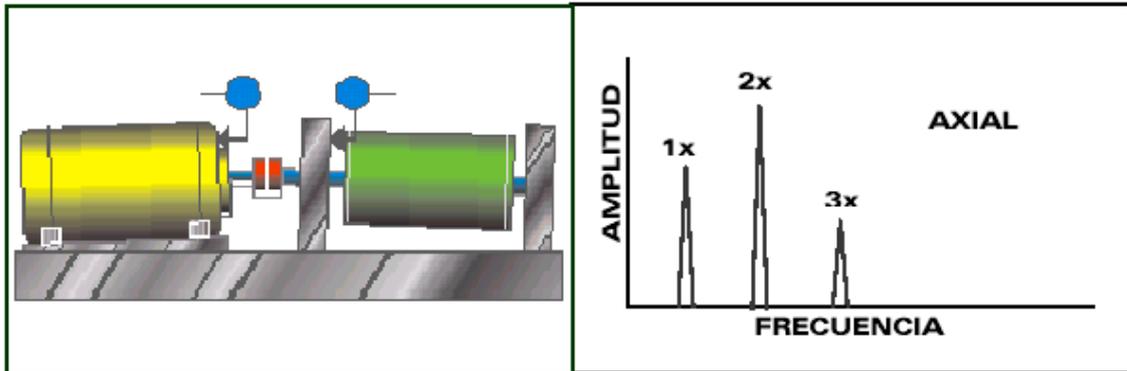


Fig. 2.23 Espectro de Desalineación Angular^b

Un acoplamiento desalineado generalmente producirá niveles axiales bastante altos en 1x en los rodamientos a las otras extremidades de las flechas también. De manera general, la mayoría de los casos de desalineación son una combinación de los tipos descritos arriba. El diagnóstico está basado en picos 2x más fuertes que los picos 1x y en la existencia de picos axiales 1x y 2x.

La firma de vibración causada por una flecha flexionada se parece a la firma causada por desalineación, y es fácil confundirlas. Una flecha flexionada, que por lo general esta causada por un calentamiento desigual en el rotor, debido a una barra de rotor en mal estado, causa altos picos axiales 1x y 2x y altos picos radiales y transversales 1x en ambos rodamientos.

2.4.3.2 Desbalanceo

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

Esta es la razón por la cual, un problema de vibración por desbalanceo, se observa a la frecuencia de rotación del rotor. La mayor componente de vibración se observará en las direcciones radiales, aunque para rotores montados en voladizo o cantilever, la componente axial de la vibración será comparable con la radial, o en ocasiones, aún mayor.

Aunque el desbalanceo es un problema fácil de diagnosticar, se debe tener cuidado, porque existen otros problemas que normalmente también aparecen a la frecuencia de rotación del rotor. Otra forma de confirmar el desbalanceo es mediante la forma de onda en dominio del tiempo.

Las máquinas están sujetas a varias condiciones de desbalanceo, las más importantes se llaman estáticas y dinámicas. El desbalanceo estático es un estado donde el centro de rotación de un rotor no corresponde a su centro de masa o en otras palabras, su centro de gravedad no está ubicado en su eje de rotación. Esto resulta en una fuerza centrífuga, que se aplica en el rodamiento a la frecuencia $1x$. Esta fuerza $1x$ es proporcional al cuadrado de la velocidad del rotor, lo que quiere decir que máquinas de alta velocidad requieren un balanceo con mucha más precisión que máquinas de baja velocidad.

El tipo de desbalanceo más sencillo es equivalente a un punto pesado en un punto único del rotor. Esto se llama un desbalanceo estático ya que se podrá ver aunque el rotor no está girando. Si se coloca el rotor en una arista de presión nivelada, el punto pesado siempre buscará la posición más baja. Otra forma más compleja de desbalanceo, llamada desbalanceo dinámico es muy común y lo examinaremos a continuación.

El desbalanceo estático resulta en fuerzas 1x en los dos rodamientos de soporte del rotor, y las fuerzas en ambos rodamientos siempre están en la misma dirección. Se dicen que sus señales de vibración son en fase una con otra. Un desbalanceo estático puro, producirá un fuerte pico 1x en el espectro de vibraciones y su amplitud será proporcional a la gravedad del desbalanceo y al cuadrado de la velocidad. Los niveles relativos de la vibración 1x en los rodamientos dependen de la ubicación del punto pesado en el rotor.

Cuando se está examinando un espectro sin información acerca de fase, no se puede distinguir el desbalanceo estático del dinámico. Para corregir el desbalanceo dinámico se necesita un trabajo de balanceo en varios planos y el desbalanceo estático teóricamente se puede corregir con un solo peso de corrección. El peso de corrección se debe colocar exactamente al lado opuesto al desbalanceo y esto a veces no será fácil.

2.4.3.2.1 Desbalanceo Estático

Generalmente producido por desgaste radial superficial no uniforme en rotores en los cuales su largo es despreciable en comparación con el diámetro. El espectro presenta vibración dominante con una frecuencia igual a 1x del rotor.

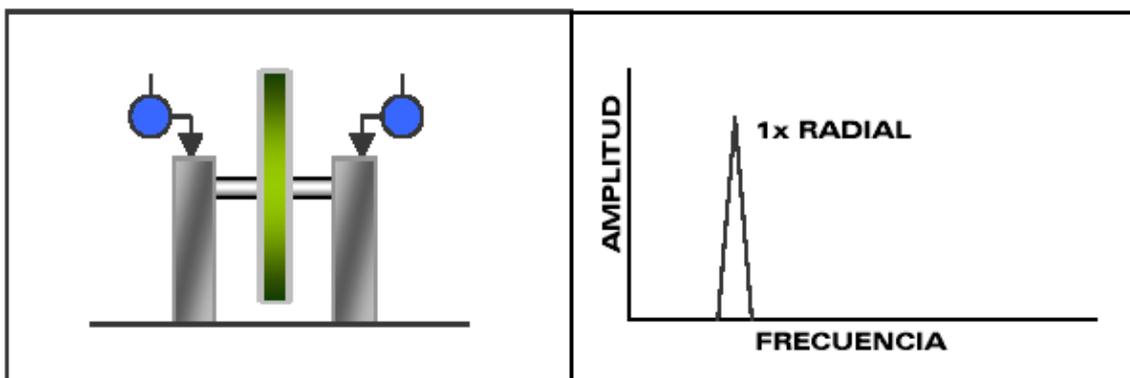


Fig. 2.24 Espectro de Desbalanceo Estático^b

2.4.3.2.2 Desbalanceo Dinámico

El desbalanceo dinámico ocurre en rotores medianos y largos. Es debido principalmente a desgastes radiales y axiales simultáneos en la superficie del rotor. El espectro presenta vibración dominante y vaivén simultáneo a frecuencia igual a 1x del rotor.

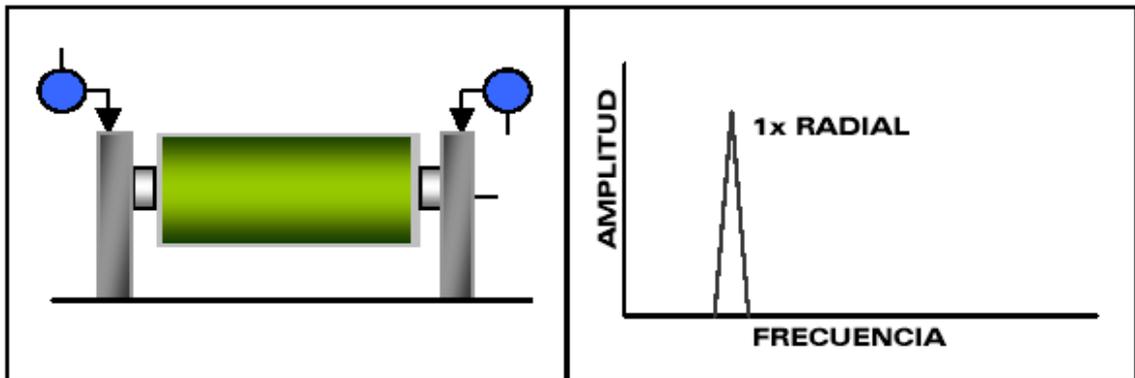


Fig. 2.25 Espectro de Desbalanceo Dinámico^b

2.4.3.2.3 Rotor Colgante

Ocurre en rotores que se encuentran en el extremo de un eje. Es producido por desgaste en la superficie del rotor y doblamiento del eje. El espectro presenta vibración dominante a 1x del rotor, muy notoria en dirección axial y radial.

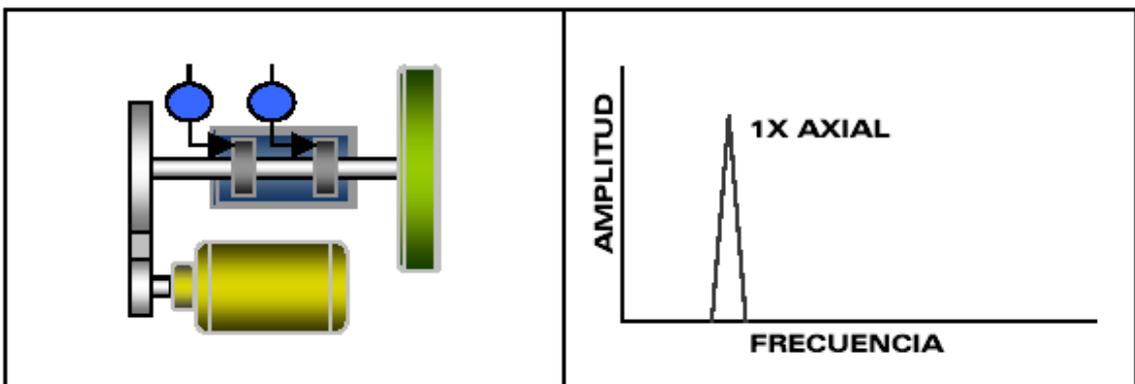


Fig. 2.26 Espectro de Rotor Colgante^b

2.4.3.2.4 Excentricidad

Fácilmente confundible con desbalanceo. Ocurre cuando el centro de rotación no coincide con el centro geométrico en una polea o engranaje. La mayor vibración ocurre a 1X del elemento con excentricidad, en dirección de la línea que cruza por los centros de los dos rotores.

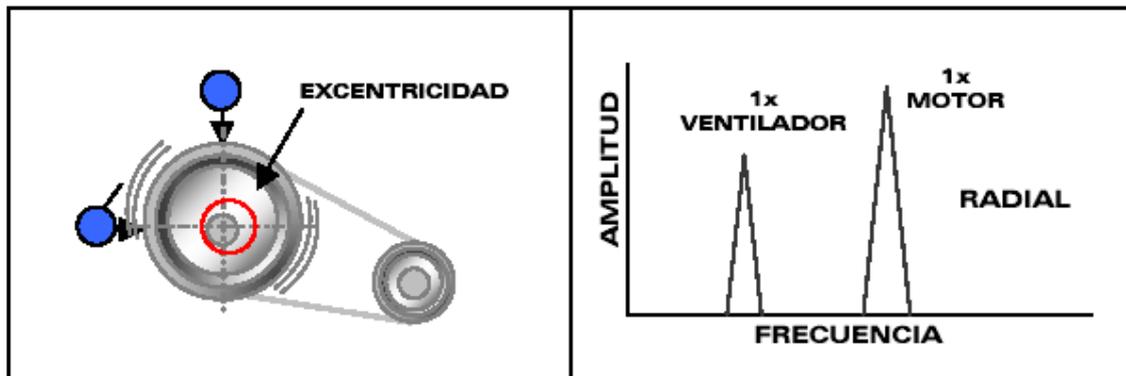


Fig. 2.27 Espectro de Excentricidad^b

2.4.3.2.5 Pandeo del Eje

Más común en ejes largos. Se produce por esfuerzos excesivos en el eje. Genera vibración axial alta con diferencia de fase de 180 grados medida en los dos soportes del rotor. La vibración dominante es de 1x si el pandeo está cercano al centro del eje, y es de 2x si el pandeo está cerca del rodamiento.

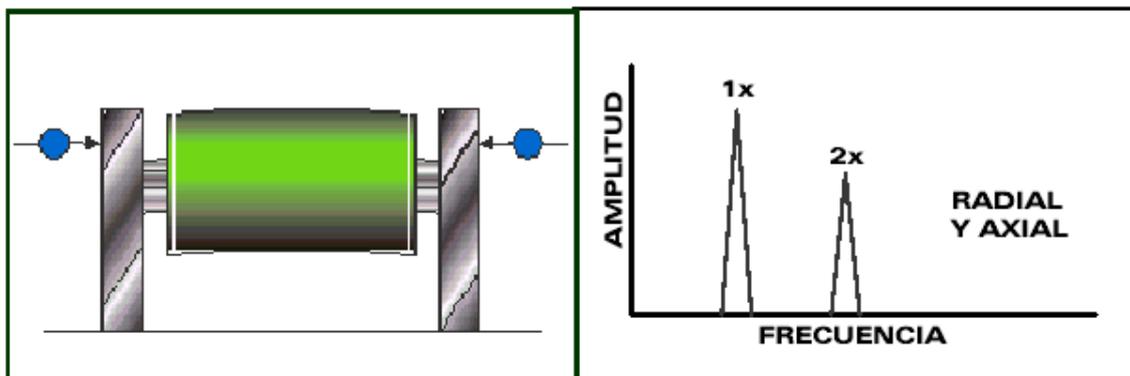


Fig. 2.28 Espectro de Pandeo en el Eje^b

2.4.3.3 Aflojamiento mecánico

La soltura mecánica típica resulta como vibración predominante a la frecuencia de dos veces la velocidad de rotación (2xRPM), pero se puede mostrar en órdenes de frecuencia más bajos y más altos según el tipo de soltura mecánica, como veremos a continuación.

2.4.3.3.1 Soltura Estructural

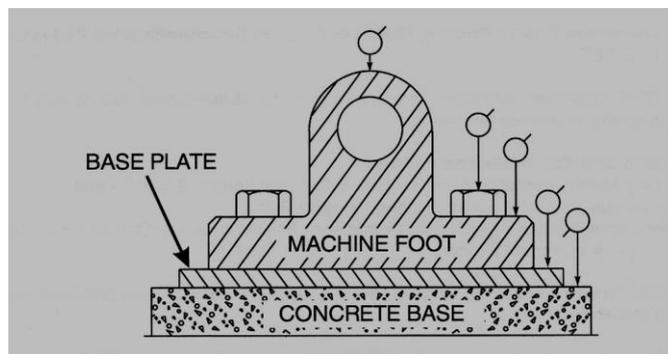


Fig. 2.29 Soporte Típico de una Máquina^a

Este tipo de soltura se presenta por deterioro de las bases o aflojamiento de los pernos de anclaje de skids o patines. Su manifestación espectral se podría confundir con desbalanceo porque se genera vibración a la frecuencia de 1x, radialmente.

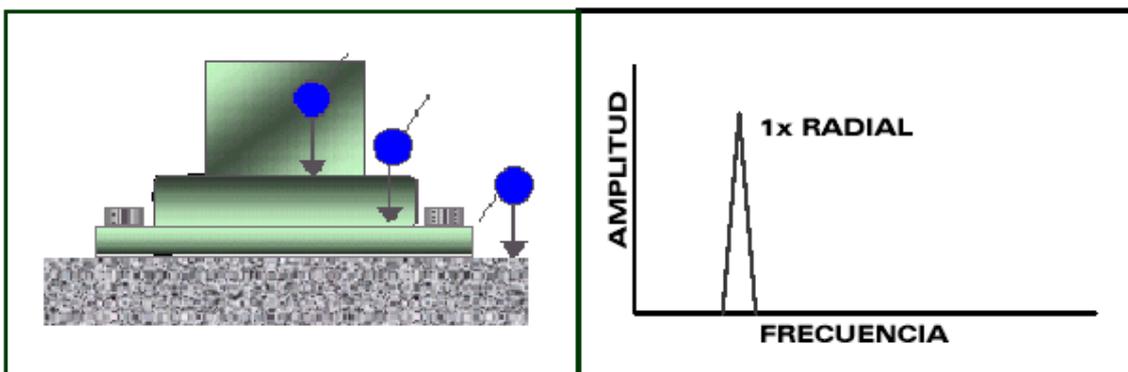


Fig. 2.30 Espectro de Soltura Estructural^b

La soltura mecánica es comúnmente un problema muy direccionado y es lo que hace la diferencia frente al desbalanceo. Al tomar lecturas radiales alrededor del cojinete a intervalos de 30 grados, se pueden observar cambios muy notorios en amplitud. El análisis de fase puede revelar cambios de fase hasta de aproximadamente 180 grados en mediciones verticales, entre los componentes entre los cuales se localice la soltura.

2.4.3.3.2 Soltura en pedestales o chumaceras

Este tipo de soltura se presenta en pernos o en pedestales de chumaceras y por grietas o fisuras estructurales a nivel de soporte de chumaceras.

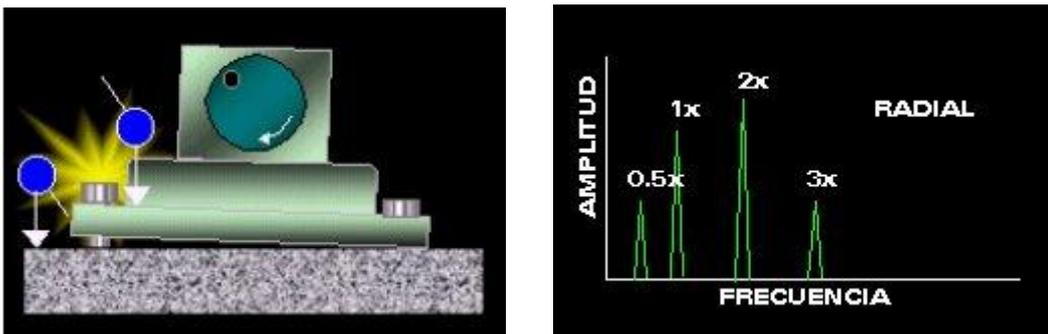


Fig. 2.31 Espectro de Soltura en Pedestales o Chumaceras^b

La vibración generada se caracteriza por ser predominantemente radial y compuesta por picos mayores a la frecuencia de 2x aunque también aparecen picos a 1x y algunas veces a 3x. No es raro encontrar picos sub-armónicos a las frecuencias de 1/2x y 1/3x.

Para este caso también se aplica el análisis de fase explicado en el caso anterior.

2.4.3.3.3 Soltura de eje o componentes asociados al eje

Este tipo de soltura se presenta por inadecuado ajuste de componentes que entran en contacto directo con el eje de una máquina, lo cual genera muchos armónicos debido a la respuesta no lineal de las partes flojas, a las fuerzas dinámicas del rotor. Esto causa formas de onda truncadas.

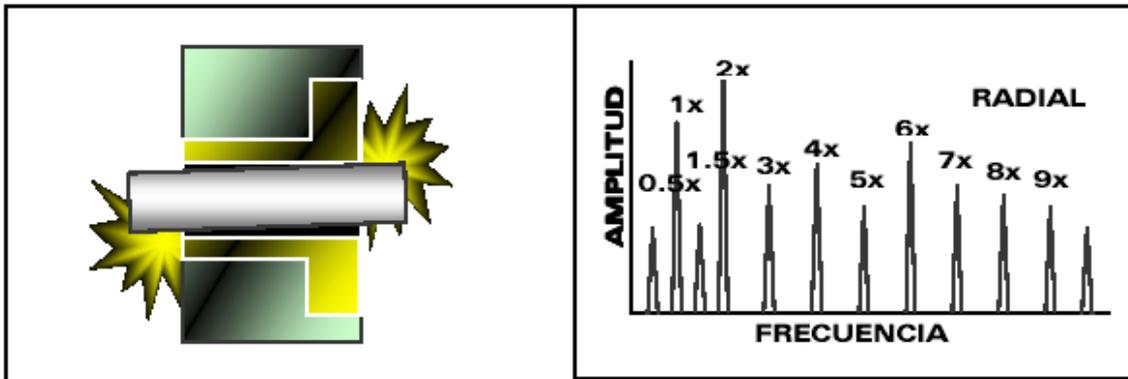


Fig. 2.32 Espectro de Soltura en Eje^b

Los ejemplos más comunes de este tipo de soltura son:

- 1) Rodamientos sueltos en sus chumaceras y/o en sus ejes
- 2) Excesiva tolerancia de cojinetes
- 3) Rotor o impulsor flojo en su eje
- 4) Acoples flojos o con excesivas tolerancias

Las lecturas de fase son a menudo inestables y pueden variar considerablemente de una medición a otra, particularmente si el rotor cambia de posición en el eje de un arranque a otro.

Espectralmente se aprecian como arreglos multiarmónicos de la frecuencia de giro del eje problema. El número de picos se incrementa junto con el problema en sí. También aparecen a menudo picos sub-armónicos a las frecuencias de $1/2x$ y $1/3x$ y sus armónicos.

2.4.3.3.4 Soft Foot

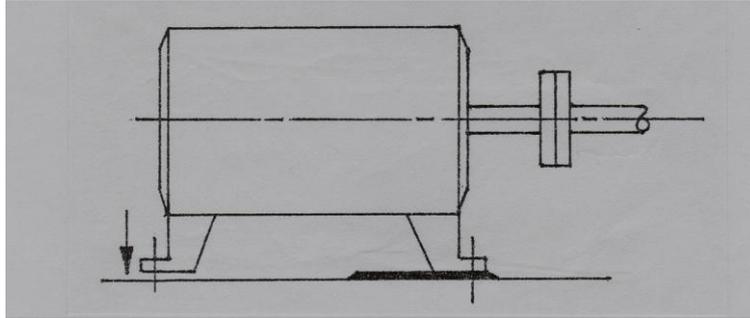


Fig. 2.33 Esquema de una Máquina con Soft Foot^a.

El término "Soft Foot" se refiere a la distorsión que sufren algunas máquinas por efecto de las fuerzas de anclaje.

- 1) Es posible que las patas de la máquina, por defecto de construcción, no descansen sobre el mismo plano.
- 2) Es posible que la base de anclaje de la máquina no conserve el mismo plano en los puntos de anclaje.
- 3) Es posible que tras la labor de alineación, las calzas (Shims) no permitan la conservación del plano mencionado.
- 4) Es posible que exista una sutil combinación de todas las anteriores.

En resumen, cuando las patas de la máquina son obligadas por el perno de anclaje a fijarse a su base, se induce distorsión de la carcasa, obviamente desalineación de sus componentes internos y flexión de ejes. Como resultado tendremos:

- Desalineación entre ejes
- Desalineación en cojinetes

- Desbalanceo y/o
- Excentricidad estática del entrehierro (Motores)

Para identificar el “soft foot” o “pié suave”, se debe mantener la máquina operando y monitoreada vibracionalmente. Se debe aflojar un perno de anclaje para aliviar los esfuerzos sobre esa pata, observe la medición de vibración, si su nivel se reduce notoriamente se puede decir que la máquina tiene soft foot. De no encontrar problemas con ese perno, de todas maneras se debe realizar el procedimiento en todos los puntos de anclaje de la máquina.

2.4.3.4 Fallas en rodamientos

Los problemas de rodamientos con elementos rodantes son las faltas más comunes que se diagnostican en análisis de vibración. Un rodamiento defectuoso producirá componentes de vibración que son múltiplos exactos de 1x, en otras palabras, son componentes no síncronos. La existencia de componentes no síncronos en un espectro de vibraciones es una bandera roja para el analista e indica que pueden existir problemas de rodamientos y que el analista inmediatamente debería de excluir otras posibles fuentes de este tipo de componentes para verificar el diagnóstico.

Tipos de vibración causada por deterioro en rodamientos

a. Vibración aleatoria, frecuencias ultrasónicas:

Las mediciones en la región de frecuencias ultrasónicas de 5000 a 120.000 Hz aproximadamente son hechas por una variedad de instrumentos y técnicas. Cada una de ellas es significativa en la detección de defectos incipientes y lo que se ha determinado por la experiencia es que estas mediciones son solo un indicador, no el indicador de la condición del

rodamiento. Deben ser usadas en conjunto con el análisis espectral de la vibración para evaluar mejor la condición del rodamiento.

b. Frecuencias naturales de los componentes de los rodamientos:

Las frecuencias naturales de los componentes de rodamientos instalados se dan más comúnmente entre 500 y 2000 Hz aprox. Cada componente vibrará a su respectiva frecuencia natural cuando es impactado; por ejemplo, si el rodillo de un rodamiento es impactado intermitentemente cada vez que él pasa sobre un defecto localizado en su pista. Realmente existen varias frecuencias naturales de diferentes componentes en la región mencionada, pero habrá algunas que son predominantes sobre otras. Por ello, cuando el defecto se desarrolla más allá del tamaño microscópico, comienzan a excitar las frecuencias naturales, convirtiéndose en la "segunda línea de detección". A medida que el defecto crece, causa mayores impactos, los cuales causan mayor respuesta en los picos de las frecuencias naturales. Eventualmente, cuando el desgaste progresa, aparecen más frecuencias alrededor de estas excitaciones, muchas de las cuales serán bandas laterales a $1x$ del eje del rodamiento impactado.

Otro punto importante es el hecho de que las frecuencias naturales son independientes de la frecuencia de rotación del eje. Significa que no importa si la velocidad de giro es baja o alta, los impactos excitarán las mismas frecuencias naturales; sin embargo, su respuesta en amplitud será proporcional a la velocidad del impacto, o sea, que a mayor velocidad de giro su respuesta será normalmente con una mayor amplitud.

c. Frecuencias de defectos rotacionales:

A través de los años, una serie de fórmulas han sido desarrolladas para ayudar a detectar defectos específicos en rodamientos como son; pista interior, pista exterior, canastilla y elementos rodantes. Se han basado en la geometría del rodamiento, en el número de elementos rodantes y en la velocidad de giro del eje involucrado.

En estas ecuaciones se deben conocer los parámetros de diseño de los rodamientos: Diámetro Pitch (Pd), diámetro de los elementos rodantes (Bd), número de elementos rodantes (Nb) y ángulo de contacto. Si el analista no conoce todos los parámetros exigidos, pero conoce el número de elementos rodantes, puede utilizar las ecuaciones de aproximación de la misma forma.

Estas ecuaciones representan frecuencias de defectos, en otras palabras, no debe existir vibración a dichas frecuencias en un rodamiento sano. Si la hay, significa que existe un defecto, al menos incipiente y exige la atención del analista.

Nótese que el producto de número de bolas x RPM es igual a la suma de las frecuencias de pista Interior y Exterior (BPFI + BPFO). Por años, muchos han buscado vibración a la frecuencia de Número de bolas x RPM; sin embargo, es más común encontrar vibración a cada una de las frecuencias de pistas.

En el Anexo B se puede ver las formulas para calcular y aproximar las frecuencias de los rodamientos. En la gran mayoría de los equipos analizadores de vibración, existen bases de datos con cada una de estas constantes, para multiplicarlas por la velocidad nominal de la máquina y obtener las frecuencias forzantes para cada rodamiento.

Es muy difícil asignar niveles definidos de severidad de vibración a los defectos en rodamientos, a diferencia de como ocurre cuando analizamos un problema de desbalanceo, donde la vibración permitida es mucho mayor que la permitida para un defecto de rodamientos; además, existe una variedad de rodamientos montados en una mayor variedad de diferentes máquinas, donde cada una de ellas provee una trayectoria diferente de la señal de vibración hacia el transductor.

Lo mas importante para tener en cuenta como indicador de deterioro significativo en rodamientos, es la presencia de armónicos de frecuencias asociadas a defectos de rodamientos, particularmente si ellos están

rodeados de bandas laterales espaciadas por 1x o por frecuencias de otros defectos del rodamiento; independientemente de la amplitud.

Pistas

Los defectos en las pistas se pueden identificar por picos a su frecuencia característica. Es común encontrar que a medida que el defecto crece los picos crecen hasta cierto punto, para luego dar paso a la generación de bandas laterales espaciadas por 1x. A mayor tamaño del defecto mayor será el número de bandas laterales generadas y no solo alrededor de las frecuencias fundamentales sino de sus armónicos.

Normalmente la amplitud del pico a la frecuencia de pista exterior es mayor que la amplitud del pico a la frecuencia de pista interior. Esto es debido, muy probablemente al hecho de que el transductor se localiza generalmente mucho más cerca de la pista exterior. Además, la señal de vibración de la pista interior debe pasar a través del conjunto rotativo del rodamiento en su trayectoria hacia el transductor de vibración, lo que hace que la señal llegue más débil.

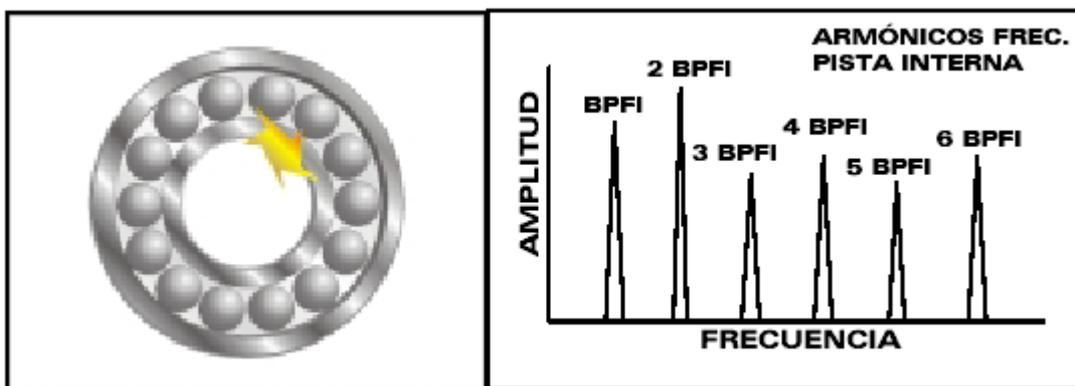


Fig. 2.34 Falla en pista interna^b.

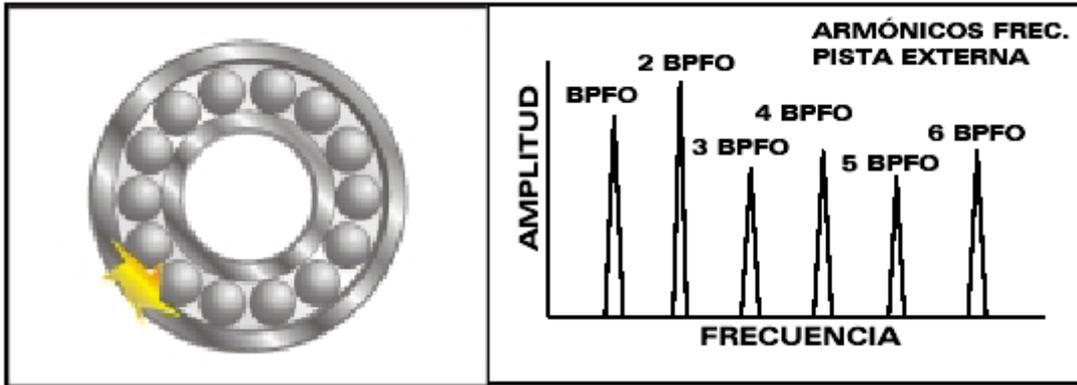


Fig. 2.35 Falla en pista externa^b.

Elementos rodantes

Cuando se presentan defectos en los elementos rodantes, la vibración registrada a menudo es no solamente a la frecuencia rotacional de bolas (BSF), sino también a la frecuencia de canastilla o frecuencia fundamental del tren de bolas (FTF). Claro está, que no siempre que aparece la frecuencia rotacional de bolas significa que existen defectos en los elementos rodantes.

Si más de un elemento rodante tiene defectos se genera vibración a la frecuencia igual al número de bolas con defectos por la frecuencia rotacional de bolas.

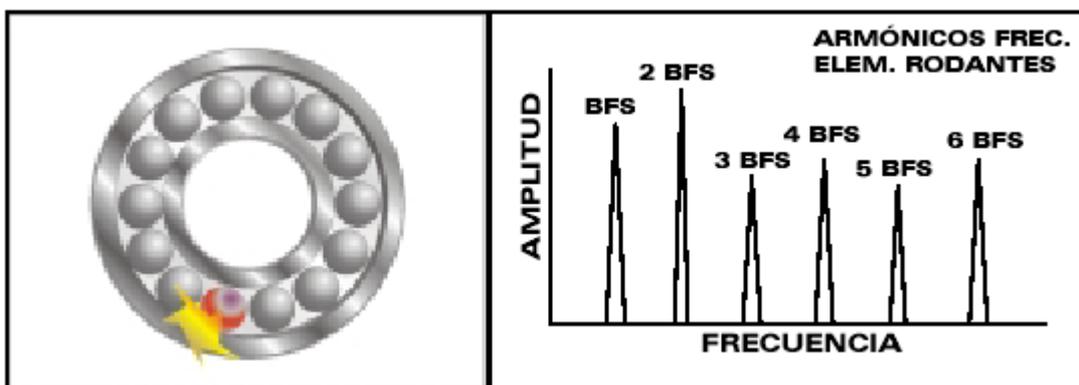


Fig. 2.36 Falla en elementos rodantes^b.

Canastilla

Aunque los problemas de rodamientos son clásicamente de alta frecuencia, la frecuencia fundamental de la canastilla siempre será subsincrónica en un rango aproximado entre $0.33 \times \text{RPM}$ y $0.48 \times \text{RPM}$. La mayoría de los casos se presentan entre 0.35 y $0.45 \times \text{RPM}$. Sin embargo, la frecuencia de canastilla normalmente no aparece a su frecuencia fundamental, sino que muy probablemente lo hará como banda lateral alrededor de la frecuencia de paso de bolas o alrededor de una de las frecuencias de pistas.

La aparición de vibración a la frecuencia rotacional de bolas indica algunas veces que la canastilla está rota y que los elementos rodantes están cargando fuertemente la canastilla.

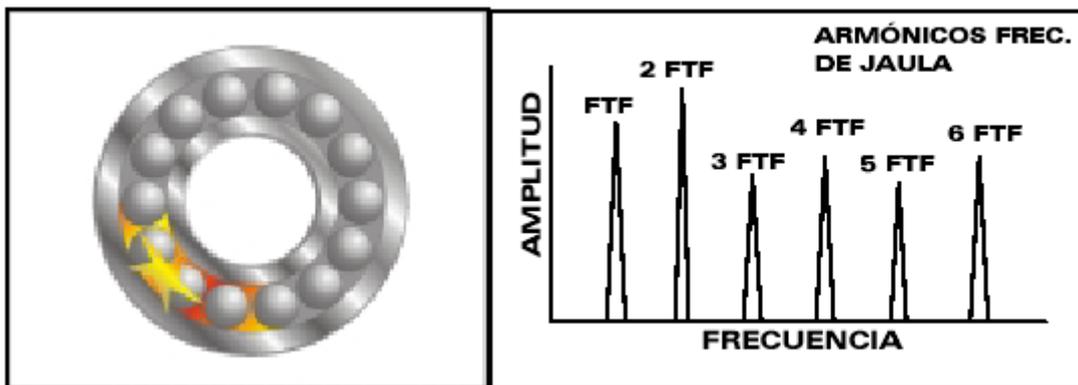


Fig. 2.37 Fallas en la canastilla^b.

2.4.3.5 Fallas en chumaceras

La mayoría de las chumaceras generarán picos espectrales a frecuencias más bajas que $1x$, y estos se llaman picos subsíncronos. A veces, los armónicos de estos picos subsíncronos también se generan, lo que indica una fuerte degeneración del rodamiento. A continuación mencionamos

algunas causas que se tienen que investigar cuando se hace el diagnóstico de las chumaceras.

2.4.3.5.1 Remolino de aceite (Oil Whirl)

Es una condición en la que ocurre una fuerte vibración entre $0.38x$ a $0.48x$. Nunca aparece en exactamente $0.5x$, pero siempre está un poco más bajo de esta frecuencia. Está causado por un juego excesivo y una carga radial ligera, lo que resulta en una acumulación de la película de aceite y obliga al gorrón de migrar en el rodamiento a menos de la mitad de la velocidad de rotación del eje. El remolino de aceite es una condición seria, que necesita corrección, cuando se encuentra, ya que se puede deteriorar rápidamente hasta el punto donde hay contacto de metal a metal en el rodamiento.

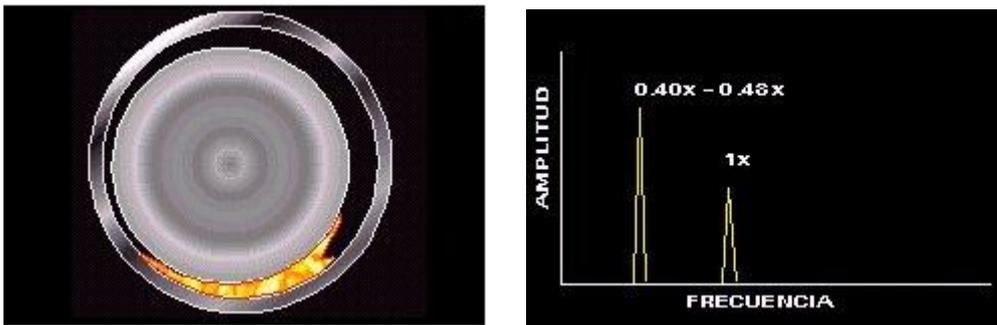


Fig. 2.38 Remolino de Aceite^b.

2.4.3.5.2 Latigazo de aceite

El latigazo de aceite es una condición muy destructiva que ocurre a veces en grandes ensamblados con varios rotores operados arriba de velocidades críticas. El latigazo de aceite ocurre cuando el componente de excitación por remolino de aceite llega a una frecuencia igual a la frecuencia natural de la flecha. La resonancia está excitada y el resultado son niveles de vibración muy altos. El latigazo de aceite a veces ocurre al arrancar, en máquinas con flechas largas. Ya que la frecuencia natural que se está excitando es la influencia controladora en el sistema, la frecuencia de la vibración no

cambiará a medida que se incrementa la velocidad. Esto en contraste con el sencillo remolino de aceite, cuya frecuencia se cambia con la velocidad de la flecha. Esto proporciona un buen método para la detección de latigazo de aceite.

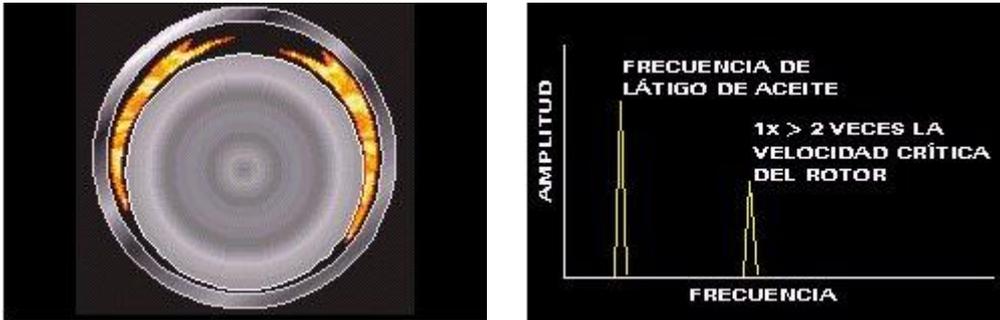


Fig. 2.39 Látigo de Aceite^b.

Las llamadas velocidades críticas son velocidades en las que se excita una frecuencia natural de la flecha. La mayoría de las máquinas con flechas largas tendrán varias velocidades críticas, y la velocidad de operación estará por lo general arriba de la primera velocidad crítica. La solución al remolino de aceite, y al latigazo de aceite es un juego adecuado pequeño en el rodamiento y una carga radial adecuada. Cuando una gran turbina está llevada a su velocidad de funcionamiento, es importante de pasar rápidamente a través de las velocidades críticas para evitar la generación de latigazo de aceite.

2.4.3.6 Fallas en engranes

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

$$(\text{Gear Mesh}) = T_n \times \text{RPM} \quad \text{Ecuación (2.5)}$$

T_n = Número de dientes

RPM = Frecuencia de rotación del engranaje

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

- Desgaste de dientes
- Carga excesiva
- Engranaje excéntrico
- Ajuste entre dientes inadecuado (Backlash)
- Dientes agrietados, desconchados o partidos
- Inexactitudes en el maquinado del perfil de los dientes
- Lubricación deficiente

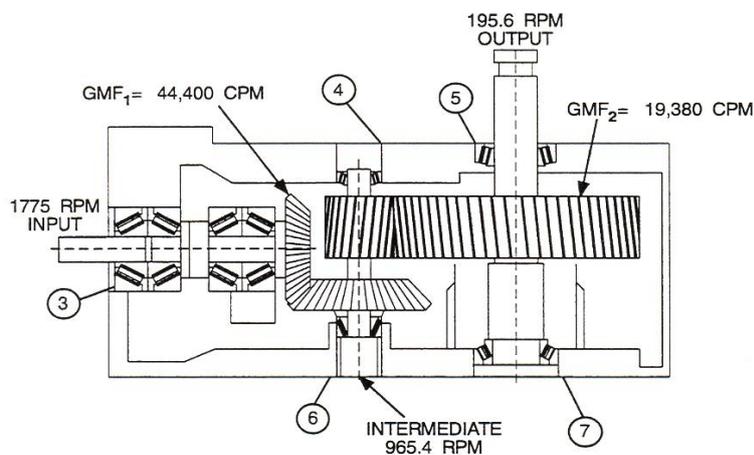


Fig. 2.40 Tren de Engranajes^d.

Como se dijo antes, la principal herramienta para la identificación de estos problemas es la Frecuencia de Engrane; sin embargo, hay que aclarar que ella no representa por si misma un defecto, como si lo son las frecuencias de defecto de rodamientos. Todos los engranes entre piñones generan actividad dinámica a la correspondiente frecuencia, con diferentes amplitudes; adicionalmente, todas las frecuencias de engrane tienen bandas laterales de alguna amplitud, separadas por las RPM de uno o ambos engranajes involucrados.

^d Ilustración tomada de: Seminario Taller: Mantenimiento Predictivo Basado en Vibraciones y Termografía, Colombia 2003.

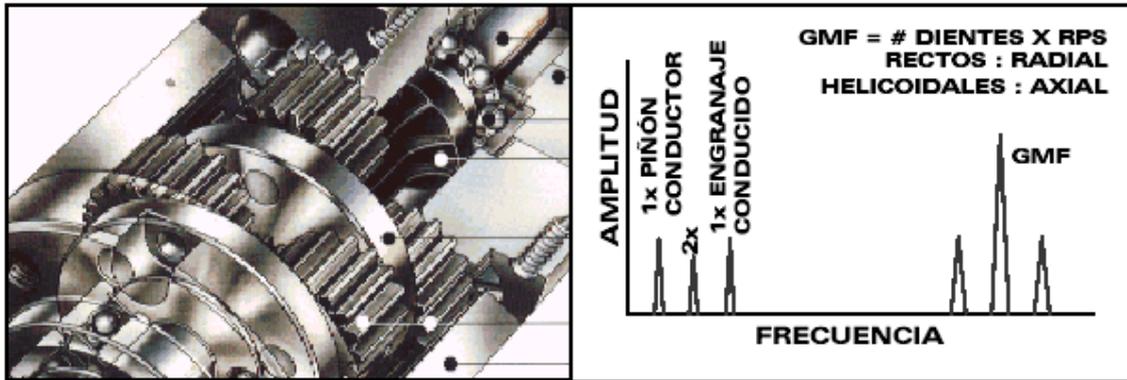


Fig. 2.41 Espectro característico de un engranaje en estado normal^b.

El espectro mostrará armónicos 1x y 2x del piñón conductor y de la rueda conducida. Adicionalmente, mostrará bandas laterales alrededor de la Frecuencia de Engrane GMF (Gear Mesh Frequency). El engranaje se encuentra en buen estado si estos picos de vibración se encuentran en niveles relativamente bajos.

Sin embargo, si los engranajes están en buenas condiciones, si están correctamente alineados, las amplitudes de las frecuencias descritas y sus armónicos, deben ser bajas, particularmente las de las bandas laterales.

Existen otros problemas que afectan los engranajes y que los hacen reaccionar generando frecuencia de engrane, armónicos y bandas laterales pero que no son causados por ellos, como: desalineación, ejes torcidos y soldura mecánica en cojinetes.

1. En engranajes helicoidales, espina de pescado, cónicos e hipoidales es normal encontrar componentes axiales importantes de vibración, puesto que el contacto diente a diente genera componentes de carga, en las direcciones radial y axial.
2. Uno siempre debe evaluar la actividad asociada con engranajes hasta mínimo el tercer armónico de la frecuencia de engrane, o sea que para inspecciones de PMP se puede configurar la frecuencia máx. del espectro en $3.25 \times \text{GMF}$. Si no se conoce el número de dientes del piñón,

una buena aproximación es configurar la frecuencia máx. en 200xRPM del eje del piñón.

3. Para un sistema múltiple de piñones que tienen un engranaje común, la frecuencia de engrane será la misma sin importar el número de piñones involucrados. Por ejemplo, en todos los motores reciprocantes existe un gran piñón conductor que engrana con varios piñones, por ejemplo los piñones de los árboles de levas, bombas de aceite y de agua y piñones de otros sistemas auxiliares, en este caso hay solo una frecuencia de engrane aunque haya varios contactos o engranes diferentes.

2.4.3.6.1 Desgaste de dientes

El desgaste se entiende como daño superficial a lo largo de la cara del diente y muestra las siguientes características espectrales:

El principal indicador de desgaste de dientes, como se observa en la figura, no es la frecuencia de engrane sino la frecuencia natural del engranaje. En realidad existe más de una frecuencia natural, las cuales pueden ser identificadas mediante una Prueba de Impacto, realizada con un analizador de vibración moderno.

Como todas las cosas en la naturaleza, cuando un componente es impactado, éste responde vibrando en su frecuencia natural; de la misma manera, cuando un diente defectuoso impacta el engrane, excita las frecuencias naturales de los engranajes en contacto. La clave aquí, es que las frecuencias naturales serán moduladas por la rata de repetición del impacto que es igual a la velocidad de rotación del piñón defectuoso.

Su espectro se caracteriza por la aparición de bandas laterales alrededor de la frecuencia natural de vibración (f_n) del engrane defectuoso. El espaciamiento de las bandas laterales es 1x del engrane defectuoso. Si el desgaste es avanzado, hay sobreexcitación de la GMF.

Ocurre por operación más allá del tiempo de vida del engranaje, contaminación de la grasa lubricante, elementos extraños circulando en la caja del engrane o montaje erróneo.

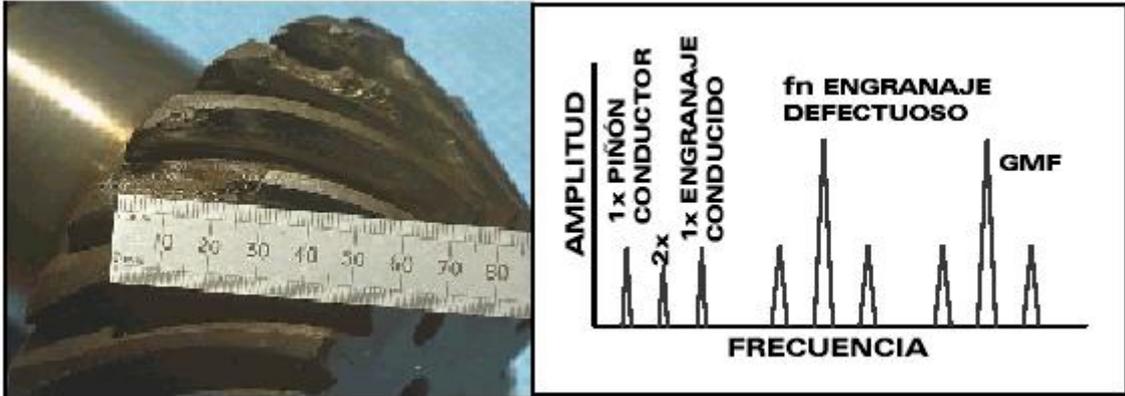


Fig. 2.42 Desgaste en diente^b.

Si el deterioro de los dientes es notorio no solamente aparecerán bandas laterales alrededor de las frecuencias de engrane, sino también alrededor de las frecuencias naturales. En el caso de frecuencias de engrane con bandas laterales, la amplitud de las bandas laterales es un mejor indicador de desgaste que la misma amplitud de las frecuencias de engrane. Además, a más parejas de bandas laterales, más serio es el problema de desgaste en el piñón.

Si más de un piñón en un sistema de engrane tienen desgaste, aparecerán bandas laterales a cada una de las velocidades de los piñones con desgaste.

2.4.3.6.2 Carga excesiva

Las frecuencias de engrane son a menudo muy sensibles a la carga, lo que significa que grandes amplitudes de la frecuencia de engrane, no necesariamente indica un problema en el engrane; es posible que los dientes estén soportando una excesiva carga. Sin embargo, si dicha carga

se mantiene por largos períodos de tiempo, puede sobrevenir fatiga superficial en las caras de los dientes.

Por eso, un incremento substancial de la amplitud de una frecuencia de engrane entre dos inspecciones consecutivas dentro de un plan de mantenimiento predictivo, podría indicar variaciones de carga, especialmente, si la amplitud de las bandas laterales permanece baja y si no se excitan frecuencias naturales asociadas con el engrane. Por lo anterior, las inspecciones de Cajas Reductoras o de Incrementadores de Velocidad se deben hacer siempre bajo condición de máxima carga, en lo posible.

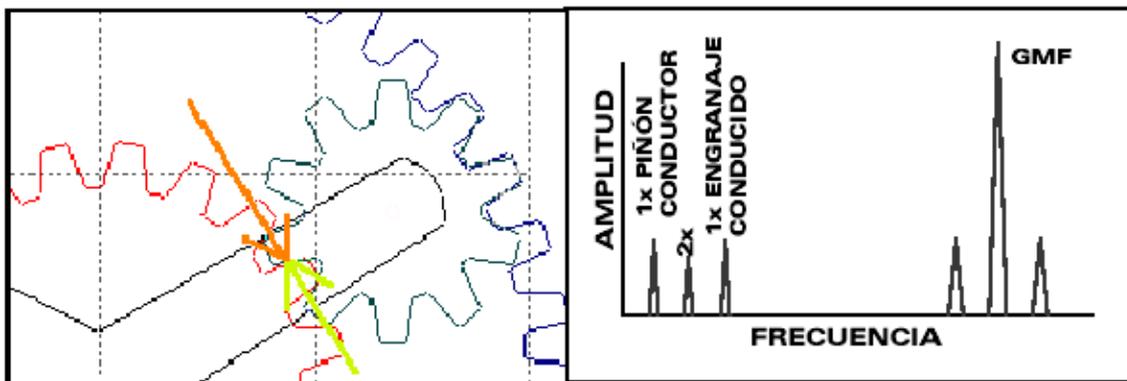


Fig. 2.43 Sobrecarga en engrane^b.

2.4.3.6.3 Ajuste entre dientes inadecuado (Backlash):

Un pobre ajuste entre dientes exhibirá excesiva tolerancia y un excesivo ajuste se traduce en interferencia; éste último puede generar grandes esfuerzos y vibración, pero en ambos casos existe una alta probabilidad de que ocurran impactos, lo que excita frecuencias naturales.

La excentricidad ocurre cuando el centro de simetría no coincide con el centro de rotación. El backlash se produce cuando, al terminar el contacto entre dos dientes, los dos siguientes no entran inmediatamente en contacto.

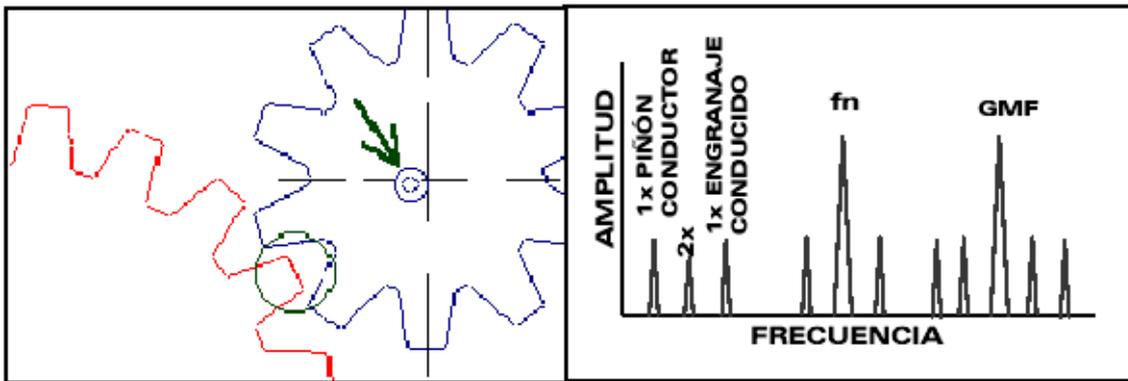


Fig. 2.44 Excentricidad y/o Backlash^b.

El espectro muestra aumento considerable de las bandas laterales alrededor del la GMF y f_n . El engranaje con problemas es indicado por el espaciado de las bandas laterales. Si el problema es backlash, la GMF debe disminuir con el aumento de la carga.

2.4.3.6.4 Dientes agrietados, desconchados o partidos

Un piñón con un diente agrietado, desconchado o partido, es decir, con problemas de manufactura o “hunting” muestra alta vibración a $1x$ y excita frecuencias naturales por impacto, con bandas laterales también a la frecuencia de rotación del piñón. El pico de vibración a $1x$ visto en el espectro FFT aparece pequeño; sin embargo, puede tener una amplitud 10 o 20 veces mayor en la forma de onda con picos notorios que revelan impacto, espaciados por el correspondiente período de $1x$ del piñón con el problema.

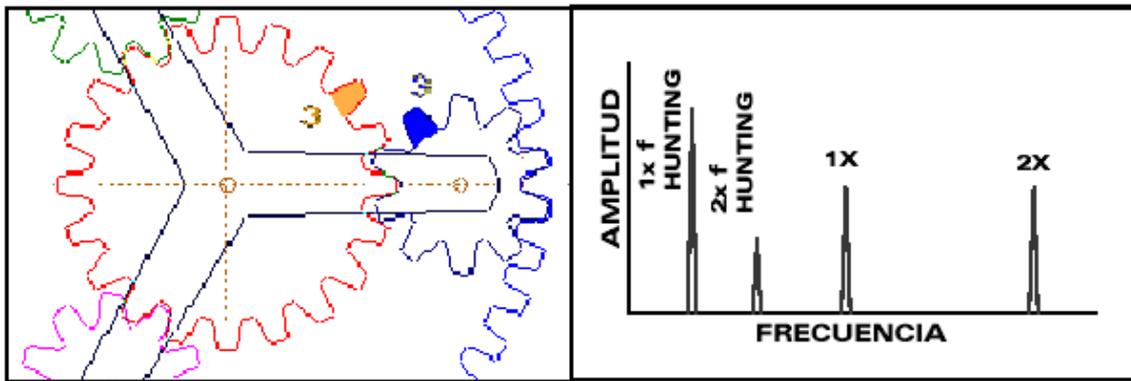


Fig. 2.45 Imperfecciones en los dientes^b.

Es por ello que la mejor técnica para confirmar problemas relacionados con engranajes, es ver su comportamiento dinámico mediante las formas de onda en dominio de tiempo porque en ellas uno puede determinar si el problema se relaciona con los dientes del engranaje o con otro evento que produzca impacto como por ejemplo, un problema de rodamientos. En este caso la diferencia radicaría en el período de cada actividad dinámica.

Si tomamos un espectro sobre un eje que tenga más de un piñón montado sobre él y observamos las características de diente partido, para determinar cual es el piñón problema debemos realizar pruebas de impacto para medir las frecuencias naturales de cada uno de ellos y así poder identificar esta actividad en el espectro.

2.4.3.6.5 Desalineación entre piñones

En la figura se indica la típica reacción espectral de un juego de piñones desalineados; obsérvese que se excitan armónicos de la frecuencia de engrane, la cual alcanza una pequeña amplitud; sin embargo, su segundo y/o tercer armónico pueden alcanzar amplitudes mucho mayores. Algunas veces se observa que el espaciamiento de las bandas laterales no es de 1x sino de 2x o incluso 3x.

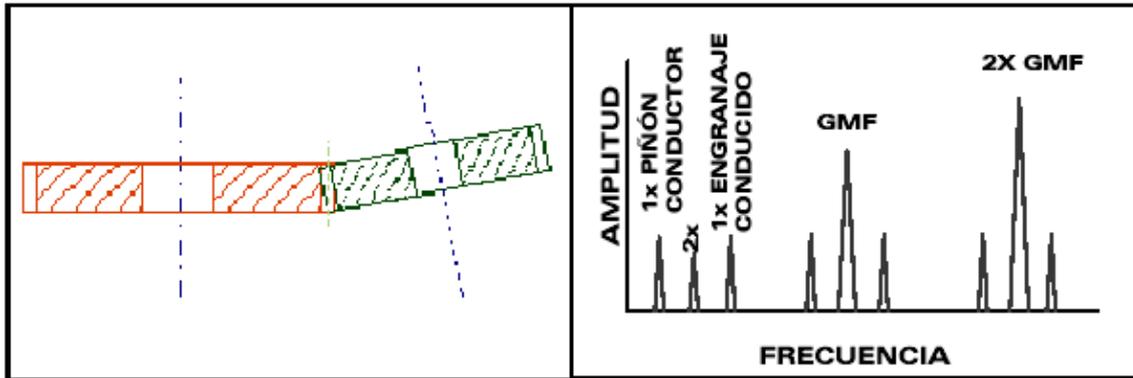


Fig. 2.46 Engrane desalineado^b.

Se presenta cuando las ruedas dentadas fueron ensambladas con errores de alineación o cuando sus ejes no están paralelos.

2.4.3.7 Fallas en bandas y poleas

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

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

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

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

La mejor forma de detectar vibración de bandas es colocar el transductor sobre la chumacera próxima a la transmisión en dirección paralela a la

tensión se las bandas. Los defectos de banda, normalmente generan mayor amplitud en dicha dirección.

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

2.4.3.7.1 Bandas mal emparejadas, desgastadas o estiradas

Bandas mal emparejadas, estiradas o desgastadas, especialmente bandas Vee, generarán vibración a la frecuencia fundamental de paso de banda y sus armónicos. Si es que hay dos poleas en el sistema, el segundo armónico será dominante. La frecuencia fundamental de la banda (FFB) se da con la fórmula siguiente. Siempre es subsíncrona, esto quiere decir que la frecuencia fundamental de la banda será mas baja que la frecuencia de 1x.

$$FFB = p * D/L *(RPM) \quad \text{Ecuación (2.6)}$$

FFB = Frecuencia Fundamental de la Banda

D = Diámetro de la Polea

L = Longitud de la Banda

RPM = Velocidad de revolución de la polea.

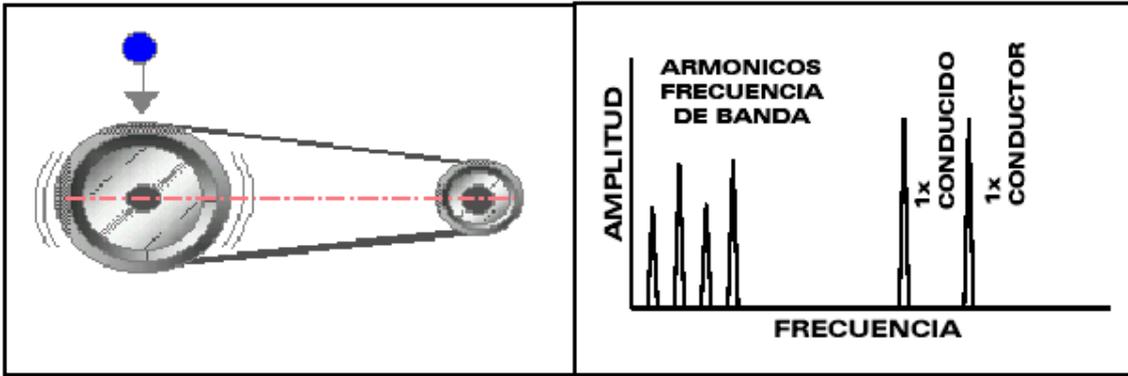


Fig. 2.47 Distensión en las Poleas^b

2.4.3.7.2 Poleas excéntricas, movimiento excéntrico de poleas

Ocurre cuando el centro de rotación no coincide con el centro geométrico en una polea.

Poleas excéntricas generarán fuertes componentes radiales 1x, especialmente en la dirección paralela a las bandas. Esta situación es muy común e imita el desbalanceo. Eso se puede verificar removiendo las bandas y volviendo a medir. Una vibración 1x de una polea excéntrica o de una polea con movimiento excéntrico generalmente se manifestará en la otra polea.

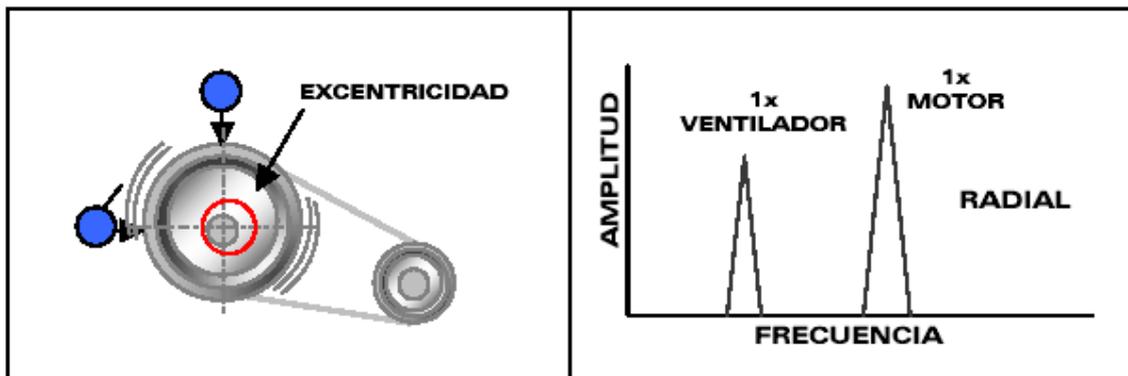


Fig. 2.48 Excentricidad en Poleas^b.

2.4.3.7.3 Desalineación de poleas

Puede ocurrir porque los ejes de las poleas no están alineados o porque las poleas no están paralelas. También pueden ocurrir ambos casos simultáneamente. La desalineación de poleas generará fuertes componentes axiales $1x$ y armónicos axiales de la frecuencia fundamental de la banda.

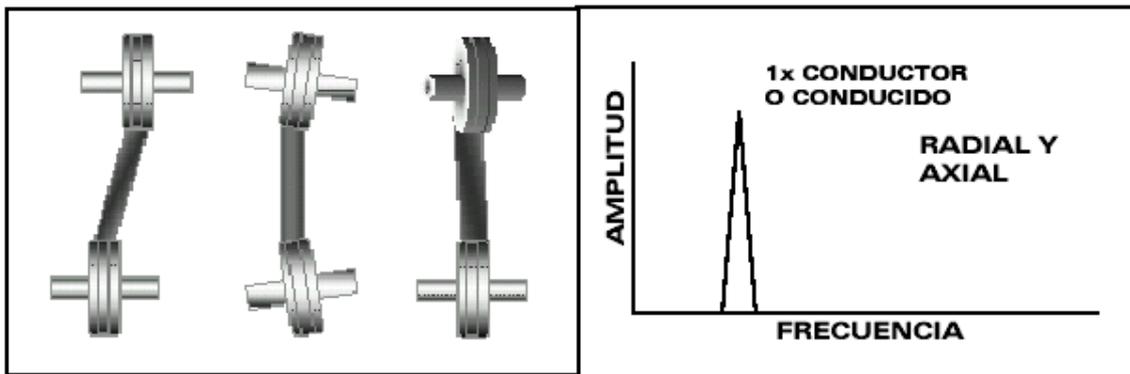


Fig. 2.49 Desalineación de Poleas^b.

2.4.3.7.4 Resonancia de banda o golpe de banda.

Sucede si la frecuencia natural de la banda coincide o se aproxima a la velocidad nominal del motor o de la máquina conducida. A veces las bandas individuales en un sistema multibandas tendrán una resonancia a frecuencias diferentes debido a longitudes y tensiones diferentes.

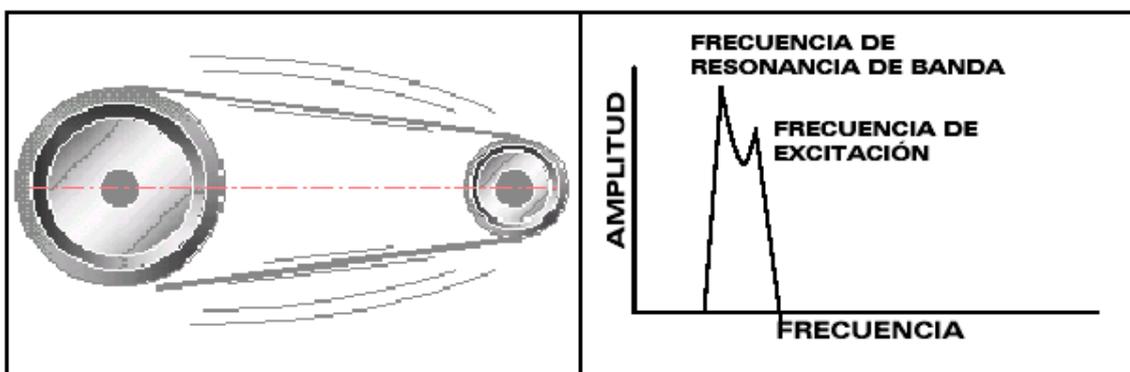


Fig. 2.50 Resonancia de banda^b.

El espectro muestra altas amplitudes de la frecuencia de resonancia y la frecuencia de excitación de banda, siendo la frecuencia de resonancia la predominante. La frecuencia natural puede ser alterada cambiando la tensión de la banda o su longitud.

2.4.3.8 Fallas eléctricas

Las máquinas eléctricas son similares a otros tipos de equipos rotativos en cuanto a que muestran problemas comunes de desbalanceo, desalineación, resonancia, problemas de rodamientos, etc. Sin embargo, son únicos en cuanto a que muestran problemas asociados con los campos magnéticos producidos por el rotor y el estator. Esto hace que el diagnóstico de problemas de vibración en motores eléctricos sea más complejo.

Debido a su construcción simple y resistente y a sus buenas características de operación, el motor de inducción es el motor AC más comúnmente usado. Se compone de dos partes: El estator (Parte estacionaria) y el rotor (Parte rotativa). El estator está conectado a la fuente AC; el rotor no está conectado eléctricamente a la fuente, pero la corriente es inducida en él por transformación magnética desde el estator.

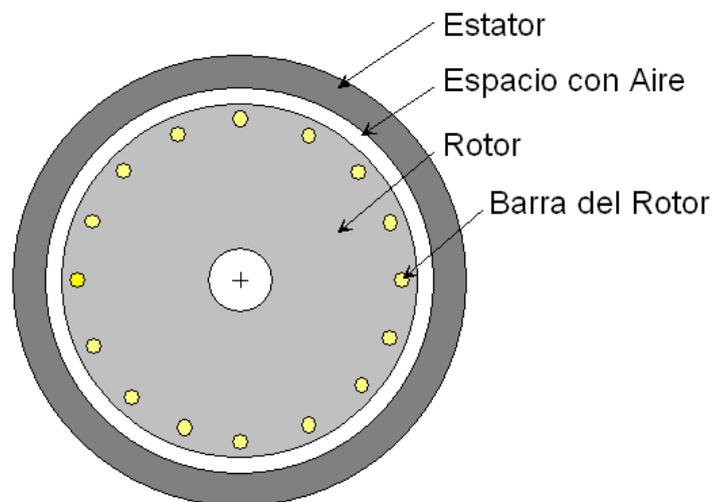


Fig. 2.51 Motor de Inducción CA^c.

El rotor en un motor de inducción se compone de varias barras usualmente hechas de cobre o aluminio, conectadas entre sí por los anillos de conexión, los cuales además, encierran el núcleo del rotor que consiste en una serie de laminillas de acero, aisladas entre sí.

2.4.3.8.1 Entrehierro desigual (excentricidad estática)

Cuando las zonas de alto flujo magnético del campo rotante del estator enfrentan la desigualdad del entrehierro, las fuerzas magnéticas quedan desbalanceadas: el menor entrehierro genera una mayor fuerza, la cual tiende a halar el rotor hacia la derecha. Si el espacio de aire no está uniforme, las fuerzas en el rotor no son balanceadas y esto resulta en una alta vibración inducida magnéticamente a 120 Hz. La atracción magnética es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el estator y el rotor, y por eso, una pequeña excentricidad causará una vibración relativamente importante.

Obsérvese que el desbalanceo magnético generado en este caso, actúa sobre el rotor dos veces por revolución del campo magnético rotante. En efecto, la frecuencia es a dos veces la frecuencia de línea o sea a 120 Hz para todos los motores sin importar el número de polos. Cuando la fuerza se corta, la vibración a 120 Hz desaparece inmediatamente.

La magnitud de las fuerzas electromagnéticas desbalanceadas que actúan sobre los componentes del motor, es alta. Por ejemplo: Para un motor de 2.000 HP con una excentricidad en el entrehierro del 10%, las fuerzas dinámicas desbalanceadas alcanzan 1.500 lbs. Esto comparado con la fuerza aceptable para desbalanceo mecánico que es de solo 128 lbs., nos da una idea de la magnitud del problema.

2.4.3.8.2 Rotor excéntrico (excentricidad dinámica)

Si el rotor no está redondo, causará una excitación en 1x y fuerzas magnéticas desbalanceadas que causan una vibración a la frecuencia de deslizamiento, multiplicado por el número de polos. Este componente desaparecerá inmediatamente, cuando se apaga la corriente, y eso sirve de prueba de confirmación.

Resumiendo, un rotor excéntrico genera vibración a la frecuencia de 1x modulada a una rata igual al número de polos por la frecuencia de deslizamiento; es decir, a la frecuencia de paso de polos:

$$NS = 120 * FL / P \quad \text{Ecuación (2.7)}$$

$$FS = NS - RPM \quad \text{Ecuación (2.8)}$$

$$FP = FS * P \quad \text{Ecuación (2.9)}$$

Donde:

NS = Velocidad sincrónica

FL = Frecuencia de línea (60 Hz)

P = Número de Polos

FS = Frecuencia de deslizamiento

FP = Frecuencia de paso de polos

RPM = Velocidad Nominal del equipo

La carga del motor determina la frecuencia de deslizamiento. Un motor opera a la velocidad de placa cuando está completamente cargado, mientras que en vacío opera cerca de la velocidad sincrónica.

Las excentricidades estática y dinámica pueden también generar vibración a frecuencia de “Paso de Barras” del rotor con bandas laterales a 120 Hz.

2.4.3.8.3 Barras de rotor defectuosas

Las barras de rotor rotas o fisuradas en un motor no pueden llevar corriente. Cuando se encuentran en una zona de alto flujo magnético, las fuerzas en el rotor quedan desbalanceadas. A mayor carga en el motor, mayor flujo de corriente a través del rotor y mayores las fuerzas magnéticas generadas; por lo tanto, en vacío cuando la corriente es baja, el defecto de las barras se minimiza.

Una barra agrietada puede también crear una fuente de calor localizada en el rotor, lo cual causa expansión diferencial y pandeo del rotor. Esto a su vez genera desbalanceo e incremento de la vibración a la frecuencia de giro, también se presentan bandas laterales asociadas con frecuencia de polos alrededor de 1x y de sus armónicos (hasta el cuarto o quinto armónico).

El problema también se manifiesta a través de vibración a la frecuencia de Paso de Barras con bandas laterales separadas entre sí por 2x Frecuencia de línea (120 Hz).

2.4.3.8.4 Laminillas de rotor en corto

Las laminillas del rotor están recubiertas para prevenir el flujo de corrientes de Eddy e incrementar la eficiencia. Muchas cosas pueden ocurrir que pueden dañar las laminillas, permitir flujo de corriente entre ellas y crear fuentes de calor localizadas. El mal manejo de los rotores es la principal causa de deterioro de las laminillas y de las barras.

El resultado esperado en un rotor que haya sufrido alguno de los problemas mencionados, es pandeo y pérdida de su balanceo dinámico. Su sintomatología vibracional obviamente sería similar a la de un rotor excéntrico, pero al realizar una inspección visual, fácilmente se puede detectar la deformación de las laminillas.

2.4.3.8.5 Estator suelto o flojo

Como el estator es atraído hacia la carcasa del motor tanto como hacia el rotor, cuando existe soltura o flojedad del estator, este problema se convierte en excentricidad estática. La sintomatología espectral será igual; es decir, aparecerá actividad predominante a la frecuencia de $2x$ Frecuencia de línea (120 Hz).

2.4.3.8.6 Monitoreo de la corriente del motor

Esta es una nueva técnica para determinar la condición eléctrica del rotor de un motor. La señal se obtiene conectando una pinza amperimétrica con transformador de corriente a una de las fases del motor y a un analizador de espectro. El espectro de la corriente contiene información detallada sobre la condición del rotor. La técnica se basa en la teoría de que problemas en las barras del rotor y excentricidades del entrehierro causan una variación en el flujo de corriente.

Un motor saludable mostrará un pico en el espectro de corriente a 60 Hz (Frecuencia de línea). Un motor con una o más barras fracturadas mostrará bandas laterales alrededor del pico a 60 Hz, separadas por la frecuencia de polos. La amplitud relativa de estos picos puede determinar el número de barras fracturadas. Un motor con entrehierro excéntrico muestra picos de corriente en la vecindad de la frecuencia de paso de barras y bandas laterales separadas por 120 Hz.

2.4.3.9 Fallas en bombas y turbinas

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

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

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

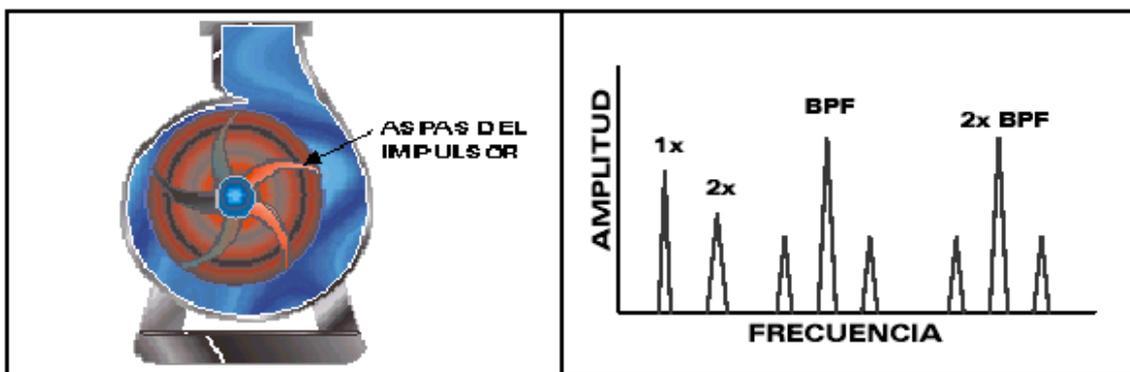


Fig. 2.52 Falla en las aspapas de la bomba^b.

La cavitación es la entrada de aire o vaporización de un fluido dentro de la bomba. Ocurre cuando la presión de fluido es menor que la presión de vapor a esta temperatura. La cavitación causará erosión a las partes internas de la bomba.

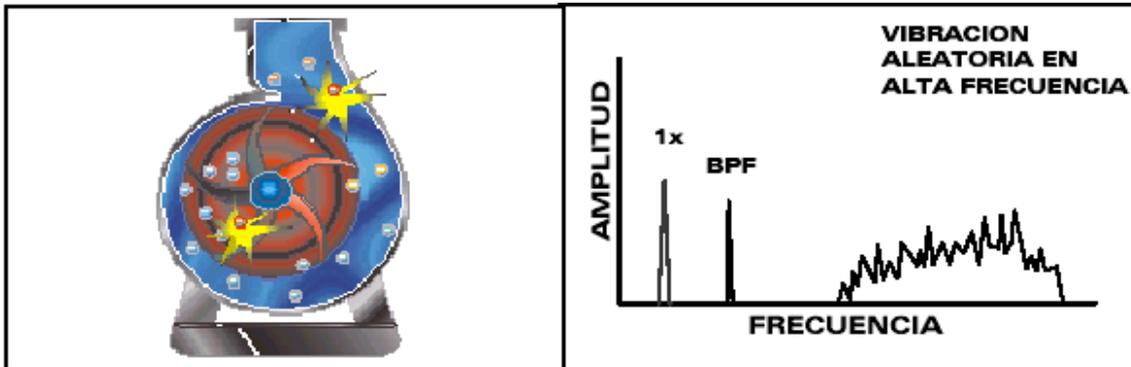


Fig. 2.53 Cavitación^b.

El espectro muestra una vibración caótica que se presenta a altas frecuencias (del orden de 2000 Hz).

Bombas con engranes se usan para bombear aceite de lubricación, y casi siempre tienen un componente de vibración fuerte en la frecuencia del engranaje, que es el número de dientes en el engrane por las RPM. Este componente dependerá fuertemente de la presión de salida de la bomba. Si la frecuencia del engranaje se cambia de manera significativa, y hay una aparición de armónicos o de bandas laterales, en el espectro de vibración, este podría ser una indicación de un diente cuarteado o dañado de otra manera.

El tipo de bomba a hélice puede generar un gran número de componentes de frecuencia en el espectro de vibración. Desgaste o daños en la rosca generalmente producirán fuertes armónicos en la proporción de la rosca que son el número de hilos por las RPM.

En turbinas, a más de los problemas ya antes descritos, se le suma los problemas de turbulencias anómalas que son creadas por las variaciones de velocidad o presión del aire pasando a través de un ventilador o red de ventilación.

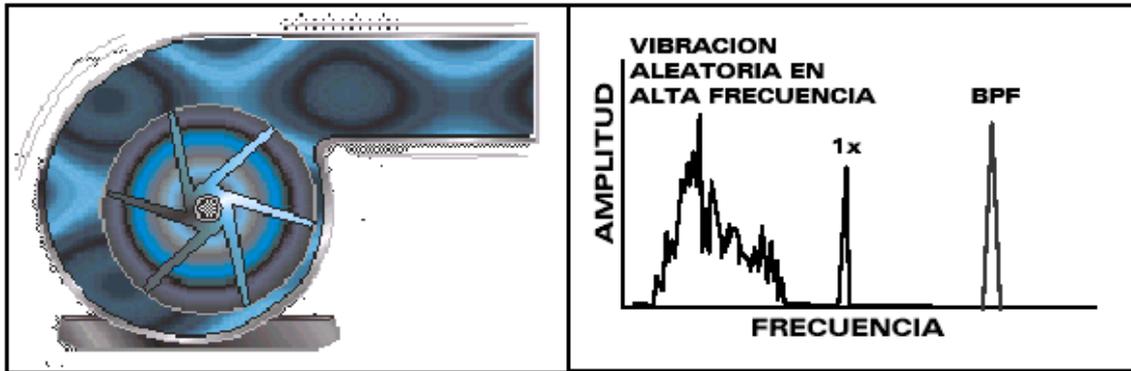


Fig. 2.54 Turbulencia anómala^b.

El espectro muestra una vibración anómala a baja frecuencia que generalmente está entre 0.3 y 30 Hz, siempre por debajo de la velocidad nominal.

CAPITULO 3

CLASIFICACIÓN Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN DE LA MAQUINARIA

Para llevar a cabo con éxito el plan de mantenimiento, se necesita llevar a cabo cada actividad en un orden predeterminado, para evitar pérdidas innecesarias de tiempo y dinero. A continuación se detallan, en orden cronológico, las actividades que se realizaron en este proyecto, desde la selección de las máquinas que serán incluidas en el plan hasta la organización de los datos tomados periódicamente.

1. Definición de las máquinas que entrarán en el Plan de Mantenimiento.

Antes de comenzar con el proyecto, la empresa había seleccionado la maquinaria que formo parte de este estudio, y entregó un listado con todas ellas, en esta lista se incluyo toda la maquinaria rotativa mayor dentro del campamento CPF y las islas que son parte de este campamento, dejando fuera de este estudio a maquinaria rotativa menor, como por ejemplo los motores eléctricos pequeños que trabajan en sistemas auxiliares del campamento.

2. Clasificación y organización de la maquinaria en un orden lógico para coleccionar sus datos.

En este capitulo se muestra la clasificación de la maquinaria según criterios como el funcionamiento, el entorno, los factores económicos y las características propias del lugar donde esta ubicada la planta, como son las distancias entre las máquinas y el campamento. Todos estos criterios fueron tomados en cuenta también para luego de clasificar la maquinaria, trazar rutas para la recolección de datos y de este modo evitar el desperdicio de recursos.

3. Registro de las características de la maquinaria.

Tanto para llenar la base de datos del equipo analizador de vibraciones como para realizar el análisis manual de los espectros, se necesita recopilar la información particular e inherente a cada máquina. Toda esta información es fundamental al momento de caracterizar en el espectro las frecuencias forzadas y poder detectar fallos particulares.

4. Grabación y registro de información dinámica inicial

Es el conocimiento detallado y la evaluación del estado inicial en que se encuentra vibracionalmente cada máquina. Este análisis servirá como base de comparación en el futuro, en el caso de existir algún problema, generará una acción correctiva programada, con base en el diagnóstico.

5. Colección y registro de datos en forma periódica

Son mediciones periódicas, de acuerdo a la clasificación previa. Estas mediciones darán origen a las curvas de tendencia donde se evalúa la tasa de deterioro de la maquinaria. Estas mediciones tienen tres propósitos principales:

- Buscar cambios en niveles de vibración o sobrepaso de niveles de alarma preestablecidos, en cualquiera de las máquinas medidas.
- Grabar la información dinámica en máquinas que hayan experimentado lo anterior, es decir, con problemas, para efectos de evaluación y diagnóstico.
- Organizar la información de tal forma que pueda ser usada para definir ágilmente la situación o condición individual de cada máquina.

3.1 CRITERIOS PARA LA CLASIFICACIÓN

Los equipos portátiles de medida de vibración aplicados al mantenimiento de maquinaria, están contruidos con calidad industrial para ser usados en el campo. La mayoría disponen de memoria en la cual almacenan los datos tomados en rutas de medición para que luego estos sean directamente analizados en el mismo equipo o descargarlos posteriormente a una computadora personal donde se analizan tendencias para ver la evolución a lo largo del tiempo y los espectros, principalmente para diagnosticar los problemas y pronosticar futuros fallos.

Entre los primeros pasos que se deben desarrollar al implementar un plan de mantenimiento predictivo esta la definición de las máquinas que entrarán en este estudio. Al principio de este proyecto, el departamento de mantenimiento de la empresa realizó un listado de las máquinas que formarían parte de esta investigación, y luego, según las necesidades que fueron suscitándose durante el proyecto, se extendió este listado para abarcar todas las máquinas que, de acuerdo a las posibilidades del departamento de mantenimiento se podía incluir en este trabajo.

Existen distintos tipos de maquinaria dentro de este listado como son:

- Generadores.
- Bombas impulsadas por motores eléctricos.
- Bombas impulsadas por motores de combustión interna.
- Compresores de pistón para gas.

Dentro de cada una de estas categorías también existen subdivisiones de acuerdo a los modelos, las marcas, combustible y el tipo de bombas.

**Tabla 3.1 Equipos Seleccionados para el Análisis de Vibraciones.
Máquinas accionadas por Motores de Combustión Interna.**

EQUIPOS CON MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA					
ÍTEM	LOCACIÓN	EQUIPO	FABRICANTE	COMBUSTIBLE	MODELO
1	ÁNGEL NORTE	POWER TRAILER MG501-4	CATERPILLAR	DIESEL	3508
2	CONCORDIA	POWER TRAILER MG531-4	CATERPILLAR	DIESEL	3512
3	CPF	GENERATOR ENGINE MG101-6D	CATERPILLAR	DIESEL	3512
4	CPF	GENERATOR ENGINE MG101-1	CATERPILLAR	DIESEL	3516
5	CPF	GENERATOR ENGINE MG101-2D	CATERPILLAR	DIESEL	3512
6	CPF	GENERATOR ENGINE MG101-4D	CATERPILLAR	DIESEL	3512
7	CPF	GENERATOR ENGINE MG601-2	CATERPILLAR	DIESEL	3512
8	CPF	GENERATOR ENGINE MG601-4	CATERPILLAR	DIESEL	3512
9	CPF	PUMP ENGINES MP-103D	CATERPILLAR	DIESEL	3508
10	CPF	PUMP ENGINES MP-105A	CATERPILLAR	DIESEL	3412
11	CPF	PUMP ENGINES MP-105B	CATERPILLAR	GAS	3508
12	CPF	GENERATOR ENGINE MG101-7G	WAUKESHA	GAS	9390
13	CPF	GENERATOR ENGINE MG101-8G	WAUKESHA	GAS	9390
14	CPF	PUMP ENGINE MP-110A	CATERPILLAR	DIESEL	3306
15	CPF	PUMP ENGINE MP-110B	CATERPILLAR	DIESEL	3306
16	INDILLANA	GENERATOR ENGINE MG601-5	CATERPILLAR	DIESEL	3516
17	INDILLANA	GENERATOR ENGINE MG701-1	CATERPILLAR	DIESEL	3512
18	INDILLANA	GENERATOR ENGINE MG701-3	CATERPILLAR	DIESEL	3512
19	ITAYA A	GENERATOR ENGINE MG1001-1	CATERPILLAR	DIESEL	3512
20	ITAYA A	GENERATOR ENGINE MG1001-2	CATERPILLAR	DIESEL	3512
21	ITAYA A	GENERATOR ENGINE MG1001-3	CATERPILLAR	DIESEL	3512
22	ITAYA A	GENERATOR ENGINE MG601-7	CATERPILLAR	DIESEL	3512
23	ITAYA A	GENERATOR ENGINE MG601-1	CATERPILLAR	DIESEL	3512
24	ITAYA B	GENERATOR ENGINE MG1002-1	CATERPILLAR	DIESEL	3512
25	ITAYA B	GENERATOR ENGINE MG1002-2	CATERPILLAR	DIESEL	3512
26	ITAYA B	GENERATOR ENGINE MG1002-3	CATERPILLAR	DIESEL	3512
27	ITAYA PORT	GENERATOR ENGINE CMG-01	JOHN DEERE	DIESEL	
28	ITAYA PORT	GENERATOR ENGINE MTMG-01	CUMMINS	DIESEL	
29	JIVINO A	GENERATOR ENGINE MG301-1	CATERPILLAR	GAS	3516
30	JIVINO A	GENERATOR ENGINE MG301-7	CATERPILLAR	GAS	3516
31	JIVINO A	POWER TRAILER MG511-4	CATERPILLAR	DIESEL	3512
32	JIVINO A	GENERATOR ENGINE MG101-2	CATERPILLAR	GAS	3516
33	JIVINO B	GENERATOR ENGINE MG103-C	CATERPILLAR	DIESEL	3406
34	JIVINO B	POWER TRAILER ENGINE MG-W05	CATERPILLAR	DIESEL	3516
35	JIVINO B	PUMP ENGINES MP-330A	CATERPILLAR	DIESEL	3508
36	JIVINO B	PUMP ENGINES MP-430A	CATERPILLAR	DIESEL	3508
37	JIVINO B	PUMP ENGINES MP-430B	CATERPILLAR	DIESEL	3508
38	JIVINO B	PUMP ENGINES MP-430C	CATERPILLAR	DIESEL	3508
39	JIVINO B	PUMP ENGINES MP-430E	CATERPILLAR	DIESEL	3512
40	JIVINO C	GENERATOR ENGINE MG301-9	CATERPILLAR	GAS	3516
41	JIVINO C	PUMP ENGINES MP-502	JOHN DEERE	DIESEL	

**Tabla 3.1 Equipos Seleccionados para el Análisis de Vibraciones.
Máquinas accionadas por Motores de Combustión Interna.
(Continuación)**

EQUIPOS CON MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA					
ÍTEM	LOCACIÓN	EQUIPO	FABRICANTE	COMBUSTIBLE	MODELO
42	JIVINO C	GENERATOR ENGINE MG301-2	CATERPILLAR	GAS	3516
43	JIVINO E	GENERATOR ENGINE MG513-1D	CATERPILLAR	DIESEL	3512
44	JIVINO F	PUMP ENGINES MP-430D	CATERPILLAR	DIESEL	3508
45	JIVINO F	PUMP ENGINES MP-330C	CATERPILLAR	DIESEL	3508
46	JIVINO F	PUMP ENGINES MP-330D	CATERPILLAR	DIESEL	3508
47	JIVINO F	PUMP ENGINES MP-330E	CATERPILLAR	DIESEL	3508
48	LAGUNA	GENERATOR ENGINE MG521-4	CATERPILLAR	DIESEL	3512
49	LAGUNA	GENERATOR ENGINE MG101-3D	CATERPILLAR	DIESEL	3512
50	LAGUNA	GENERATOR ENGINE MG512-1D	CATERPILLAR	DIESEL	3512
51	LAGUNA	GENERATOR ENGINE MG601-6	CATERPILLAR	DIESEL	3516
52	LAGUNA	GENERATOR ENGINE MG601-8	CATERPILLAR	DIESEL	3512
53	LAGUNA	GENERATOR ENGINE MG602-1	CATERPILLAR	DIESEL	3516
54	LAGUNA	GENERATOR ENGINE MG701-2	CATERPILLAR	DIESEL	3512
55	LAGUNA	POWER TRAILER MG-W03	CATERPILLAR	DIESEL	3516
56	LAGUNA	GENERATOR ENGINE MG101-5	CATERPILLAR	GAS	3516
57	LAGUNA	GENERATOR ENGINE MG401-3	CATERPILLAR	GAS	3516
58	LIMONCOCHA	GENERATOR ENGINE MG2101-1D	CATERPILLAR	DIESEL	3406
59	LIMONCOCHA	GENERATOR ENGINE MG2101-1G	WAUKESHA	GAS	5790
60	LIMONCOCHA	GENERATOR ENGINE MG2101-2G	WAUKESHA	GAS	5790
61	LIMONCOCHA	GENERATOR ENGINE MG2101-3G	WAUKESHA	GAS	5790
62	LIMONCOCHA	GENERATOR ENGINE MG2101-4G	WAUKESHA	GAS	5790
63	LIMONCOCHA	GENERATOR ENGINE MG2101-5G	WAUKESHA	GAS	5790
64	LIMONCOCHA	GENERATOR ENGINE MG2101-6G	WAUKESHA	GAS	5790
65	LIMONCOCHA	GENERATOR ENGINE MG2101-7G	CATERPILLAR	GAS	3516
66	LIMONCOCHA	GENERATOR ENGINE MG2101-8G	CATERPILLAR	GAS	3516
67	LIMONCOCHA	PUMP ENGINES MP-2105A	CATERPILLAR	DIESEL	3408
68	LIMONCOCHA	PUMP ENGINES MP-2105C	CATERPILLAR	GAS	3408
69	LIMONCOCHA 4	GENERATOR ENGINE MG501-6	CATERPILLAR	DIESEL	3406
70	LIMONCOCHA 10	PUMP ENGINES MP-2103F	CATERPILLAR	DIESEL	3512
71	SHIRA	PUMP ENGINES MP-230B	CATERPILLAR	DIESEL	3512
72	SHIRA	PUMP ENGINES MP-230C	CATERPILLAR	DIESEL	3512
73	SRF	GENERATOR ENGINE MG2920	CATERPILLAR	DIESEL	3412
74	SRF	GENERATOR ENGINE MG2930	CATERPILLAR	DIESEL	3508
75	SRF	PUMP ENGINES MP-205A	CATERPILLAR	DIESEL	3512
76	SRF	PUMP ENGINES MP-205B	CATERPILLAR	DIESEL	3512
77	SRF	PUMP ENGINES MP-205C	CATERPILLAR	DIESEL	3512
78	TALLER	GENERATOR ENGINE MG101-5D	CATERPILLAR	DIESEL	3512
79	TALLER	GENERATOR ENGINE MG601-3	CATERPILLAR	DIESEL	3512
80	TALLER	GENERATOR ENGINE MG101-3	CATERPILLAR	GAS	3516
81	TALLER	GENERATOR ENGINE MG101-4	CATERPILLAR	GAS	3516
82	TALLER	GENERATOR ENGINE MG401-5	CATERPILLAR	DIESEL	3412
83	TALLER	PUMP ENGINES MP-330B	CATERPILLAR	DIESEL	3508

**Tabla 3.1 Equipos Seleccionados para el Análisis de Vibraciones.
Máquinas accionadas por Motores de Combustión Interna.
(Continuación)**

EQUIPOS CON MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA					
ÍTEM	LOCACIÓN	EQUIPO	FABRICANTE	COMBUSTIBLE	MODELO
84	TALLER	GENERATOR ENGINE MG2101-9G	WAUKESHA	GAS	AT27
85	TALLER	GENERATOR ENGINE MG2101-10G	WAUKESHA	GAS	AT27
86	TALLER	POWER TRAILER MG-W06	CATERPILLAR	DIESEL	3516
87	YANAQUINCHA EAST	POWER TRAILER MG-W04	CATERPILLAR	DIESEL	3516
88	YANAQUINCHA WEST	POWER TRAILER MG-W01	CATERPILLAR	DIESEL	3516
89	YANAQUINCHA WEST	POWER TRAILER MG-W02	CATERPILLAR	DIESEL	3516

**Tabla 3.2 Equipos Seleccionados para el Análisis de Vibraciones.
Máquinas accionadas por Motores Eléctricos.**

EQUIPOS CON MOTORES ELÉCTRICOS			
ÍTEM	LOCACIÓN	EQUIPO	FABRICANTE
90	LAGUNA	PUMP P-601A	FLOWTRONEX
91	LAGUNA	PUMP P-601B	FLOWTRONEX
92	JIVINO E	PUMP P-530A	REDA
93	JIVINO E	PUMP P-530C	REDA
94	CPF	PUMP P-103H	REDA
95	CPF	PUMP P-103I	REDA
96	CPF	PUMP P-103F	REDA
97	CPF	PUMP P-112D	REDA
98	CPF	PUMP P-112E	REDA
99	CPF	PUMP P-112F	REDA
100	CPF	PUMP P-112G	REDA
101	CPF	PUMP P-112H	REDA
102	CPF	PUMP P-112I	REDA
103	CPF	PUMP P-112K	REDA
104	CPF	PUMP P-112L	REDA
105	CPF	PUMP P-112M	REDA
106	CPF	PUMP P-112N	REDA
107	CPF	PUMP P-112O	REDA
108	JIVINO B	PUMP P-430E	BINGHAM
109	LIMONCOCHA 10	PUMP P-2103F	BINGHAM
110	LIMONCOCHA 4	PUMP P-2103A	REDA
111	LIMONCOCHA 4	PUMP P-2103B	REDA
112	LIMONCOCHA 4	PUMP P-2103D	FLOWTRONEX

Llegados a este punto, se puede ver que existe una gran cantidad de maquinaria que será monitoreada dentro del plan de mantenimiento predictivo, y se debe estudiar los factores o criterios que influirán en la clasificación. Anteriormente se clasificó a la maquinaria según su tipo, pero además existen diecisiete locaciones donde esta ubicada esta maquinaria. También se debe crear una categoría para los Power Trailer, que son generadores montados en trailers móviles que sirven en muchos casos como respaldo para cuando alguna de las locaciones tiene un paro inesperado.

En las secciones siguientes se estudiará a fondo los criterios a ser considerados para realizar una clasificación que permita garantizar una advertencia temprana de un cambio en la condición de las máquinas.

3.1.1 CRITERIOS DE FUNCIONAMIENTO

En primer lugar se recomienda clasificar a los equipos en cuatro categorías, donde se toma en cuenta factores como la fiabilidad que se debe tener para evitar una para indeseada en la planta. Es muy importante al realizar esta clasificación tomar en cuenta la importancia que tiene cada máquina en el funcionamiento de la planta y si existe la posibilidad de que la parada de esta máquina pueda causar una caída en la producción de la planta.

Estas cuatro categorías se listan a continuación:

1. **Equipo vital único:** El daño o la para de estos equipos paraliza la producción de la planta.
2. **Equipo vital con respaldo:** El daño o la para de estas máquinas y su respaldo causarían una paralización de la producción de la planta.

3. **Equipo no vital con respaldo:** El daño o la para de estos equipos, no afecta directamente la producción de la planta debido a que son parte de sistemas auxiliares.
4. **Equipo operado intermitentemente:** Al ser su utilización intermitente, una para no afecta la producción y permite que el departamento de mantenimiento trabaje sin presiones ni restricciones de tiempo.

Luego de conocer el funcionamiento de la planta, se puede decir que no existe equipo vital único, toda la maquinaria que entra en este estudio se la clasificará como equipo vital con respaldo. Esto se debe a que la maquinaria esta trabajando con una carga entre el 60 y 70% de la capacidad, y cuando un equipo cae, los demás aumentan la carga pero se sigue trabajando y la planta no baja su producción. Esto no quiere decir que una máquina no es indispensable, ya que si trabajan con una carga demasiado alta durante un tiempo prolongado, se esta arriesgando la vida útil de estos equipos.

3.1.2 CRITERIOS DE ENTORNO

Otro punto que se debe tomar en consideración al clasificar la maquinaria es la seguridad de las personas que trabajan cerca de ellas, muchas veces la maquinaria trabaja con líquidos venenosos o inflamables que pueden causar heridas o la muerte al personal que se encuentra cerca. Además una máquina que no trabaja en un estado óptimo, tiende a aumentar los niveles de contaminación, ya sea por una mala combustión, ruido o pequeños derrames que pueden causar problemas de salud en los operarios.

También se debe tomar en cuenta que hay máquinas que por su localización o por las características propias de funcionamiento no tienen o no requieren de personal para su operación, razón por la cual estas

máquinas requerirán un mayor interés de parte del mantenimiento predictivo para detectar posibles fallas.

Un factor que no se debe dejar de lado es la velocidad de avance del daño. Una vez que se ha detectado un daño en una máquina esta deberá ser monitoreada mas frecuentemente, según el criterio del analista, para poder saber cuando la falla ha llegado a un nivel inaceptable y es inminente la parada para la reparación.

3.1.3 CRITERIOS ECONÓMICOS

Existen máquinas que debido a su costo relativamente bajo, tienen mas de un respaldo, o simplemente el momento de un daño en la máquina esta es remplazada en su totalidad y no es necesaria una reparación. Pero también existe maquinaria muy costosa, tanto en su totalidad como en los repuestos, que requiere de una mayor atención del departamento de mantenimiento.

A mas del costo de la maquinaria se debe tomar en cuenta que existen locaciones muy distantes y que los costos de traslado tanto de personal como de equipo y repuestos resulta muy alto, y además emplea mas tiempo, razón por la cual esta maquinaria requiere de una especial atención.

3.2 CARACTERÍSTICAS DEL BLOQUE 15

El bloque 15 se encuentra ubicado en la Provincia de Orellana, en el oriente ecuatoriano. Entre sus riquezas se encuentra el petróleo y la madera. El ecosistema amazónico, en especial su bosque lluvioso tropical, es considerado uno de los hábitats vegetales y animales más ricos y complejos del mundo. La característica más importante de la región es la existencia de una prolífica flora y fauna junto con extraordinarias variaciones de macro y micro-hábitats.

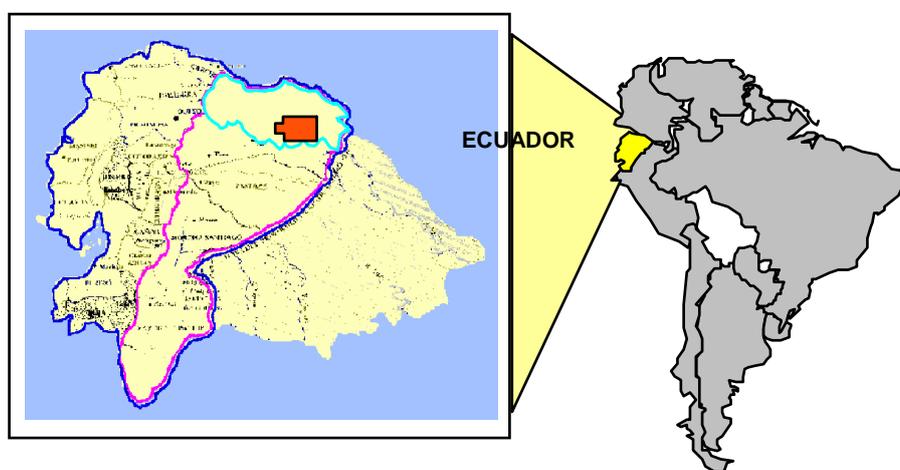


Fig. 3.1 Ubicación Geográfica del Bloque 15

La temperatura anual promedio oscila entre los 24 °C y 25 °C. Pese a que los meses de diciembre a febrero son los más secos, a lo largo del año se distribuyen uniformemente de 300 y 400 cm. de lluvia.

El extenso sistema de parques nacionales del Ecuador junto con las estaciones científicas y las áreas protegidas cubren cerca de 3'035.250 Ha. Para conservar y proteger estas áreas únicas y ubérrimas, el Ecuador ha creado, entre otros, la Reserva del Parque Nacional Yasuní, la Reserva Ecológica de Limoncocha y la Reserva Faunística de Cuyabeno. Las cuencas del Napo y el Aguarico ofrecen numerosas oportunidades de observar complejos ecosistemas, llanuras aluviales, pantanos y áreas inundadas, todas habitadas por una gran variedad de especies. Los ríos Yuturi, Yasuní, Tiputini, Tivacuno y Cononaco están totalmente rodeados de

bosques vírgenes y como se puede ver en el mapa todos estos se encuentran dentro del Bloque 15.

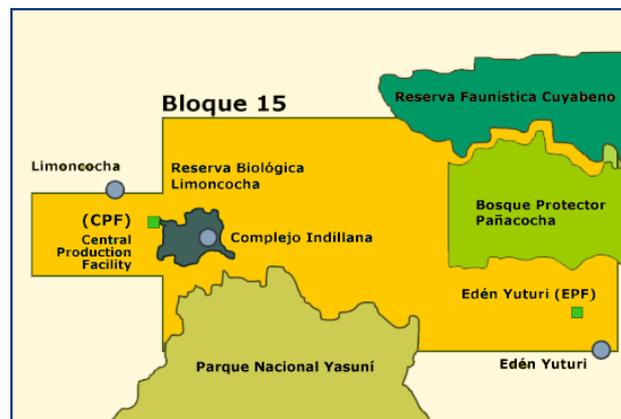


Fig. 3.2 Bloque 15

Hablando ya del bloque 15 como un campamento petrolero, este esta compuesto principalmente por sus dos campamentos mas importantes que son el CPF (Central Production Facilities) y el EPF (Eden-Yuturi Production Facilities). Estos dos campamentos se administran independientemente, y el estudio para el plan de mantenimiento se lo realizo únicamente en el CPF y las islas que de una manera u otra son parte de este sistema autónomo.

En el CPF se encuentran ubicados los sistemas de separación de crudo, gas y agua de formación, almacenamiento y transporte de crudo y reinyección de agua de formación. Esta locación se encuentra conectada a las diferentes islas de donde se extrae el crudo o se reinyecta el agua de formación, también existen islas que cumplen con las dos funciones, es decir, tienen pozos de donde se extrae crudo, pero también pozos donde se reinyecta agua.

Este estudio se centro principalmente en los generadores y las bombas, encargadas de la reinyección de agua a los pozos. A más de estos dos grupos, bastante amplios, ingresaron en el estudio los compresores de gas ubicados en el CPF, las bombas para el transporte del crudo que se encuentran en el CPF, Limoncocha y en el SRF (Estación de Transferencia de Shushufindi) y las bombas contra incendios del CPF.

Otro punto que debe ser tomado en cuenta el momento de clasificar la maquinaria es la distancia a la cual cada una de las islas esta ubicada con respecto al CPF, lugar donde se focalizan los recursos, tanto de personal como de materiales. Un plan propuesto por los supervisores de mantenimiento para abaratar costos es hacer coincidir la medición de las vibraciones con los mantenimientos preventivos que se llevan a cabo en todas las islas.

3.3 CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE LA MAQUINARIA A SER ANALIZADA

Un factor primordial para tener éxito en el análisis de vibraciones en maquinaria es el conocimiento de las partes y funciones de las mismas. Antes de empezar a analizar los espectros de vibración se debe tener conocimiento de variables muy importantes como por ejemplo la velocidad nominal de giro, que es básica para la normalización de los espectros y futura identificación de las frecuencias forzadas.

Estas frecuencias forzadas pueden ser el producto de los alabes de un ventilador, el número de pistones en un motor de combustión, los polos de un generador, las barras de un motor eléctrico, las aletas o las etapas de una bomba, los dientes de los engranes, los elementos rodantes de un cojinete anti-fricción y en fin cualquier parte de una máquina que se encuentre rotando, razón por la cual es tan importante tener un conocimiento claro de las mismas. Todas estas características serán detalladas en el quinto capítulo máquina por máquina.

3.4 CLASIFICACIÓN DE LA MAQUINARIA

Para realizar la clasificación de la maquinaria es necesario tener un conocimiento un poco más amplio sobre el funcionamiento de la planta. Se puede decir que todas las máquinas tienen respaldo, pero esto no quiere decir que la paralización intempestiva de una máquina no interfiere en la producción de la planta.

		OBSERVACIONES
CRITERIOS DE FUNCIONAMIENTO		Todas las máquinas dentro del plan de mantenimiento forman parte de los procesos fundamentales de la planta y después de entender el funcionamiento global de la planta, se pudo constatar que no existe maquinaria única, todas las máquinas tienen su respaldo. Estas razones llevaron a clasificar a toda la maquinaria como equipo vital con respaldo.
CRITERIOS DE ENTORNO	Seguridad	Los daños en las máquinas analizadas no presentan peligro para la seguridad de la gente que en ellas trabaja.
	Peligros	Esta maquinaria no trabaja con materiales venenosos pero si inflamables.
	Localización	Este es un criterio muy importante, ya que las islas donde se encuentra la mayoría de las máquinas están a una distancia considerable y esto representa mucho tiempo en traslados.
	Velocidad	La velocidad de avance de los daños es un factor que influirá en la frecuencia con que se toman los datos.
CRITERIOS ECONÓMICOS	Costo	En general estas máquinas son grandes y costosas, por lo que no son reemplazadas cuando sufren daños, todas son reparadas.
	Localización	Es un factor preponderante, ya que la movilización a las islas se lo hará el momento en que una de las máquinas dentro de la isla tenga programado un mantenimiento predictivo y la toma de datos se la hará en todas las máquinas de la isla.

En los lugares donde se encuentran trabajando máquinas iguales, por ejemplo una sala de generación donde podemos encontrar tres o más generadores o en una estación de bombeo donde también existen varias máquinas iguales, la

paralización de una de estas es suplida incrementando la carga o la velocidad de las máquinas que trabajan cerca. En estos casos pareciera que la paralización de un equipo no afecta la producción, pero en cambio afecta la vida útil de la maquinaria que supe el trabajo del equipo dañado, lo que al final puede llegar a ser tan malo como una parada en el proceso.

Todas las máquinas, sean estas generadores, bombas de reinyección de agua o bombas de transferencia de crudo, dentro de este estudio forman parte de los procesos fundamentales dentro de lo que significa la producción de petróleo, razón por la cual todas ellas son necesarias para el correcto funcionamiento del campo. El fallo de cualquiera de estas máquinas no paraliza la producción total del campamento pero si disminuye, en mayor o menor cantidad, la producción de crudo.

Otro factor que fue importante el momento de clasificar la maquinaria, al que se lo puede considerar como un factor económico y de entorno, fue el hecho de que la maquinaria no se encuentra en un solo lugar y seria ilógico trasladarse hasta las islas, lo que puede llevar hasta dos horas, y no monitorear todas las máquinas que allí se encuentren y se haga necesario realizar otro viaje en poco tiempo.

Estas razones han llevado a tomar la decisión de clasificar a toda la maquinaria como equipo vital con respaldo y subclasificarlo de acuerdo a la localización, tipo de maquinaria y modelo específico. Las mediciones en un principio se harán cada quince días y luego estos intervalos podrán ir variando según las necesidades de cada máquina.

Locación 1 (Central Production Facilities CPF)

Generadores:

- Generator Engine MG101-1
- Generator Engine MG101-6D
- Generator Engine MG101-2D
- Generator Engine MG101-4D
- Generator Engine MG601-2
- Generator Engine MG601-4
- Generator Engine MG101-7G
- Generator Engine MG101-8G

Bombas Booster con motor eléctrico:

- Pump P-112D
- Pump P-112E
- Pump P-112F
- Pump P-112G
- Pump P-112H
- Pump P-112I
- Pump P-112K
- Pump P-112L
- Pump P-112M
- Pump P-112N
- Pump P-112O
- Pump P-103H
- Pump P-103I
- Pump P-103F

Bombas Booster con motor de combustión:

- Pump Engine MP-103D

Bombas de Transferencia de Crudo:

- Pump Engines MP-105A
- Pump Engines MP-105B

Bombas Contra Incendios:

- Pump Engine MP-110A
- Pump Engine MP-110B

Compresores de Gas:

- COM-107-A
- COM-107-B

Locación 2 (Estacion Limoncocha)

Generadores:

- Generator Engine MG2101-1D
- Generator Engine MG2101-1G
- Generator Engine MG2101-2G
- Generator Engine MG2101-3G
- Generator Engine MG2101-4G
- Generator Engine MG2101-5G
- Generator Engine MG2101-6G
- Generator Engine MG2101-7G
- Generator Engine MG2101-8G

- Generator Engine MG2101-9G
- Generator Engine MG2101-10G

Bombas de Transferencia de Crudo:

- Pump Engines MP-2105A
- Pump Engines MP-2105C

Bombas Booster con motor eléctrico:

- Pump P-2112A
- Pump P-2112B
- Pump P-2112C

Bombas de Transferencia de Crudo con Motor Eléctrico:

- Pump P-105C

Locación 3 (Laguna)

Generadores:

- Generator Engine MG521-4
- Generator Engine MG101-3D
- Generator Engine MG512-1D
- Generator Engine MG601-6
- Generator Engine MG601-8
- Generator Engine MG101-5D
- Generator Engine MG701-2
- Generator Engine MG101-5
- Generator Engine MG101-4D

Bombas de Alta con Motor Eléctrico:

- Pump P-601A
- Pump P-601B
- Pump P-103A

Locación 4 (Jivino A)

Generadores:

- Generator Engine MG301-1
- Generator Engine MG301-7
- Generator Engine MG101-2

Locación 5 (Jivino B)

Bombas de Alta con Motor de Combustión:

- Pump Engines MP-430A
- Pump Engines MP-430B
- Pump Engines MP-330D
- Pump Engines MP-330A
- Pump Engines MP-430E

Bombas de Alta con Motor Eléctrico:

- Pump P-430F

Locación 6 (Jivino C)

Generadores:

- Generator Engine MG301-9
- Generator Engine MG301-2

Bomba con Motor de Combustión:

- Pump Engines MP-502

Locación 7 (Jivino E)

Generadores:

- Generator Engine MG-513-1D

Bombas de Alta con Motor Eléctrico:

- Pump P-530A
- Pump P-530C

Locación 8 (Jivino F)

Bombas de Alta con Motor de Combustión:

- Pump Engines MP-430D
- Pump Engines MP-330C
- Pump Engines MP-330B
- Pump Engines MP-330E

Locación 9 (Itaya A)

Generadores:

- Generator Engine MG1001-1
- Generator Engine MG1001-2
- Generator Engine MG1001-3
- Generator Engine MG601-7
- Generator Engine MG601-1

Locación 10 (Itaya B)

Generadores:

- Generator Engine MG1002-1
- Generator Engine MG1002-2
- Generator Engine MG1002-3

Locación 11 (Itaya Port)

Generadores:

- Generator Engine CMG-01
- Generator Engine MTMG-01

Locación 12 (Indillana)

Generadores:

- Generator Engine MG601-5

- Generator Engine MG701-1
- Generator Engine MG701-3

Locación 13 (Shira)

Bombas de Alta con Motor de Combustión:

- Pump Engines MP-230B
- Pump Engines MP-230C

Locación 14 (Limoncocha 10)

Bombas de Alta con Motor de Combustión:

- Pump Engines MP-2103F

Bombas de Alta con Motor Eléctrico:

- Pump P-230A

Locación 15 (SRF)

Generadores:

- Generator Engine MG-2920

Bombas de Transferencia de Crudo:

- Pump Engines MP-205A

- Pump Engines MP-205B
- Pump Engines MP-205C

Locación 16 (Concordia)

Generadores:

- Generator Engine MG-2930

Locación 17 (Power Trailers)

Generadores:

- Power Trailer Engine MGW-01
- Power Trailer Engine MGW-02
- Power Trailer Engine MGW-03
- Power Trailer Engine MGW-04
- Power Trailer Engine MGW-05
- Power Trailer Engine MGW-06
- Power Trailer Engine MG511-4
- Power Trailer Engine MG501-4
- Power Trailer Engine MG531-4

CAPITULO 4

METODOLOGÍA PARA LA RECOPIACIÓN DE DATOS

4.1 SELECCIÓN DE LOS PUNTOS PARA MEDIR LA VIBRACIÓN.

El análisis de vibraciones sirve para detectar fallas en equipos rotativos, tales como desalineamiento, desbalanceo, aflojamiento o soltura mecánica, desgaste de rodamientos, problemas de engranajes, etc. Las localizaciones o puntos de medida, tienen que estar lo más cercano al elemento que se quiere monitorear y estar asentadas en estructuras sólidas que permitan que las vibraciones lleguen hasta el sensor sin sufrir las influencias externas que pueden hacer que los espectros muestren problemas falsos, nunca se debe seleccionar como punto de medición a carcazas, tapas, guardas, etc. Los puntos que mayor información pueden brindar son los que se encuentran mas cerca de los rodamientos de la máquina.

Para fijar el sensor a los puntos donde se requiere realizar las mediciones de vibración, se requiere de “bases roscadas de bronce”, especificadas por el fabricante del sensor utilizado, las mismas que se adhieren sobre la superficie limpia y plana de la máquina. El sensor de vibración (acelerómetro triaxial) es montado a estas bases para recolectar los datos de vibración.

Estas bases roscadas, aseguran una buena transferencia de las ondas de vibración a través del transductor, además aseguran que los datos son tomados siempre en el mismo punto y no haya lugar a confusiones en la dirección en que es adquirida cada lectura, de manera que se pueda llevar un buen registro y realizar los análisis de tendencias de manera confiable.

Las bases roscadas son adheridas a la máquina, con pegamento especial para no afectar la transferencia de las vibraciones al sensor, una vez que se ha limpiado completamente la superficie de contacto.

La orientación indicará al equipo analizador de vibraciones, el eje que está siendo medido por cada canal del sensor. Existen 6 posibles orientaciones del sensor:

- RAT
- ART
- TRA
- TAR
- RTA
- ATR

Donde, para máquinas horizontales, los ejes son:

A = Axial = Paralelo al eje de la máquina

R = Radial = Vertical

T = Tangencial = Horizontal

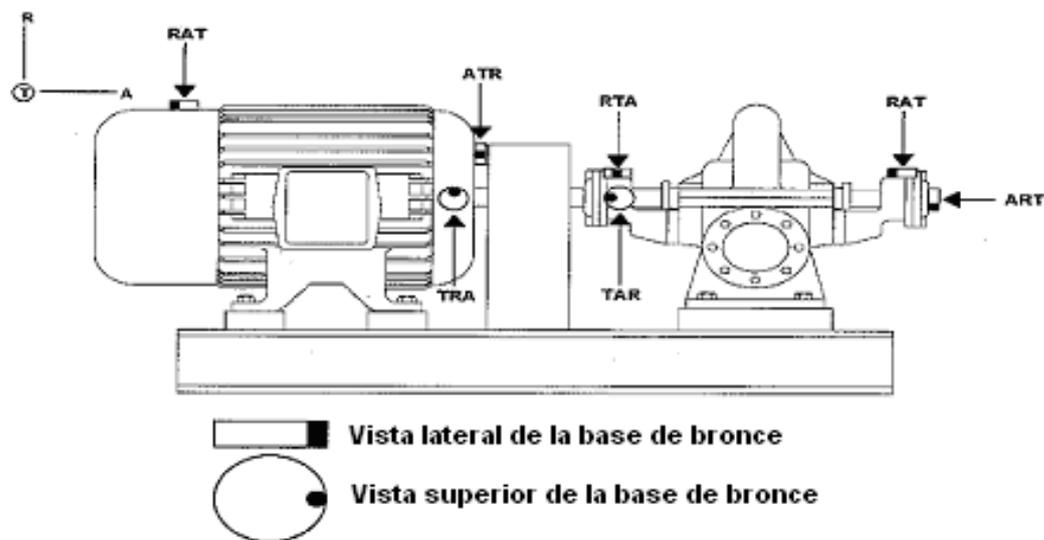


Fig. 4.1 Orientación de las bases en Máquinas Horizontales¹.

¹ Ilustración tomada de: **Ron Bodre**, *Introduction to Machine Vibration*, DLI Engineering Corp. Estados Unidos de América

Para máquinas verticales:

R = Radial

T = Tangencial

A = Axial = Vertical

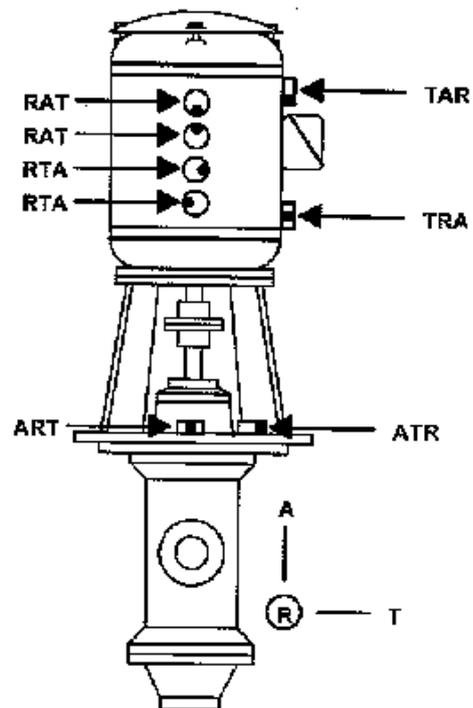


Fig. 4.2 Orientación de las bases en Máquinas Verticales¹.

¹ Ilustración tomada de: **Ron Bodre**, *Introduction to Machine Vibration*, DLI Engineering Corp. Estados Unidos de América

El acelerómetro, registra los datos en orden, es decir, canal 1 primero, luego canal 2 y canal 3, de tal manera que la orientación debe ser especificada en ese orden.

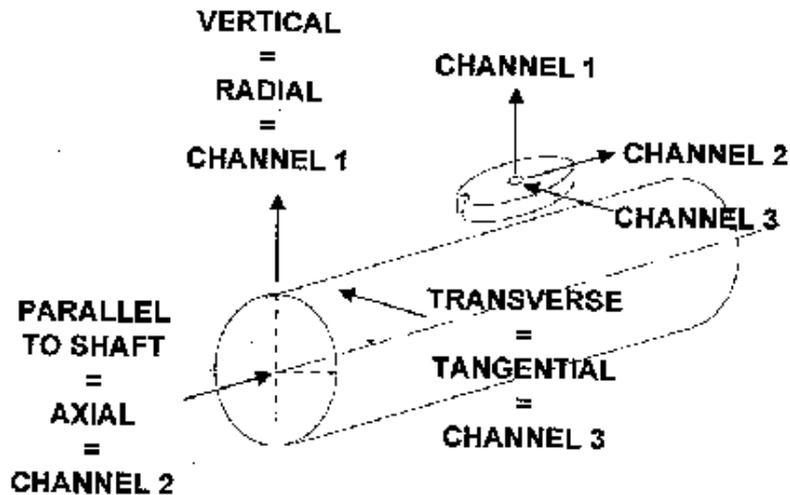


Fig. 4.3 Forma de ingresar la orientación de Sensor¹.

Entonces, por ejemplo, una orientación “RAT”, en una máquina horizontal, significaría que el canal 1 va a medir en la dirección radial o vertical, el canal 2 en la dirección axial, es decir, la del eje, y el canal 3 mediría la dirección tangencial u transversal.

4.2 SEÑALIZACIÓN DE LOS PUNTOS PARA MEDIR LA VIBRACIÓN.

Es conveniente normalizar la manera de nombrar las posiciones de los apoyos a medir en una máquina, por lo cual se decidió empezar numerando desde el apoyo del extremo libre de la máquina conductora (motor diesel, motor eléctrico, turbina) continuando a lo largo del tren de potencia (eje principal de la

¹ Ilustración tomada de: **Ron Bodre**, *Introduction to Machine Vibration*, DLI Engineering Corp. Estados Unidos de América

máquina) hasta el apoyo del extremo libre del último componente conducido. Esta forma de numerar los puntos de medición fue acogida pensando principalmente en lograr un orden el momento de recoger los datos, pero para el análisis de vibraciones este orden no influye en absoluto.



Fig. 4.4 Puntos de medición en una bomba REDA

A continuación, se muestran por separado las bases colocadas en cada componente de la máquina. Cabe indicar que no es necesario que las bases sean colocadas en el mismo punto ni que tengan la misma orientación que se muestra en las imágenes, dependerá de varios factores como la facilidad de acceso al punto de medida, facilidad de montaje del sensor, comodidad del técnico, etc., pero se debe siempre poner la base lo mas cerca posible a los rodamientos para obtener una lectura adecuada y asegurarse de que el equipo colector de datos tiene la información correcta sobre la dirección y sentido de las bases de bronce y el sensor.



Fig. 4.5 Puntos de medición en un Motor Eléctrico

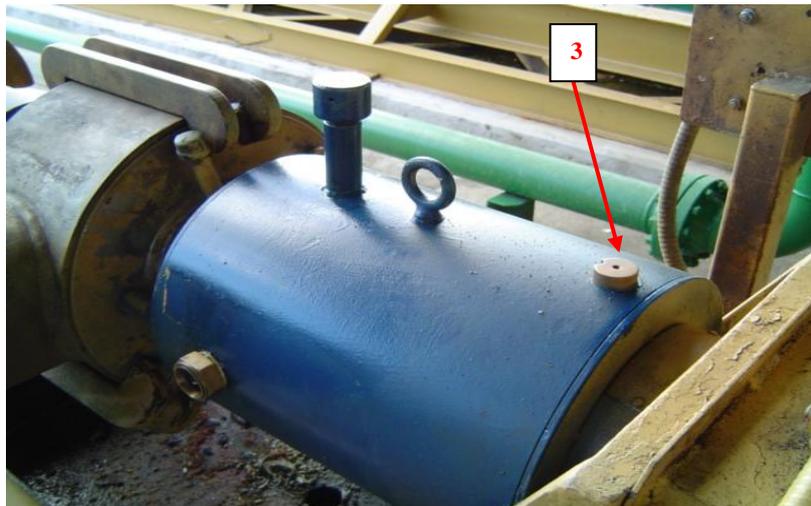


Fig. 4.6 Punto de medición en una Cámara de Empuje



Fig. 4.7 Punto de medición en Bomba 1, lado conducido



Fig. 4.8 Punto de medición en la unión entre la Bomba 1 y 2

En el caso de los Sets de Motor – Generador Caterpillar, las localizaciones serían:

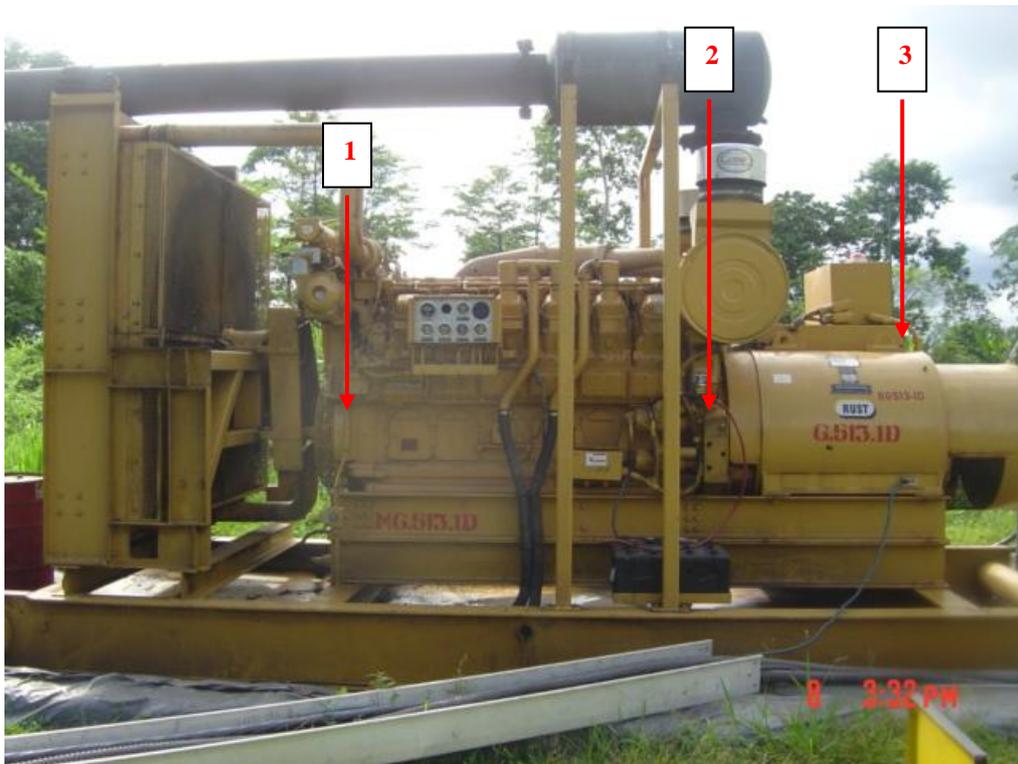


Fig. 4.9 Puntos de medición en un generador Caterpillar.



Fig. 4.10 Punto de medición en el Motor, lado libre.

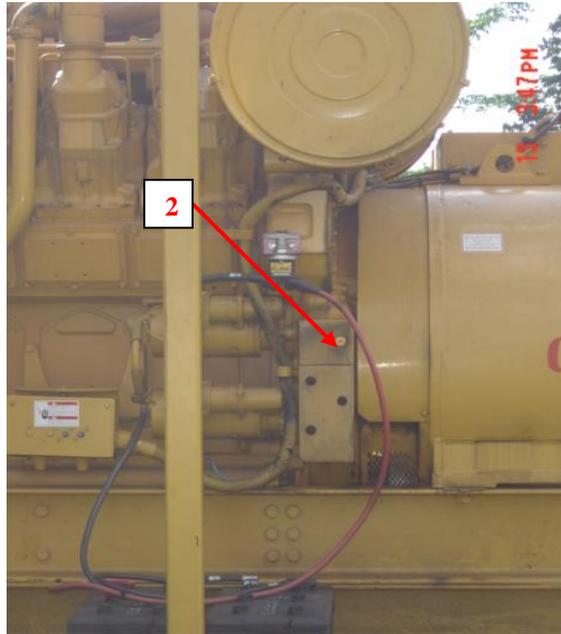


Fig. 4.11 Punto de medición en el Motor, lado conductor.



Fig. 4.12 Punto de medición en el Generador, lado libre

En el caso de los Sets de Motor – Generador Waukesha, las localizaciones serían:

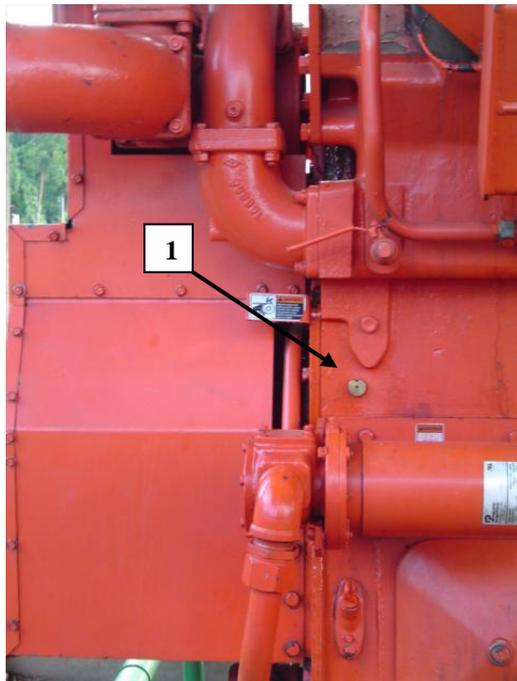


Fig. 4.13 Punto de medición en el Motor, lado libre.

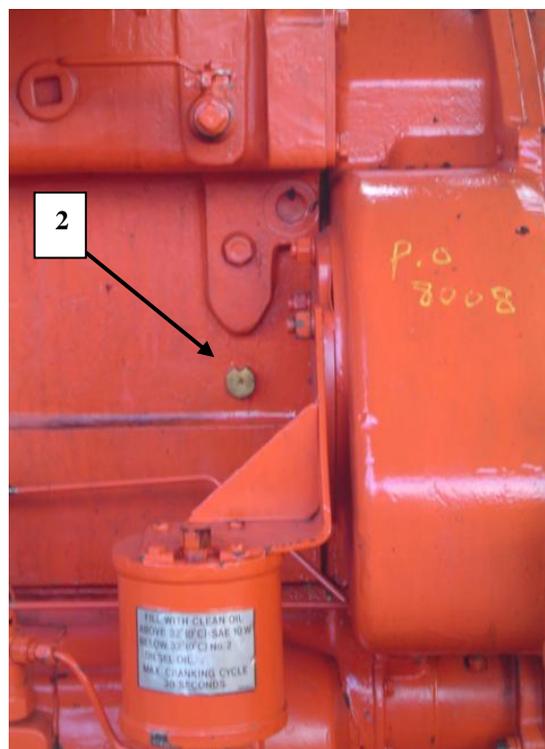


Fig. 4.14 Punto de medición en el Motor, lado conductor.

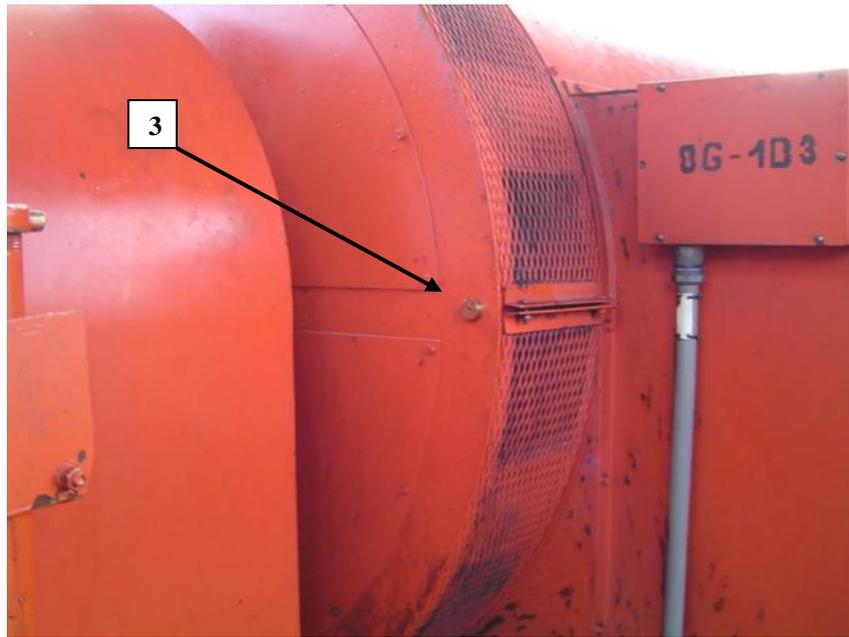


Fig. 4.15 Punto de medición en el Generador, lado conducido.

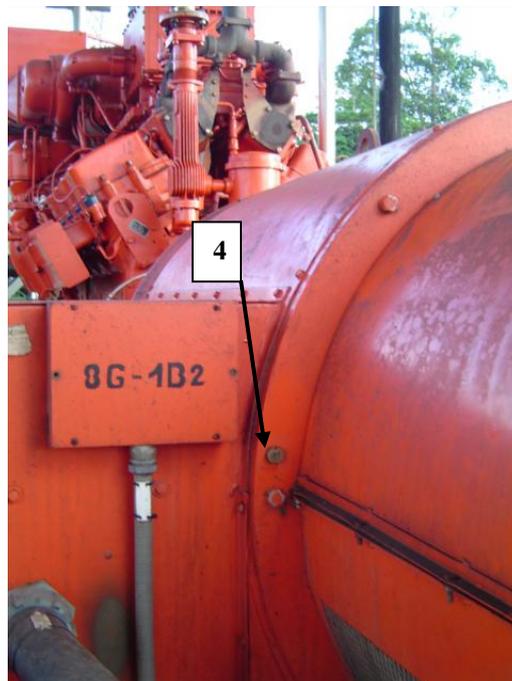


Fig. 4.16 Punto de medición en el Generador, lado libre.

4.3 ESTABLECIMIENTO DE RUTAS E INTERVALOS DE MEDICIÓN.

Gracias a que el equipo utilizado para la recolección de datos permite un rápido acceso a cualquier máquina que se desee monitorear, las rutas de medición pueden variar según más convenga. Existen factores que pueden cambiar las rutas que se desee seguir para hacer la recolección de datos como el estado de las máquinas, que puede hacer necesario monitorear unas máquinas en lugar de otras debido a que las primeras se encuentran en un estado crítico. Otra razón para no establecer rutas de medición fijas es que la mayor parte de las máquinas se encuentran en islas apartadas del campamento principal, por lo que al visitar una de estas islas es necesario realizar la medición en todas las máquinas que allí se encuentren.

4.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO DE MEDICIÓN

El equipo que se va a utilizar para el análisis vibracional, es el “DLI WATCHMAN DCX”, desarrollado por DLI Engineering. El DCX, es un colector de vibración multicanal muy resistente para el trabajo de campo, además de poder trabajar tanto con sensores triaxiales, usados para este proyecto, como con sensores uni-axiales para adquirir la información y desarrollar análisis aplicados a:

- Monitoreo de la condición de la maquinaria
- Diagnóstico y detección de fallas en rodamientos
- Análisis y tendencias de los datos de vibración
- Monitoreo de parámetros de procesos.

Este equipo trabaja bajo *Windows*, lo que hace muy fácil su uso. Es capaz de dar diagnósticos sobre el estado vibracional de la máquina, pero requiere que se carguen en él datos sobre el número de localizaciones de cada máquina, la orientación del sensor, los parámetros de funcionamiento, características de cada parte como: número de cilindros, número de polos, tipo de cojinetes,

relaciones de transmisión entre las partes, es decir, toda la información dinámica posible.



Fig. 4.17 Analizador DCX Hammerhead

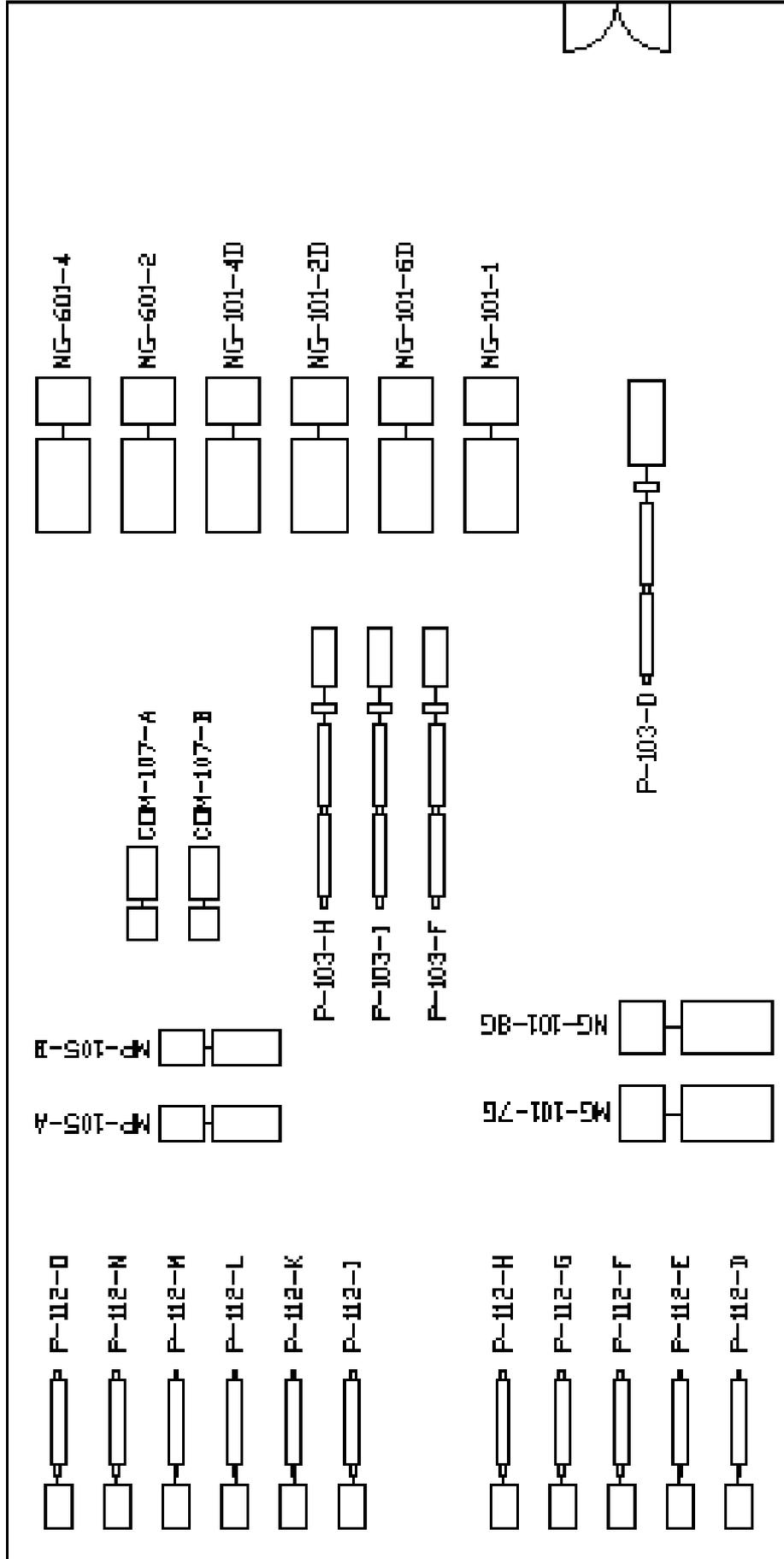
En lo que refiere al cronograma para la recolección de datos se debe tener en cuenta la cantidad de máquinas que deben ser monitoreadas y que se clasificó a toda la maquinaria como equipo vital con respaldo. Las órdenes de trabajo serán generadas por los Supervisores de Mantenimiento una vez por mes, es decir, que al cabo de un mes, se deben haber monitoreado todas las máquinas.

Cabe aclarar, que el momento que se detecte una falla, el intervalo de medición debe reducirse a mediciones semanales, diarias y hasta varias veces por día si es que el equipo está altamente deteriorado y que estamos seguros de que requerirá un mantenimiento correctivo. Estos intervalos dependen mucho del Ingeniero de Mantenimiento Predictivo, quien se encargará de evaluar el tipo de falla y el grado de la misma.

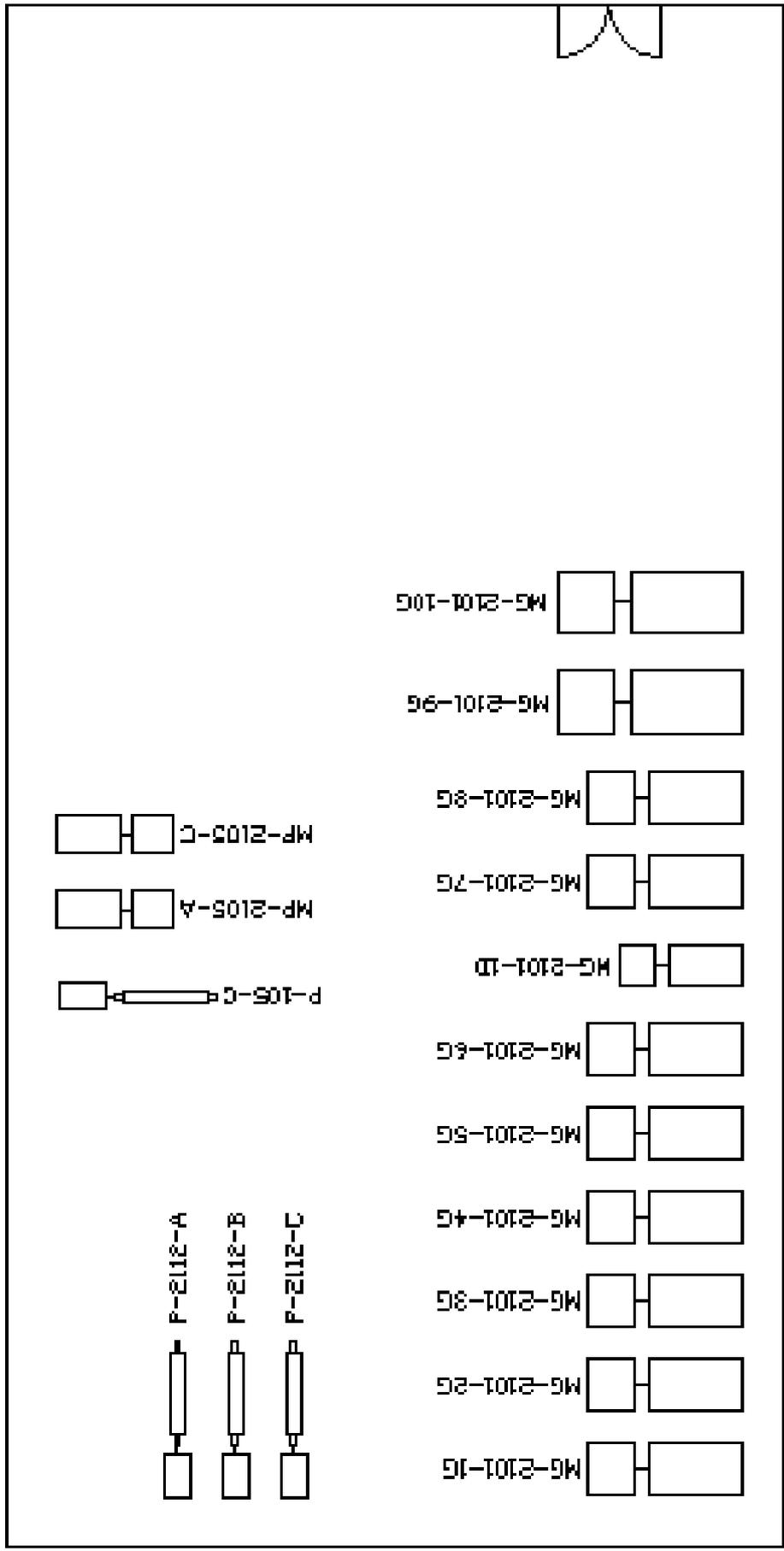
4.4 PLANOS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS.

Para facilitar la recolección de datos y poder identificar rápidamente la ubicación de una máquina en particular, se construyeron estos planos indicando cada locación y todas las máquinas que se encuentran dentro de ellas.

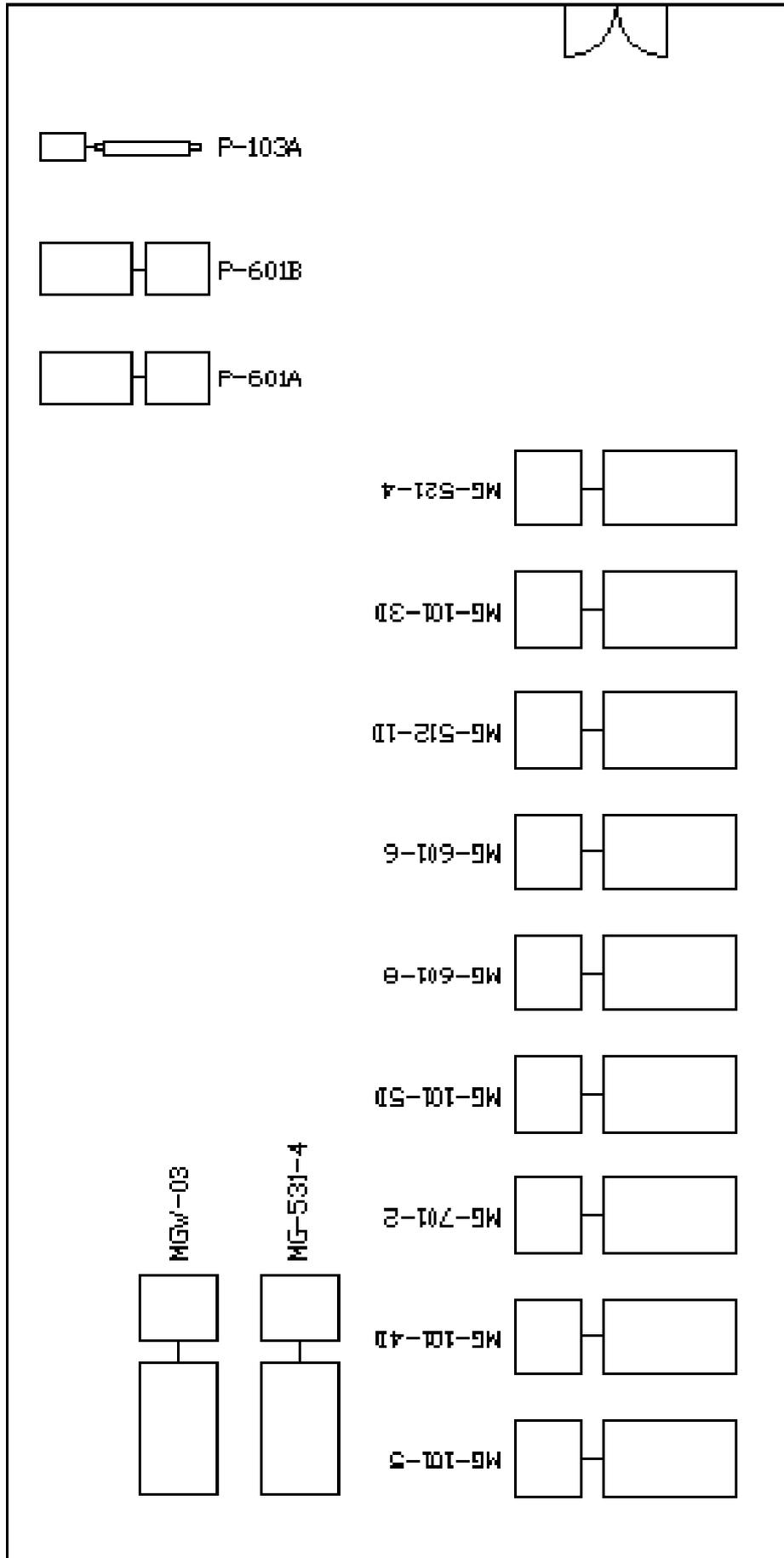
LAYOUT MAQUINARIA CPF



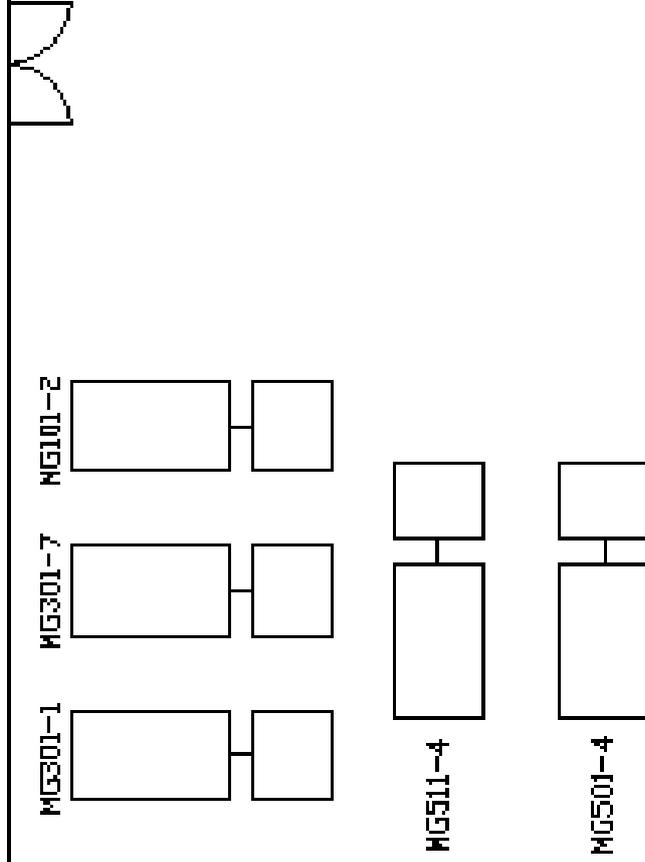
LAYOUT MAQUINARIA LIMONCOCHA



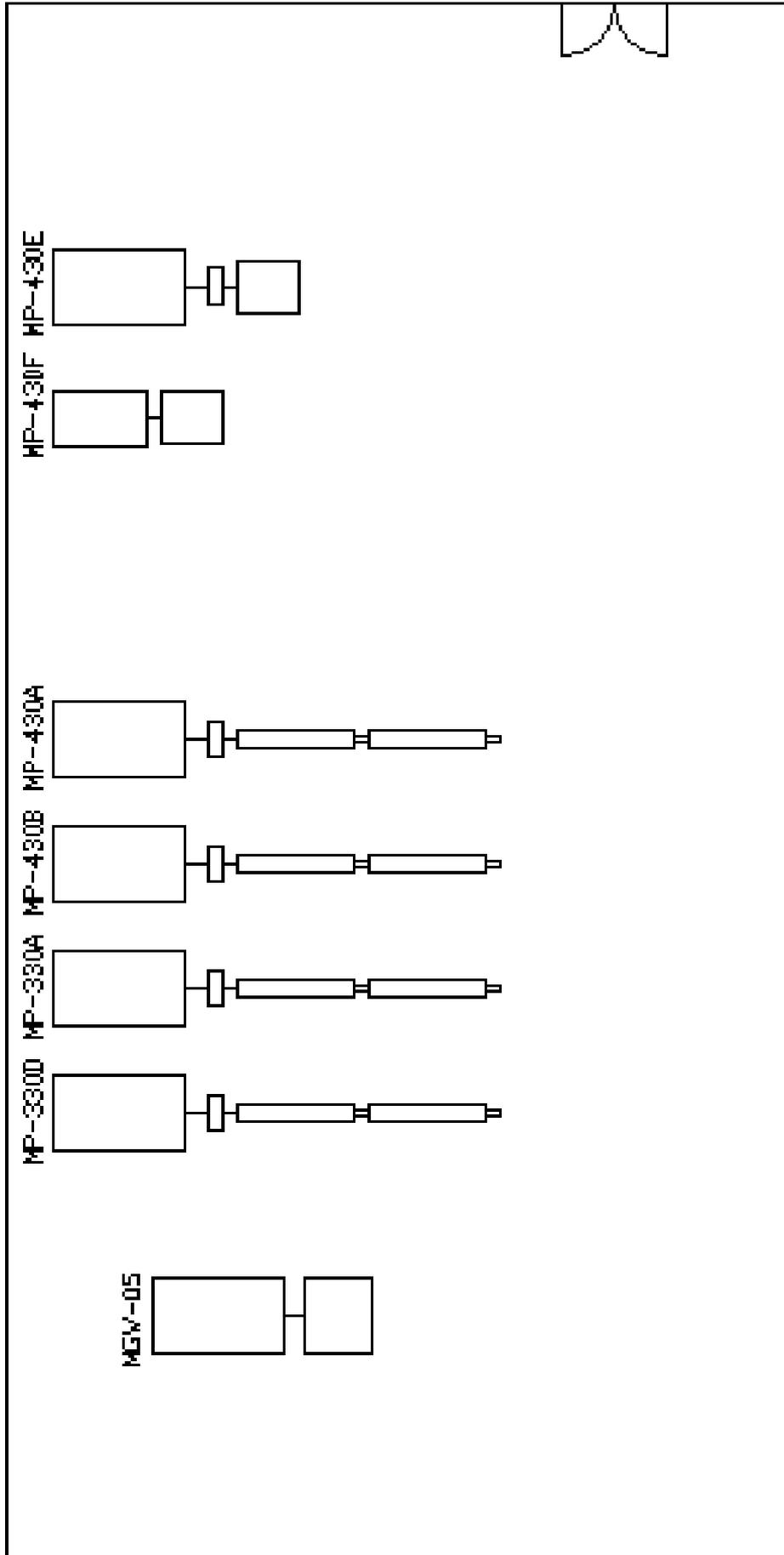
LAYOUT MAQUINARIA LAGUNA



LAYOUT MAQUINARIA JIVINO A

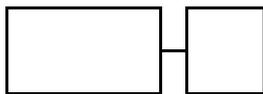
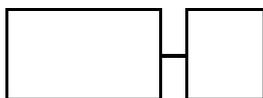


LAYOUT MAQUINARIA JIVINO B



LAYOUT MAQUINARIA JIVINO C

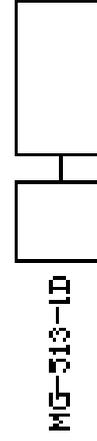
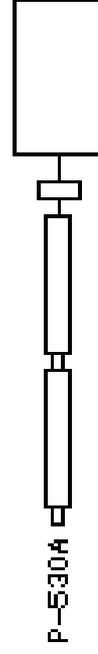
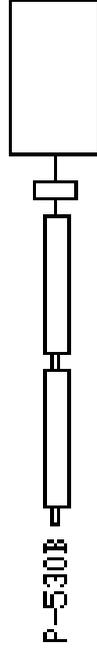
ME301-2 NG301-7



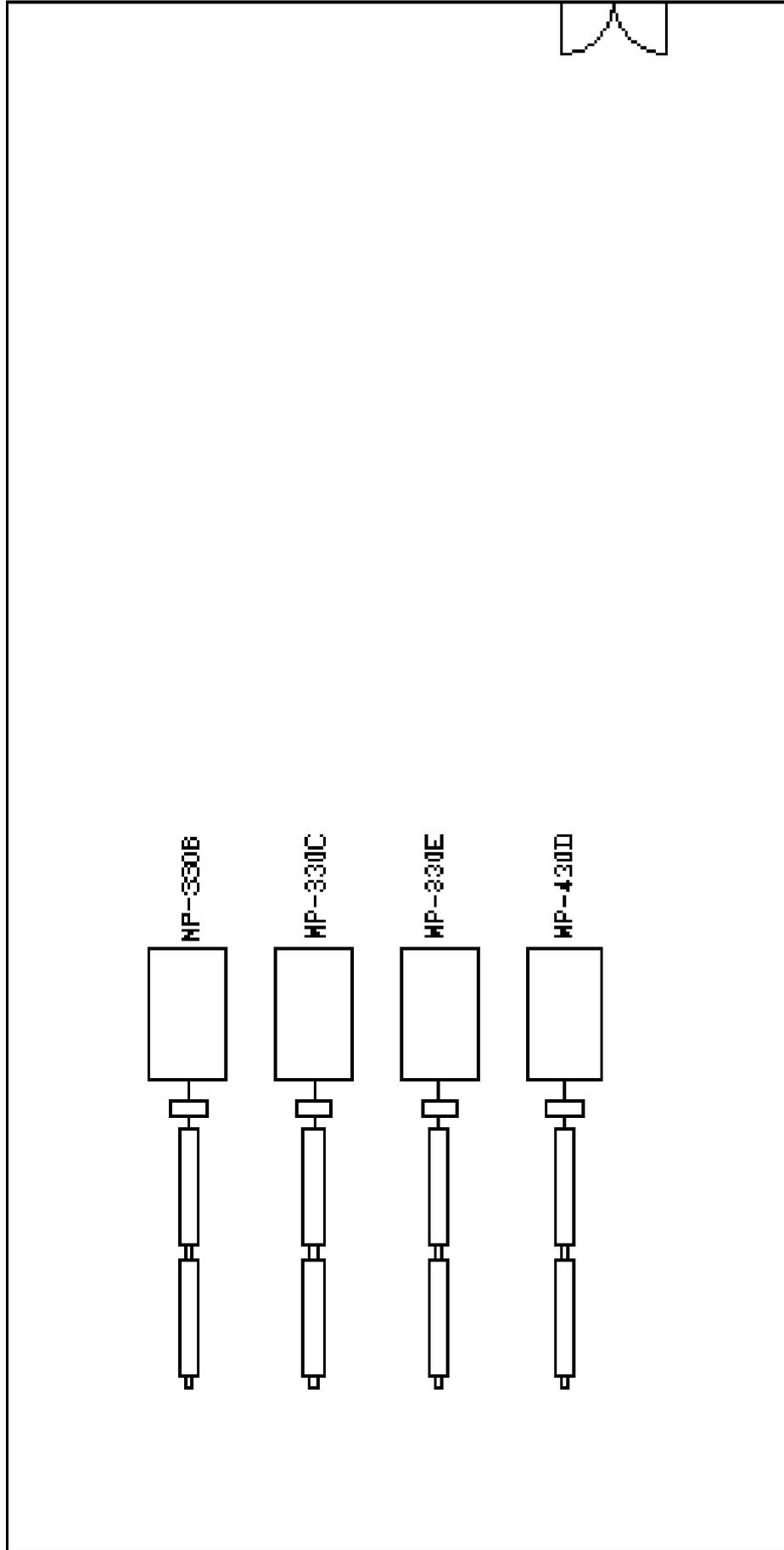
MP-502



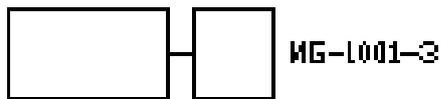
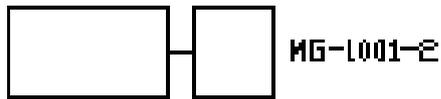
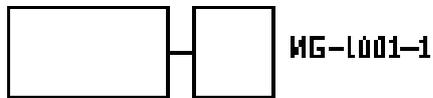
LAYOUT MAQUINARIA JIVINO E



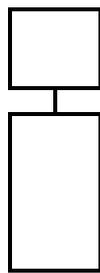
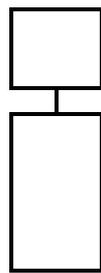
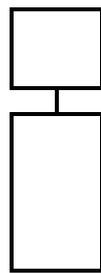
LAYOUT MAQUINARIA JIVINO F



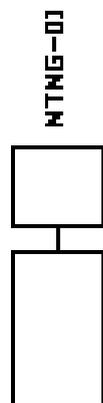
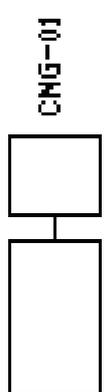
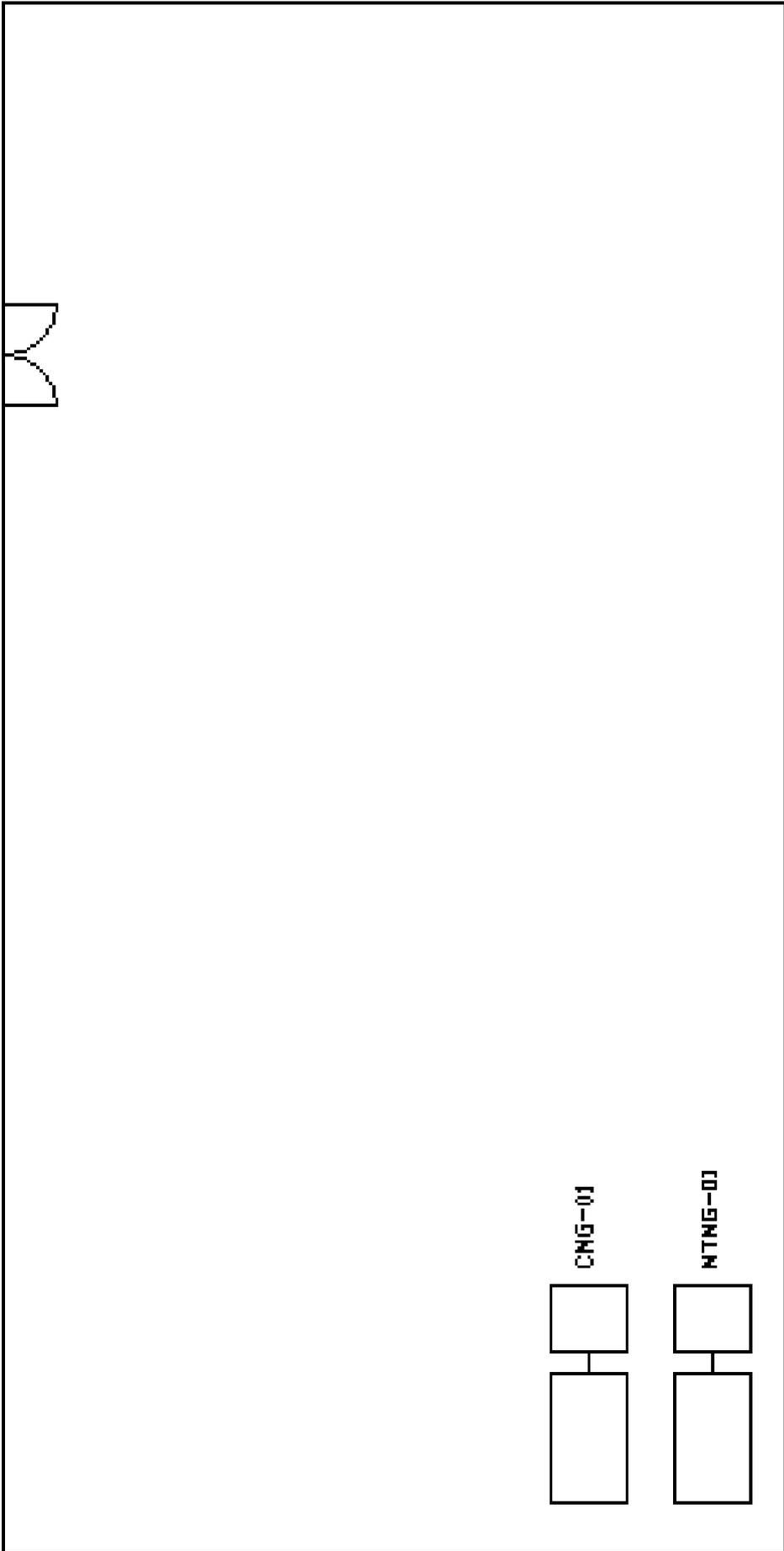
LAYOUT MAQUINARIA ITAYA A



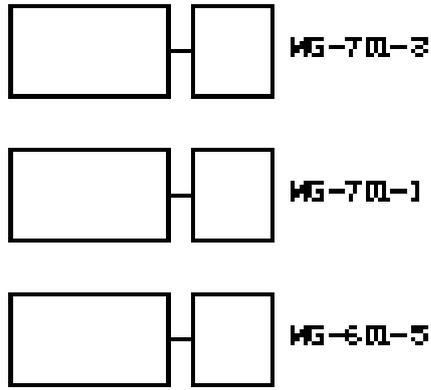
LAYOUT MAQUINARIA ITAYA B



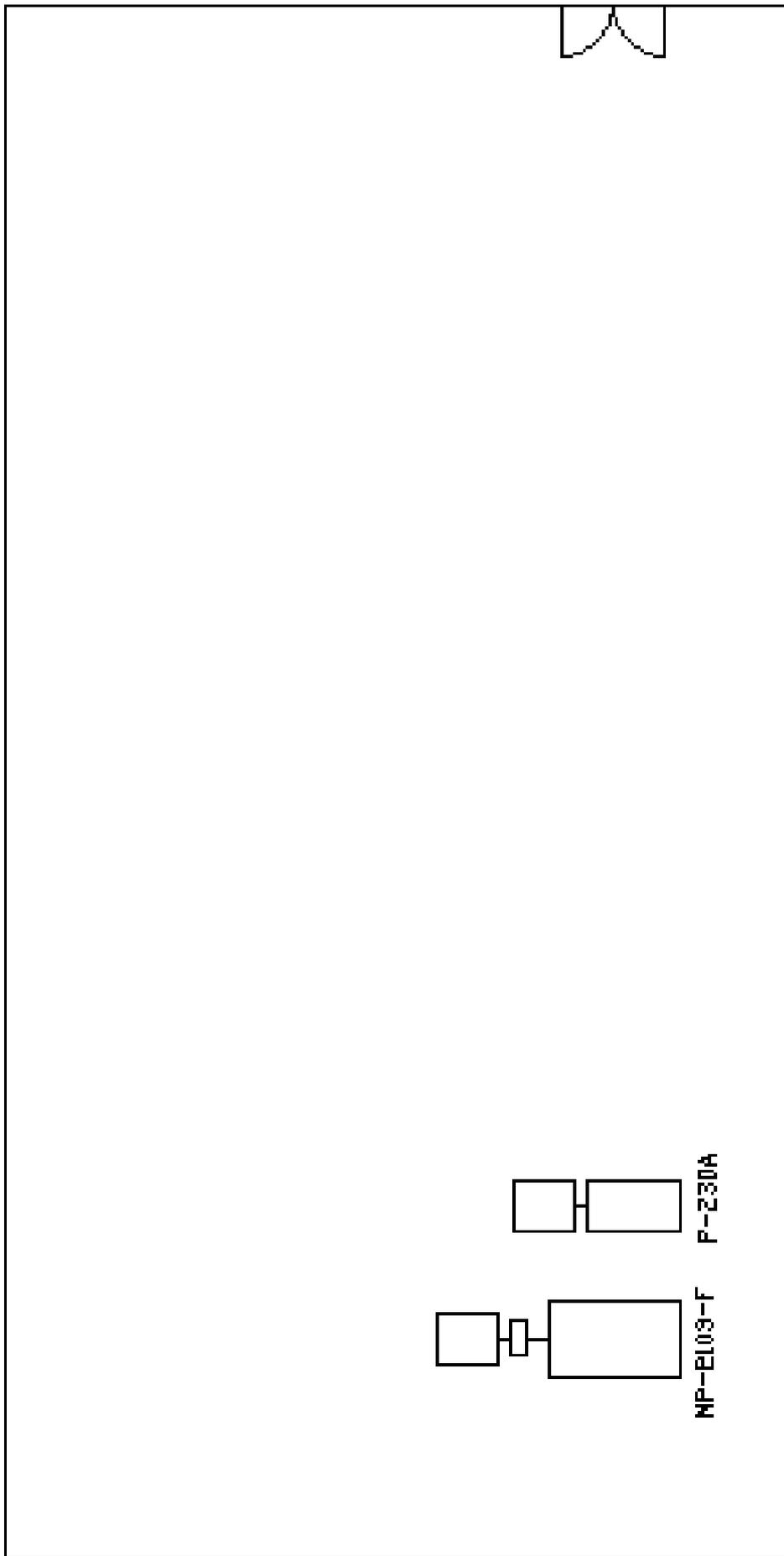
LAYOUT MAQUINARIA ITAYA PORT



LAYOUT MAQUINARIA INDILLANA

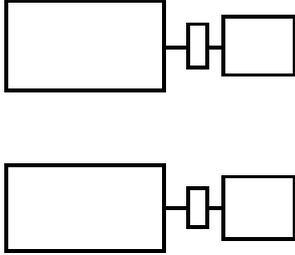


LAYOUT MAQUINARIA LIMONCOCHA 10

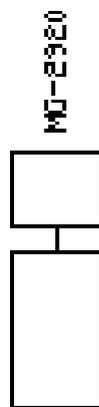
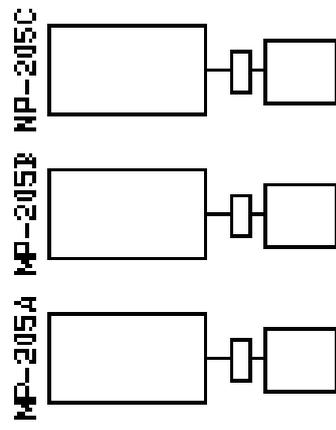


LAYOUT MAQUINARIA SHIRA

MP-2310B MP-2310C



LAYOUT MAQUINARIA SRF



CAPITULO 5

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 ORGANIZACIÓN DEL PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO.

Como se menciona en el capítulo III, para llevar a cabo con éxito el plan de mantenimiento, se necesita llevar a cabo cada actividad en un orden predeterminado, desde la selección de las máquinas que serán incluidas en el plan hasta la organización de los datos tomados periódicamente.

1. Definición de las máquinas que entrarán en el Plan de Mantenimiento.
2. Clasificación y organización de la maquinaria en un orden lógico para coleccionar sus datos.
3. Registro de las características de la maquinaria.
4. Grabación y registro de información dinámica inicial
5. Colección y registro de datos en forma periódica

5.2 REGISTROS DEL MONITOREO Y ANÁLISIS VIBRACIONAL PARA CADA MÁQUINA.

Debido a la gran cantidad de máquinas que fueron objeto del análisis en este proyecto, el análisis de resultados solamente incluye un grupo de maquinas representativas, únicamente en una máquina de cada tipo.

A continuación se presenta como parte del monitoreo de las máquinas la hoja de datos para cada máquina con su respectivo esquema, se registrarán las características propias de cada máquina y las condiciones de operación a las que se tomaron las lecturas de vibración.

Los espectros de referencia mostrados en esta sección fueron tomados del colector y analizador de espectros DCX Hammerhead. Su importancia radica en que son estos los espectros con los que se realizará las gráficas de tendencia y son las referencias con las cuales se comparará las mediciones que se realicen posteriormente.

Las gráficas de tendencia, como se dijo anteriormente, son un punto fundamental en el mantenimiento predictivo. Estas gráficas nos permiten conocer el comportamiento de las fallas detectadas para poder predecir el momento en que estas fallas sean críticas. En este punto es donde se basa principalmente el mantenimiento predictivo, ya que este sistema de mantenimiento no se enfoca únicamente en encontrar las fallas sino que trata de sacar el mayor provecho posible a los elementos de la maquinaria, evitando mantenimientos innecesarios y ahorrando tiempo y dinero.

Las gráficas de tendencia que se presentan a continuación son gráficas de Amplitud de vibración (Desplazamiento, Velocidad o Aceleración) vs. Tiempo. El equipo para análisis de vibraciones utilizado en este proyecto, permite construir estas gráficas para cada punto dentro del espectro, por lo que para cada espectro y cada máquina existen un número infinito de

gráficas de tendencia. Las gráficas de tendencia que se muestran en el proyecto son tomadas a la velocidad de rotación de la flecha de la máquina motriz, ya que esta es una velocidad en donde se presentan problemas importantes de la maquinaria como son desbalanceo, desalineación, soldaduras, etc.

En la parte superior de cada gráfico, se encuentran las abreviaciones de las frecuencias forzantes más importantes. A continuación se listan estas abreviaturas con su respectivo significado para facilitar el entendimiento de estos gráficos:

EM.....Defecto de encendido.

1X, 2X,....nX.....Múltiplos de la frecuencia nominal de rotación de la máquina motriz.

GP.....Frecuencia de paso de los polos del generador.

EF.....Frecuencia de encendido de los pistones del motor.

PR.....Frecuencia de los pistones del motor.

GFB.....Frecuencia de paso de los alabes del ventilador del generador.

1XD, 2XD,....,nXD.....Múltiplos de la velocidad nominal de la máquina motriz.

1XP, 2XP,...., nXP.....Múltiplos de la velocidad nominal de la máquina movida.

OPG.....Frecuencia de paso de los dientes de la bomba de aceite o agua.

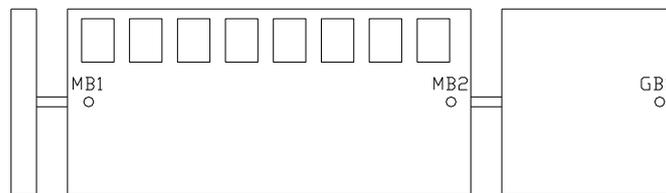
HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MG-601-6

Ubicación: Laguna

Esquema General de la Máquina

Sets Motor Generador Caterpillar 3516-D



Información General

Velocidad Nominal (rpm): 1200

Número de Cilindros: 16

Engranés Bomba de Aceite: 14

Engranés Bomba de Agua: 14

Engranés Distribución: 92

Engrane Auxiliar: 183

Polos del Generador: 6

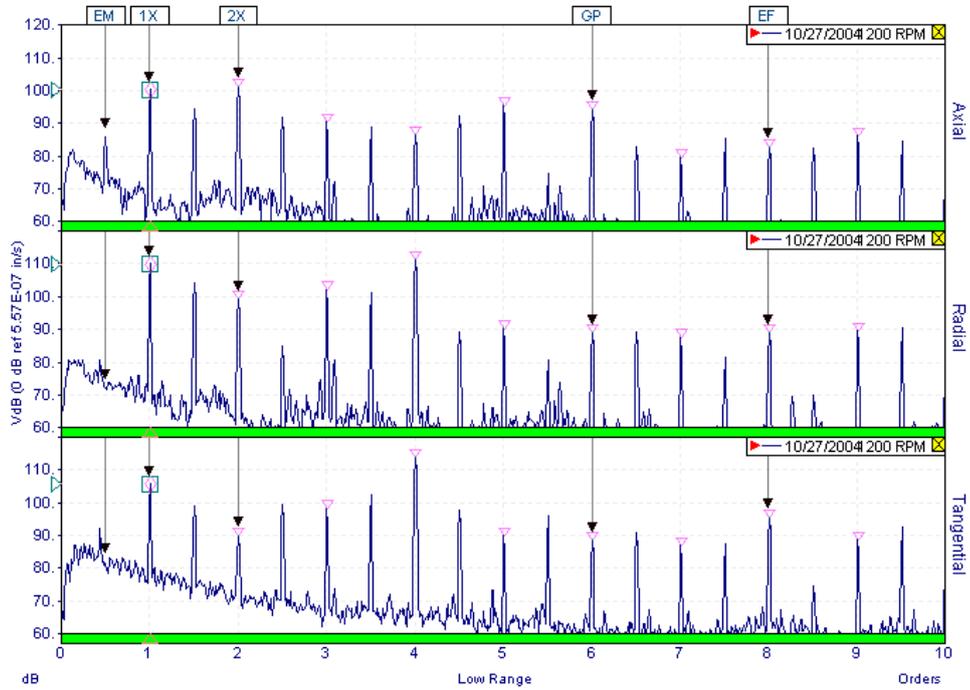
Alabes vent. Generador: 18

Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial

Carga del Equipo (kW): 700

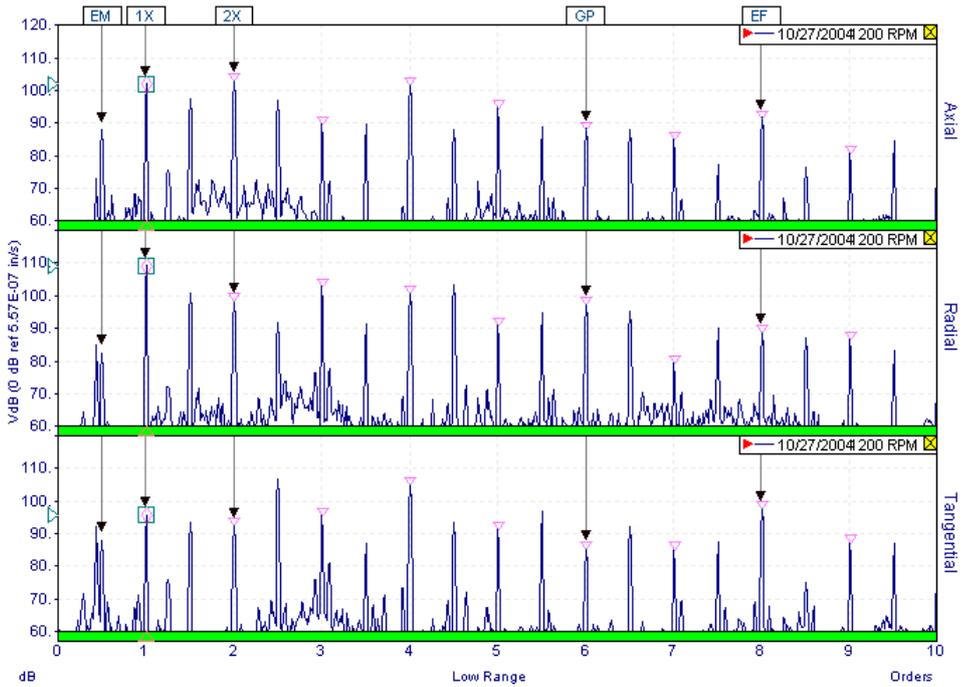
ESPECTROS DE REFERENCIA

PLANT: OXY-CPF AREA: Laguna
 MACHINE: MG-601-6 LOCATION: ENGINE, BEARING 1 [1] MID: 40
 1201.5 CPM, 1.00X, 100.3 VdB, 10/27/2004 13:34 Axial



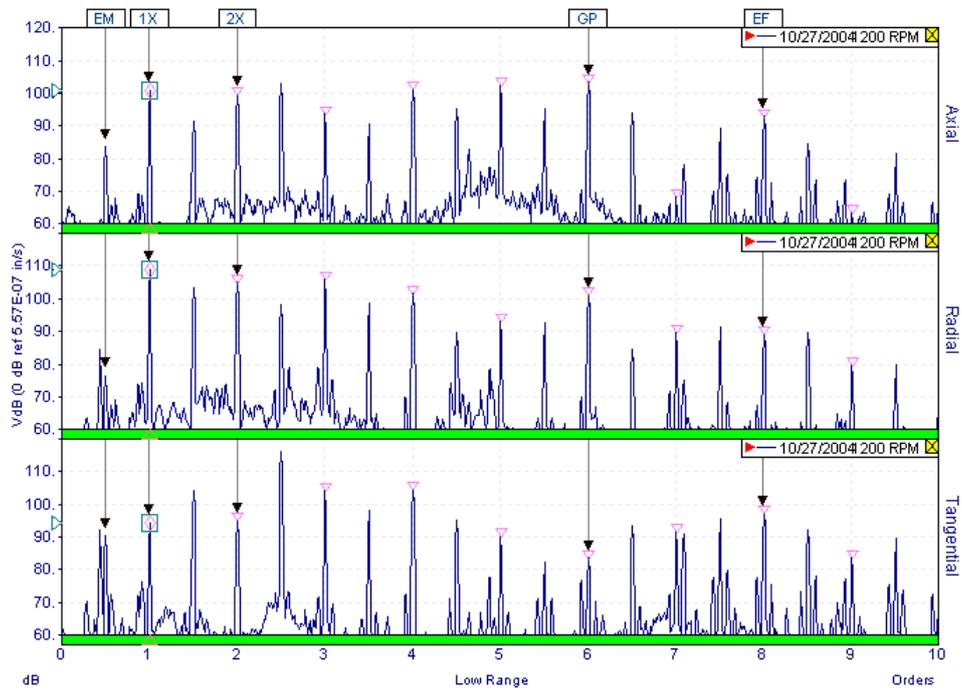
Motor, Posición 1 (MB1)

PLANT: OXY-CPF AREA: Laguna
 MACHINE: MG-601-6 LOCATION: ENGINE, BEARING 2 [2] MID: 40
 1201.5 CPM, 1.00X, 102.0 VdB, 10/27/2004 13:36 Axial



Motor, Posición 2 (MB2)

PLANT: OXY-CPF	AREA: Laguna	MID: 40
MACHINE: MG-601-6	LOCATION: GENERATOR, BEARING 3 [3]	
1201.5 CPM, 1.00X, 100.8 VdB, 10/27/2004 13:37 Axial		



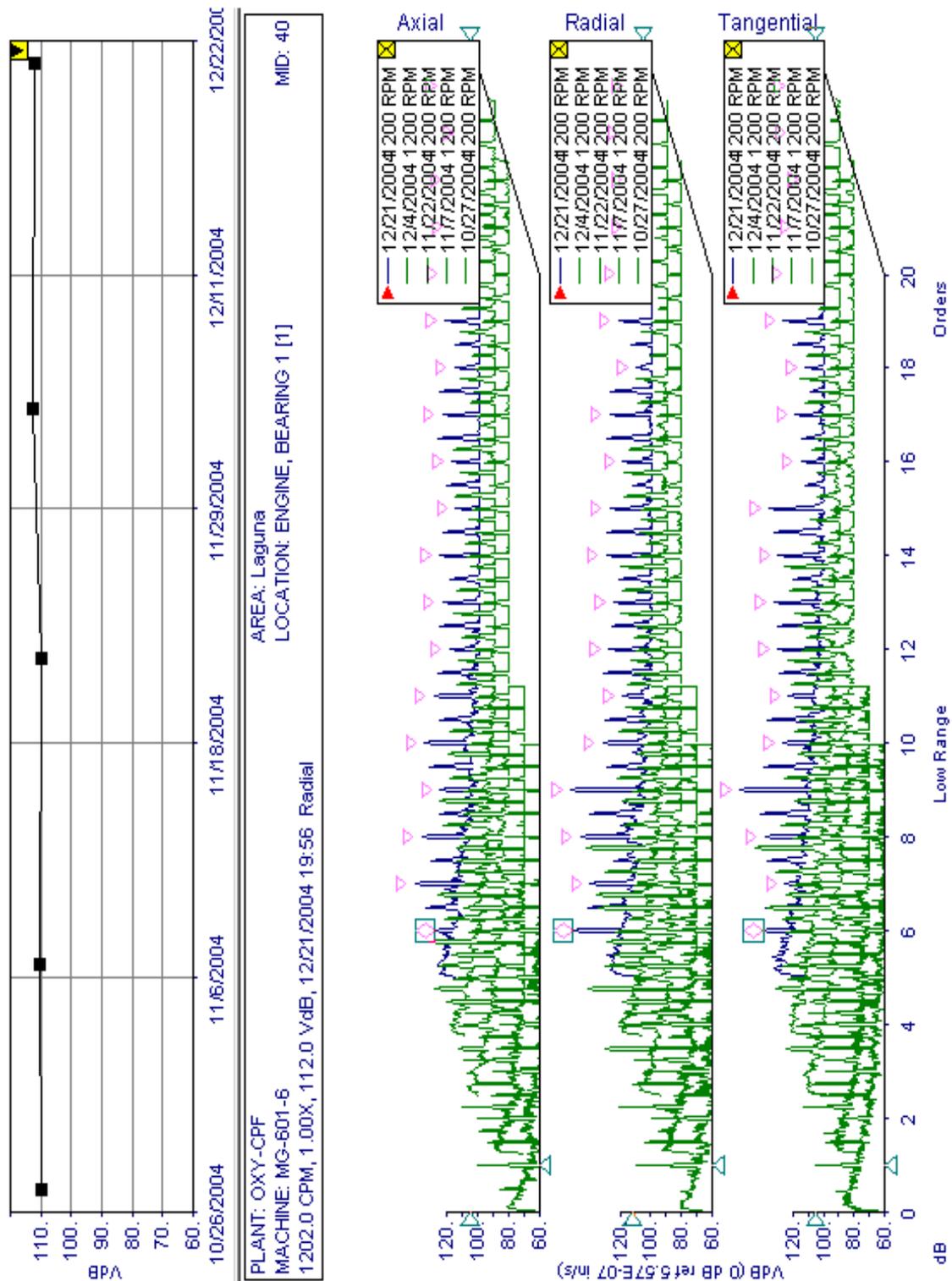
Generador, Posición 3 (GB1)

Gráficas de Cascada y Tendencia

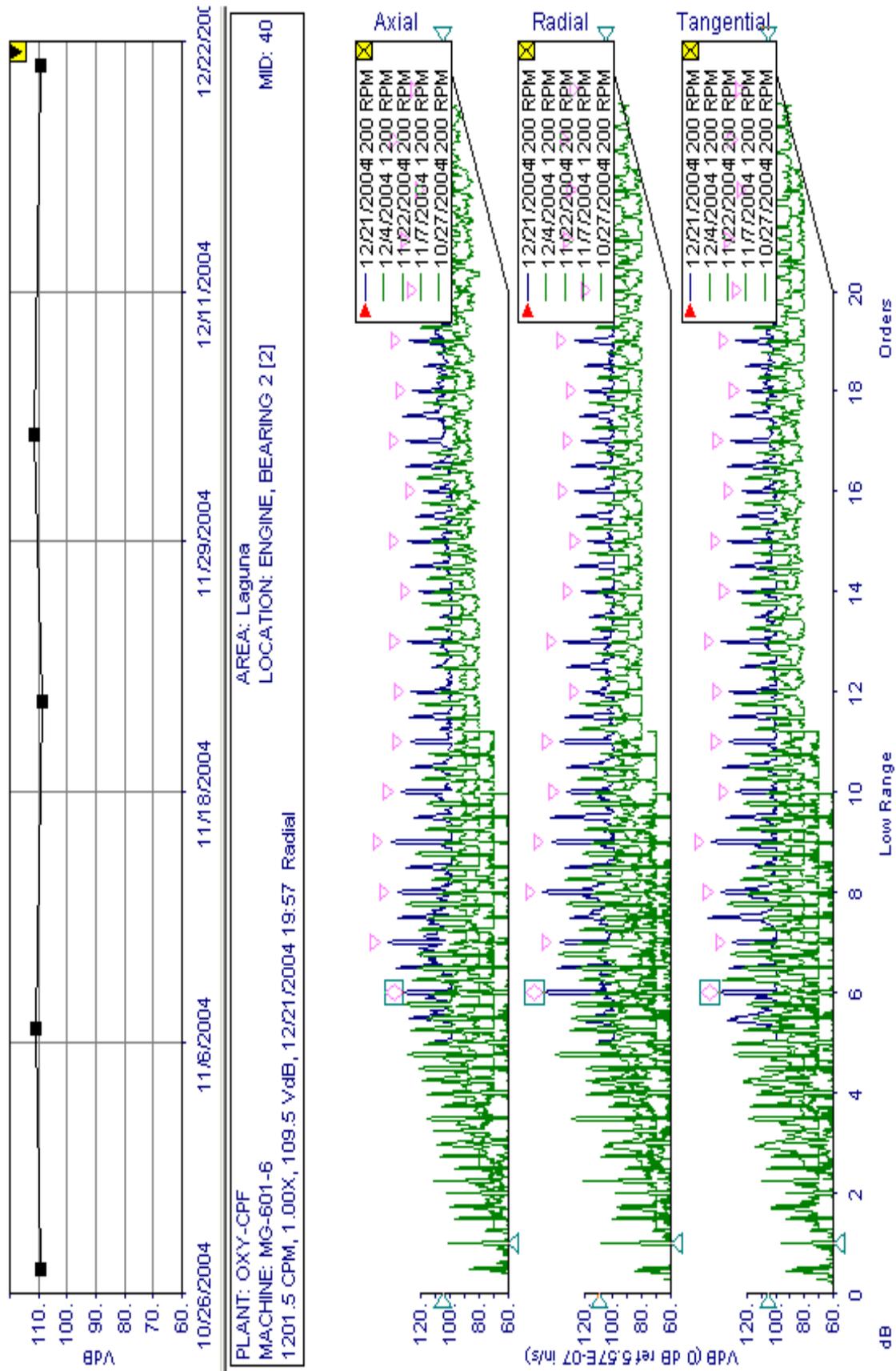
Máquina: MG-601-6

Ubicación: Laguna

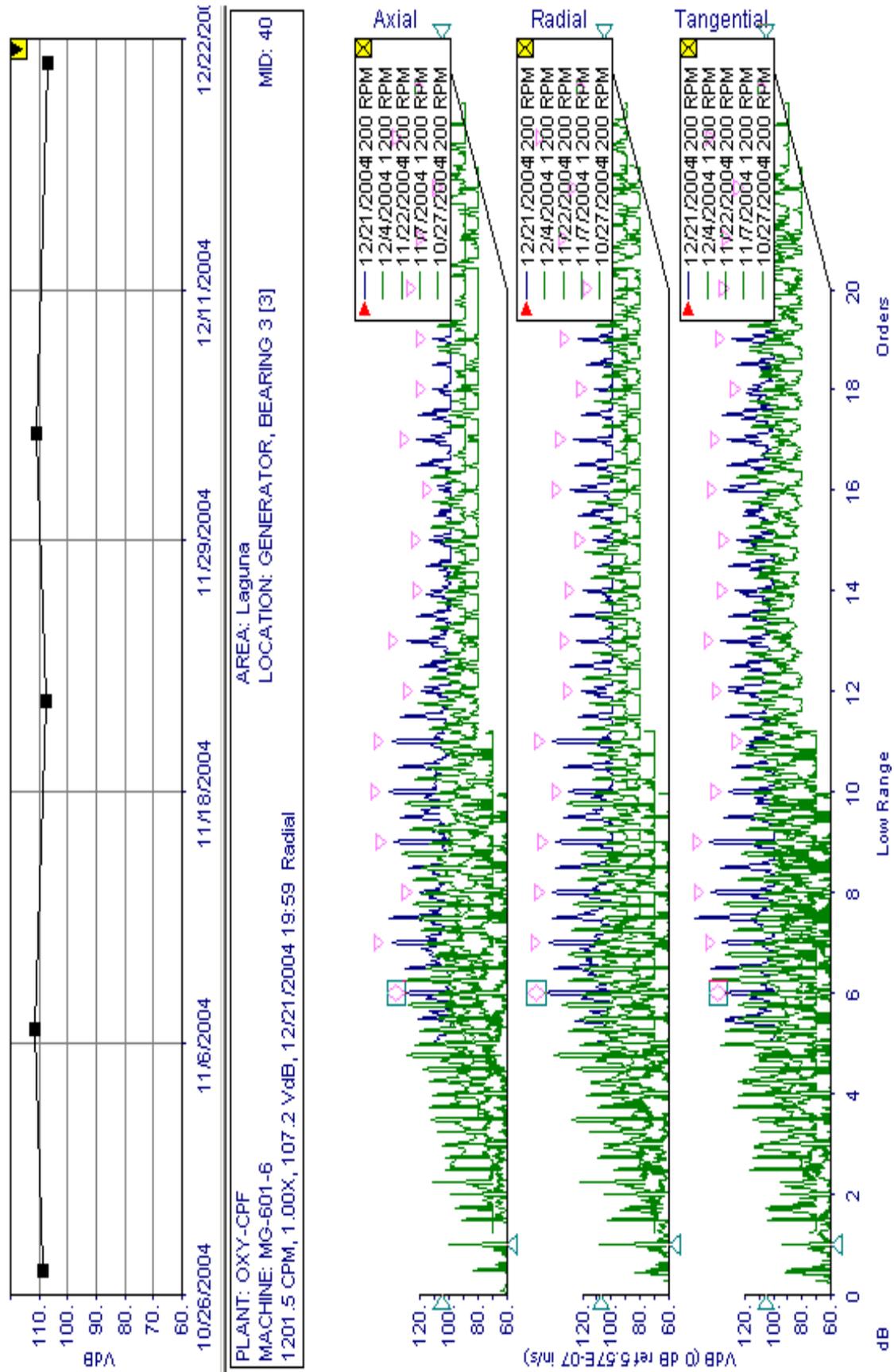
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



3.- Rodamiento del generador.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS													
Máquina: MG-601-6			Fecha: 27 de Octubre del 2004			Periodo análisis de Tendencias: 26 Octubre-22 de Diciembre / 2004							
Niveles de Alarma													
Unidades		Bueno			Regular			Malo					
in/s		0.5			0.6			0.7					
Vdb		119.1			120.6			122					
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración								Observaciones	Tendencia	Recomendaciones	
		Axial		Radial		Tang.							
		B	R	M	B	R	M	B	R	M			
Motor, MB1	0.5 X	x			x			x			El nivel de vibración en 2X Axial es mayor al nivel en 1X. Se evidencia la presencia de vibración en 0.5X y armónicos de esta frecuencia.	Los niveles de vibración en todas las frecuencias se ha mantenido constantes, esto significa que las fallas no han progresado.	Vigilar la máquina por problemas de alineación. Revisar el encendido de los pistones del motor. Revisar el eje y los elementos asociados por soltura.
	1X	x			x			x					
	2X	x			x			x					
	3X	x			x			x					
	4X	x			x			x					
	6X, GP	x			x			x					
	8X, EF	x			x			x					
			x			x			x				
Motor, MB2	0.5 X	x			x			x			El nivel de vibración en 2X Axial es ligeramente mayor al nivel en 1X. Se evidencia la presencia de vibración en 0.5X y armónicos de esta frecuencia.	Los niveles de vibración se han mantenido constantes y bajo los límites admisibles.	Se debe mantener vigilado este generador por un posible incremento en los síntomas de desalineación.
	1X	x			x			x					
	2X	x			x			x					
	3X	x			x			x					
	4X	x			x			x					
	6X, GP	x			x			x					
	8X, EF	x			x			x					
			x			x			x				
Gen., GB1	0.5 X	x			x			x			Se evidencia la presencia de vibración en 0.5X y armónicos de esta frecuencia.	No se evidencia cambio en los niveles de vibración y estos se mantienen bajo los límites admisibles.	Revisar el eje y los elementos asociados a este por soltura.
	1X	x			x			x					
	2X	x			x			x					
	3X	x			x			x					
	4X	x			x			x					
	6X, GP	x			x			x					
	8X, EF	x			x			x					
			x			x			x				

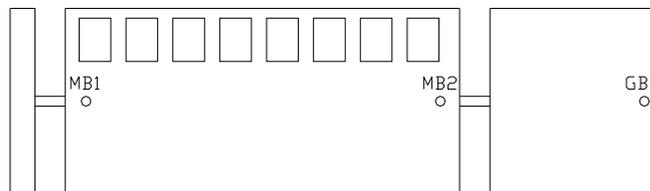
HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MG-W06

Ubicación: Jivino B

Esquema General de la Máquina

Power Trailers Caterpillar 3516-D



Información General

Velocidad Nominal (rpm): 1800

Número de Cilindros: 16

Engranés Bomba de Aceite: 14

Engranés Bomba de Agua: 14

Engranés Distribución: 92

Engrane Auxiliar: 183

Polos del Generador: 4

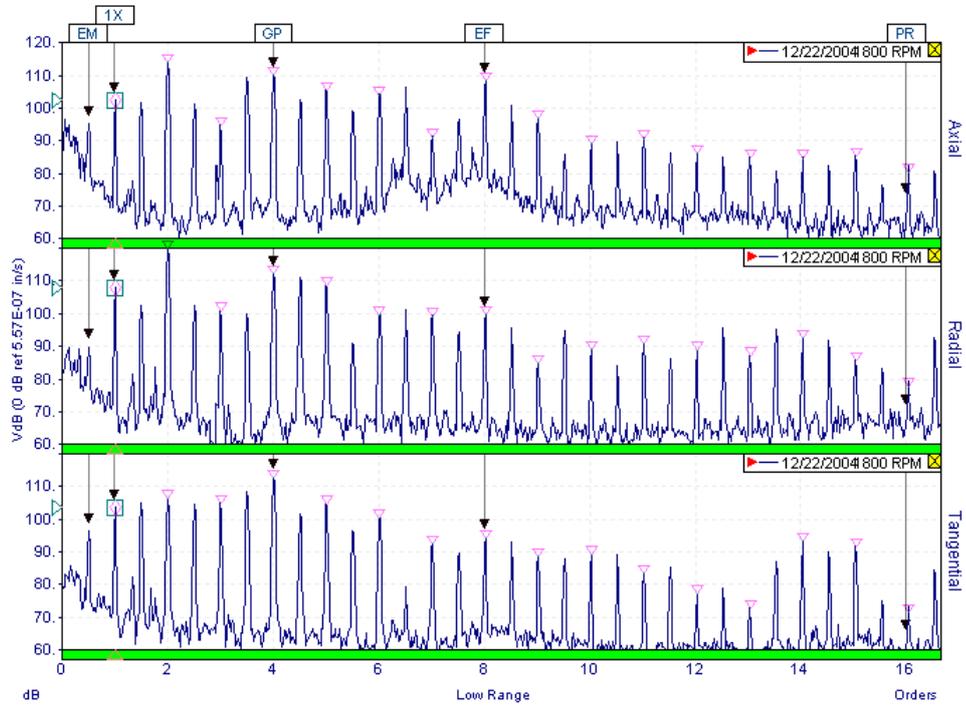
Alabes vent. Generador: 18

Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial

Carga del Equipo (kW): 700

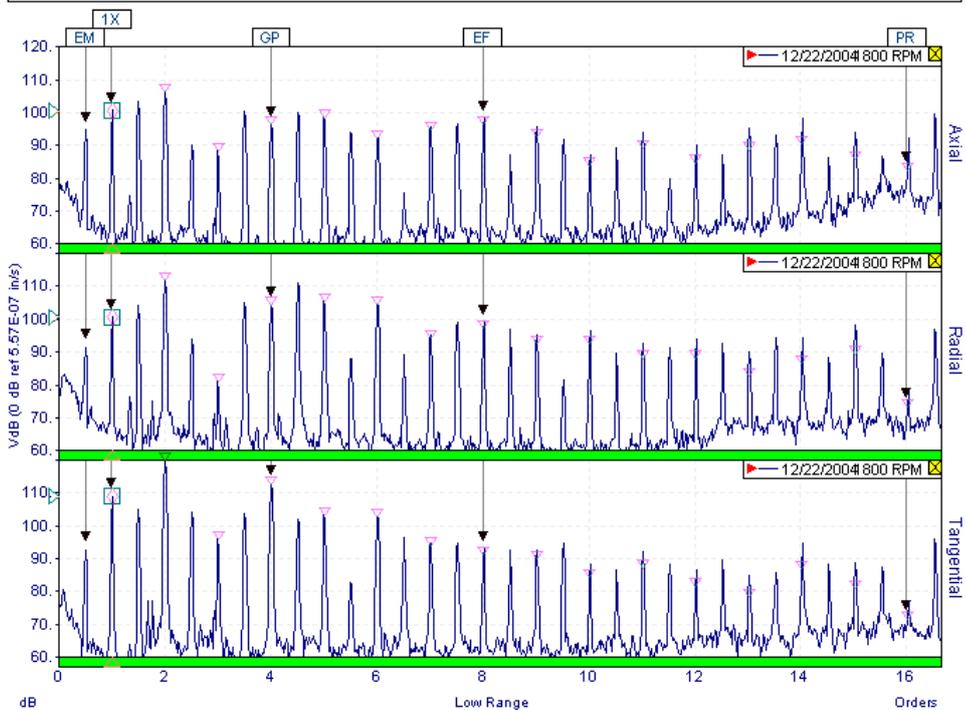
ESPECTROS DE REFERENCIA

PLANT: OXY-CPF MACHINE: MG-W06 JivB 1805.9 CPM, 1.00X, 102.4 VdB, 12/22/2004 20:35 Axial	AREA: Power Trailers LOCATION: MOTOR, BEARING 1 [1] MID: 41
--	---



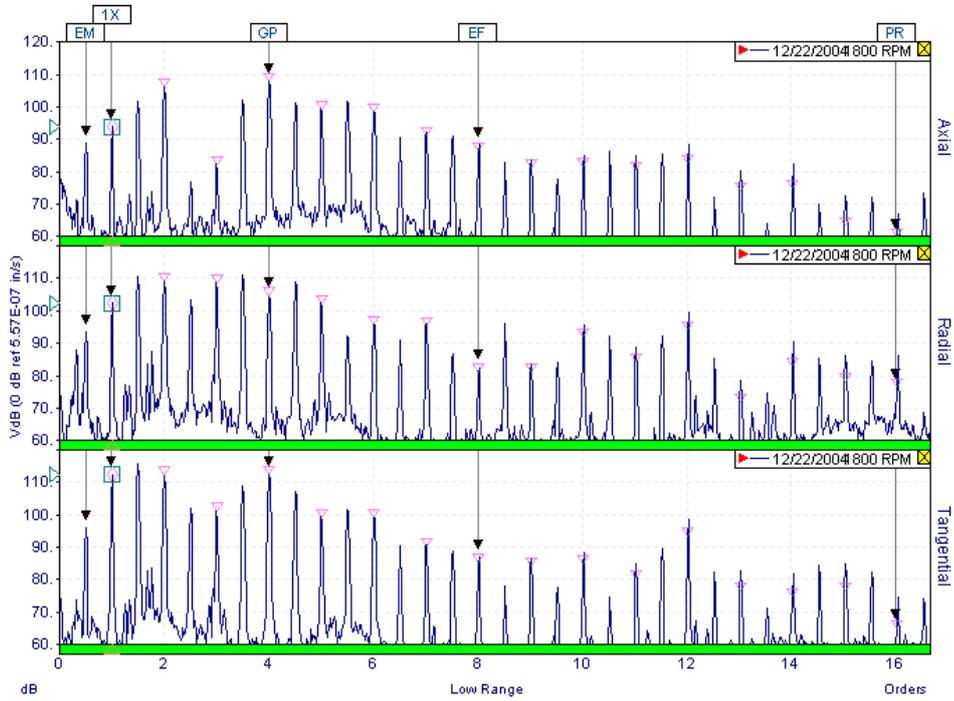
Motor, Posición 1 (MB1)

PLANT: OXY-CPF MACHINE: MG-W06 JivB 1802.3 CPM, 1.00X, 100.6 VdB, 12/22/2004 20:33 Axial	AREA: Power Trailers LOCATION: MOTOR, BEARING 2 [2] MID: 41
--	---



Motor, Posición 2 (MB2)

PLANT: OXY-CPF	AREA: Power Trailers	MID: 41
MACHINE: MG-W06 JivB	LOCATION: GENERATOR, BEARING 1 [3]	
1802.3 CPM, 1.00X, 93.8 VdB, 12/22/2004 20:31 Axial		

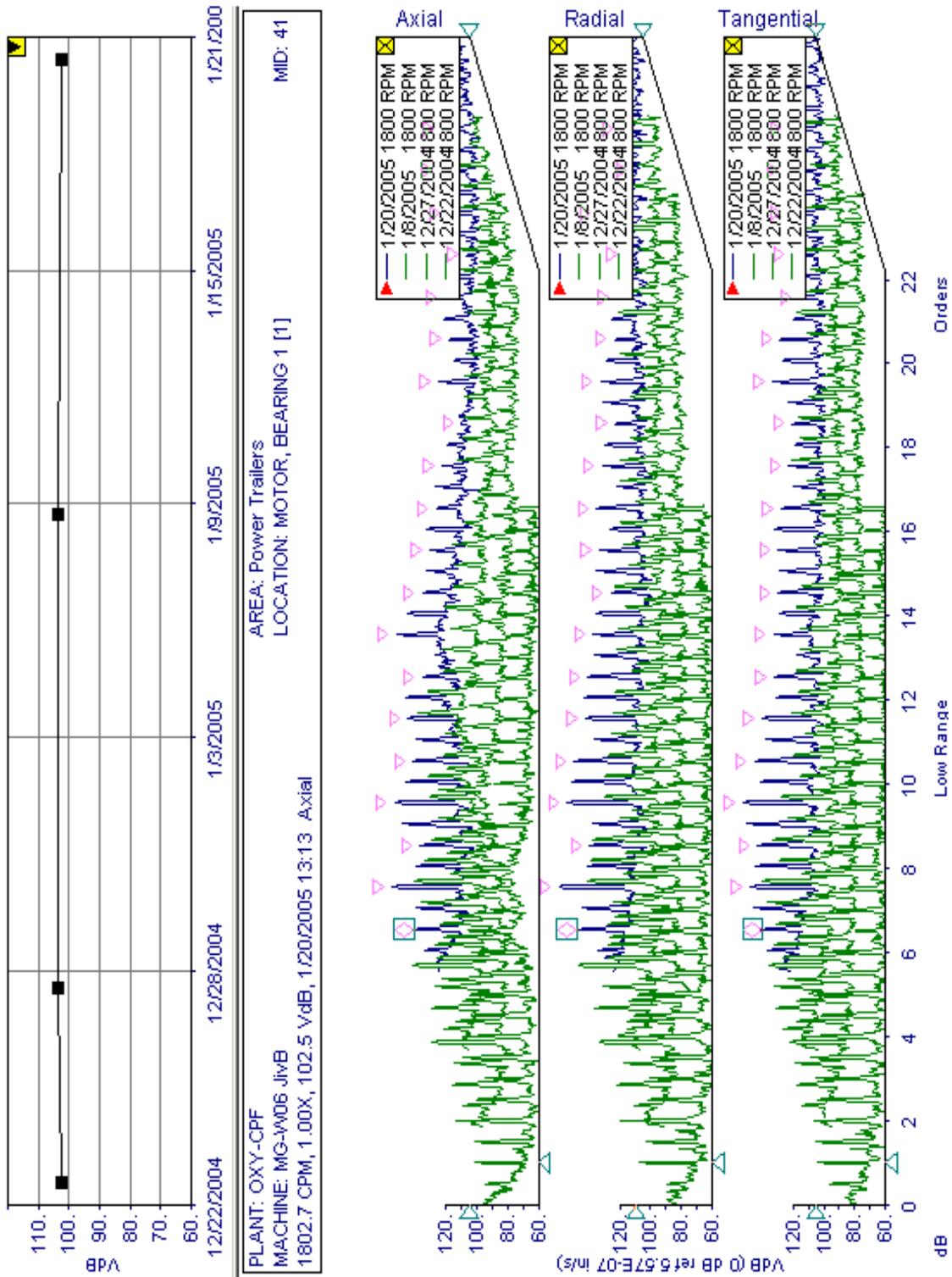


Generador, Posición 3 (GB1)

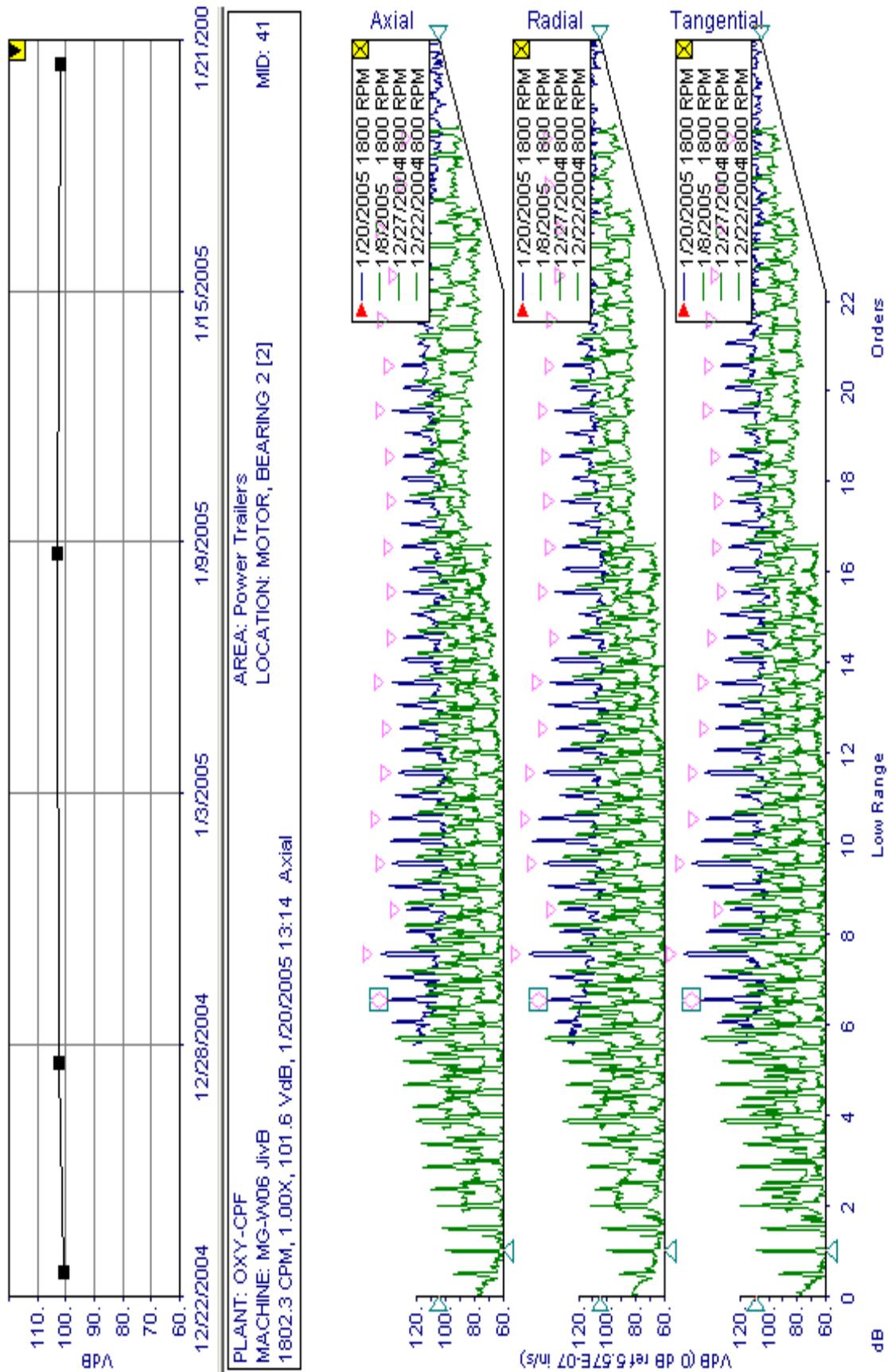
Gráficas de Cascada y Tendencia

Máquina: MG-W06
Ubicación: Jivino B

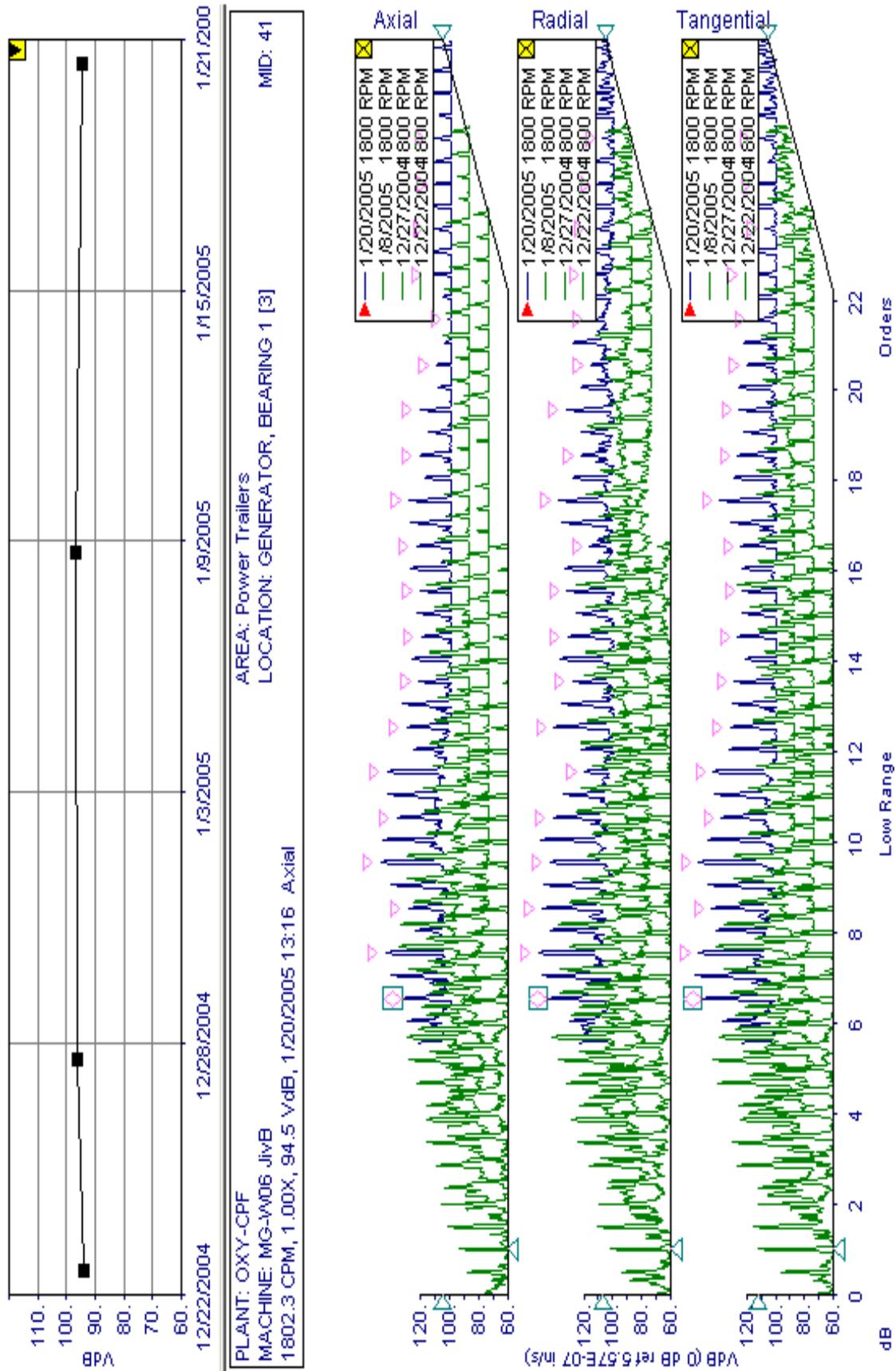
1.- Rodamiento del motor, lado libre



2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



3.- Rodamiento del generador.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS															
Máquina: MG-W06		Fecha: 22 de Diciembre del 2004		Período análisis de Tendencias: 22 Diciembre/2004-20 Enero/2005											
Niveles de Alarma															
Unidades		Bueno				Regular				Malo					
in/s		0.5				0.6				0.8					
Vdb		119.1				120.6				123.1					
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración								Observaciones	Tendencia	Recomendaciones			
		Axial				Radial							Tang.		
		B	R	M	B	B	R	M	B	R	M				
Motor, MB1	0,5 X	x			x				x						
	1X	x			x				x						
	2X	x				x			x						
	3X	x			x				x						
	4X, GP	x			x				x						
	6X	x			x				x						
	8X, EF	x			x				x						
			x			x				x					
Motor, MB2	0,5 X	x			x				x						
	1X	x			x				x						
	2X	x			x					x					
	3X	x			x				x						
	4X, GP	x			x				x						
	6X	x			x				x						
	8X, EF	x			x				x						
			x			x				x					
Gen., GB1	0,5 X	x			x				x						
	1X	x			x				x						
	2X	x			x				x						
	3X	x			x				x						
	4X, GP	x			x				x						
	6X	x			x				x						
	8X, EF	x			x				x						
			x			x				x					

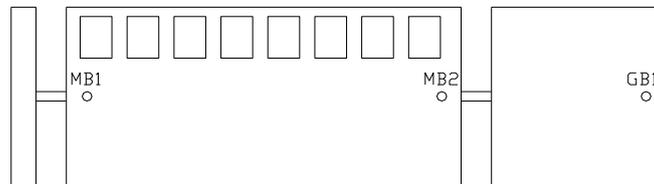
HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MG-101-5

Ubicación: Laguna

Esquema General de la Máquina

Sets Motor Generador Caterpillar 3516-SI



Información General

Velocidad Nominal (rpm): 1200

Número de Cilindros: 16

Engranés Bomba de Aceite: 14

Engranés Bomba de Agua: 14

Engranés Distribución: 92

Engrane Auxiliar: 183

Polos del Generador: 6

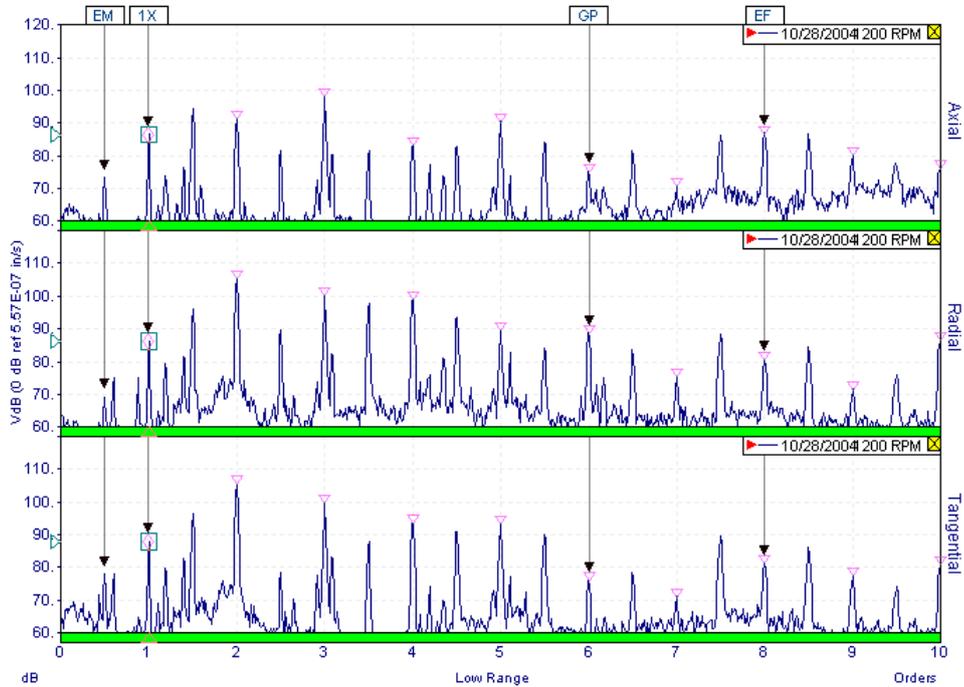
Alabes vent. Generador: 18

Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial

Carga del Equipo (kW): 700

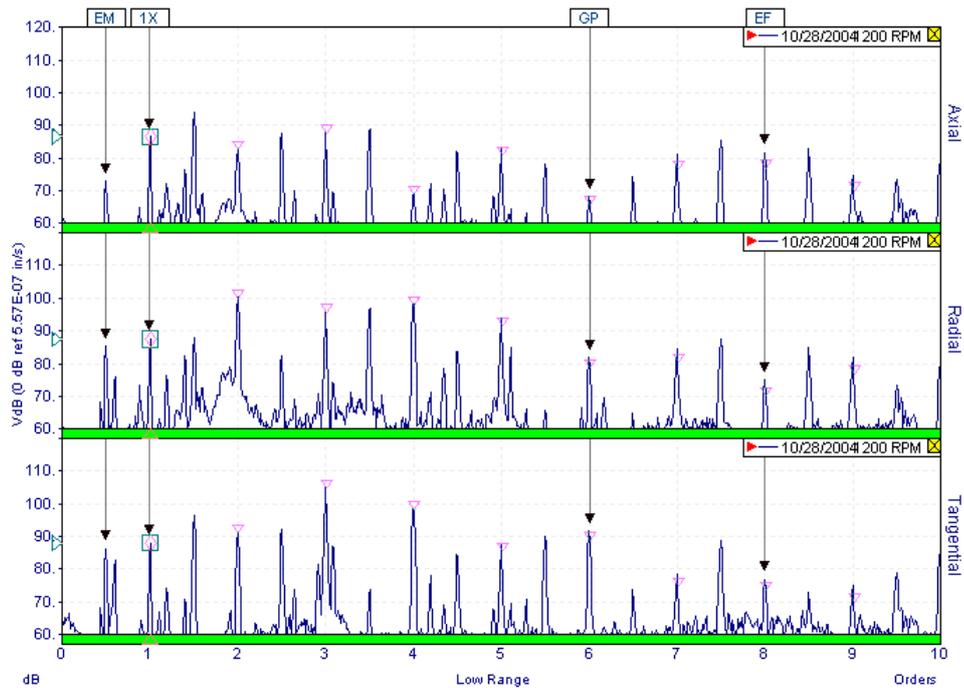
ESPECTROS DE REFERENCIA

PLANT: OXY-CPF AREA: Laguna
 MACHINE: MG-101-5 LOCATION: ENGINE, BEARING 1 [1] MID: 42
 1199.7 CPM, 1.00X, 86.4 VdB, 10/28/2004 20:23 Axial

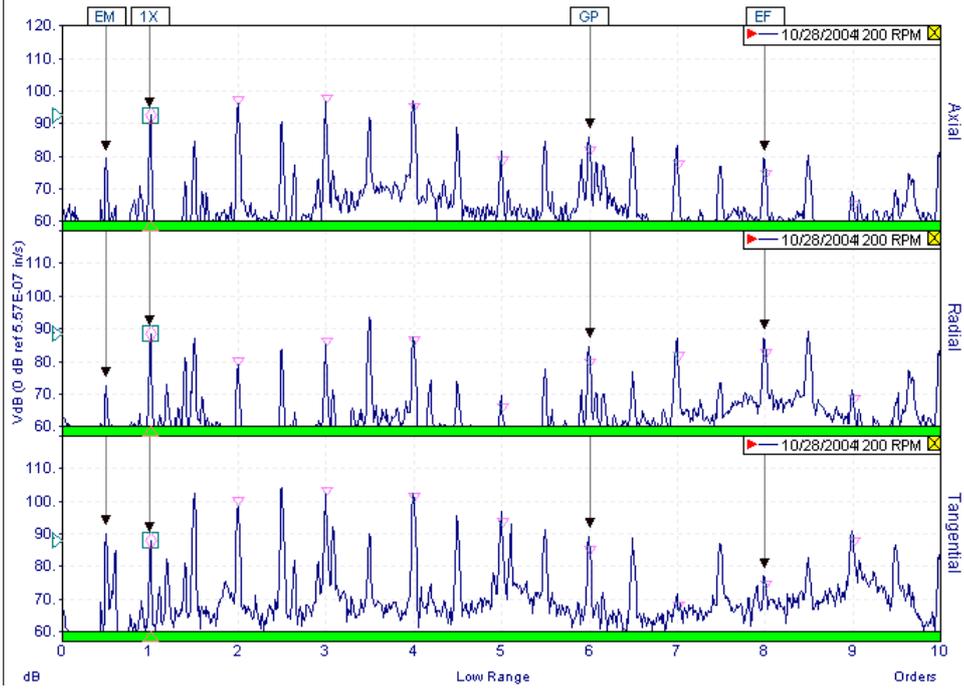


Motor, Posición 1 (MB1)

PLANT: OXY-CPF AREA: Laguna
 MACHINE: MG-101-5 LOCATION: ENGINE, BEARING 2 [2] MID: 42
 1201.5 CPM, 1.00X, 86.7 VdB, 10/28/2004 20:24 Axial



Motor, Posición 2 (MB2)



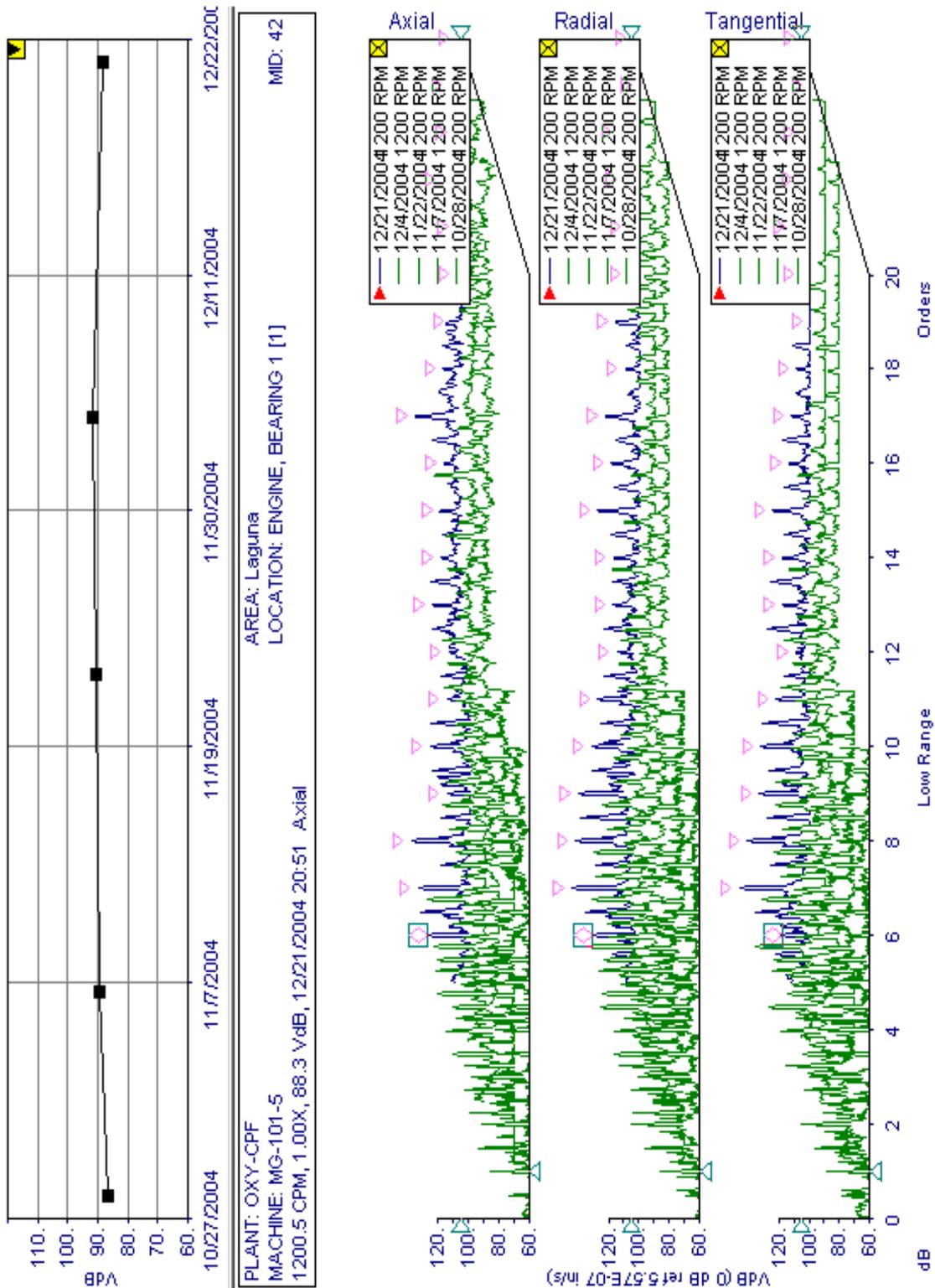
Generador, Posición 3 (GB1)

Gráficas de Cascada y Tendencia

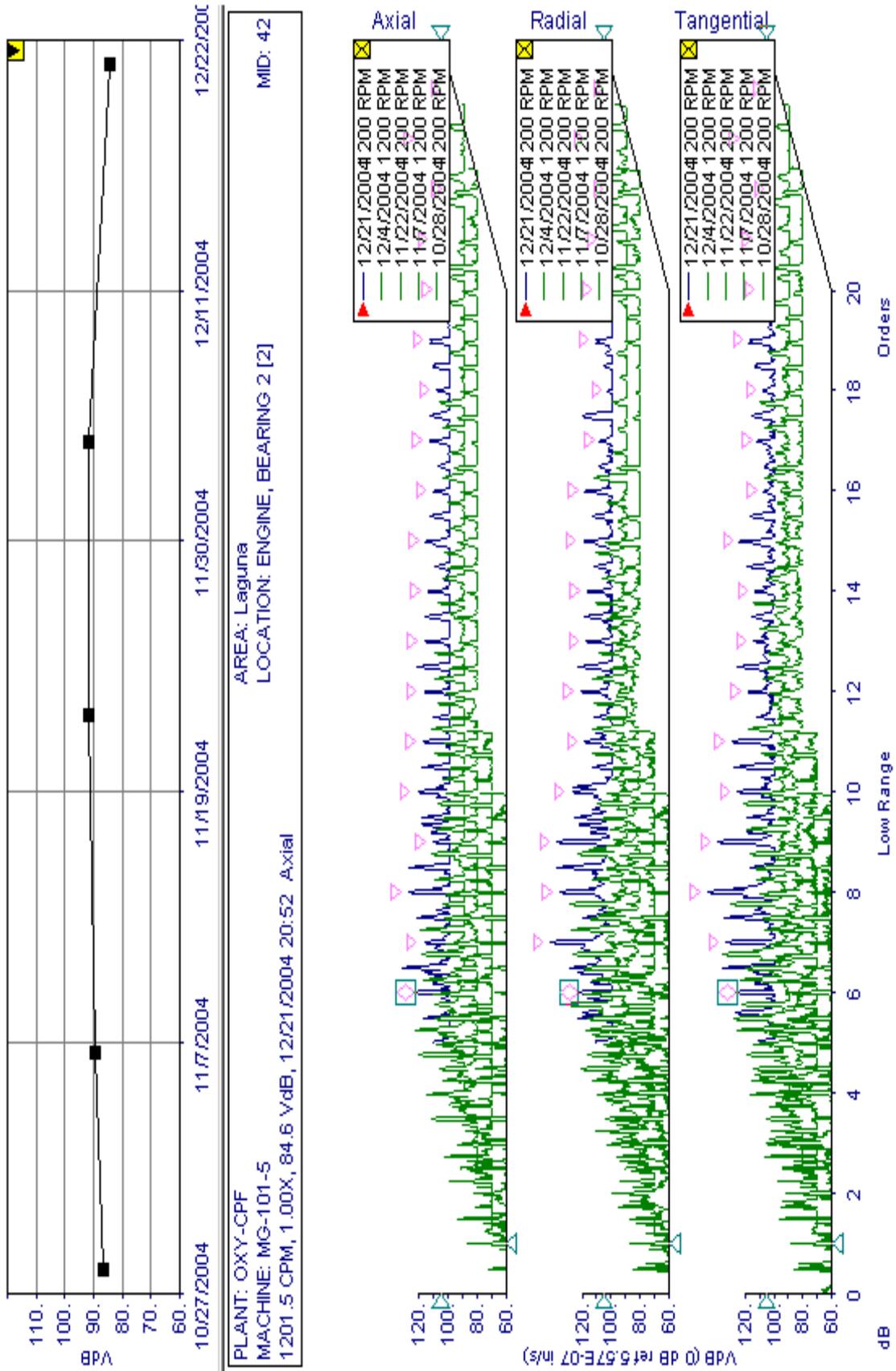
Máquina: MG-101-5

Ubicación: Laguna

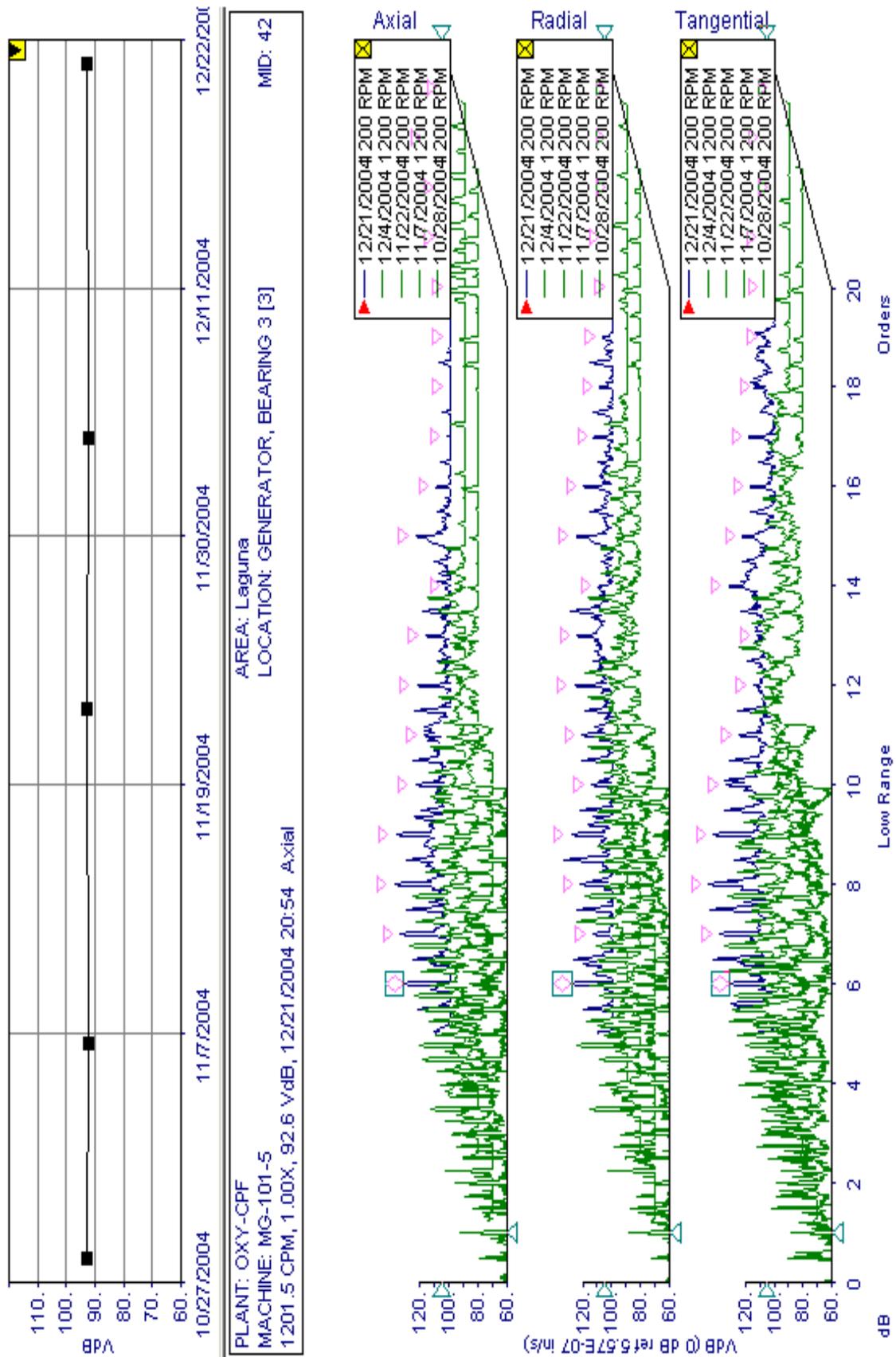
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



3.- Rodamiento del generador.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS																				
Máquina: MG-101-5			Fecha: 28 de Octubre del 2004			Período análisis de Tendencias: 28 Octubre-21 Diciembre/2004														
Niveles de Alarma																				
Unidades			Bueno			Regular			Malo											
in/s			0.5			0.6			0.7											
Vdb			119.1			120.6			122											
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración						Observaciones	Tendencia	Recomendaciones										
		Axial			Radial						Tang.									
		B	R	M	B	R	M	B	R	M										
Motor, MB1	0,5 X	x			x			x			Los niveles de vibración son bajos, pero se puede notar que la vibración axial en 2X es mayor a la vibración en 1X. Existe vibración en 0.5X y armónicos de esta.	Los niveles de vibración se han mantenido constantes, lo que significa que las fallas no han progresado.	Existen evidencias de desalineamiento pero es muy ligero para realizar una acción correctiva							
	1X	x			x			x												
	2X	x			x			x												
	3X	x			x			x												
	4X	x			x			x												
	6X, GP	x			x			x												
	8X, EF	x			x			x												
			x			x			x											
Motor, MB2	0,5 X	x			x			x			Se evidencia la presencia de vibración en 0.5X y armónicos de esta frecuencia. Los niveles de vibración en el espectro son bajos.	No se observo ningún cambio en los niveles de vibración ni en la forma de los espectros	Vigilar la máquina por problemas de soltura de los elementos asociados al eje y por un posible incremento de los síntomas de desalineación.							
	1X	x			x			x												
	2X	x			x			x												
	3X	x			x			x												
	4X	x			x			x												
	6X, GP	x			x			x												
	8X, EF	x			x			x												
			x			x			x											
Gen., GB1	0,5 X	x			x			x			Se evidencia la presencia de vibración en 0.5X y armónicos de esta frecuencia. Los síntomas de desalineación son muy ligeros.	El espectro se ha mantenido constante y los niveles de vibración no han variado	Revisar el eje y los elementos asociados a este por soltura. Existen síntomas claros de desalineación. Revisar los polos del generador.							
	1X	x			x			x												
	2X	x			x			x												
	3X	x			x			x												
	4X	x			x			x												
	6X, GP	x			x			x												
	8X, EF	x			x			x												
			x			x			x											

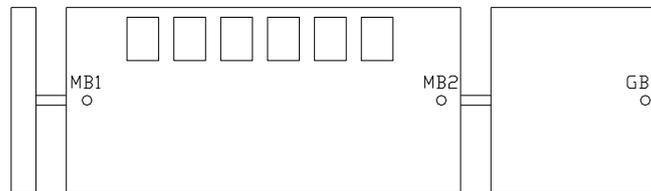
HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MG-1002-2

Ubicación: Itaya B

Esquema General de la Máquina

Sets Motor Generador Caterpillar 3512-D



Información General

Velocidad Nominal (rpm): 1200

Número de Cilindros: 12

Engranés Bomba de Aceite: 14

Engranés Bomba de Agua: 14

Engranés Distribución: 92

Engrane Auxiliar: 183

Polos del Generador: 6

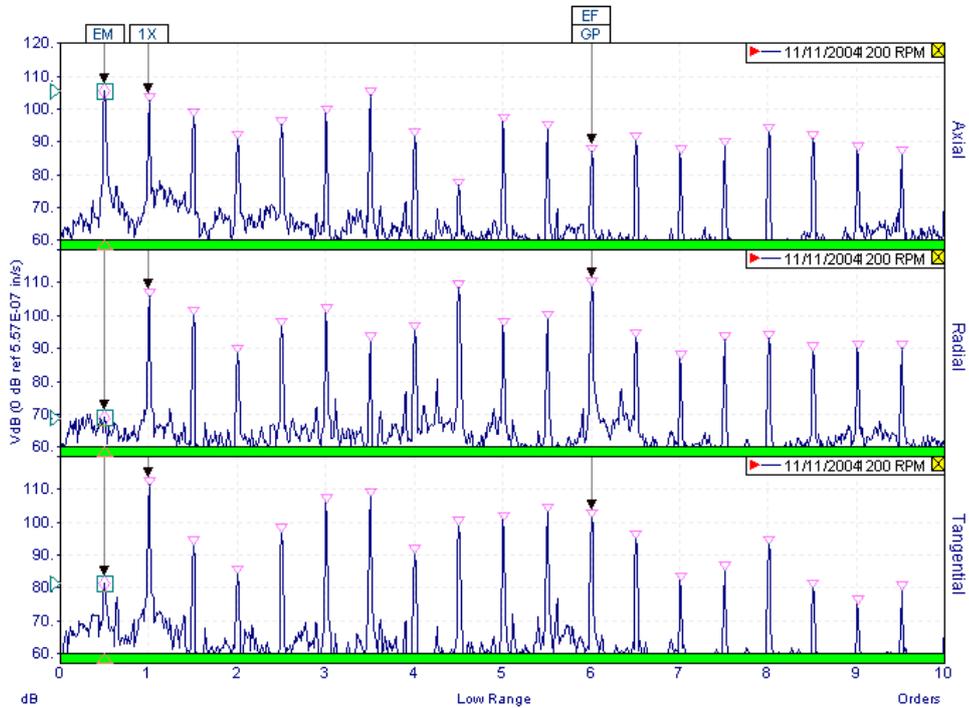
Alabes vent. Generador: 12

Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial

Carga del Equipo (kW): 500

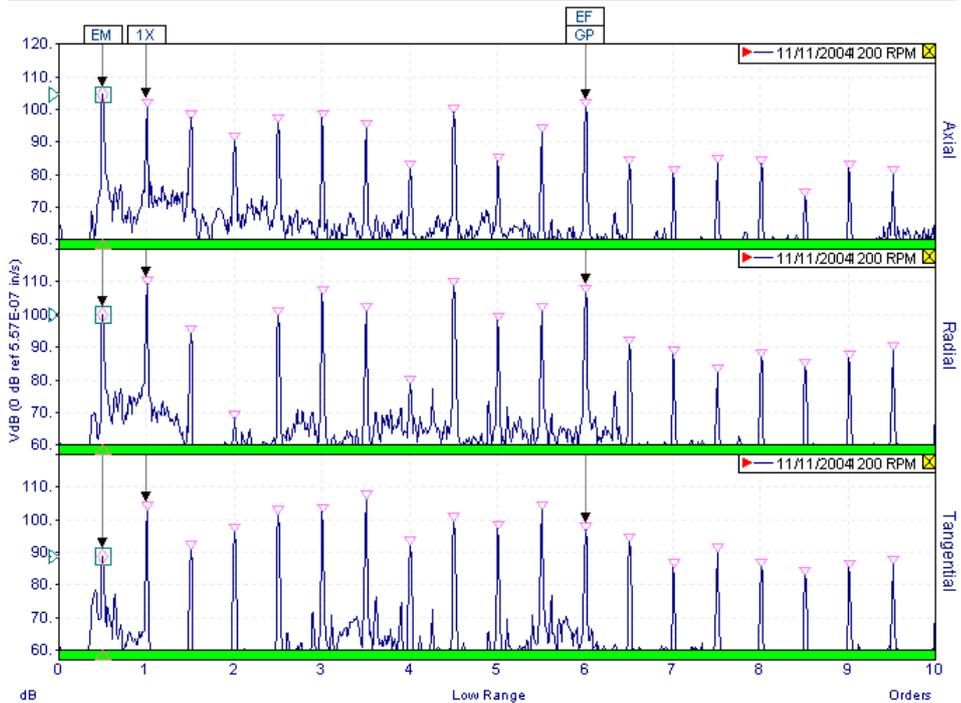
ESPECTROS DE REFERENCIA

PLANT: OXY-CPF AREA: Itaya B
 MACHINE: MG-1002-2 LOCATION: ENGINE, BEARING 1 [1] MID: 43
 600.8 CPM, 0.50X, 105.5 VdB, 11/11/2004 21:59 Axial

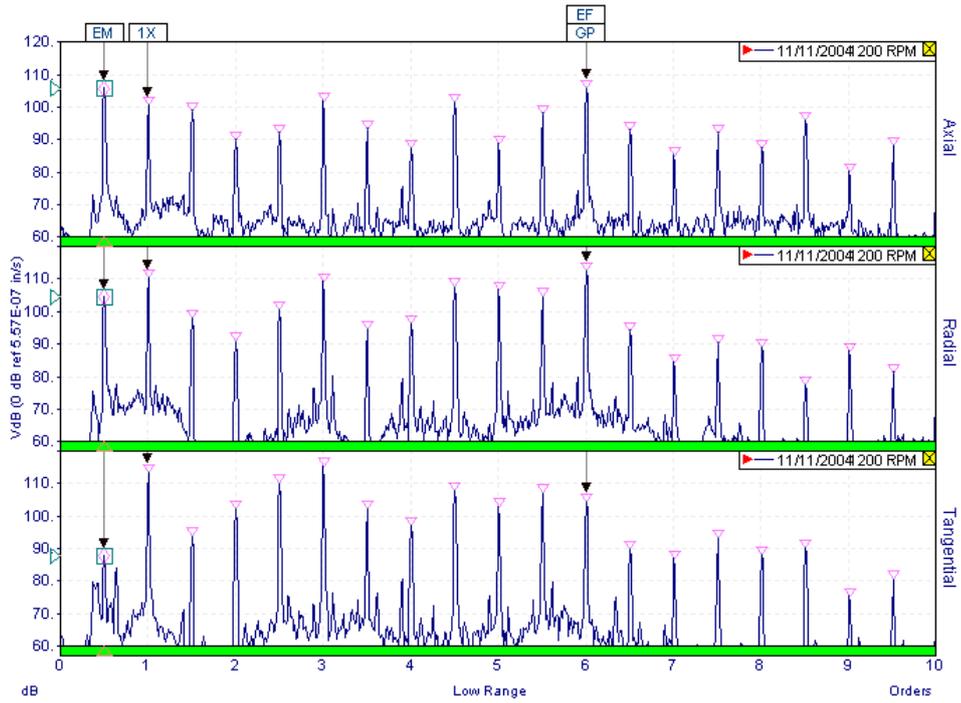


Motor, Posición 1 (MB1)

PLANT: OXY-CPF AREA: Itaya B
 MACHINE: MG-1002-2 LOCATION: ENGINE, BEARING 2 [2] MID: 43
 600.8 CPM, 0.50X, 104.6 VdB, 11/11/2004 22:01 Axial



Motor, Posición 2 (MB2)



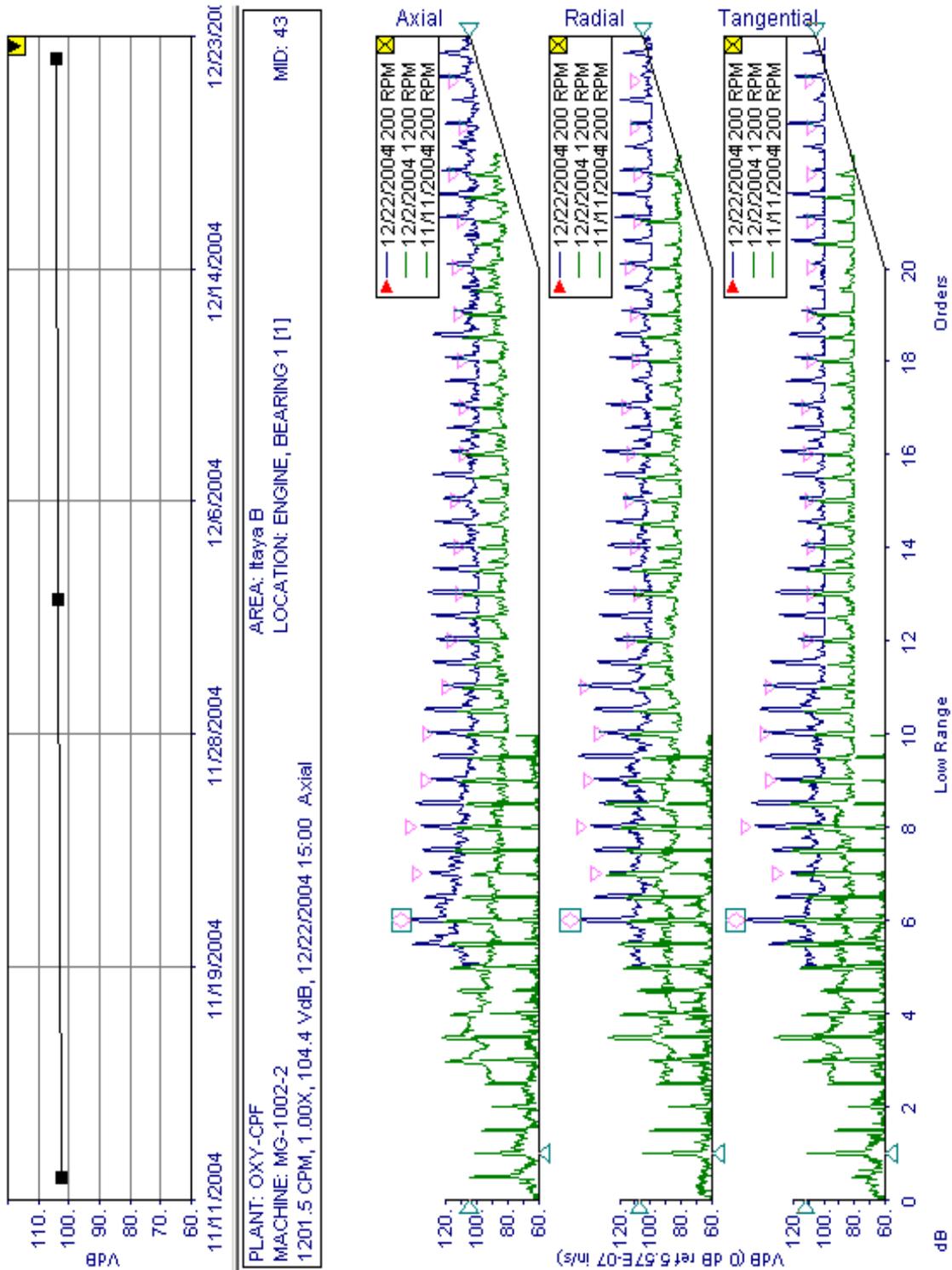
Generador, Posición 3 (GB1)

Gráficas de Cascada y Tendencia

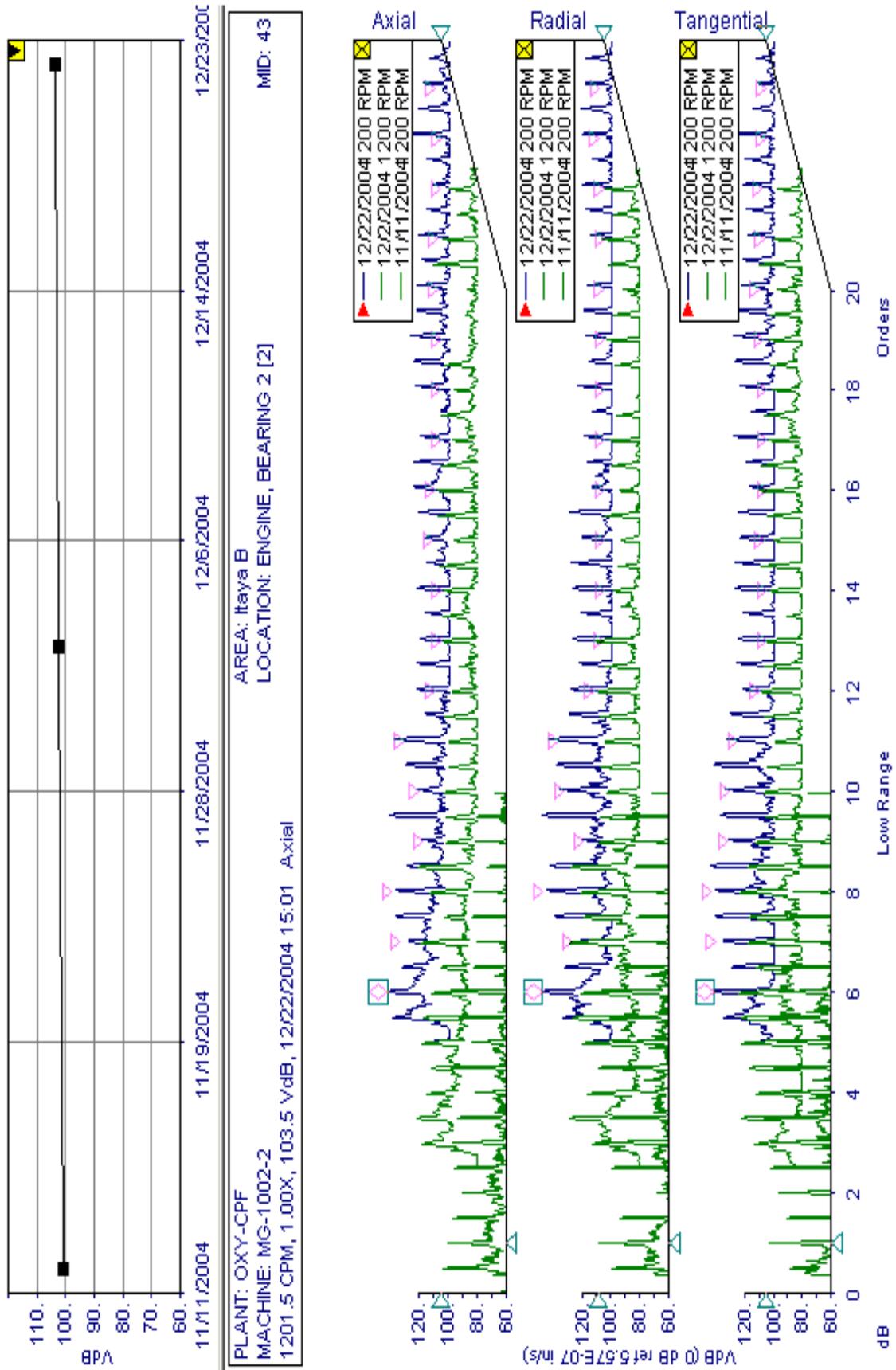
Máquina: MG-1002-2

Ubicación: Itaya B

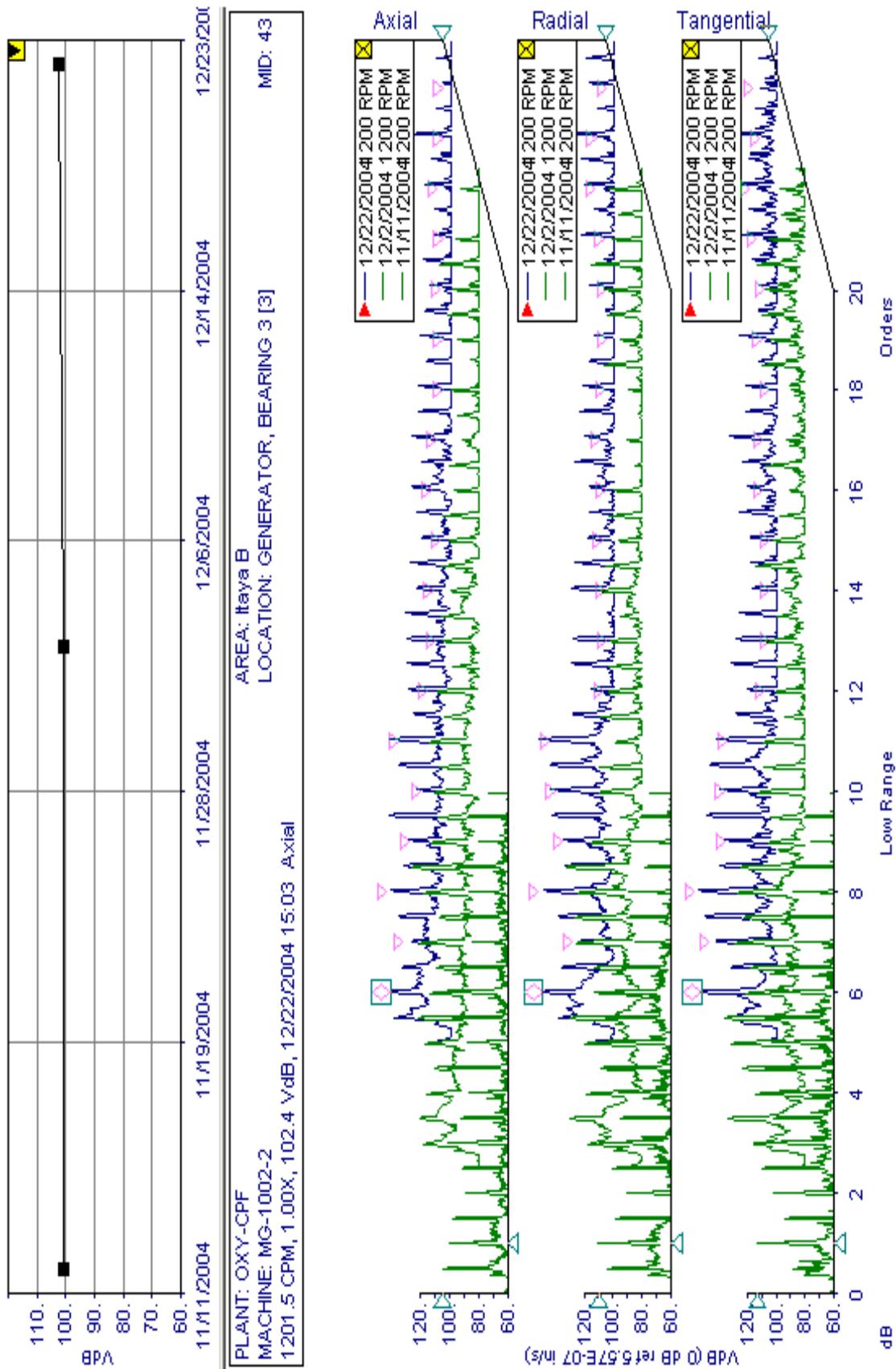
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



3.- Rodamiento del generador.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS															
Máquina: MG-1002-2			Fecha: 11 de Noviembre del 2004			Período análisis de Tendencias: 11 Noviembre-22 Diciembre/2004									
Niveles de Alarma															
Unidades		Bueno				Regular				Malo					
in/s		0.5				0.6				0.7					
Vdb		119.1				120.6				122					
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración								Observaciones	Tendencia	Recomendaciones			
		Axial				Radial							Tang.		
		B	R	M	I	B	R	M	I						
Motor, MB1															
	0,5 X	x				x				x			Existe alta vibración en 0.5X en la dirección axial y en 1X en dirección radial y tangencial	Los niveles de vibración se han mantenido constantes, lo que demuestra que no han progresado las fallas.	La alta vibración en 1X es una clara muestra de desbalanceo en el motor. Se recomienda vigilar los polos del generador y el sistema de encendido del motor.
	1X	x				x				x					
	2X	x				x				x					
	3X	x				x				x					
	4X	x				x				x					
	6X, GP y EF	x				x				x					
	8X	x				x				x					
Motor, MB2															
	0,5 X	x				x				x			Este espectro confirma las fallas encontradas en MB1.	En general los niveles de vibración son altos pero se han mantenido constantes a lo largo del tiempo de monitoreo.	Existe un problema de desbalanceo y soltura de los elementos asociados al eje. Se recomienda revisar el encendido del motor y los polos del generador.
	1X	x				x				x					
	2X	x				x				x					
	3X	x				x				x					
	4X	x				x				x					
	6X, GP y EF	x				x				x					
	8X	x				x				x					
Gen., GB1															
	0,5 X	x				x				x			Se evidencia alta vibración en 1X, tanto radial como tangencial. Además existe alta vibración en 0.5X y 6X.	No se evidencia cambio en los niveles de vibración.	Hay problemas de desequilibrio en el generador, el mismo que puede ser debido a problemas con los polos del generador.
	1X	x				x				x					
	2X	x				x				x					
	3X	x				x				x					
	4X	x				x				x					
	6X, GP y EF	x				x				x					
	8X	x				x				x					

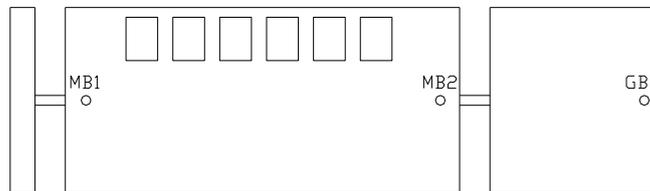
HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MG-531-4

Ubicación: Jivino A

Esquema General de la Máquina

Power Trailers Caterpillar 3512-D



Información General

Velocidad Nominal (rpm): 1800

Número de Cilindros: 12

Engranes Bomba de Aceite: 14

Engranes Bomba de Agua: 14

Engranes Distribución: 92

Engrane Auxiliar: 183

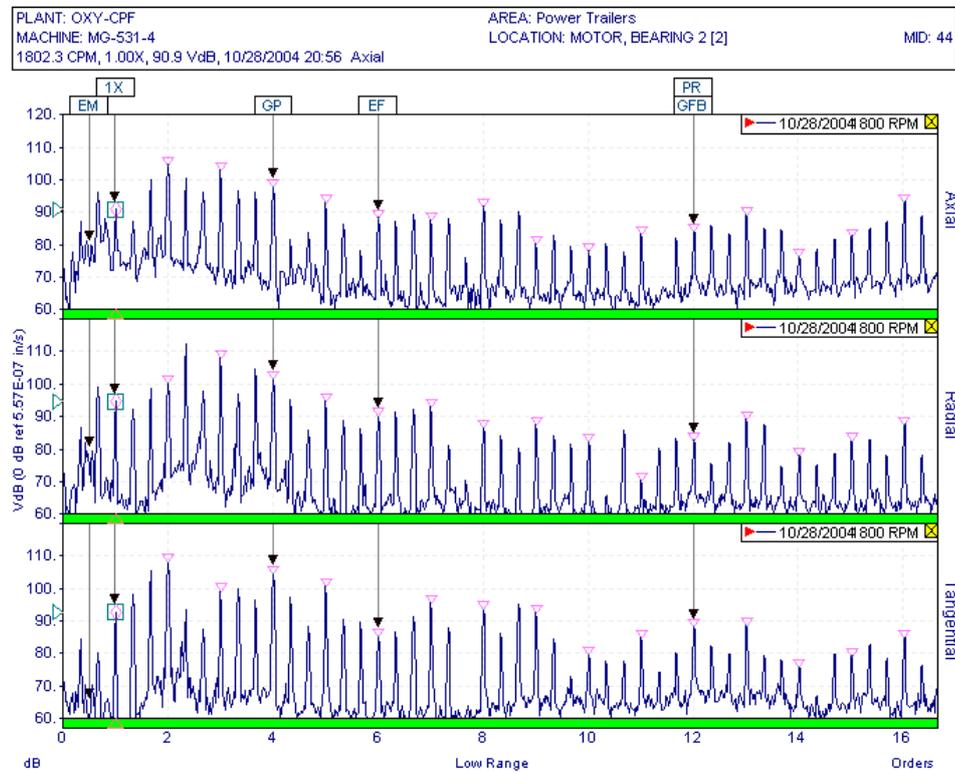
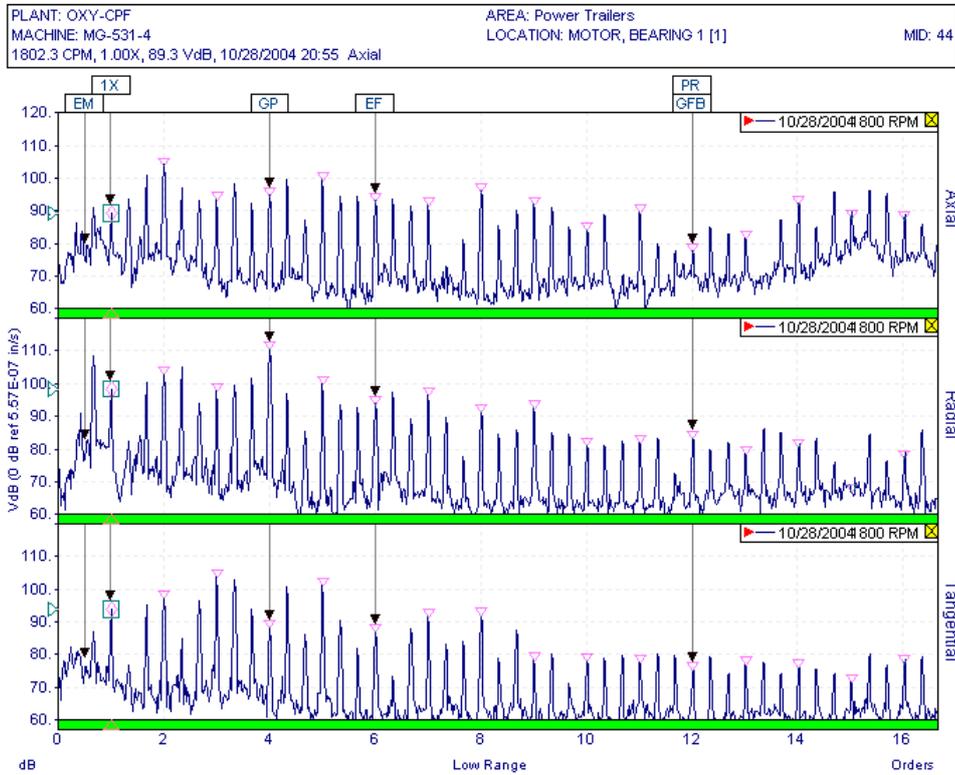
Polos del Generador: 6

Alabes vent. Generador: 12

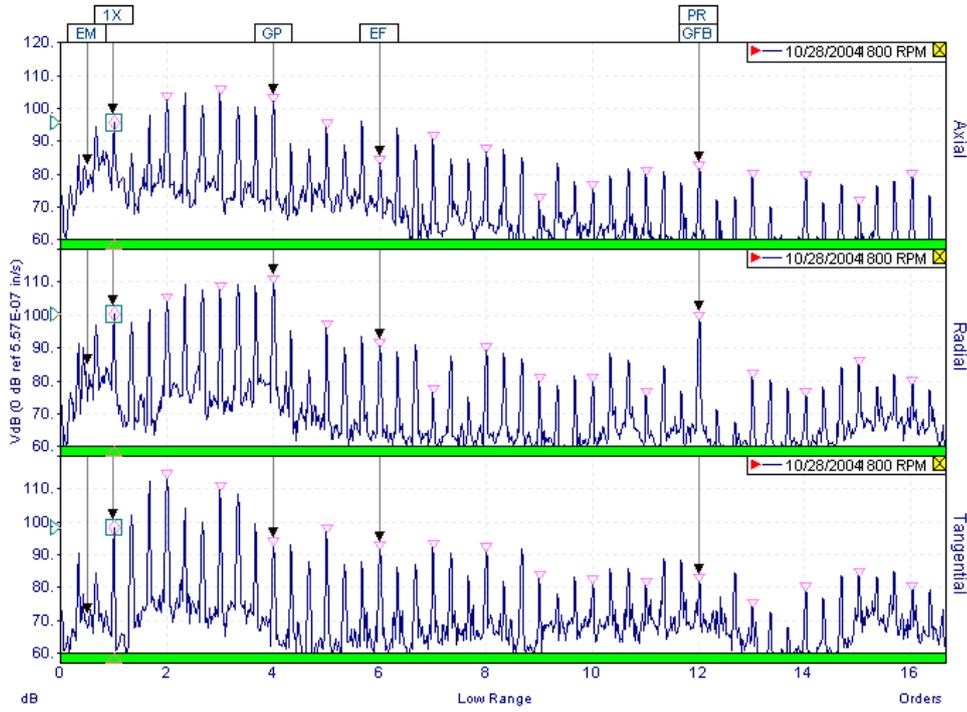
Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial

Carga del Equipo (kW): 500

ESPECTROS DE REFERENCIA



PLANT: OXY-CPF	AREA: Power Trailers	MID: 44
MACHINE: MG-531-4	LOCATION: GENERATOR, BEARING 1 [3]	
1802.3 CPM, 1.00X, 95.8 VdB, 10/28/2004 20:57 Axial		

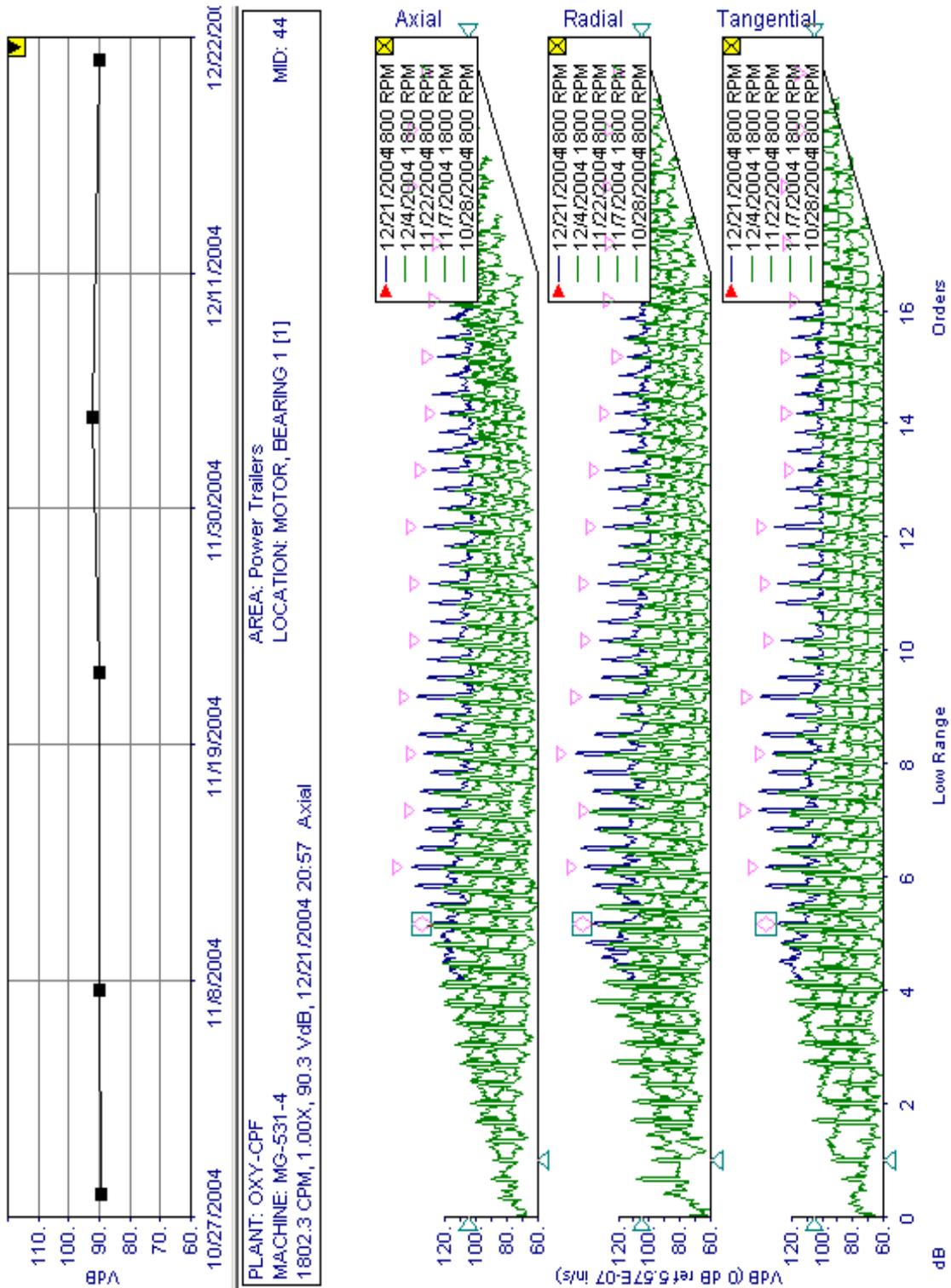


Generador, Posición 3 (GB1)

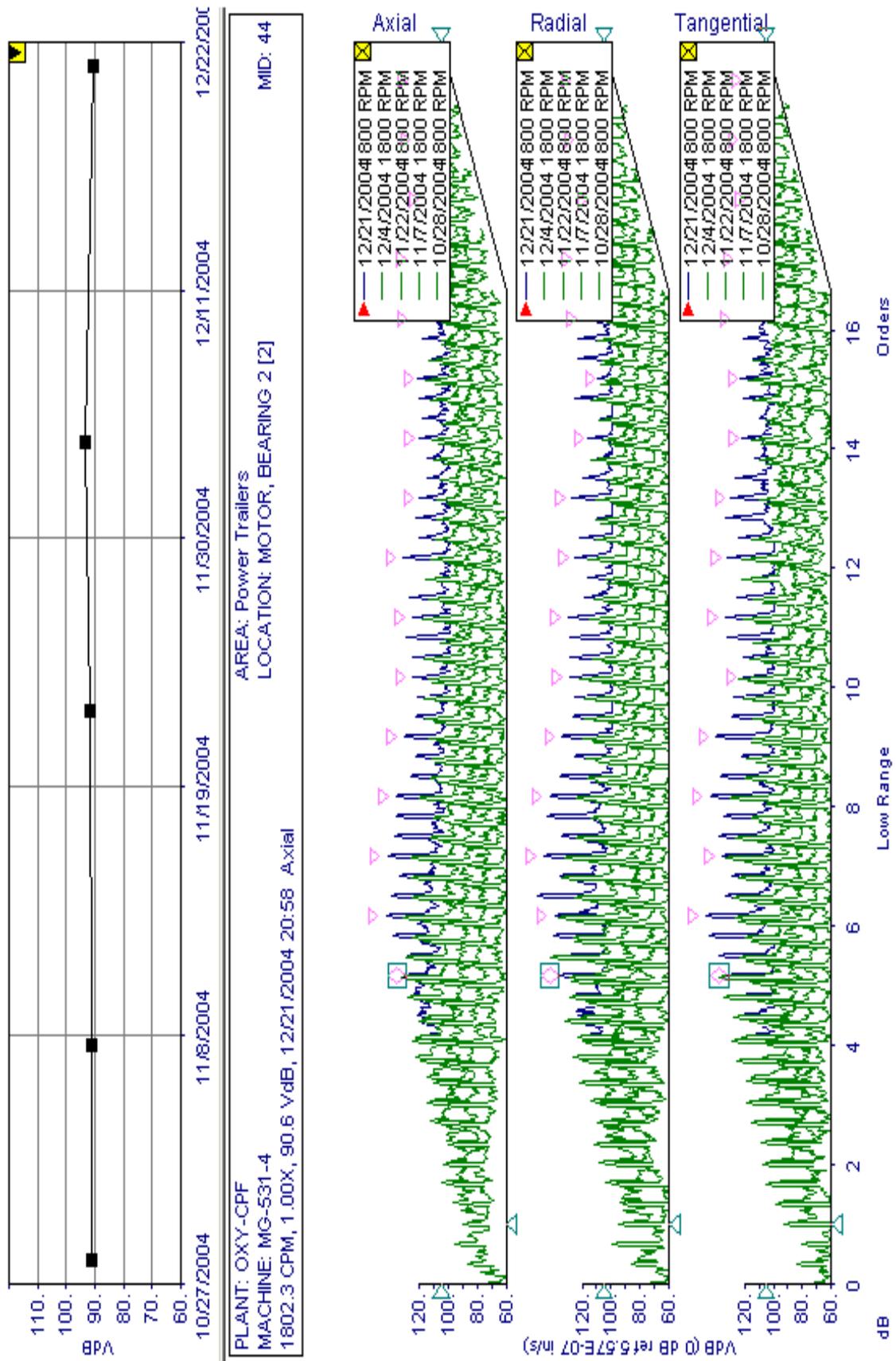
Gráficas de Cascada y Tendencia

Máquina: MG-531-4
Ubicación: Jivino A

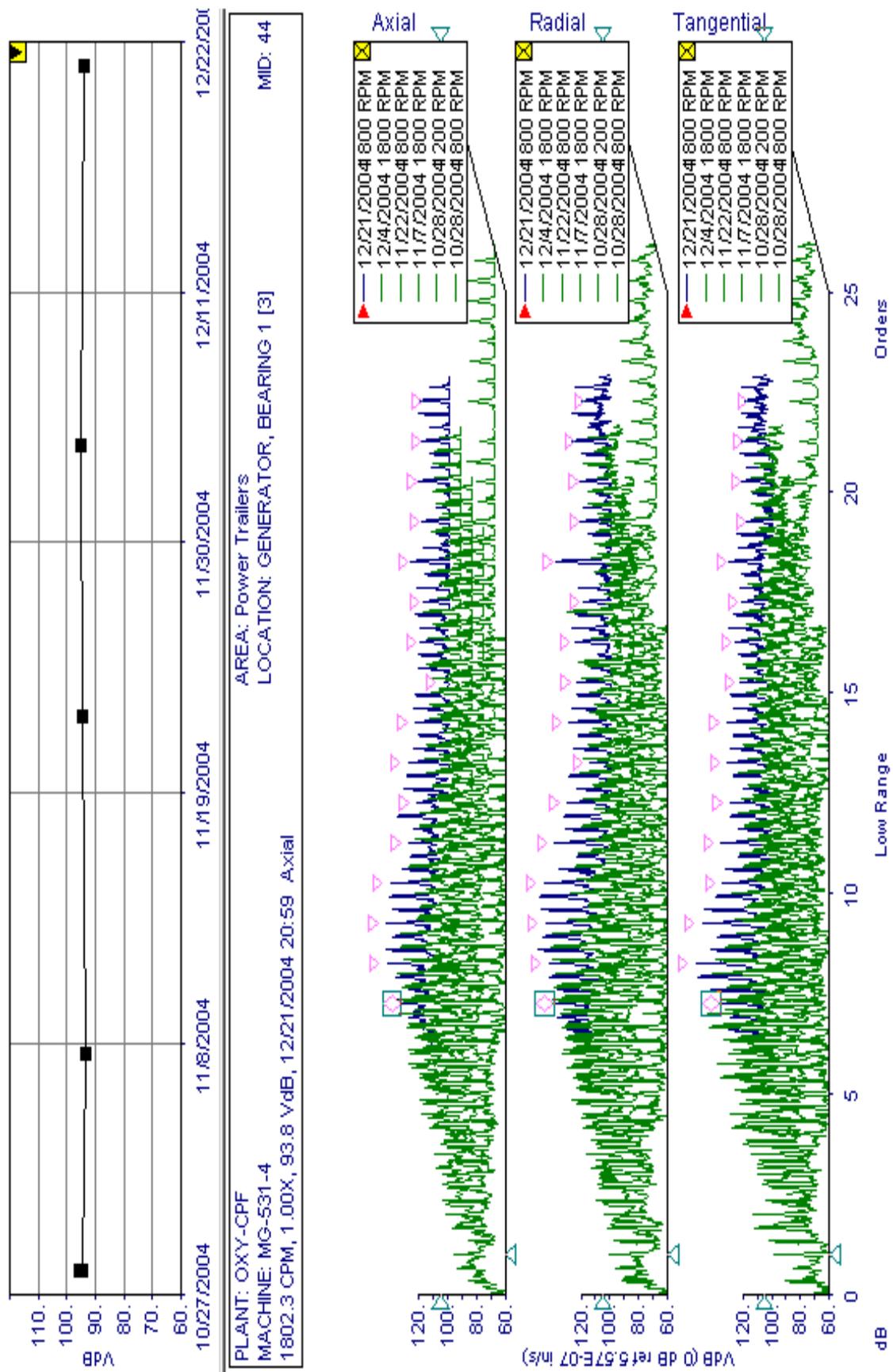
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



3.- Rodamiento del generador.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS															
Máquina: MG-531-4			Fecha: 28 de Octubre del 2004			Período análisis de Tendencias: 28 Octubre-21 Diciembre/2004									
Niveles de Alarma															
Unidades		Bueno				Regular				Malo					
in/s		0.5				0.6				0.8					
Vdb		119.1				120.6				123.1					
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración								Observaciones	Tendencia	Recomendaciones			
		Axial				Radial							Tang.		
		B	R	M	I	B	R	M	I	B	R	M			
Motor, MB1	0,5 X	x				x				x			Se evidencia la presencia de vibraciones aleatorias a lo largo de todo el espectro. La vibración en 2X Axial es mayor a la vibración en 1X	Los niveles de vibración se encuentran bajo los límites admisibles y no se ha detectado cambios en el tiempo de medición.	Las vibraciones aleatorias son causadas por el amortiguamiento de este tipo de generadores. Revisar el generador por problemas de desalineación.
	1X	x				x				x					
	2X	x				x				x					
	3X	x				x				x					
	4X, GP	x				x				x					
	6X, EF	x				x				x					
	12X,PR GFB	x				x				x					
Motor, MB2	0,5 X	x				x				x			El nivel de vibración en 2X Axial es mayor al nivel en 1X. Se evidencia la presencia de picos de vibración a velocidades menores a la rotación del motor.	No se evidencia cambio en los niveles de vibración.	Vigilar la máquina por problemas de soltura de los elementos asociados al eje.
	1X	x				x				x					
	2X	x				x				x					
	3X	x				x				x					
	4X, GP	x				x				x					
	6X, EF	x				x				x					
	12X,PR GFB	x				x				x					
Gen., GB1	0,5 X	x				x				x			Se evidencia la presencia de vibración en 0.5X y armónicos de esta frecuencia. La vibración en 2X Axial es mayor a la vibración en 1X	El espectro se ha mantenido constante sin cambios durante el período de monitoreo.	Revisar el eje y los elementos asociados a este por soltura. Existen síntomas claros de desalineación.
	1X	x				x				x					
	2X	x				x				x					
	3X	x				x				x					
	4X, GP	x				x				x					
	6X, EF	x				x				x					
	12X,PR GFB	x				x				x					

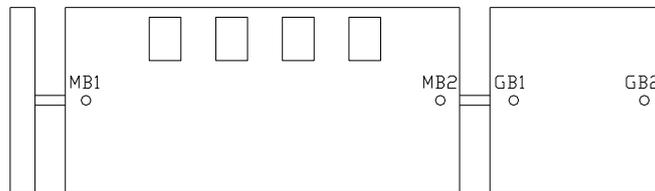
HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MG-2930

Ubicación: Concordia

Esquema General de la Máquina

Sets Motor Generador Caterpillar 3508-D



Información General

Velocidad Nominal (rpm): 1200

Número de Cilindros: 8

Engranes Bomba de Aceite: 14

Engranes Bomba de Agua: 14

Engranes Distribución: 92

Engrane Auxiliar: 183

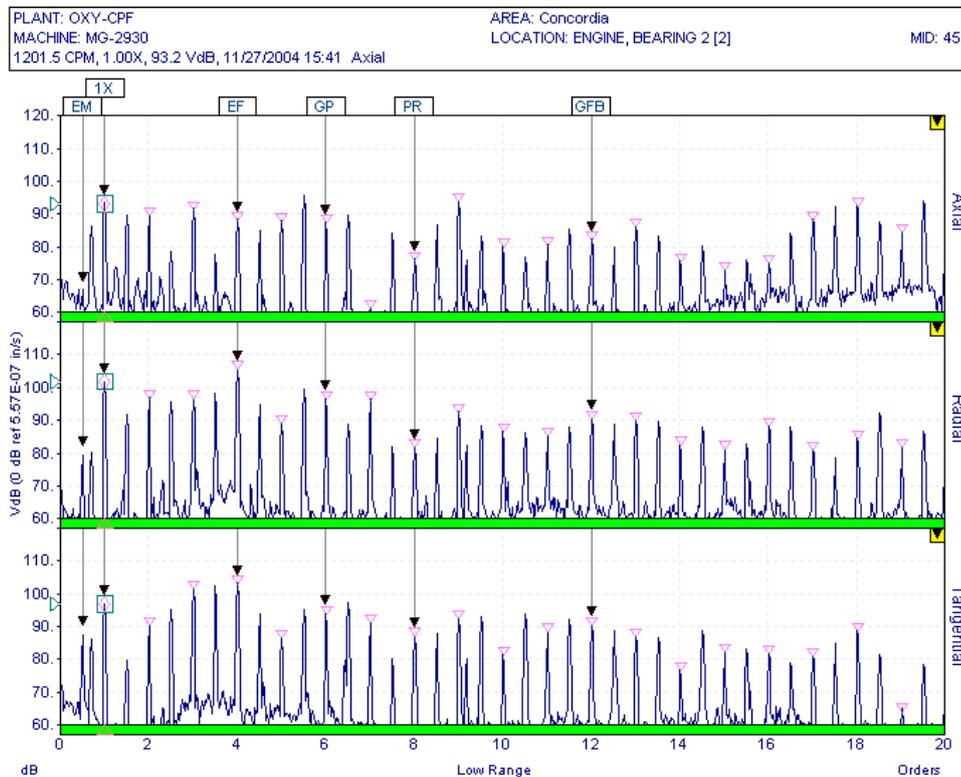
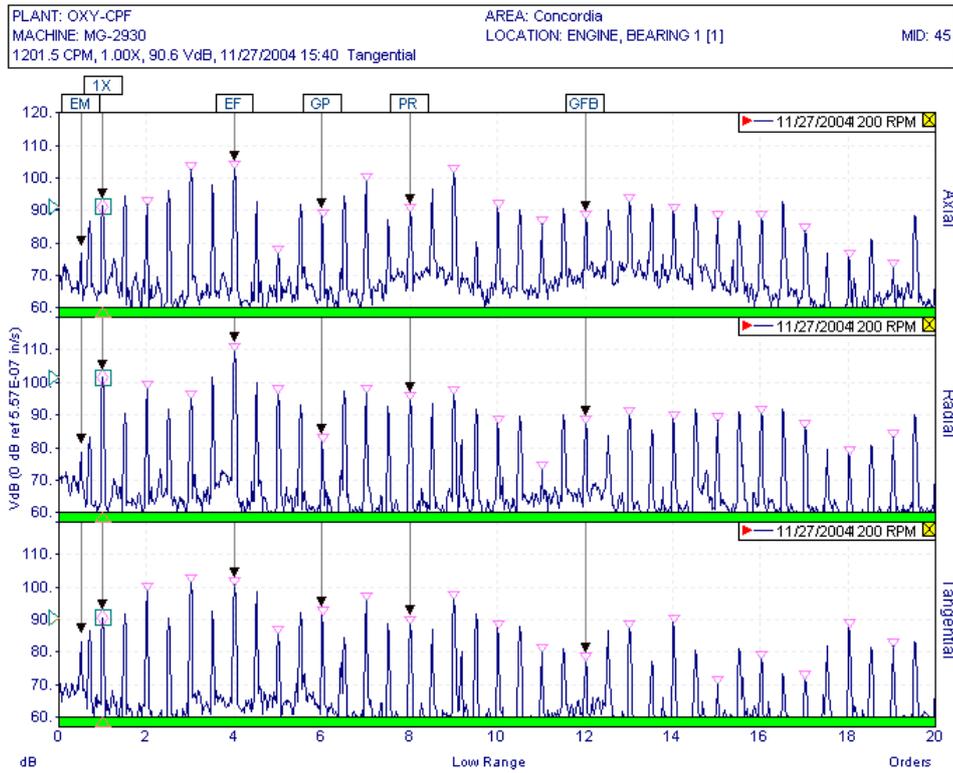
Polos del Generador: 6

Alabes vent. Generador: 12

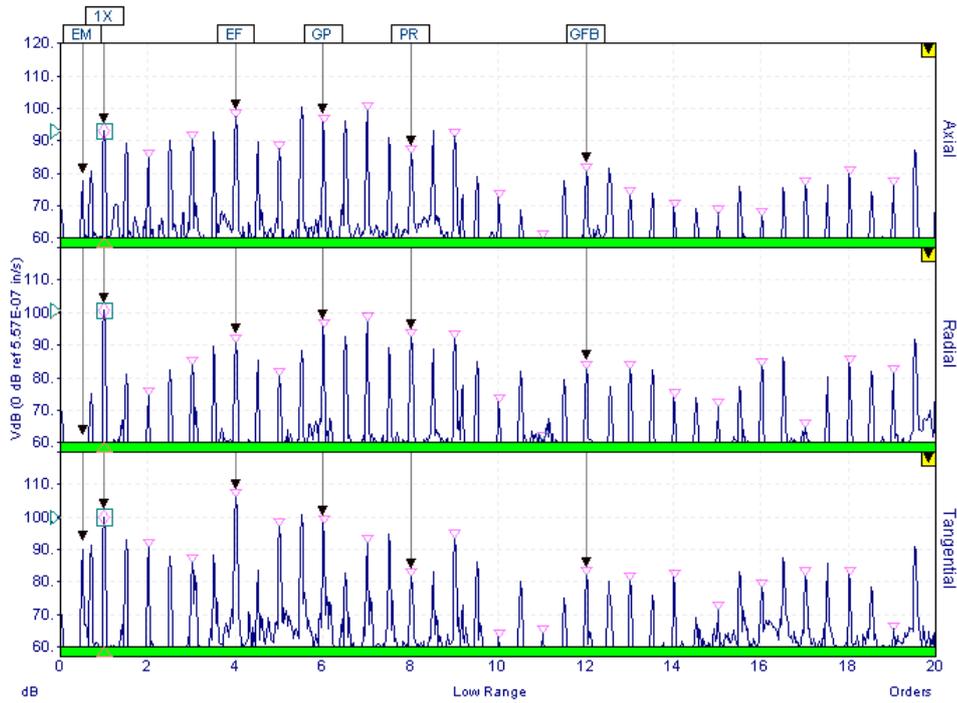
Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial

Carga del Equipo (kW): 350

ESPECTROS DE REFERENCIA

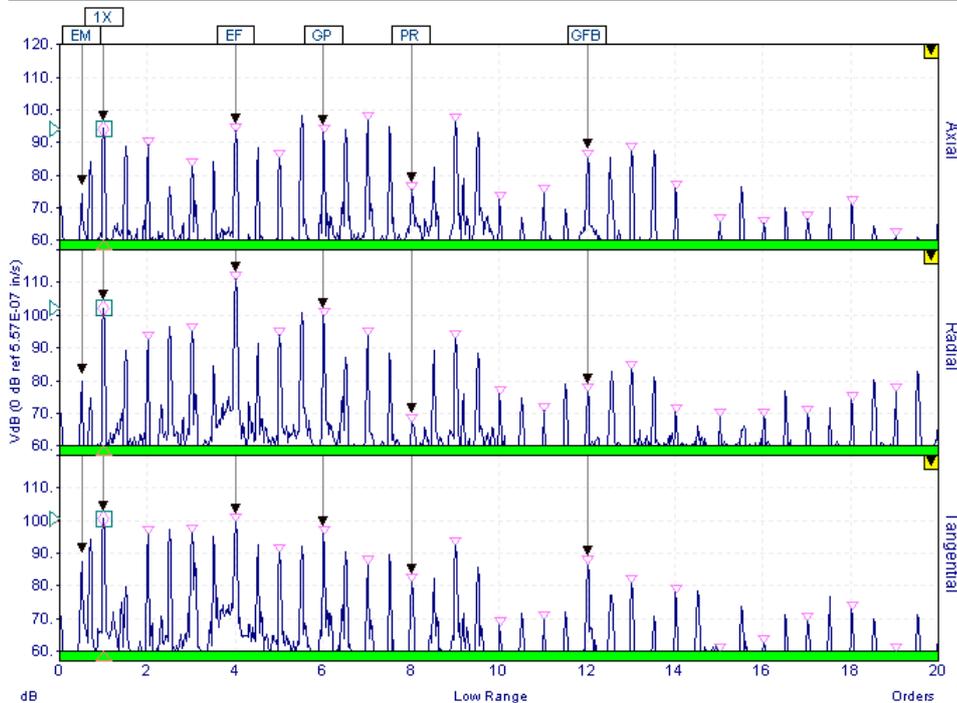


PLANT: OXY-CPF AREA: Concordia
 MACHINE: MG-2930 LOCATION: GENERATOR, BEARING 3 [3] MID: 45
 1201.5 CPM, 1.00X, 93.0 VdB, 11/27/2004 15:43 Axial



Generador, Posición 3 (GB1)

PLANT: OXY-CPF AREA: Concordia
 MACHINE: MG-2930 LOCATION: GENERATOR BEARING, 4 [4] MID: 45
 1201.5 CPM, 1.00X, 94.2 VdB, 11/27/2004 15:45 Axial

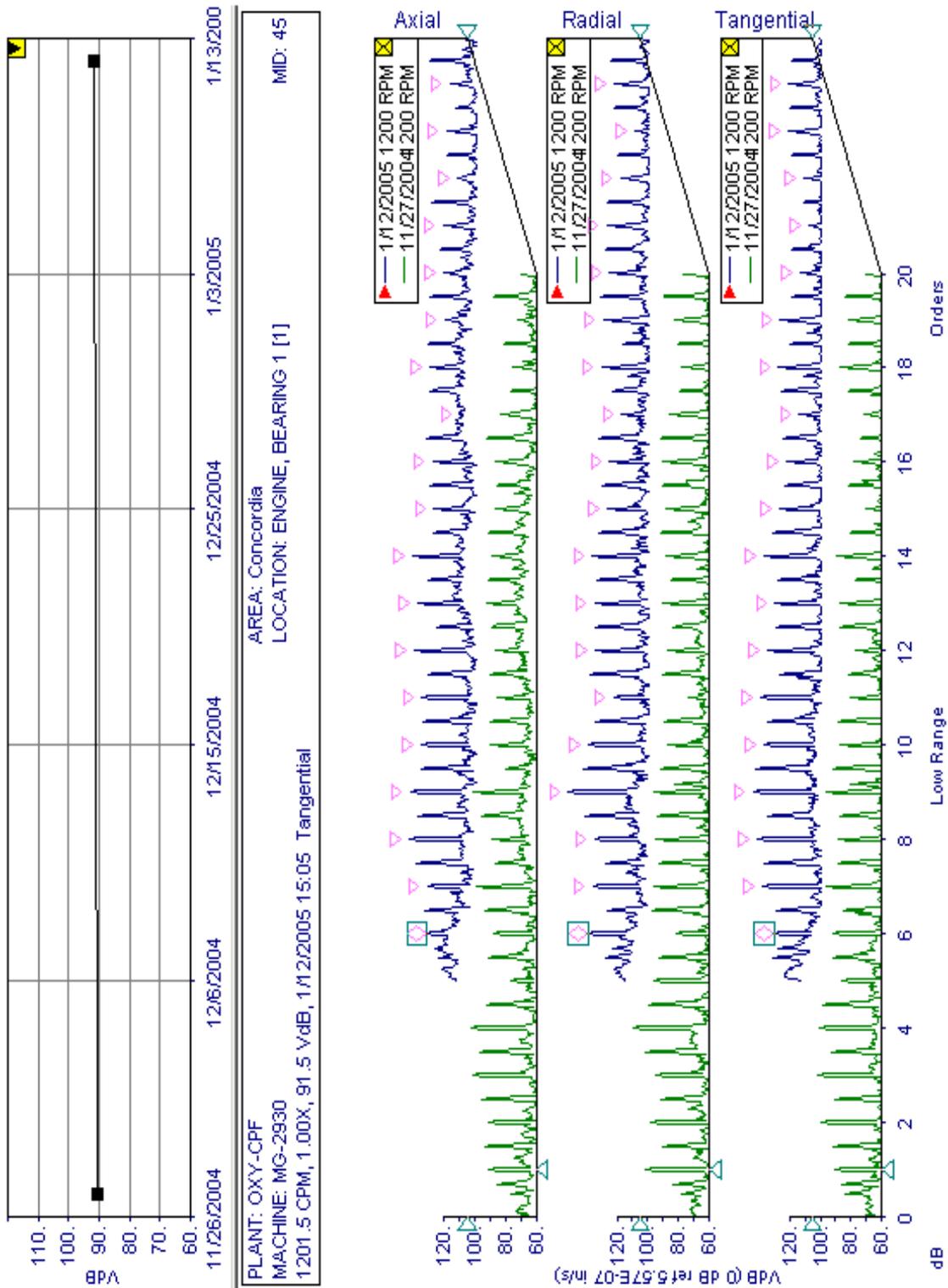


Generador, Posición 4 (GB2)

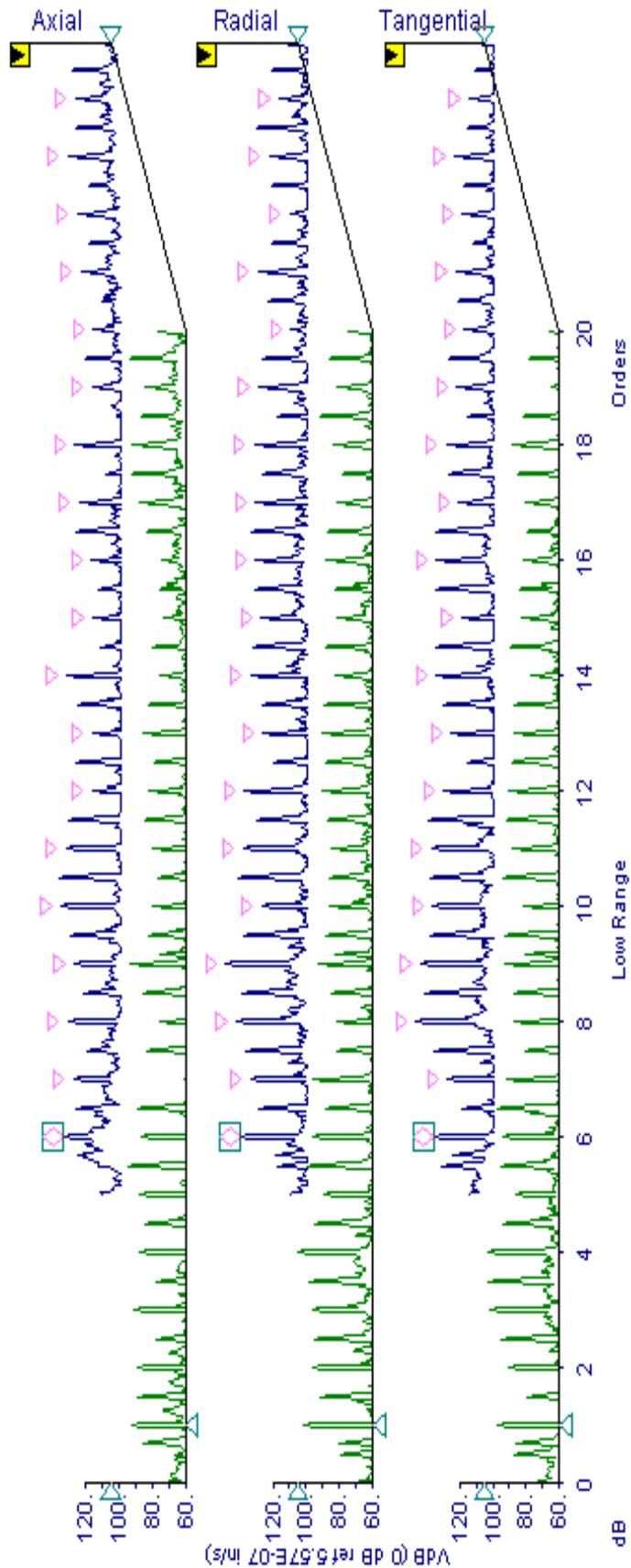
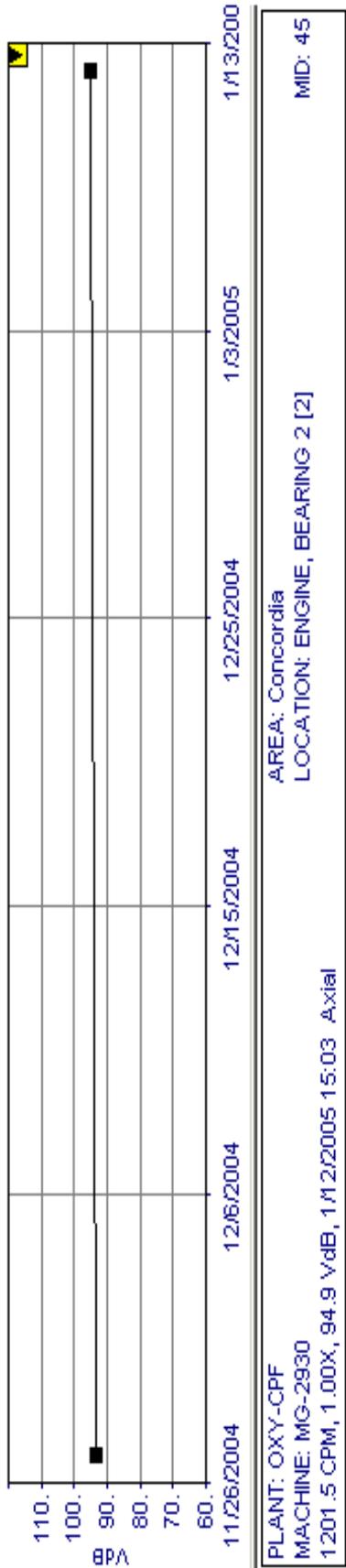
Gráficas de Cascada y Tendencia

Máquina: MG-2930
Ubicación: Concordia

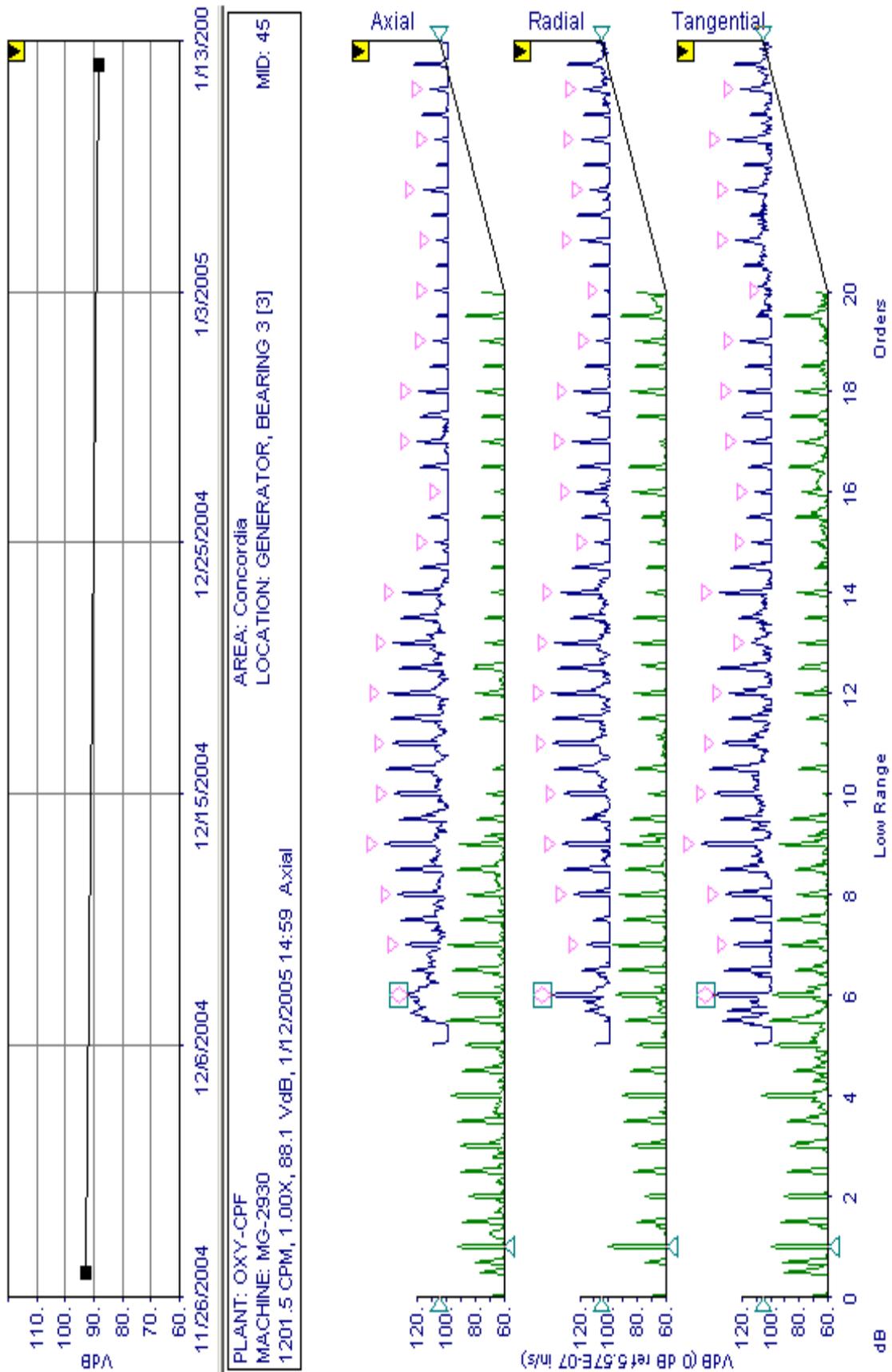
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



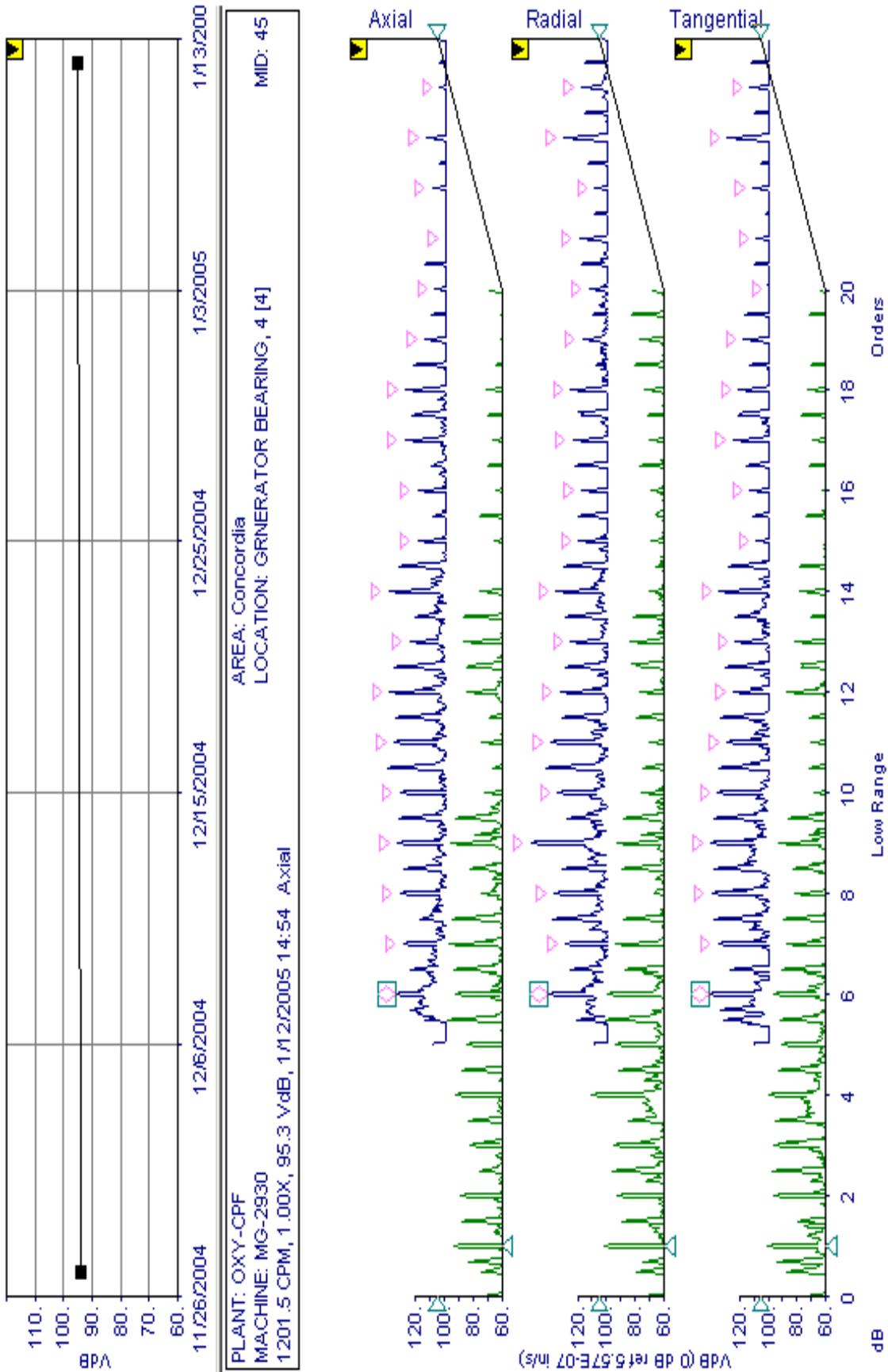
2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



3.- Rodamiento del generador, lado conducido.



4.- Rodamiento del generador, lado libre.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS																			
Máquina: MG-2930			Fecha: 27 de Noviembre del 2004			Período análisis de Tendencias: 27 Noviembre/2004-12 Enero/2005													
Niveles de Alarma																			
Unidades			Bueno			Regular			Malo										
in/s			0.5			0.6			0.7										
Vdb			119.1			120.6			122										
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración												Observaciones	Tendencia	Recomendaciones			
		Axial						Radial									Tang.		
		B	R	M	B	R	M	B	R	M	B	R	M						
Motor, MB1	0,5 X	x			x									x			El espectro muestra que la máquina esta trabajando en muy buenas condiciones.	Los niveles de vibración se han mantenido constantes, sin sintomas de fallas.	Seguir monitoreando el generador en las fechas propuestas.
	1X	x			x									x					
	2X	x			x									x					
	3X	x			x									x					
	4X,EF	x			x									x					
	6X,GP	x			x									x					
	8X,PR	x			x									x					
Motor, MB2	0,5 X	x			x									x			Los niveles de vibración son bajos y no presentan síntomas de fallas.	No se ha detectado variación alguna en la forma del espectro o en los niveles de vibración.	No hay recomendaciones.
	1X	x			x									x					
	2X	x			x									x					
	3X	x			x									x					
	4X,EF	x			x									x					
	6X,GP	x			x									x					
	8X,PR	x			x									x					

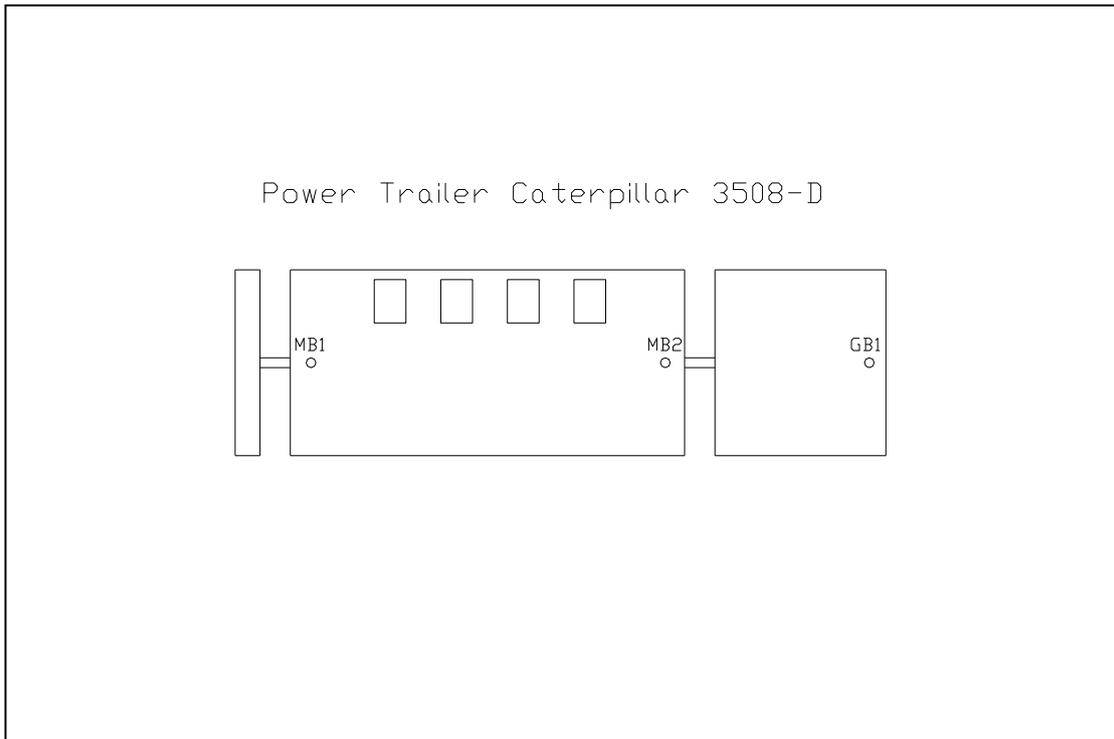
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración												Observaciones	Tendencia	Recomendaciones			
		Axial						Radial									Tang.		
		B	R	M	B	R	M	B	R	M	B	R	M				B	R	
Gen., GB1	0,5 X	x			x										x		El espectro no presenta síntomas de falla.	No se evidencia cambio en los niveles de vibración.	No hay recomendaciones
	1X	x			x										x				
	2X	x			x										x				
	3X	x			x										x				
	4X,EF	x			x										x				
	6X,GP	x			x										x				
	8X,PR	x			x										x				
Gen., GB2	0,5 X	x			x										x		La vibración radial en 4X es alta, pero es dentro de los límites admisibles.	El espectro se ha mantenido sin cambios desde la última medición.	No hay recomendaciones.
	1X	x			x										x				
	2X	x			x										x				
	3X	x			x										x				
	4X,EF	x			x										x				
	6X,GP	x			x										x				
	8X,PR	x			x										x				

HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MG-501-4

Ubicación: Jivino A

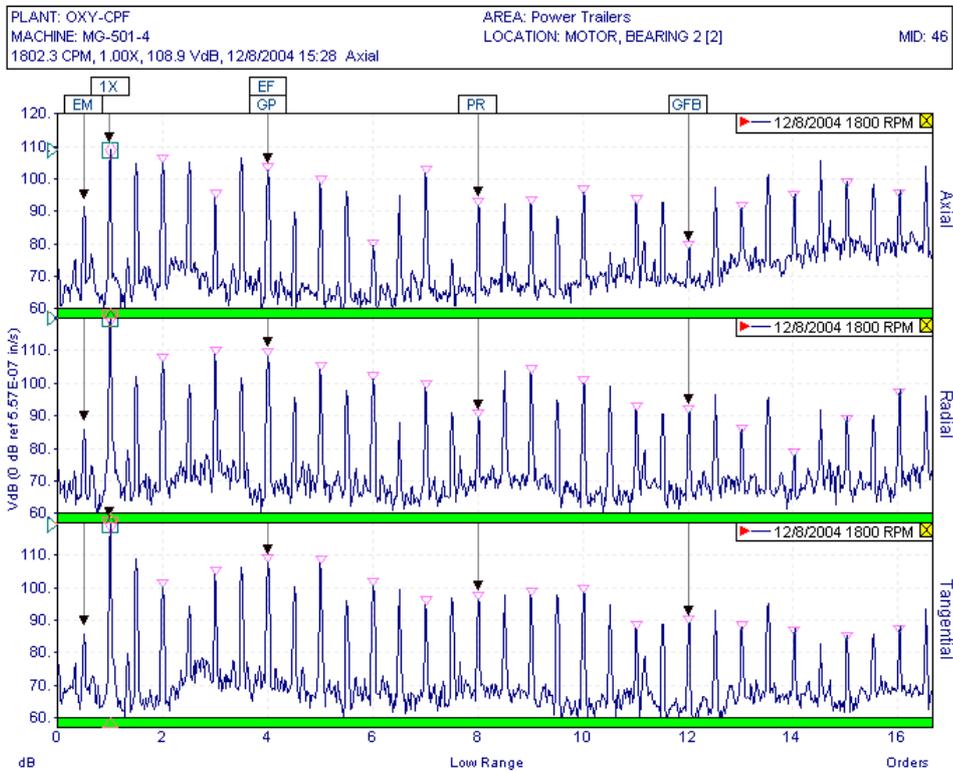
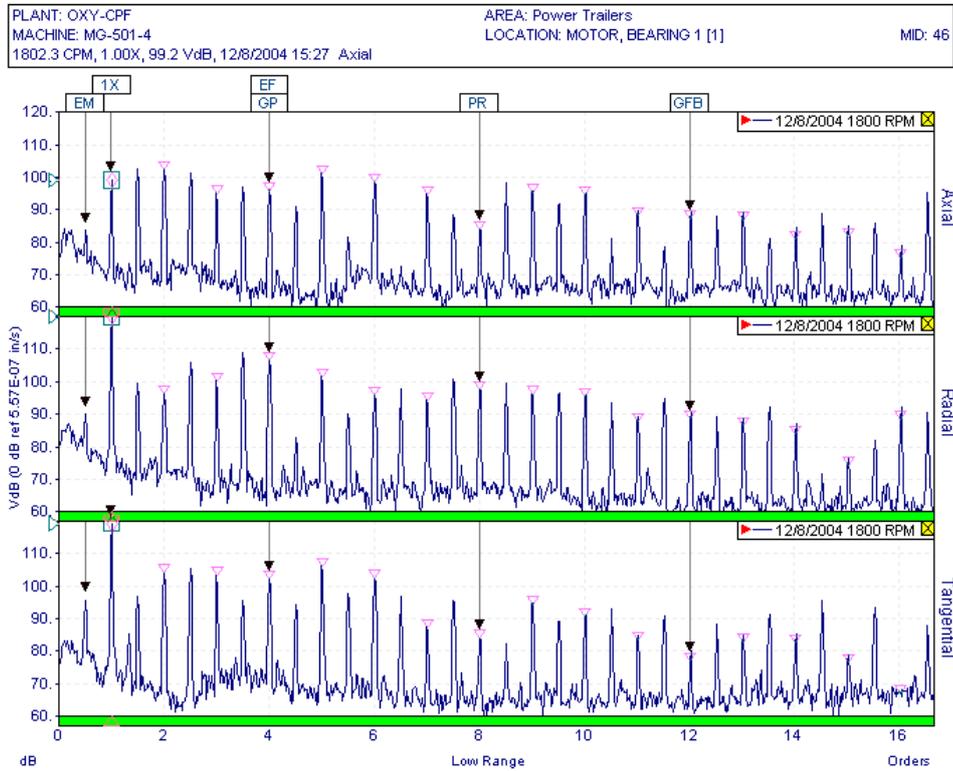
Esquema General de la Máquina

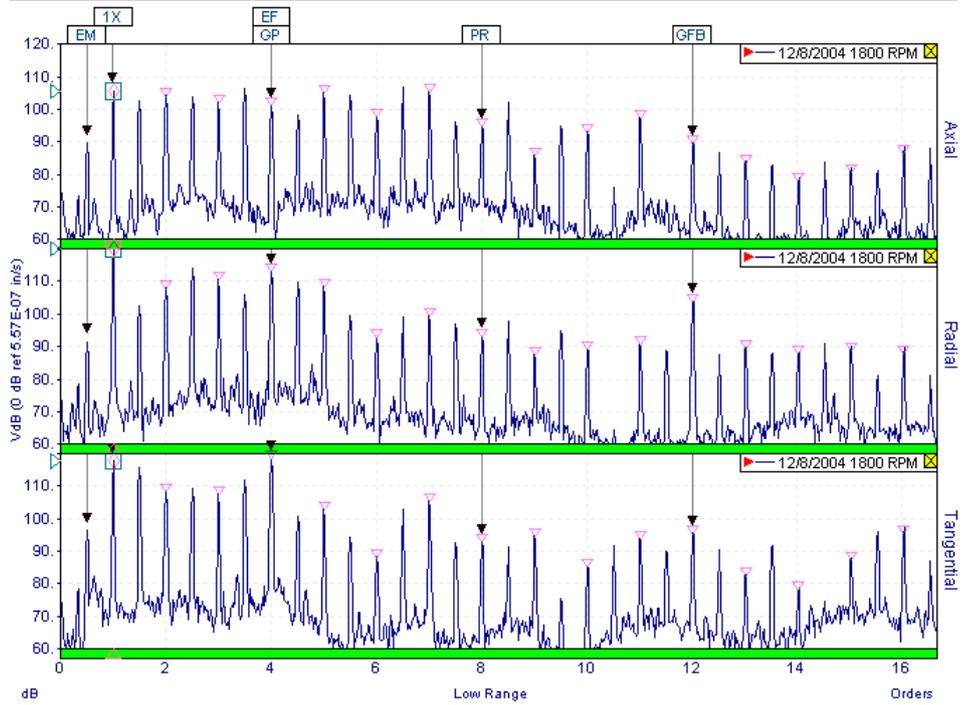


Información General

Velocidad Nominal (rpm): 1800
Número de Cilindros: 8
Engranes Bomba de Aceite: 14
Engranes Bomba de Agua: 14
Engranes Distribución: 92
Engrane Auxiliar: 183
Polos del Generador: 6
Alabes vent. Generador: 12
Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial
Carga del Equipo (kW): 350

ESPECTROS DE REFERENCIA





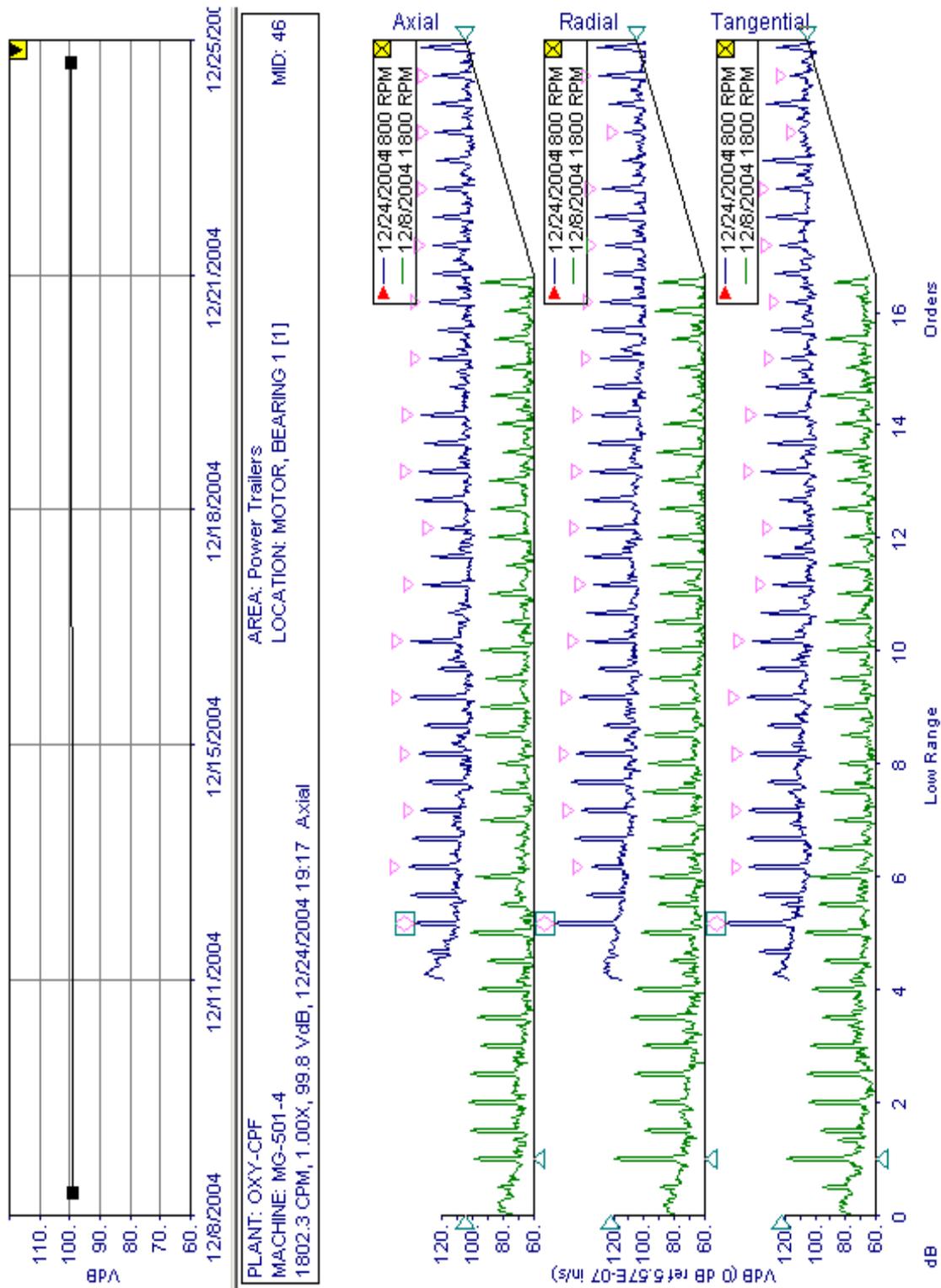
Generador, Posición 3 (GB1)

Gráficas de Cascada y Tendencia

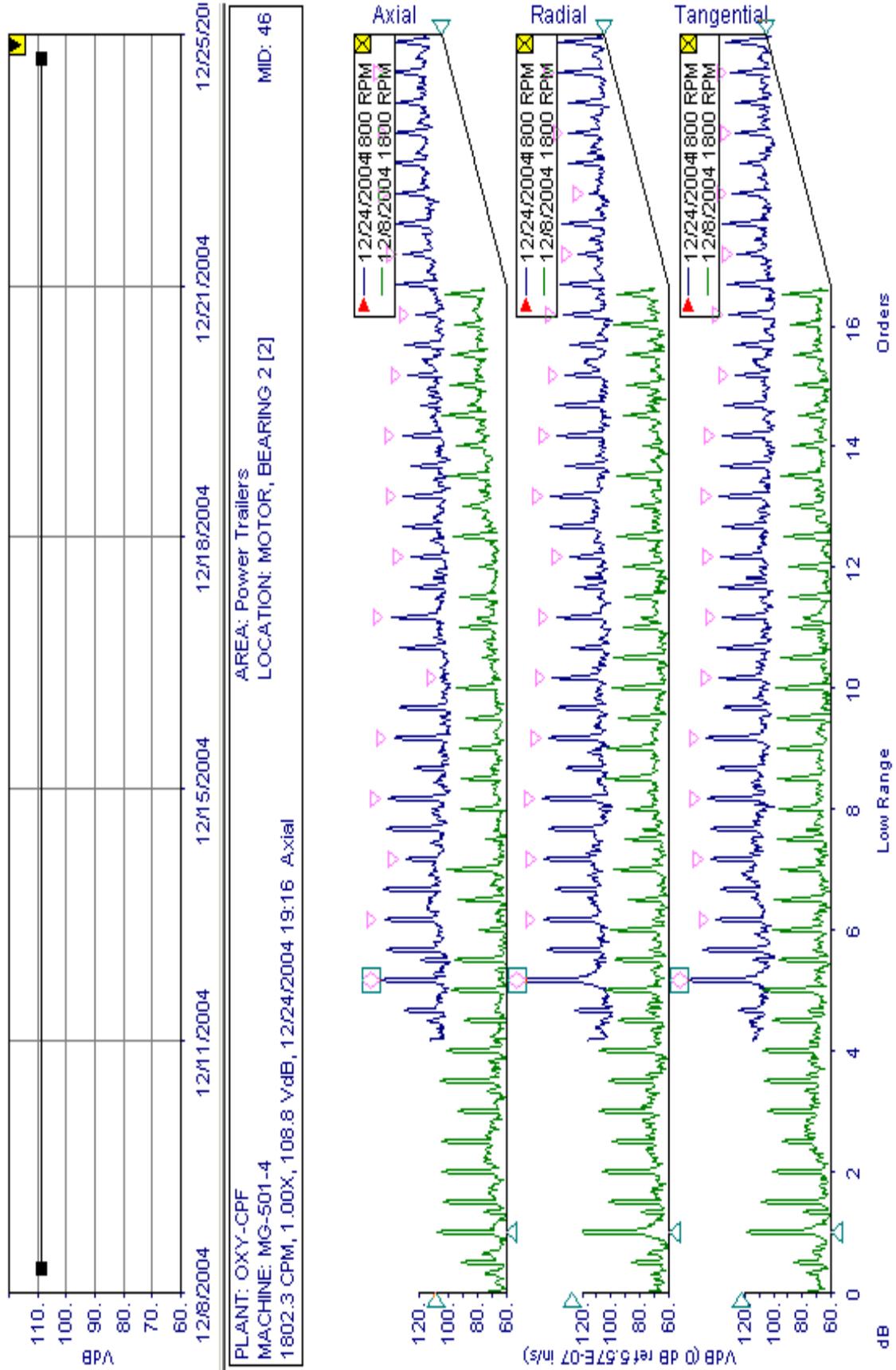
Máquina: MG-501-4

Ubicación: Jivino A

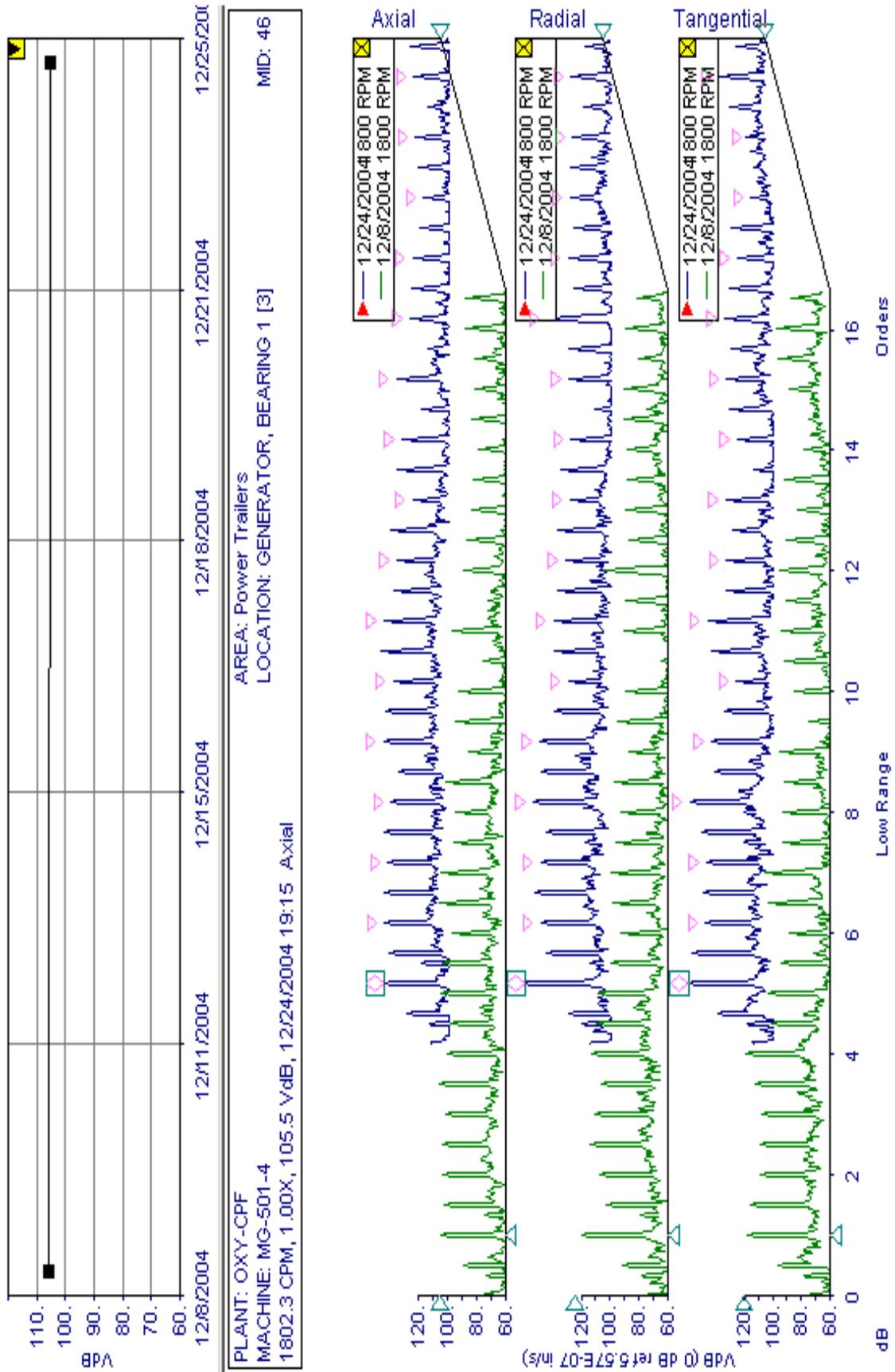
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



3.- Rodamiento del generador.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS													
Máquina: MG-501-4			Fecha: 8 de Diciembre del 2004			Período análisis de Tendencias: 8 Diciembre-24 Diciembre/2004							
Niveles de Alarma													
Unidades		Bueno			Regular			Malo					
in/s		0.5			0.6			0.8					
Vdb		119.1			120.6			123.1					
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración						Observaciones	Tendencia	Recomendaciones			
		Axial			Radial						Tang.		
		B	R	M	B	R	M	B	R	M			
Motor, MB1	0,5 X	x			x			x			Los niveles de vibración la velocidad de giro del motor son extremadamente altos en las direcciones radial y tangencial.	Los niveles de vibración son muy altos pero se han mantenido constantes durante el monitoreo.	Los síntomas de desbalanceo son preocupantes. Se debe vigilar el equipo por una posible falla.
	1X	x			x			x					
	2X	x			x			x					
	3X	x			x			x					
	4X,EF y GP	x			x			x					
	6X	x			x			x					
	8X,PR	x			x			x					
			x			x			x				
Motor, MB2	0,5 X	x			x			x			Se observa las mismas fallas que en el espectro anterior, con altos niveles de vibración en 1X en la dirección radial y tangencial.	Los niveles de vibración se han mantenido constantes.	Se confirman los síntomas de desbalanceo. Es recomendable para este equipo para un mantenimiento general.
	1X	x			x			x					
	2X	x			x			x					
	3X	x			x			x					
	4X,EF y GP	x			x			x					
	6X	x			x			x					
	8X,PR	x			x			x					
			x			x			x				
Gen., GB1	0,5 X	x			x			x			Existen niveles muy altos de vibración tanto a la velocidad de rotación del motor como a la velocidad de paso de los polos del generador.	No se evidencia cambio en los niveles de vibración.	Es evidente que la máquina tiene problemas de desbalanceo. Aquí se detecto además problemas con los polos del generador.
	1X	x			x			x					
	2X	x			x			x					
	3X	x			x			x					
	4X,EF y GP	x			x			x					
	6X	x			x			x					
	8X,PR	x			x			x					
			x			x			x				

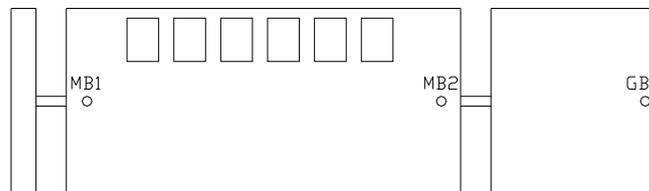
HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MG-2920

Ubicación: SRF

Esquema General de la Máquina

Sets Motor Generador Caterpillar 3412-D



Información General

Velocidad Nominal (rpm): 1200

Número de Cilindros: 12

Engranés Bomba de Aceite: 18

Engranés Bomba de Agua: 18

Engranés Distribución: 99

Engrane Auxiliar: 136

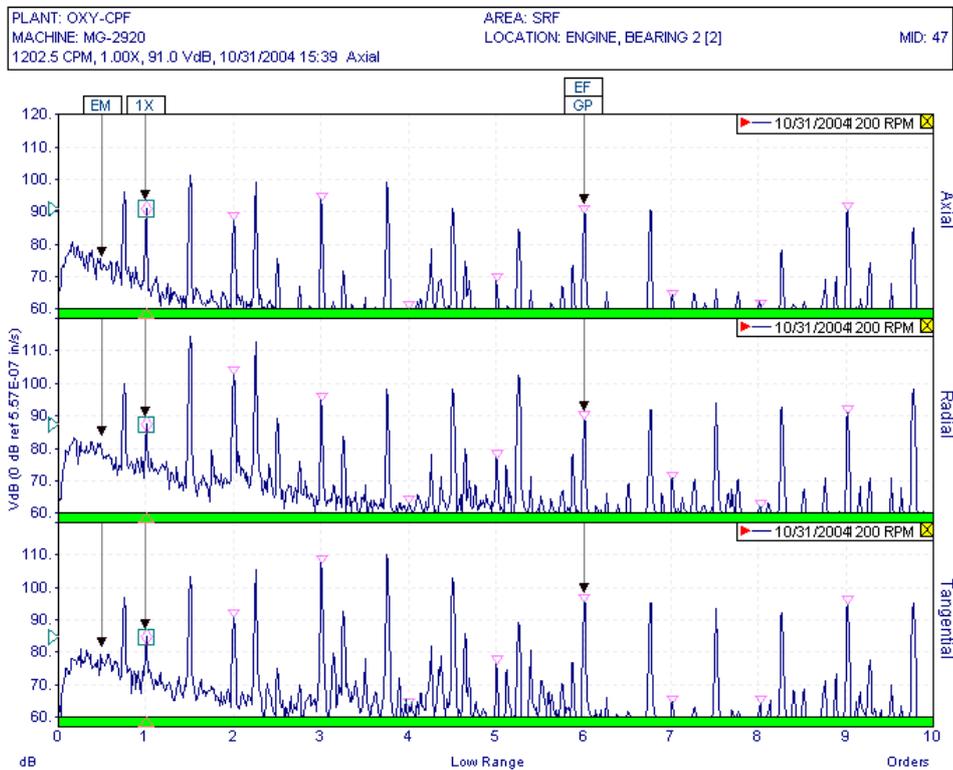
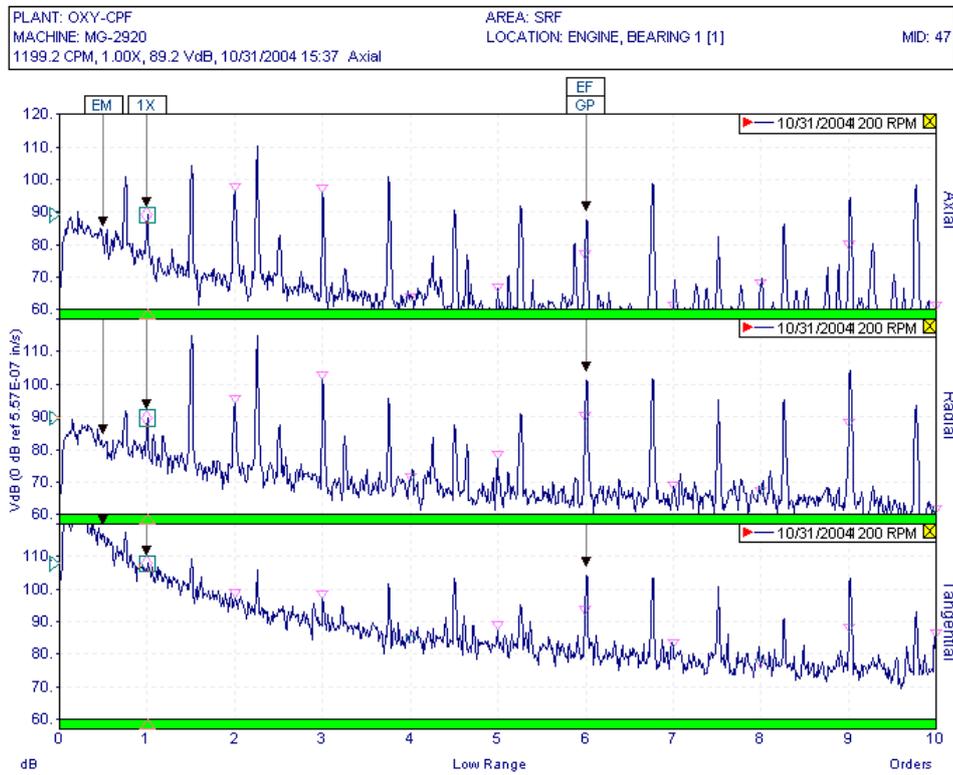
Polos del Generador: 6

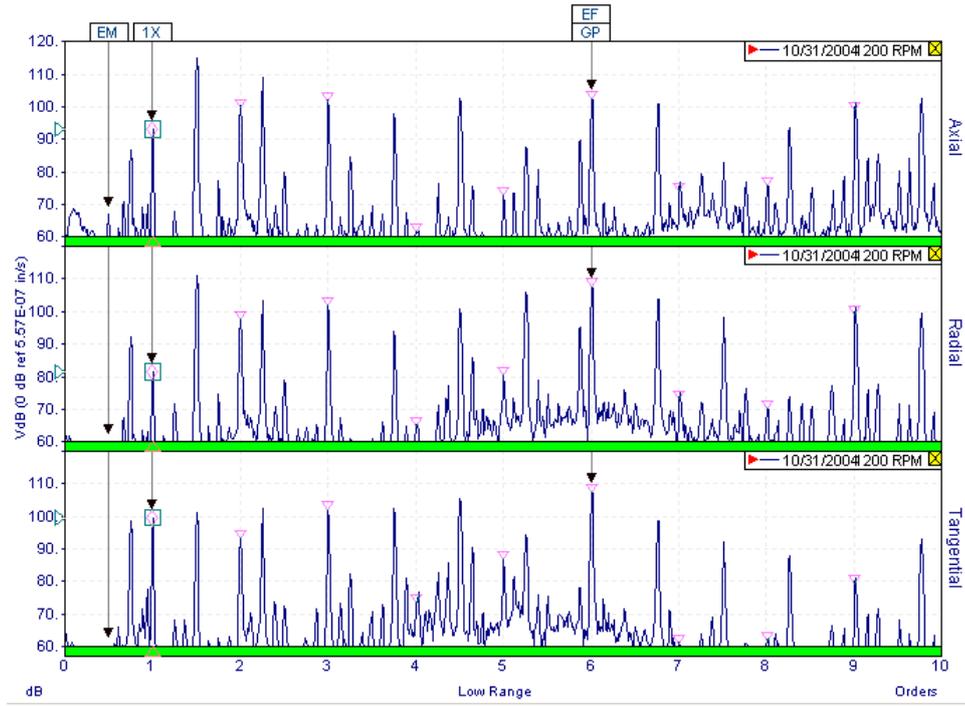
Alabes vent. Generador: 12

Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial

Carga del Equipo (kW): 200

ESPECTROS DE REFERENCIA



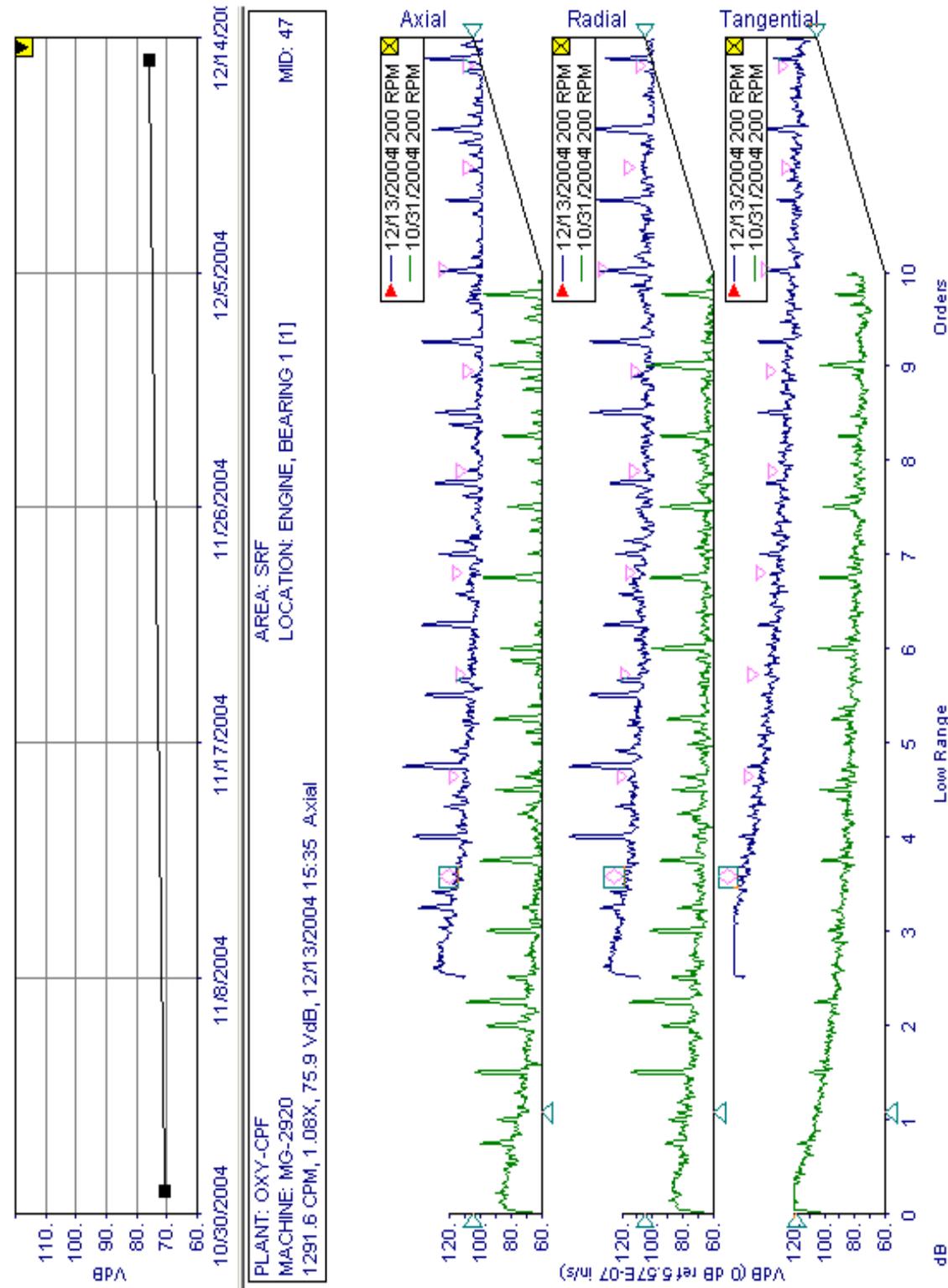


Generador, Posición 3 (GB1)

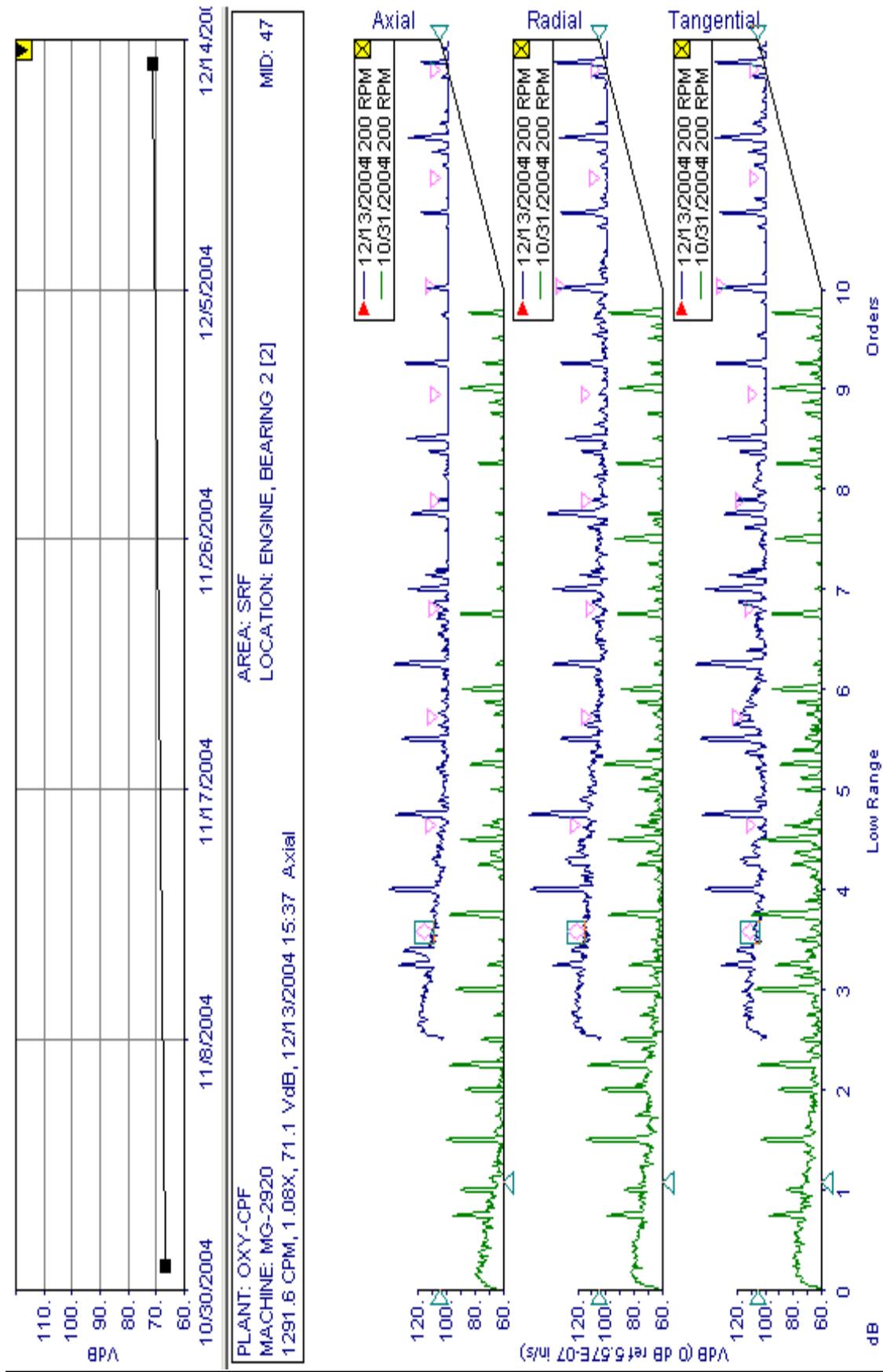
Gráficas de Cascada y Tendencia

Máquina: MG-2920
Ubicación: SRF

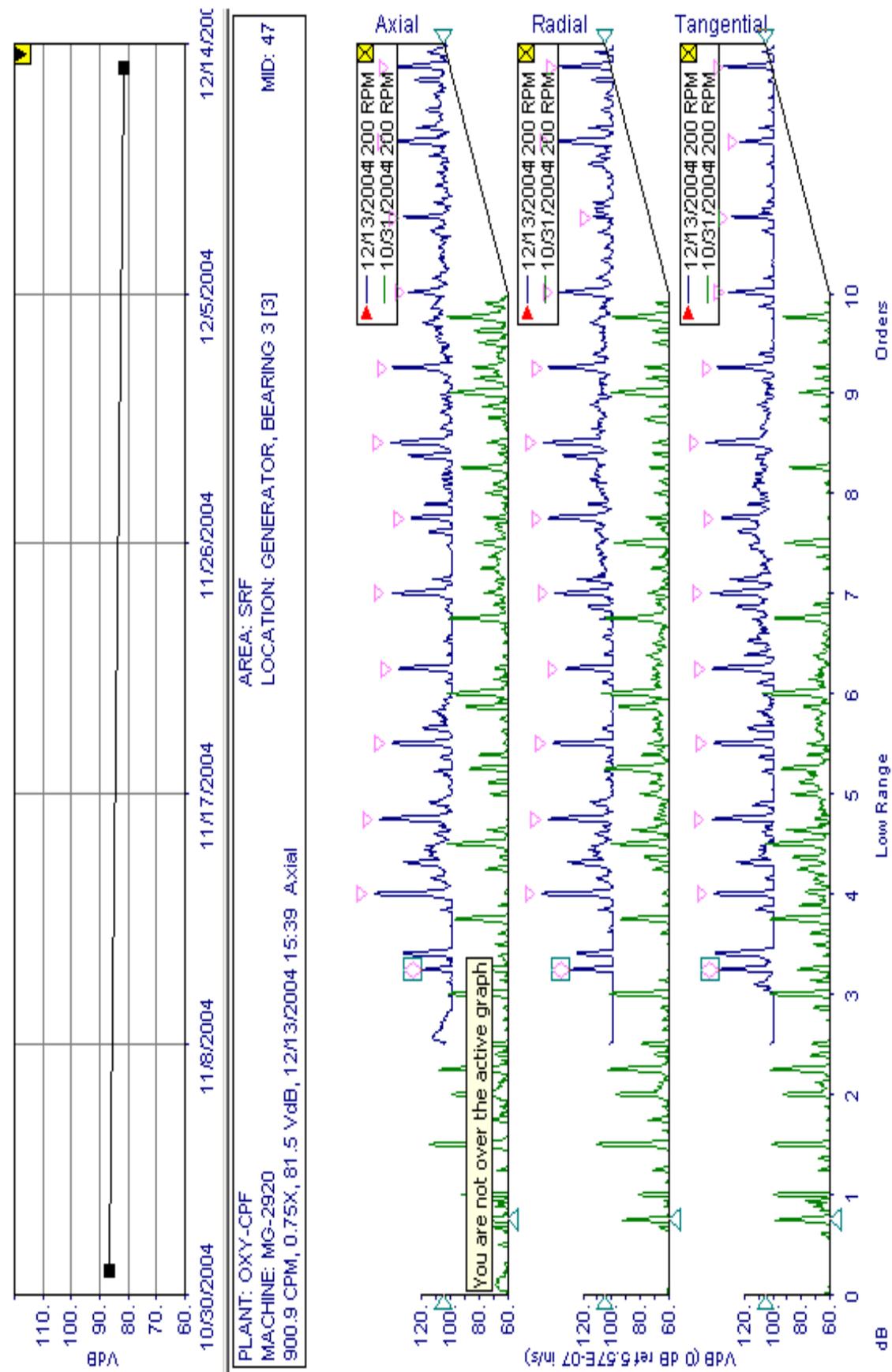
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



3.- Rodamiento del generador.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS														
Máquina: MG-2920			Fecha: 31 de Octubre del 2004			Período análisis de Tendencias: 31 Octubre-13 Diciembre/2004								
Niveles de Alarma														
Unidades		Bueno				Regular				Malo				
in/s		0.5				0.6				0.7				
Vdb		119.1				120.6				122				
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración								Observaciones	Tendencia	Recomendaciones		
		Axial				Radial							Tang.	
		B	R	M	I	B	R	M	I					
Motor, MB1														
	0,5 X	x				x				x		Los niveles de vibración son bajos pero existe mucha vibración aleatoria	El espectro se ha mantenido constante en su forma y en los niveles de vibración.	La alta vibración aleatoria es una indicación de soltura mecánica. Se recomienda hacer una revisión general del equipo.
	1X	x				x				x				
	2X	x				x				x				
	3X	x				x				x				
	4X	x				x				x				
	6X, GP y EF	x				x				x				
	8X	x				x				x				
Motor, MB2														
	0,5 X	x				x				x		Existe vibración aleatoria. Además se puede observar picos subarmónicos bastante altos.	Los niveles de vibración y la forma de espectro se han mantenido constantes	Es evidente que existen problemas de soltura mecánica y se los debe corregir.
	1X	x				x				x				
	2X	x				x				x				
	3X	x				x				x				
	4X	x				x				x				
	6X, GP y EF	x				x				x				
	8X	x				x				x				
Gen., GB1														
	0,5 X	x				x				x		Se puede observar que existen picos bajo la velocidad de rotación del motor y sus respectivos armónicos.	No se evidencia cambio en los niveles de vibración.	Este espectro confirma los problemas de soltura con picos muy altos a frecuencias múltiples del primer subarmónico.
	1X	x				x				x				
	2X	x				x				x				
	3X	x				x				x				
	4X	x				x				x				
	6X, GP y EF	x				x				x				
	8X	x				x				x				

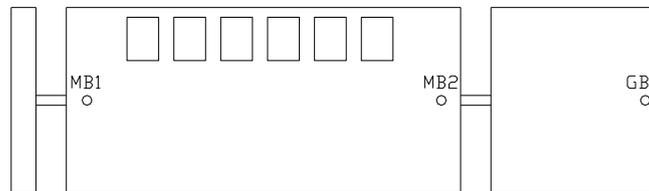
HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MG-2101-1D

Ubicación: Limoncocha

Esquema General de la Máquina

Sets Motor Generador Caterpillar 3406-D



Información General

Velocidad Nominal (rpm): 1200

Número de Cilindros: 6

Engranes Bomba de Aceite: 18

Engranes Bomba de Agua: 18

Engranes Distribución: 80

Engrane Auxiliar: 113

Polos del Generador: 6

Alabes vent. Generador: 12

Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial

Carga del Equipo (kW): 200

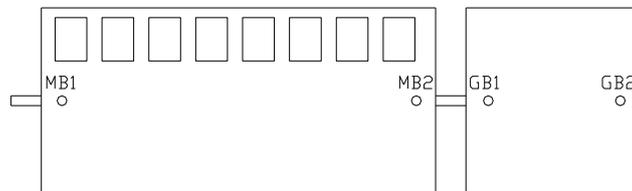
HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MG-101-8G

Ubicación: CPF

Esquema General de la Máquina

Sets Motor Generador Waukesha 9390-SI



Información General

Velocidad Nominal (rpm): 1200

Número de Cilindros: 16

Engranés Bomba de Aceite:

Engranés Bomba de Agua:

Engranés Distribución:

Engrane Auxiliar:

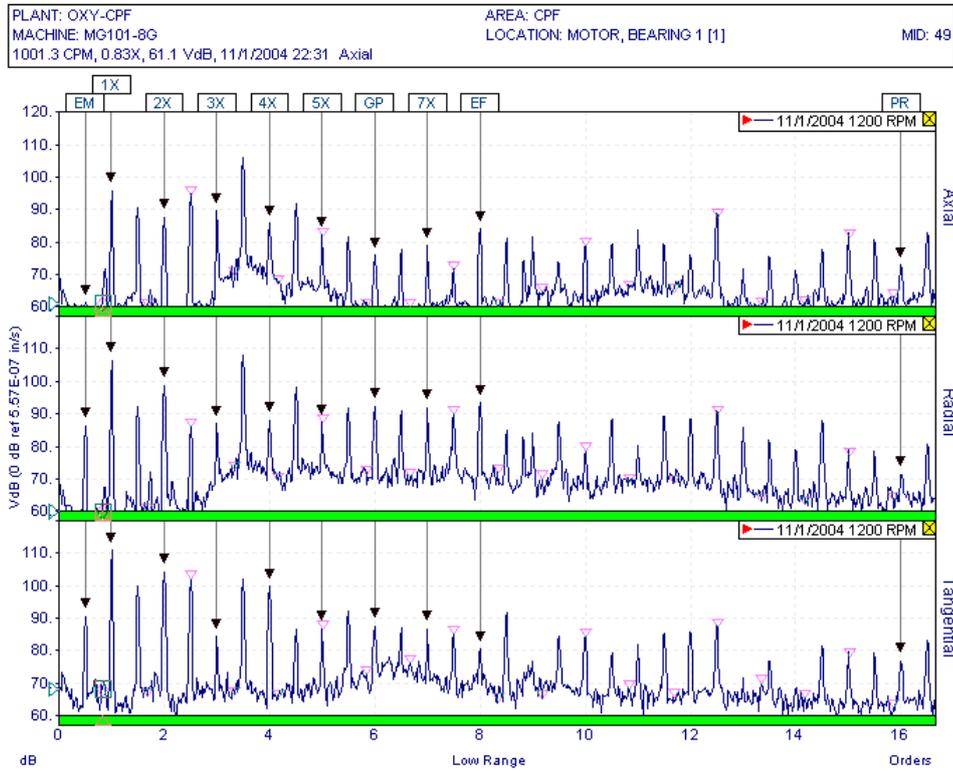
Polos del Generador: 6

Alabes vent. Generador:

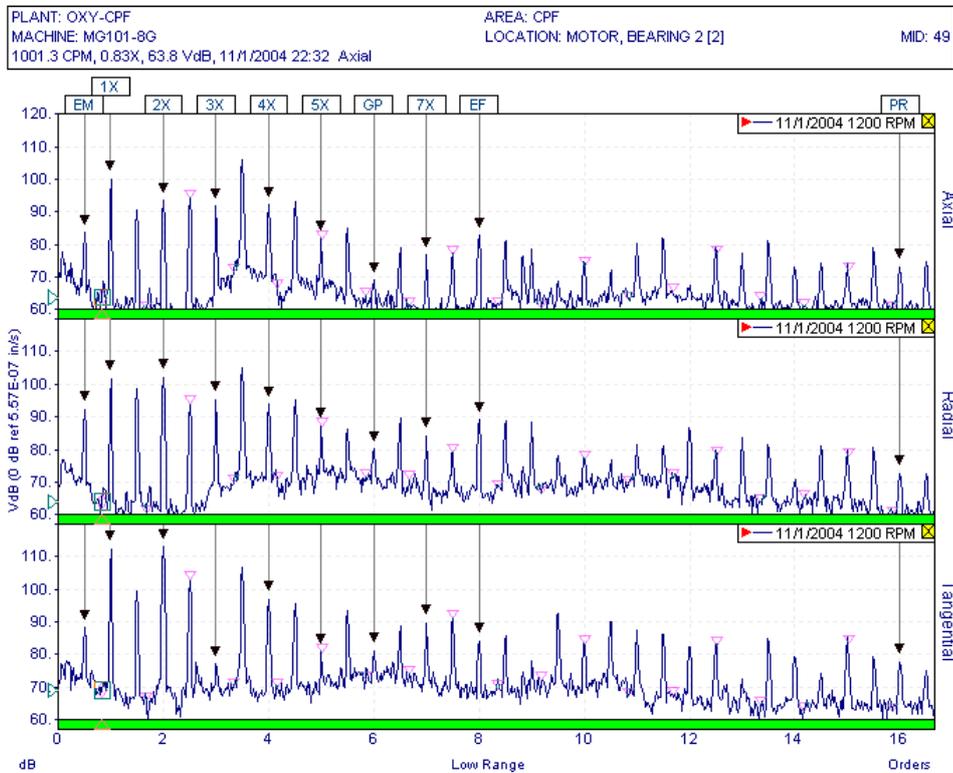
Tipo de Apoyos: Rodamientos

Carga del Equipo (kW): 700

ESPECTROS DE REFERENCIA

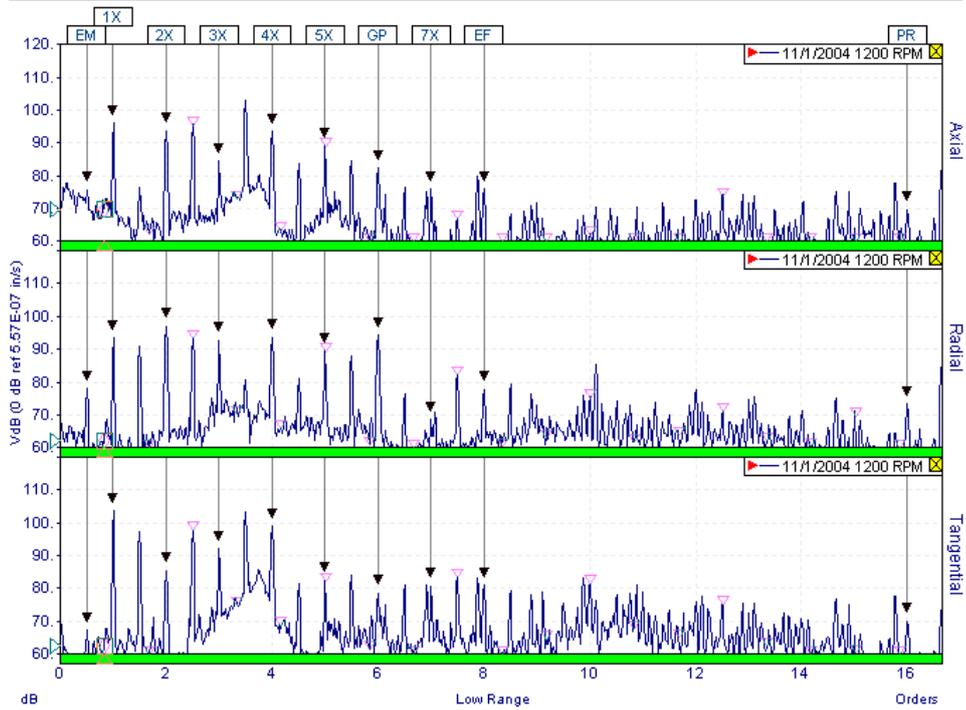


Motor, Posición 1 (MB1)



Motor, Posición 2 (MB2)

PLANT: OXY-CPF AREA: CPF MID: 49
 MACHINE: MG101-8G LOCATION: GENERATOR, BEARING 1 [3]
 1001.3 CPM, 0.83X, 69.8 VdB, 11/1/2004 22:34 Axial



Generador, Posición 3 (GB1)

PLANT: OXY-CPF AREA: CPF MID: 49
 MACHINE: MG101-8G LOCATION: GENERATOR, BEARING 2 [4]
 1001.3 CPM, 0.83X, 62.7 VdB, 11/1/2004 22:36 Axial



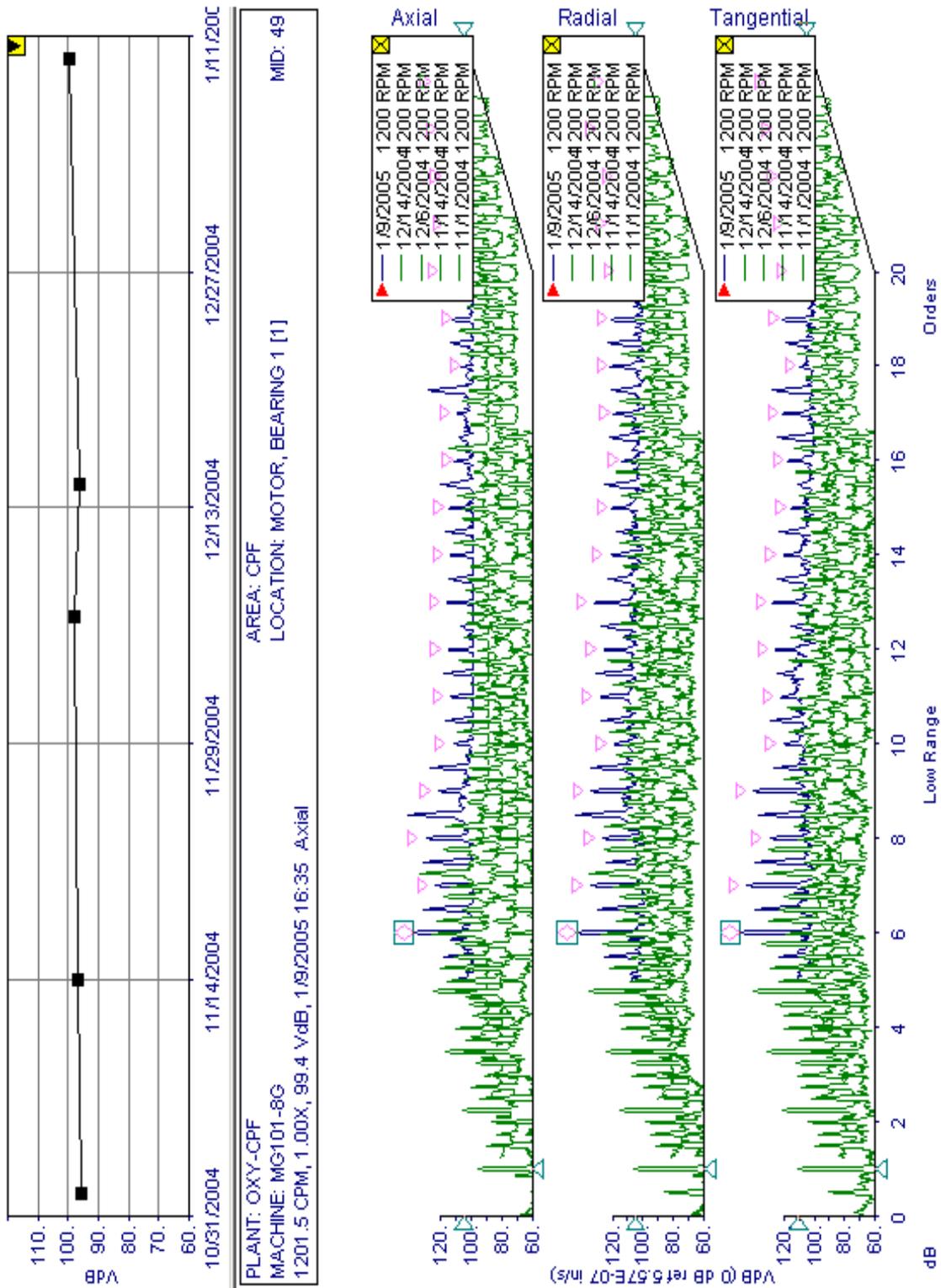
Generador, Posición 4 (GB2)

Gráficas de Cascada y Tendencia

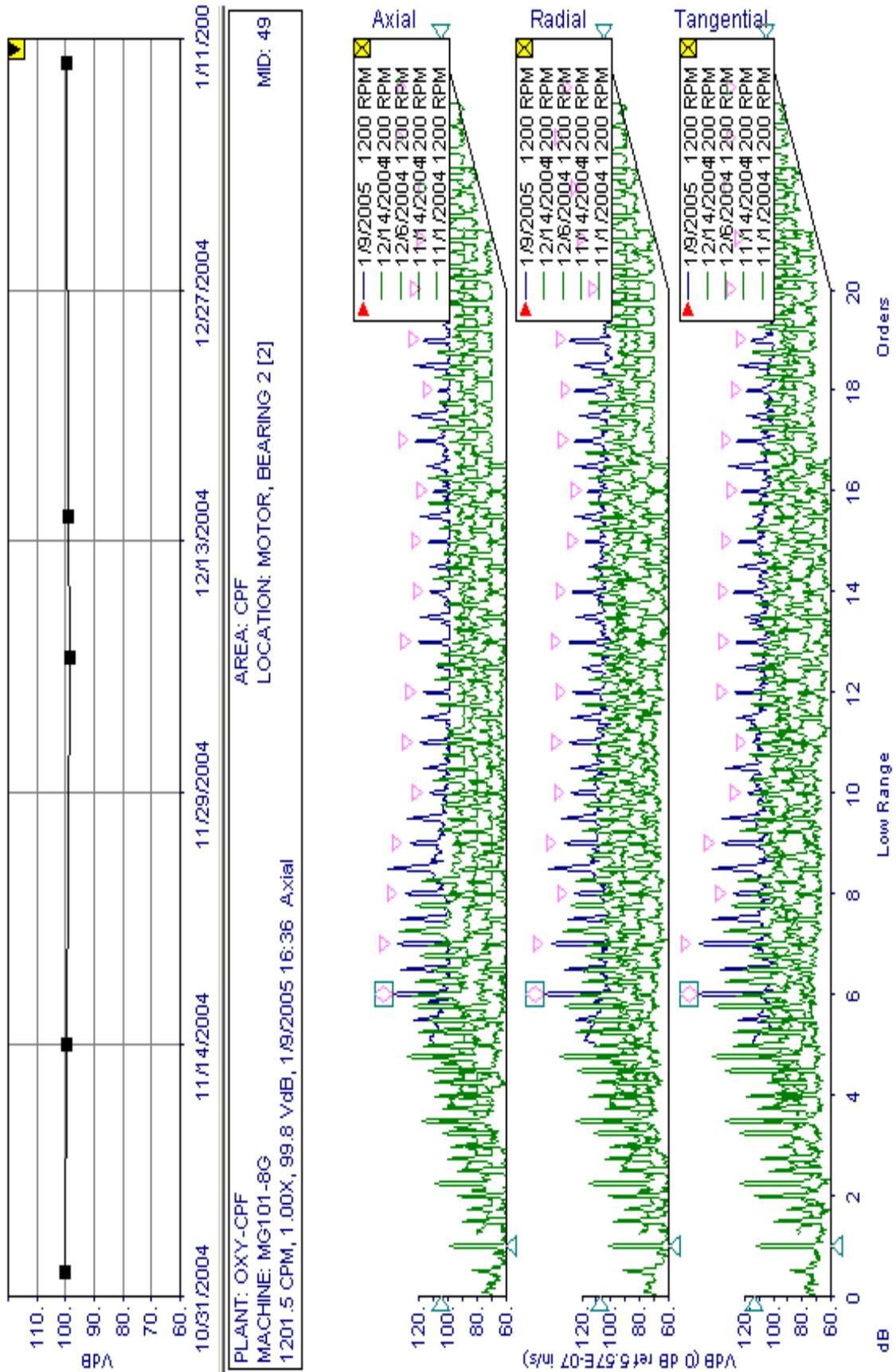
Máquina: MG-101-8G

Ubicación: CPF

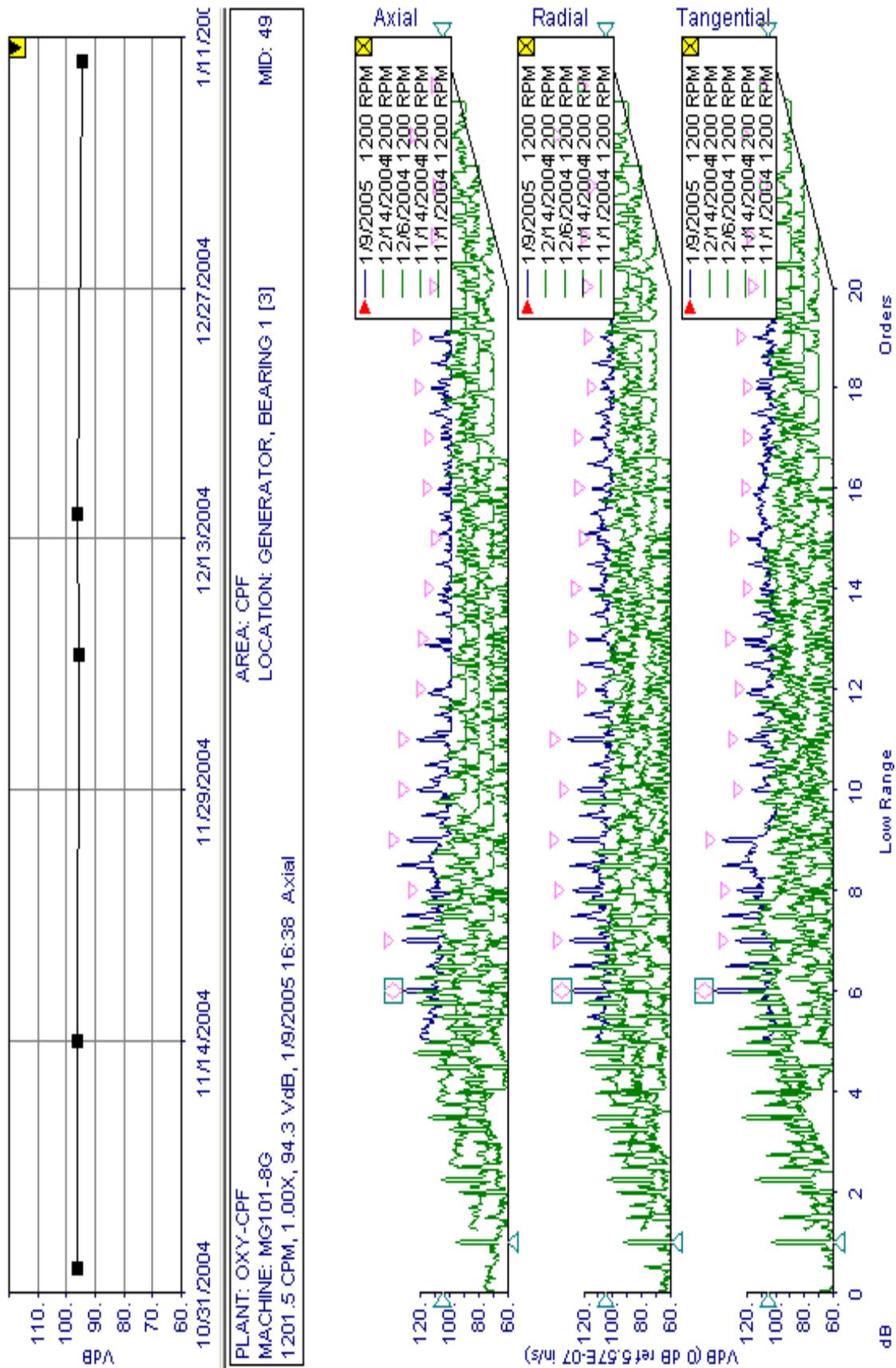
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



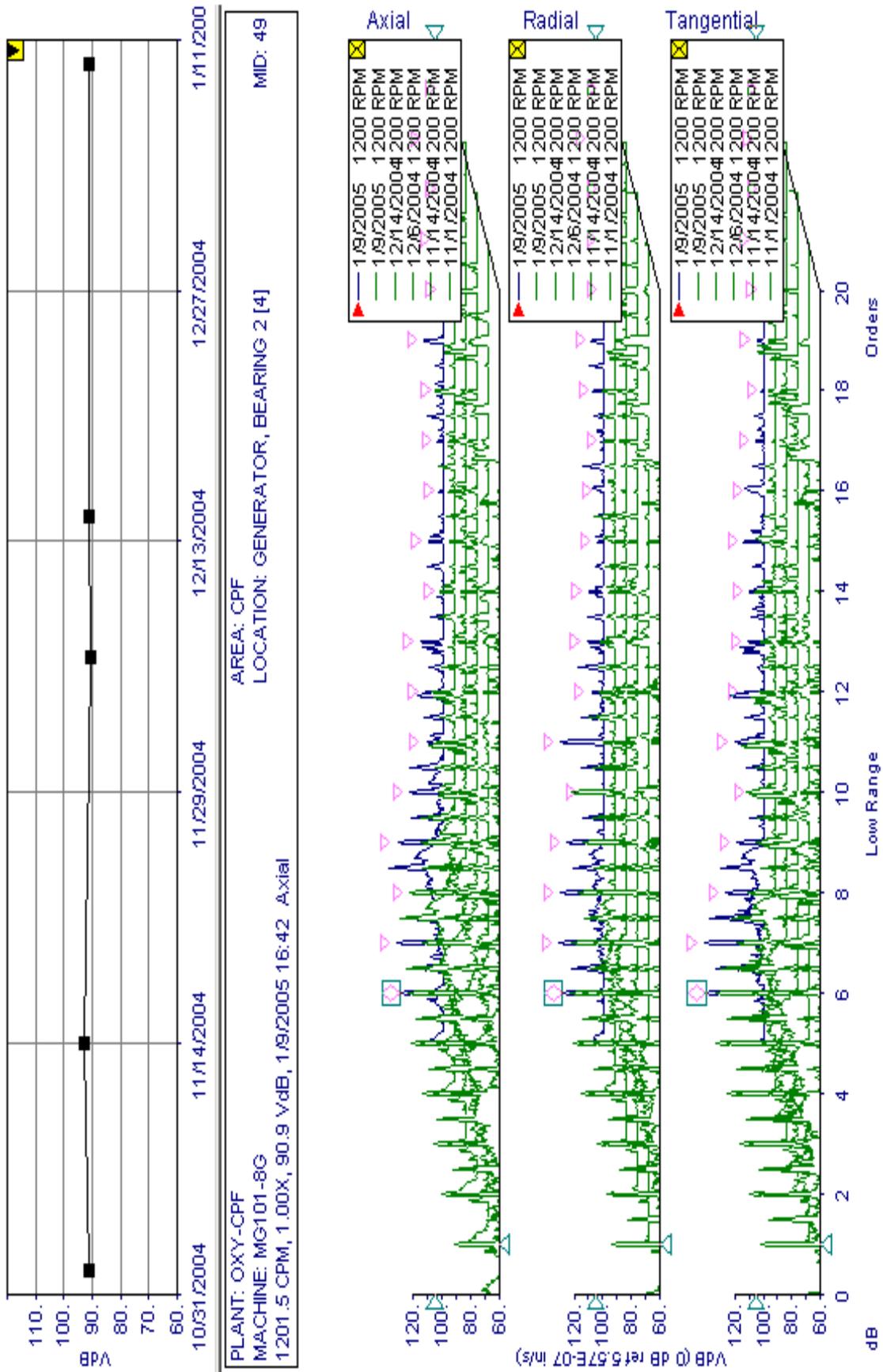
2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



3.- Rodamiento del generador, lado conducido.



4.- Rodamiento del generador, lado libre.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS																
Máquina: MG-101-8G		Fecha: 1 de Noviembre del 2004			Período análisis de Tendencias: 1 Noviembre/2004-9 Enero/2005											
Niveles de Alarma																
Unidades		Bueno				Regular				Malo						
in/s		0.5				0.6				0.7						
Vdb		119.1				120.6				122						
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración								Observaciones	Tendencia	Recomendaciones				
		Axial				Radial							Tang.			
		B	R	M	I	B	R	M	I	B	R	M	I			
Motor, MB1	0,5 X	x				x								Los niveles de vibración son bajos, no se presentan síntomas de fallas.	Los niveles de vibración se han mantenido constantes, sin síntomas de fallas.	Se recomienda continuar con el monitoreo de vibración.
	1X	x				x										
	2X	x				x										
	3X	x				x										
	4X	x				x										
	6X,GP	x				x										
	8X,EF	x				x										
16X,PR	x				x											
Motor, MB2	0,5 X	x				x								Los niveles de vibración se encuentran dentro de los límites, pero existen picos altos en 1X y 2X en la dirección tangencial.	No se ha detectado variación alguna en la forma del espectro o en los niveles de vibración.	La alta vibración en la dirección tangencial son indicadores de una ligera desalineación.
	1X	x				x										
	2X	x				x										
	3X	x				x										
	4X	x				x										
	6X,GP	x				x										
	8X,EF	x				x										
16X,PR	x				x											

Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración												Observaciones	Tendencia	Recomendaciones	
		Axial						Radial									Tang.
		B	R	M	B	R	M	B	R	M	B	R	M				
Gen., GB1	0,5 X	x					x						x		Se evidencia la presencia de vibraciones aleatorias.	El espectro se ha mantenido sin cambios desde la última medición.	La desalineación detectada en el espectro anterior no presenta indicios aquí, lo que demuestra que es muy ligera. La vibración aleatoria se debe a soltura mecánica.
	1X	x					x						x				
	2X	x					x						x				
	3X	x					x						x				
	4X	x					x						x				
	6X,GP	x					x						x				
	8X,EF	x					x						x				
	16X,PR	x					x						x				
Gen., GB2	0,5 X	x					x						x		No se evidencia ningún tipo de fallas.	No se evidencia cambio en los niveles de vibración	No hay recomendaciones.
	1X	x					x						x				
	2X	x					x						x				
	3X	x					x						x				
	4X	x					x						x				
	6X,GP	x					x						x				
	8X,EF	x					x						x				
	16X,PR	x					x						x				

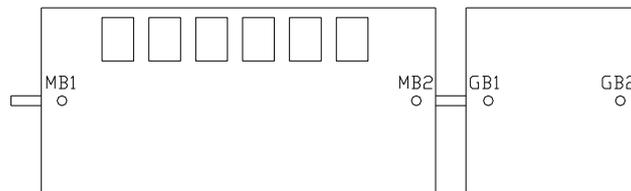
HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MG-2101-2G

Ubicación: Limoncocha

Esquema General de la Máquina

Sets Motor Generador Waukesha 5790-SI



Información General

Velocidad Nominal (rpm): 1200

Número de Cilindros: 12

Engranés Bomba de Aceite:

Engranés Bomba de Agua:

Engranés Distribución:

Engrane Auxiliar:

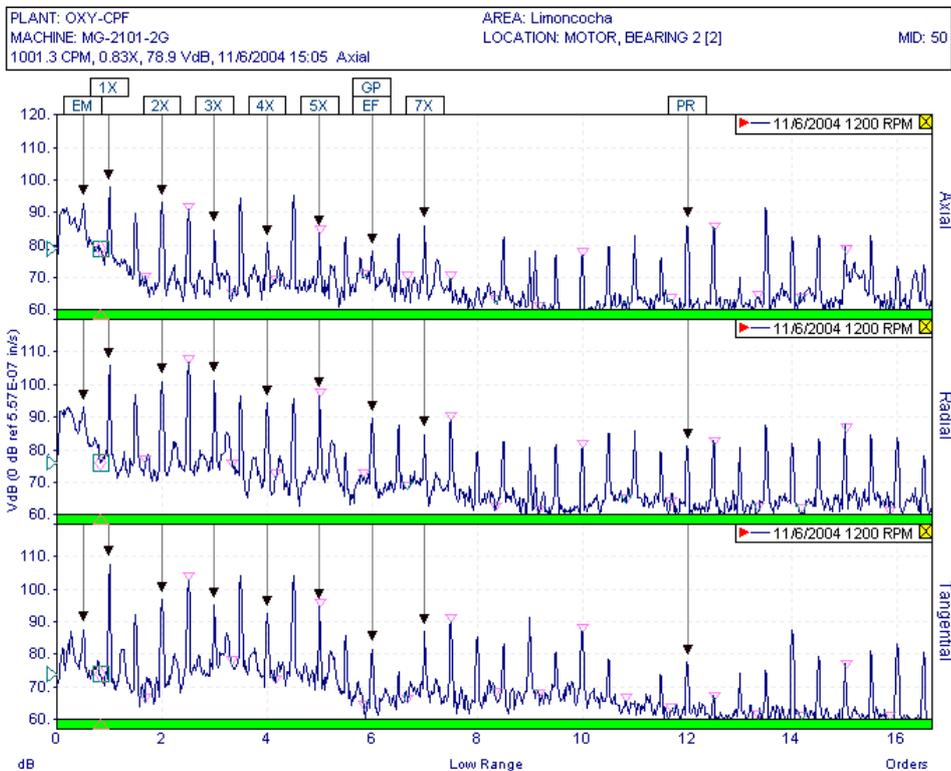
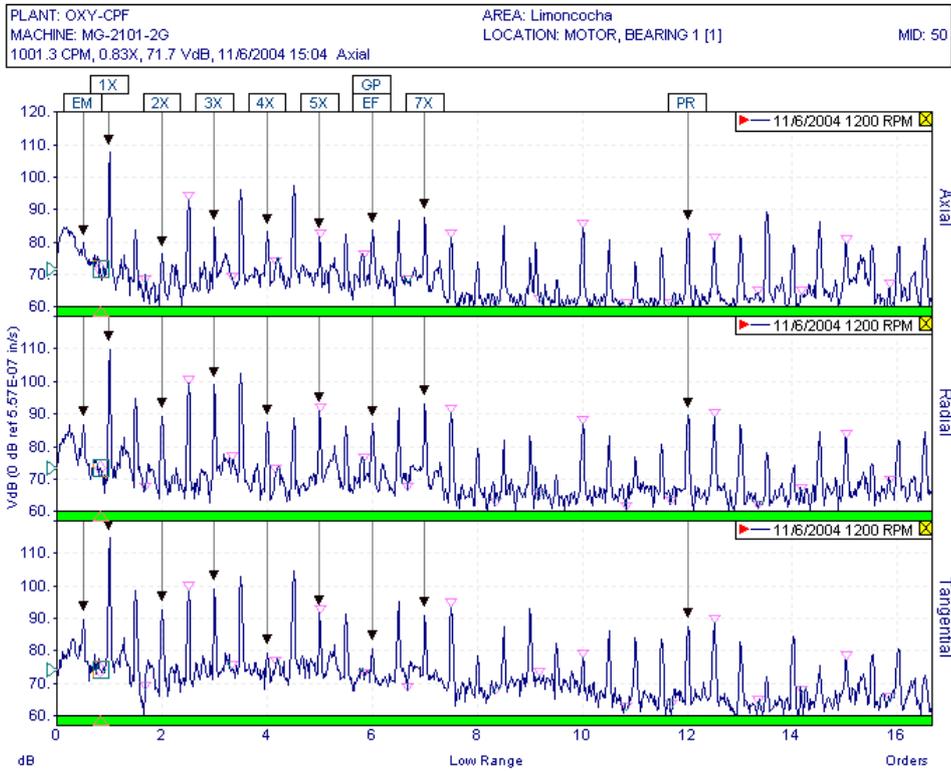
Polos del Generador: 6

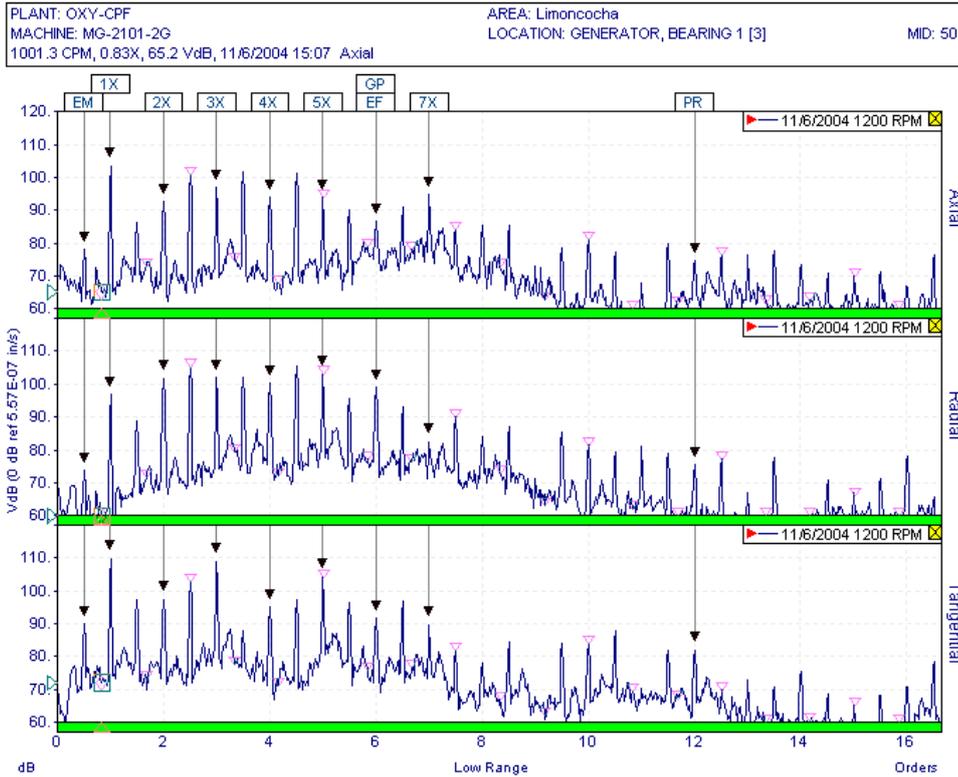
Alabes vent. Generador:

Tipo de Apoyos: Rodamientos

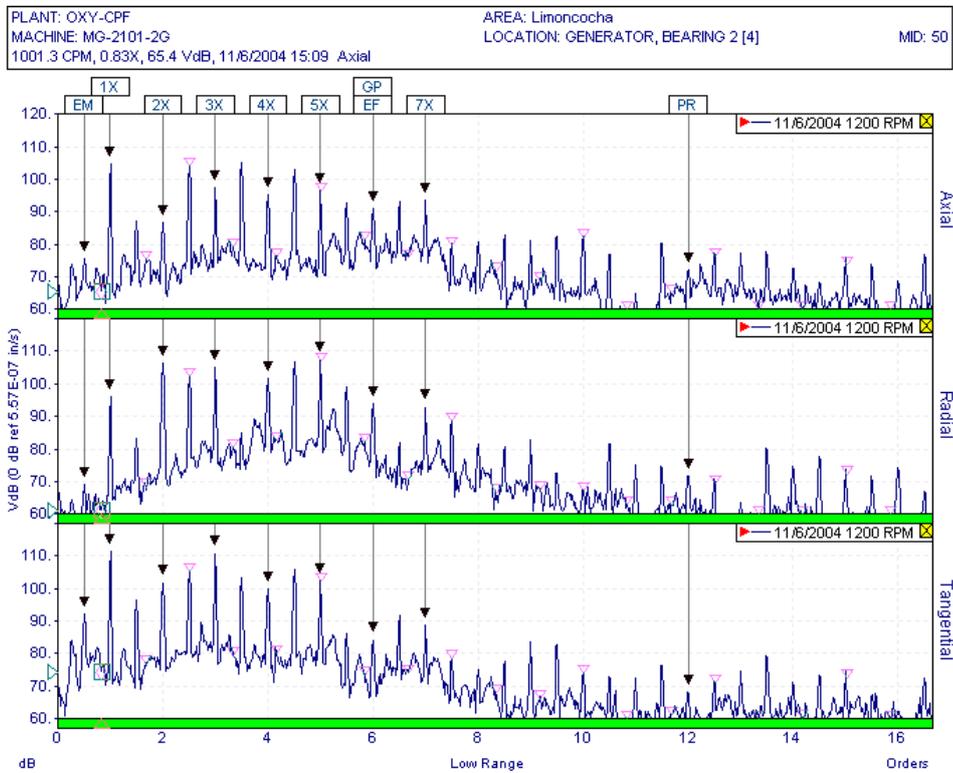
Carga del Equipo (kW): 500

ESPECTROS DE REFERENCIA





Generador, Posición 3 (GB1)

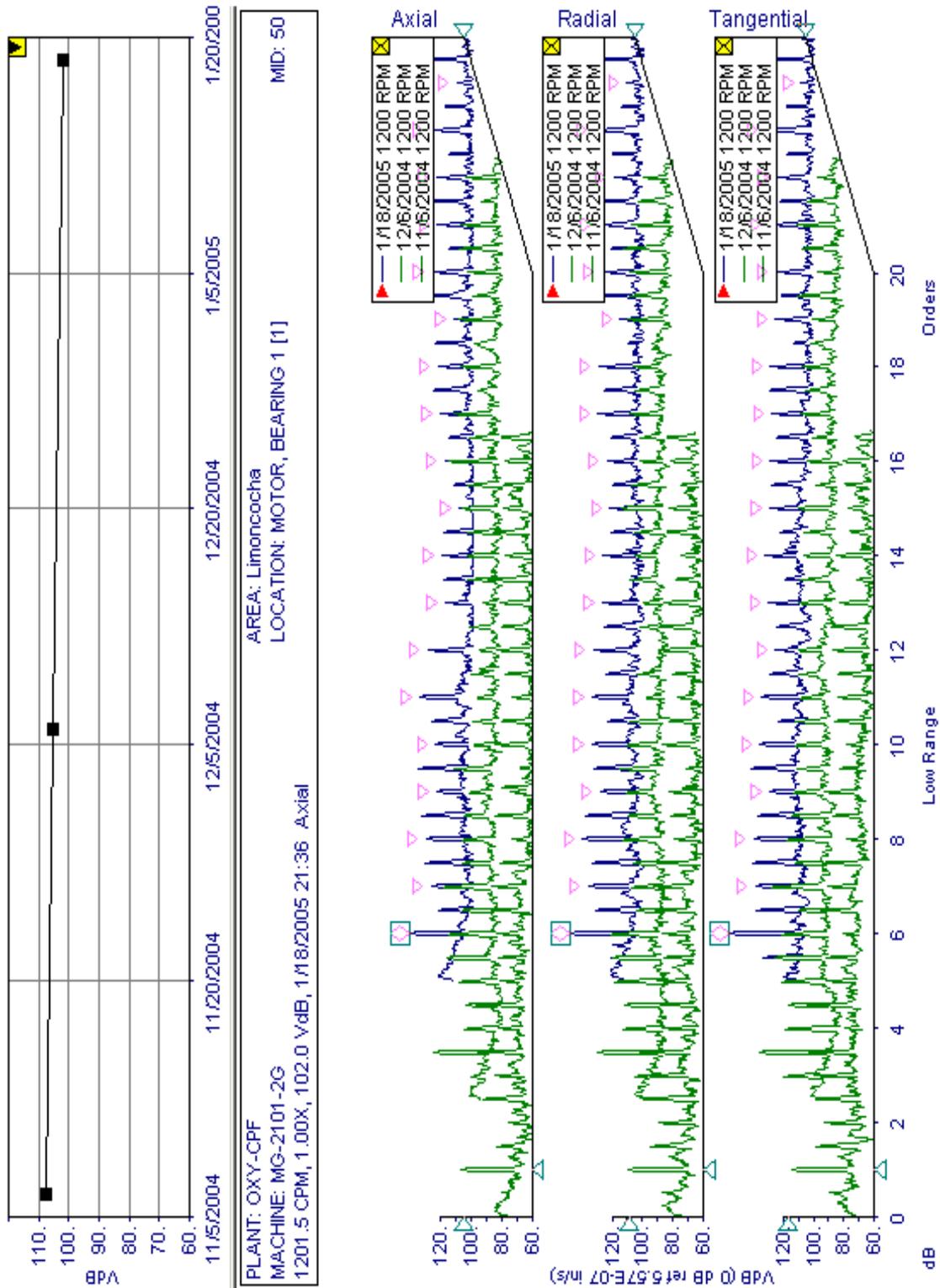


Generador, Posición 4 (GB2)

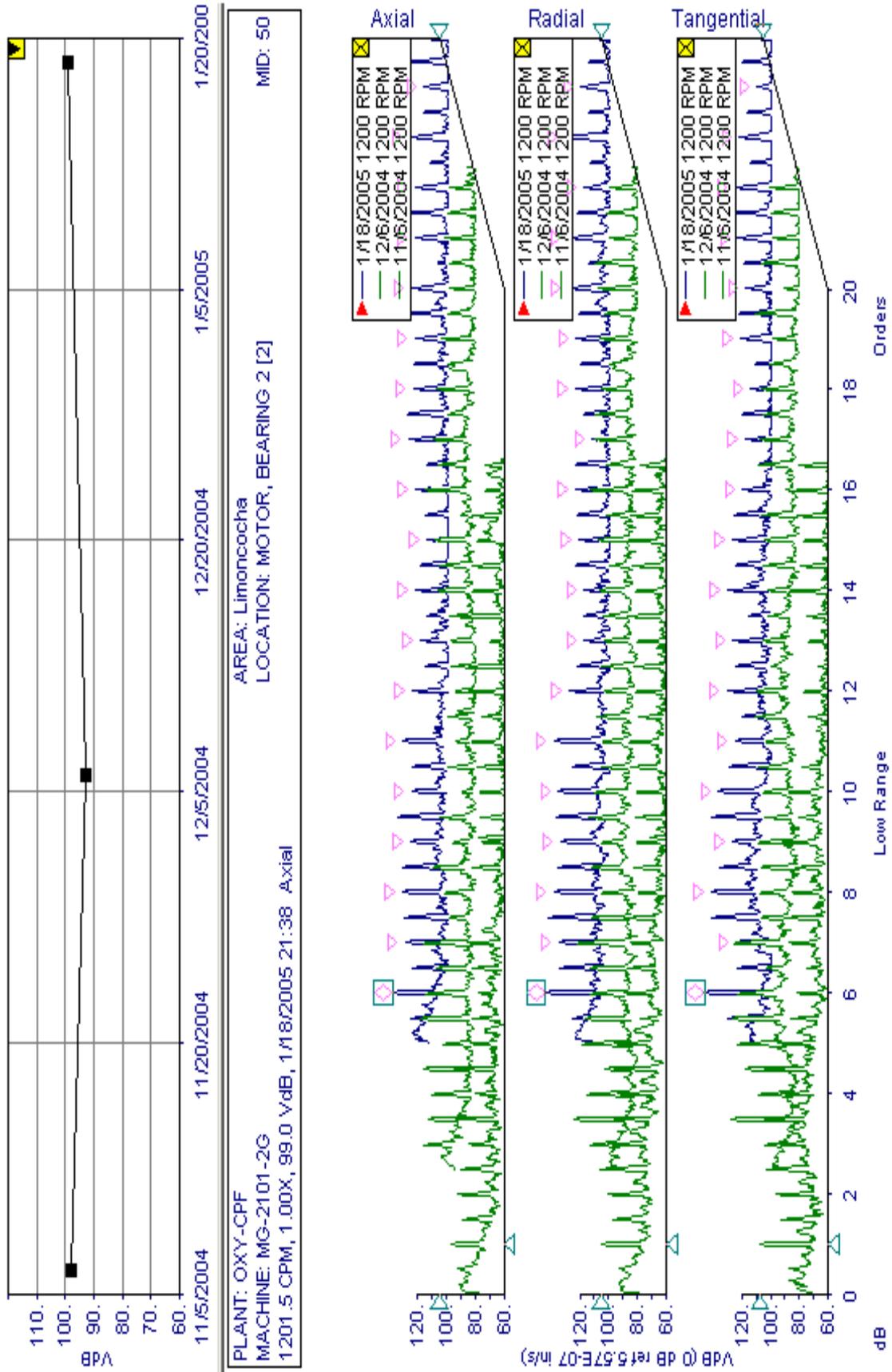
Gráficas de Cascada y Tendencia

Máquina: MG-2101-2G
Ubicación: Limoncocha

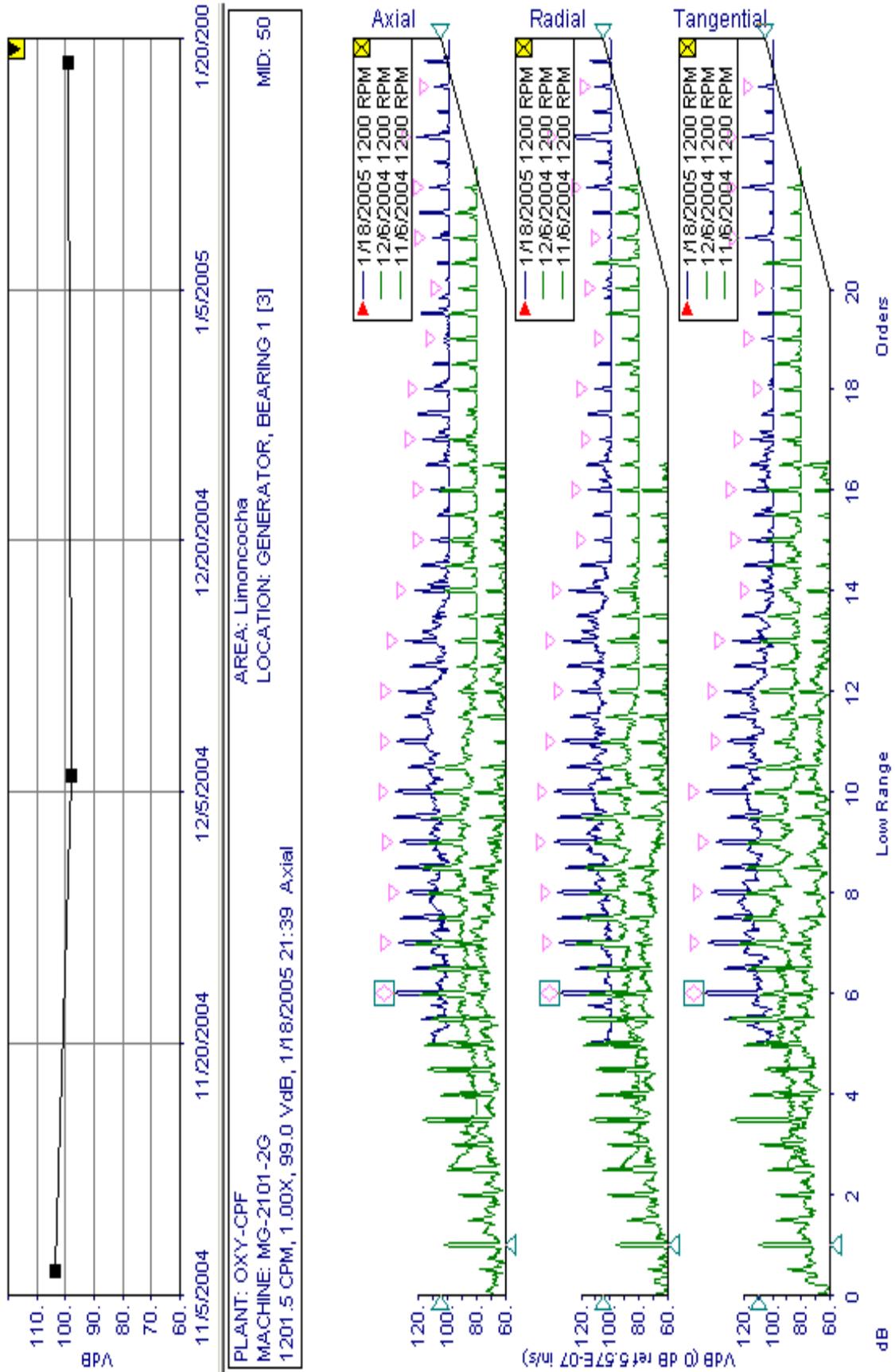
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



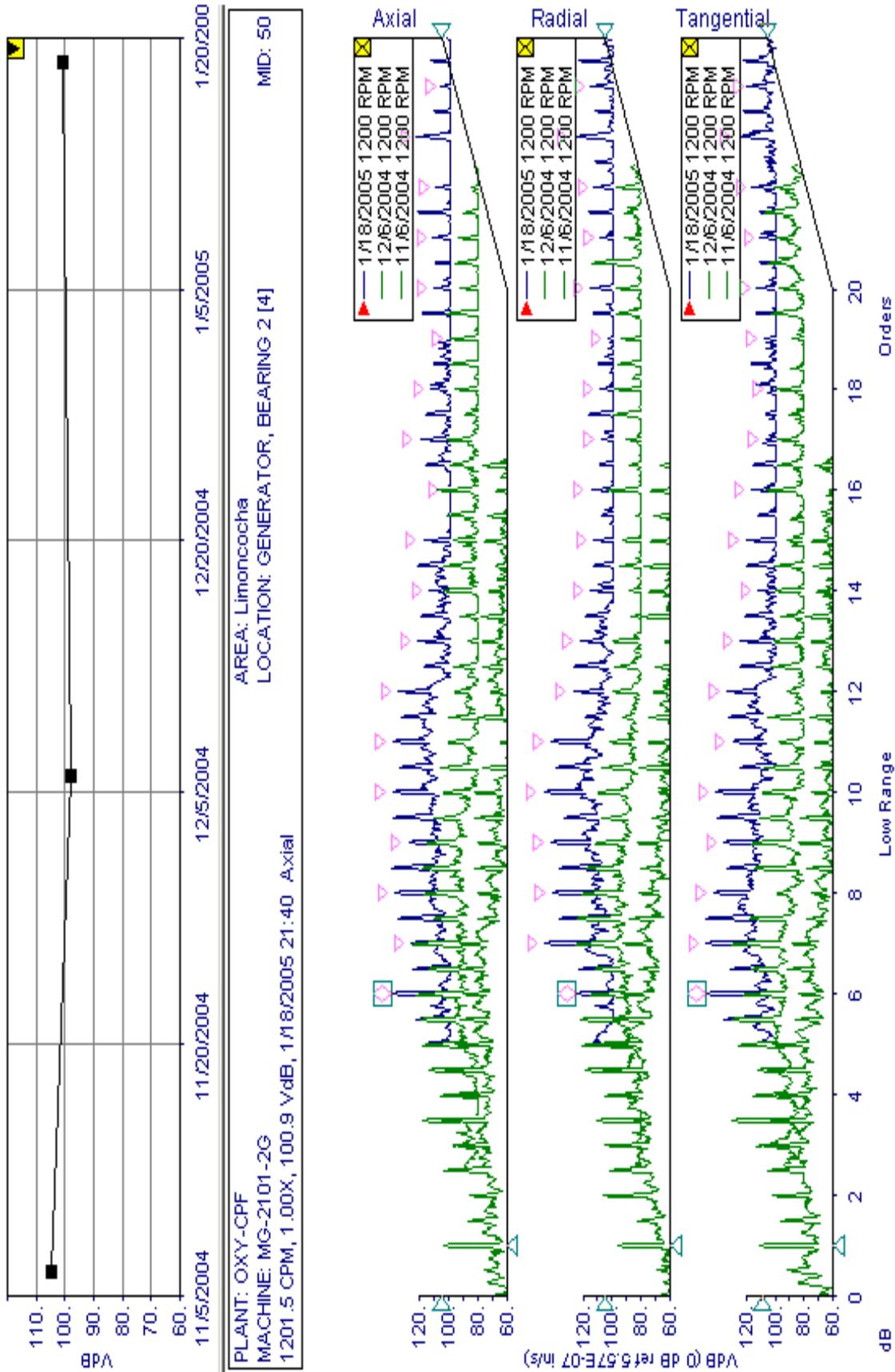
2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



3.- Rodamiento del generador, lado conducido.



4.- Rodamiento del generador, lado libre.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS													
Máquina: MG-2101-2G		Fecha: 6 de Noviembre del 2004			Período análisis de Tendencias: 6 Noviembre/2004-18 Enero/2005								
Niveles de Alarma													
Unidades		Bueno				Regular				Malo			
in/s		0.5				0.6				0.7			
Vdb		119.1				120.6				122			
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración								Observaciones	Tendencia	Recomendaciones	
		Axial				Radial							Tang.
		B	R	M	B	R	M	B	R	M			
Motor, MB1	0,5 X	x			x					x			Los síntomas son una indicación de que el equipo tiene problemas leves de desbalanceo.
	1X	x			x					x			
	2X	x			x					x			
	3X	x			x					x			
	4X	x			x					x			
	6X,GP y EF	x			x					x			
	8X	x			x					x			
	12X,PR	x			x					x			
Motor, MB2	0,5 X	x			x					x		La ausencia de síntomas de desbalanceo en este lado del motor confirman que el problema de desbalanceo es sumamente leve.	
	1X	x			x					x			
	2X	x			x					x			
	3X	x			x					x			
	4X	x			x					x			
	6X,GP y EF	x			x					x			
	8X	x			x					x			
	12X,PR	x			x					x			

Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración										Observaciones	Tendencia	Recomendaciones				
		Axial					Radial								Tang.			
		B	R	M	B	R	M	B	R	M	B				R	M		
Gen., GB1	0,5 X	x					x									Los niveles de vibración son normales. Se evidencia la presencia de vibraciones aleatorias.	No se ha detectado variación en los síntomas o en los niveles mostrados por el espectro en mediciones anteriores.	La vibración aleatoria es una indicación de soltura mecánica.
	1X	x					x											
	2X	x					x											
	3X	x					x											
	4X	x					x											
	6X,GP y EF	x					x											
	8X	x					x											
12X,PR	x					x												
Gen., GB2	0,5 X	x					x									El espectro no tiene indicios de fallas graves, se presentan vibraciones aleatorias en todas las direcciones.	El espectro se ha mantenido constante, sin evidencias de fallas.	Se recomienda realizar una revisión del generador por problemas de soltura o aflojamiento.
	1X	x					x											
	2X	x					x											
	3X	x					x											
	4X	x					x											
	6X,GP y EF	x					x											
	8X	x					x											
12X,PR	x					x												

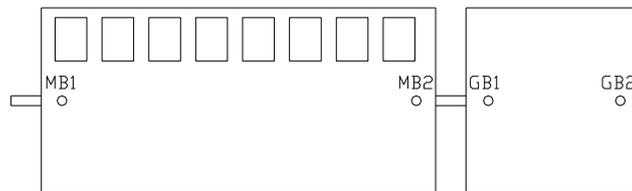
HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MG-2101-9G

Ubicación: Limoncocha

Esquema General de la Máquina

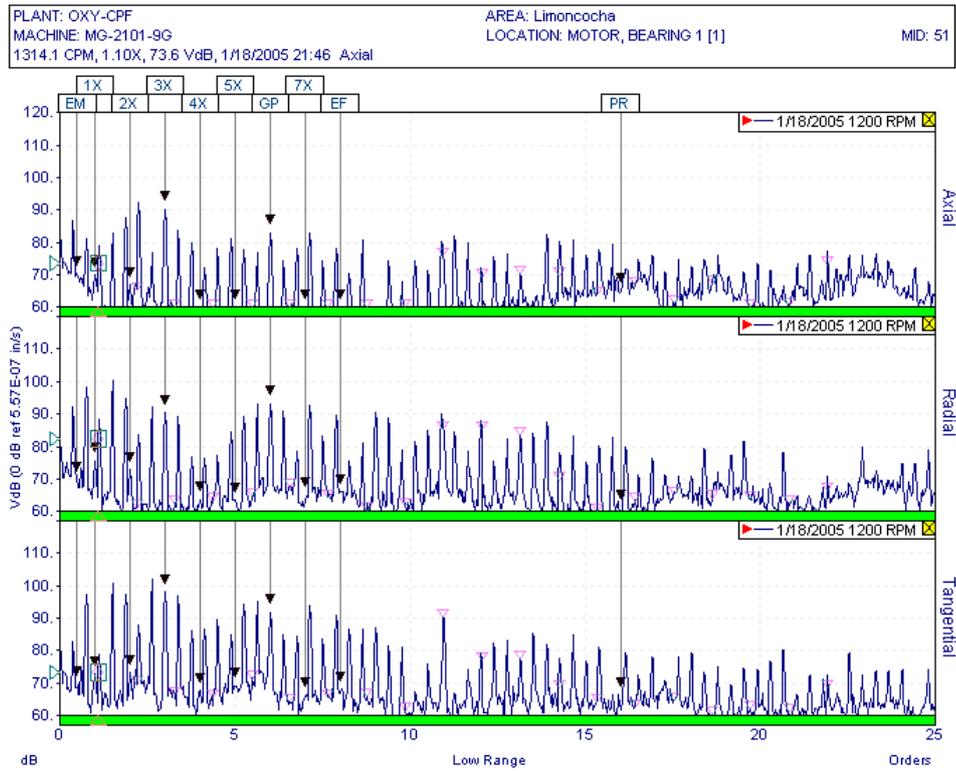
Sets Motor Generador Waukesha AT27-SI



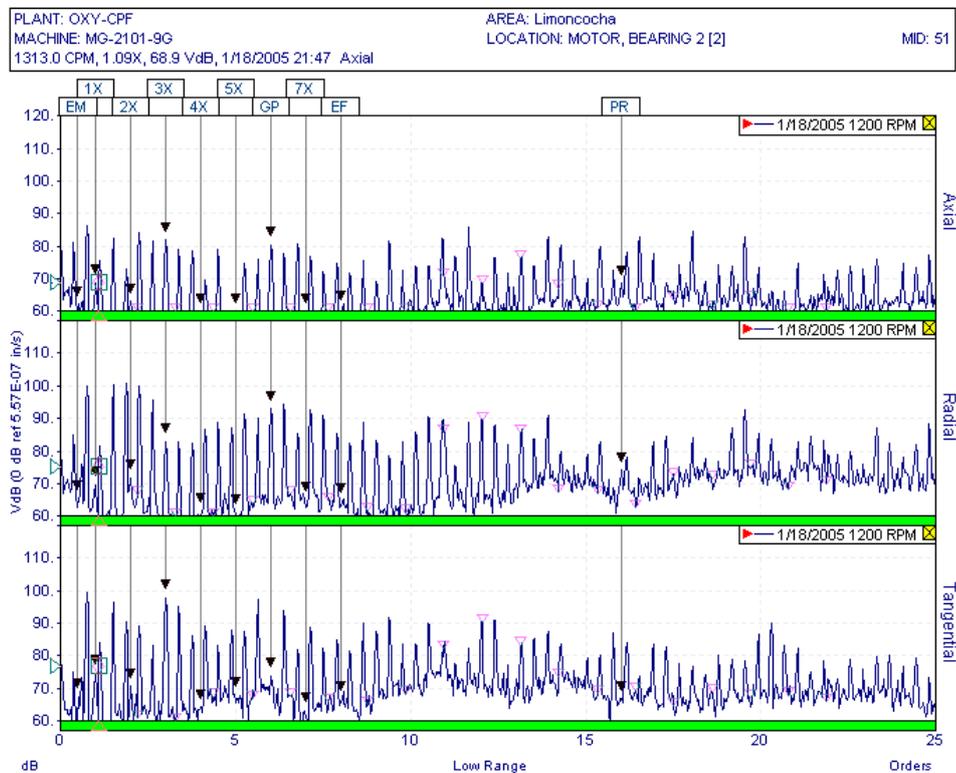
Información General

Velocidad Nominal (rpm): 1200
Número de Cilindros: 16
Engranés Bomba de Aceite:
Engranés Bomba de Agua:
Engranés Distribución:
Engrane Auxiliar:
Polos del Generador: 6
Alabes vent. Generador:
Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial
Carga del Equipo (kW): 1200

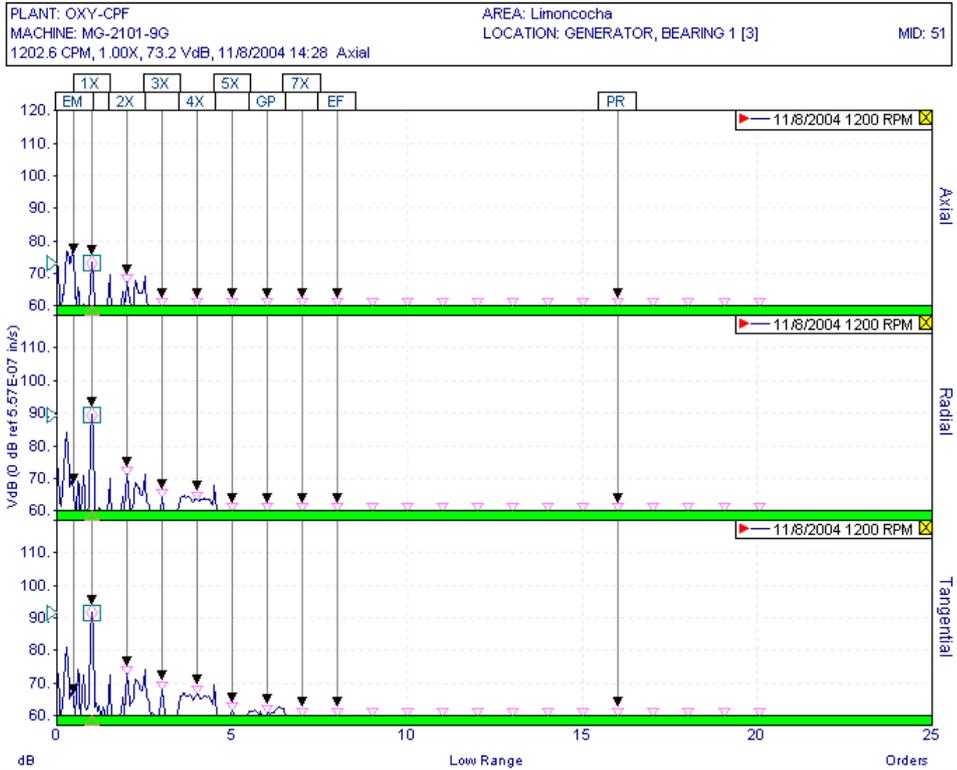
ESPECTROS DE REFERENCIA



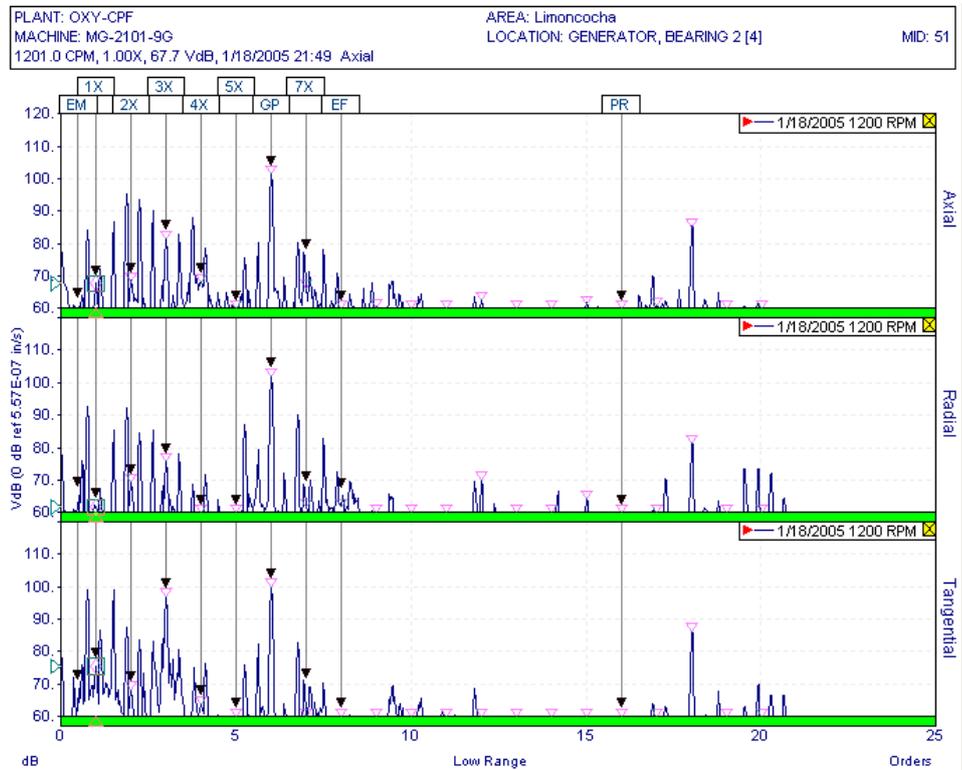
Motor, Posición 1 (MB1)



Motor, Posición 2 (MB2)



Generador, Posición 3 (GB1)



Generador, Posición 4 (GB2)

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS											
Máquina: MG-2101-9G			Fecha: 18 de Enero del 2005			Período análisis de Tendencias: 18 Enero del 2005					
Niveles de Alarma											
Unidades			Bueno			Regular			Malo		
in/s			0.5			0.6			0.7		
Vdb			119.1			120.6			122		
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración						Observaciones	Tendencia	Recomendaciones	
		Axial		Radial		Tang.					
		B	R	B	R	B	R				
Motor, MB1	0,5 X	x		x		x		x	Los niveles de vibración son muy bajos, no existe evidencia de fallas en el generador.	Este es un generador nuevo y los espectros tomados nos sirven de referencia para futuras mediciones.	Continuar con el monitoreo de vibraciones para detectar a tiempo cualquier cambio en la condición del generador.
	1X	x		x		x		x			
	2X	x		x		x		x			
	3X	x		x		x		x			
	4X	x		x		x		x			
	6X,GP	x		x		x		x			
	8X,EF	x		x		x		x			
	16X,PR	x		x		x		x			
Motor, MB2	0,5 X	x		x		x		x	Los niveles de vibración son normales. Existe vibración aleatoria.		No hay recomendaciones
	1X	x		x		x		x			
	2X	x		x		x		x			
	3X	x		x		x		x			
	4X	x		x		x		x			
	6X,GP	x		x		x		x			
	8X,EF	x		x		x		x			
	16X,PR	x		x		x		x			

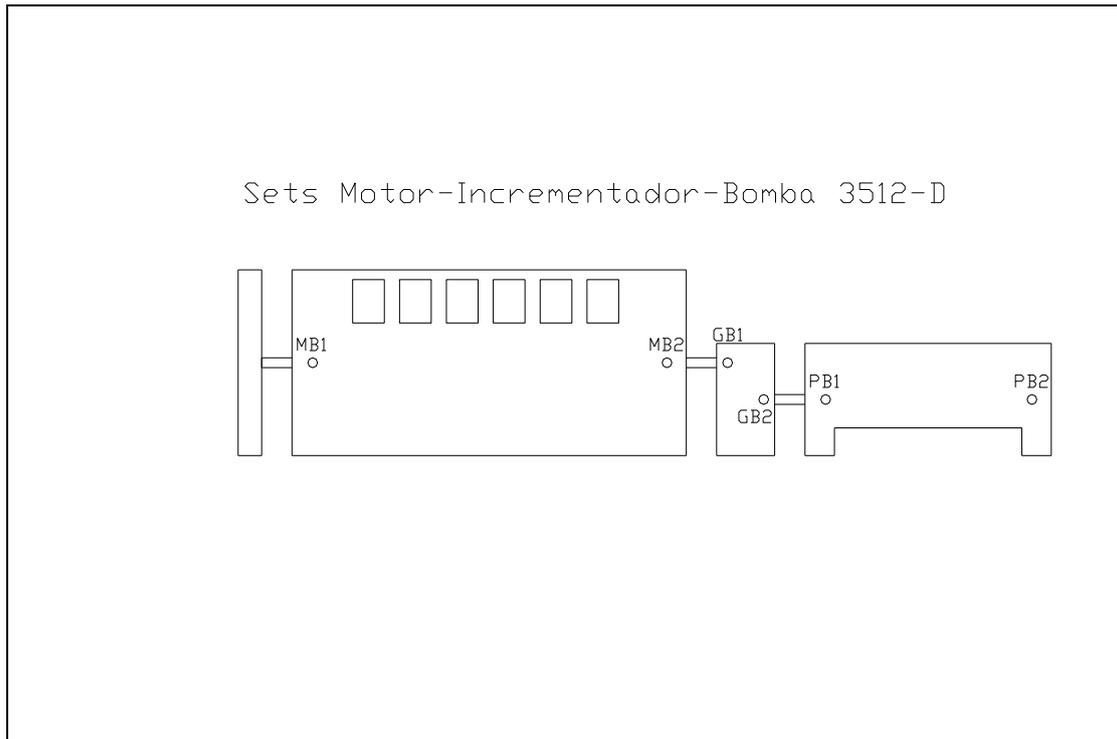
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración												Observaciones	Tendencia	Recomendaciones			
		Axial						Radial									Tang.		
		B	R	M	B	R	M	B	R	M	B	R	M						
Gen., GB1	0,5 X	x					x										Los niveles de vibración son normales, no hay síntomas de fallas.		No hay recomendaciones
	1X	x					x												
	2X	x					x												
	3X	x					x												
	4X	x					x												
	6X,GP	x					x												
	8X,EF	x					x												
16X,PR	x					x													
Gen., GB2	0,5 X	x					x										Los niveles de vibración son normales. Existe un pico alto de vibración a la velocidad de paso de los polos del generador.		No hay recomendaciones
	1X	x					x												
	2X	x					x												
	3X	x					x												
	4X	x					x												
	6X,GP	x					x												
	8X,EF	x					x												
16X,PR	x					x													

HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MP-205-A

Ubicación: SRF

Esquema General de la Máquina

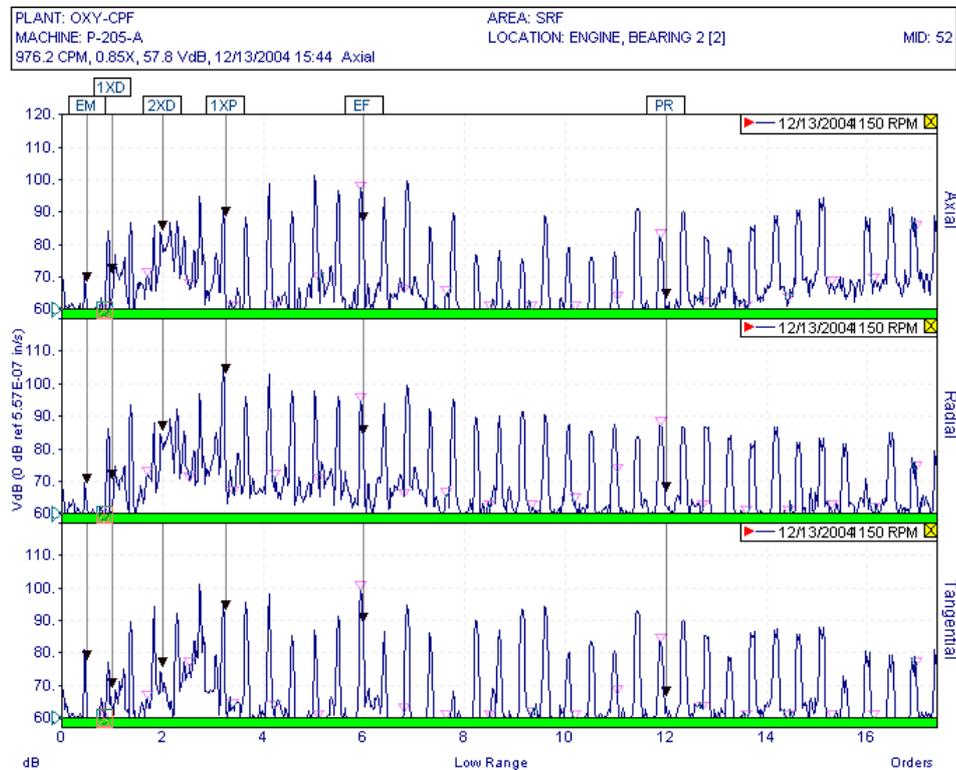
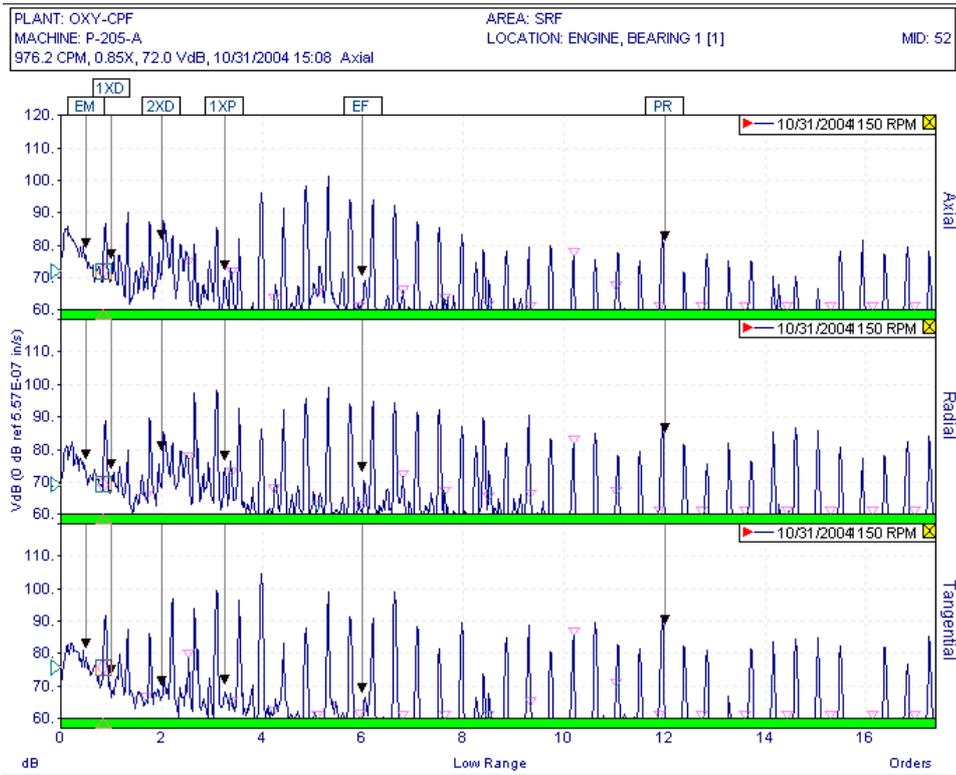


Información General

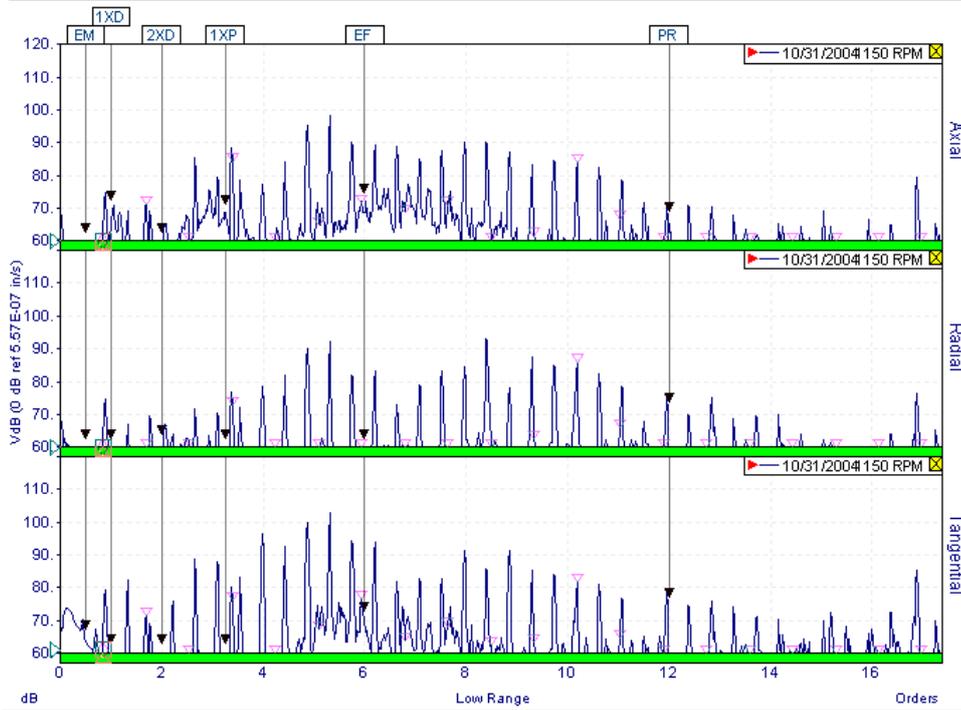
Velocidad Nominal (rpm): 1100
Número de Cilindros: 12
Engranés Bomba de Aceite: 14
Engranés Bomba de Agua: 14
Engranés Distribución: 92
Engrane Auxiliar: 183
Polos del Generador:
Alabes Ventilador: 12
Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial
Carga del Equipo (kW): 500

Etapas del Incrementador: 2
Relación de Velocidad: 3.25
Tipo de Apoyos: Rodamientos
Tipo de Bomba: Centrifuga
Número de Etapas:
Número de Paletas:
Tipo de Apoyo: Rodamientos

ESPECTROS DE REFERENCIA

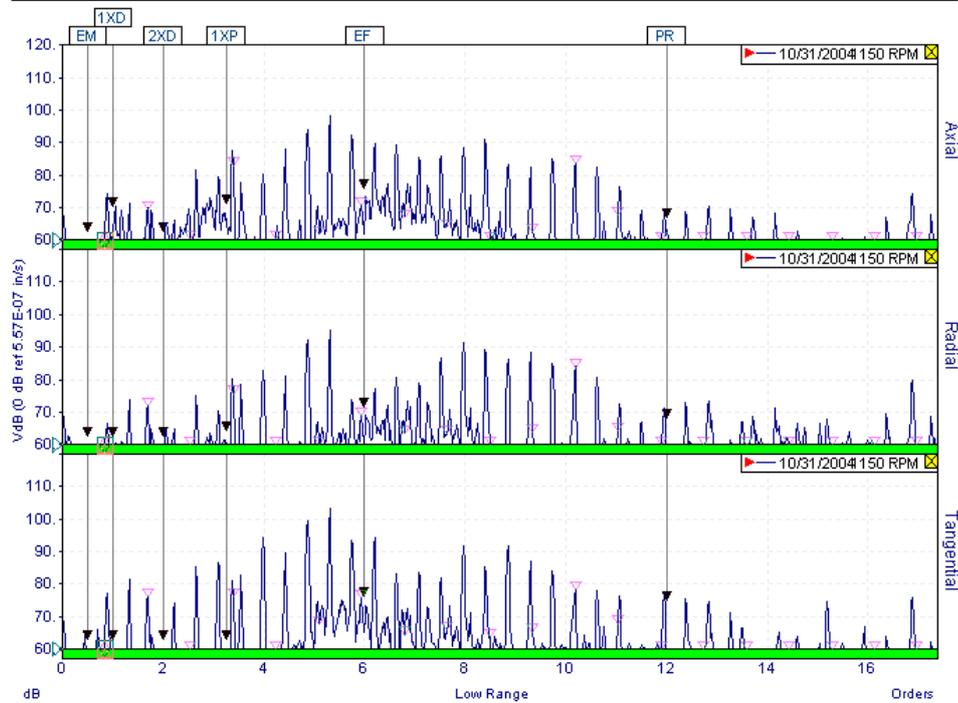


PLANT: OXY-CPF AREA: SRF
 MACHINE: P-205-A LOCATION: GEARBOX, BEARING 3 [3] MID: 52
 976.2 CPM, 0.85X, 54.7 VdB, 10/31/2004 15:05 Axial



Incrementador, Posición 3 (GB1)

PLANT: OXY-CPF AREA: SRF
 MACHINE: P-205-A LOCATION: GEARBOX, BEARING 4 [4] MID: 52
 976.2 CPM, 0.85X, 53.7 VdB, 10/31/2004 15:13 Axial



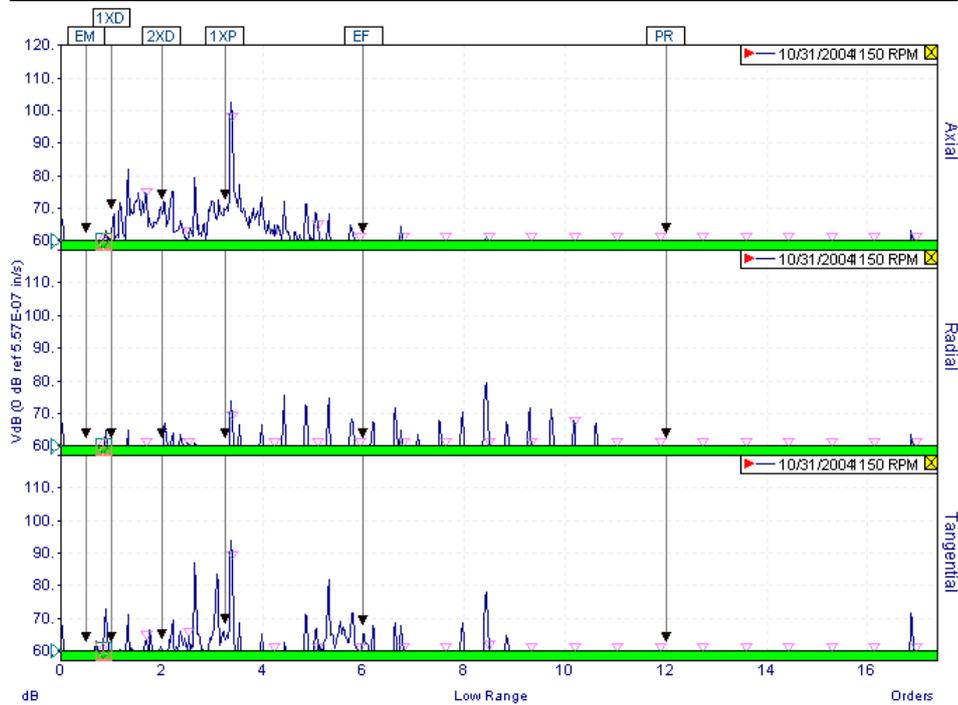
Incrementador, Posición 4 (GB2)

PLANT: OXY-CPF AREA: SRF
 MACHINE: P-205-A LOCATION: PUMP, BEARING 5 [5] MID: 52
 976.2 CPM, 0.85X, 50.2 VdB, 10/31/2004 15:15 Axial



Bomba, Posición 5 (PB1)

PLANT: OXY-CPF AREA: SRF
 MACHINE: P-205-A LOCATION: PUMP, BEARING 6 [6] MID: 52
 976.2 CPM, 0.85X, 49.2 VdB, 10/31/2004 15:16 Axial

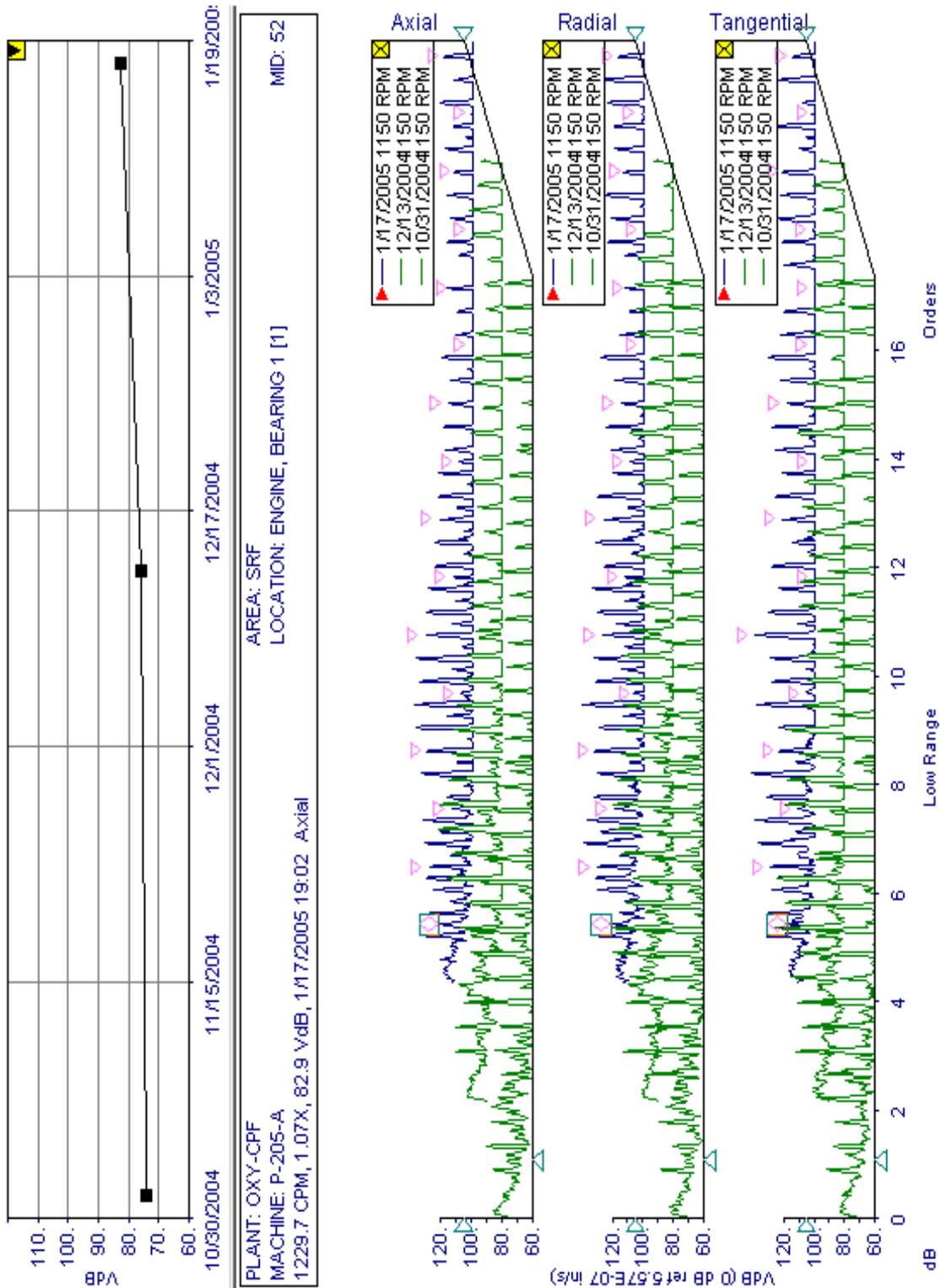


Bomba, Posición 6 (PB2)

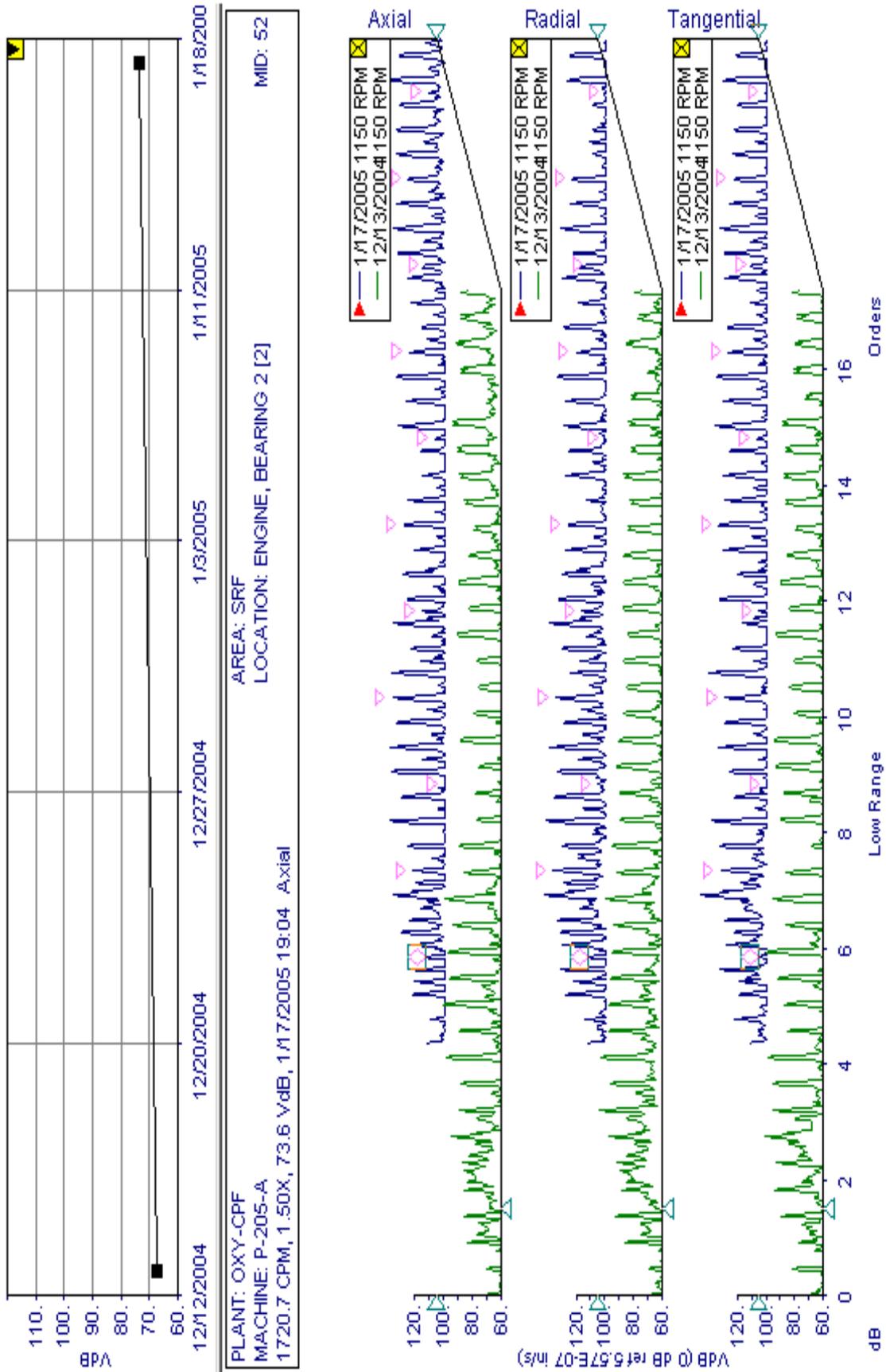
Gráficas de Cascada y Tendencia

Máquina: MP-205-A
Ubicación: SRF

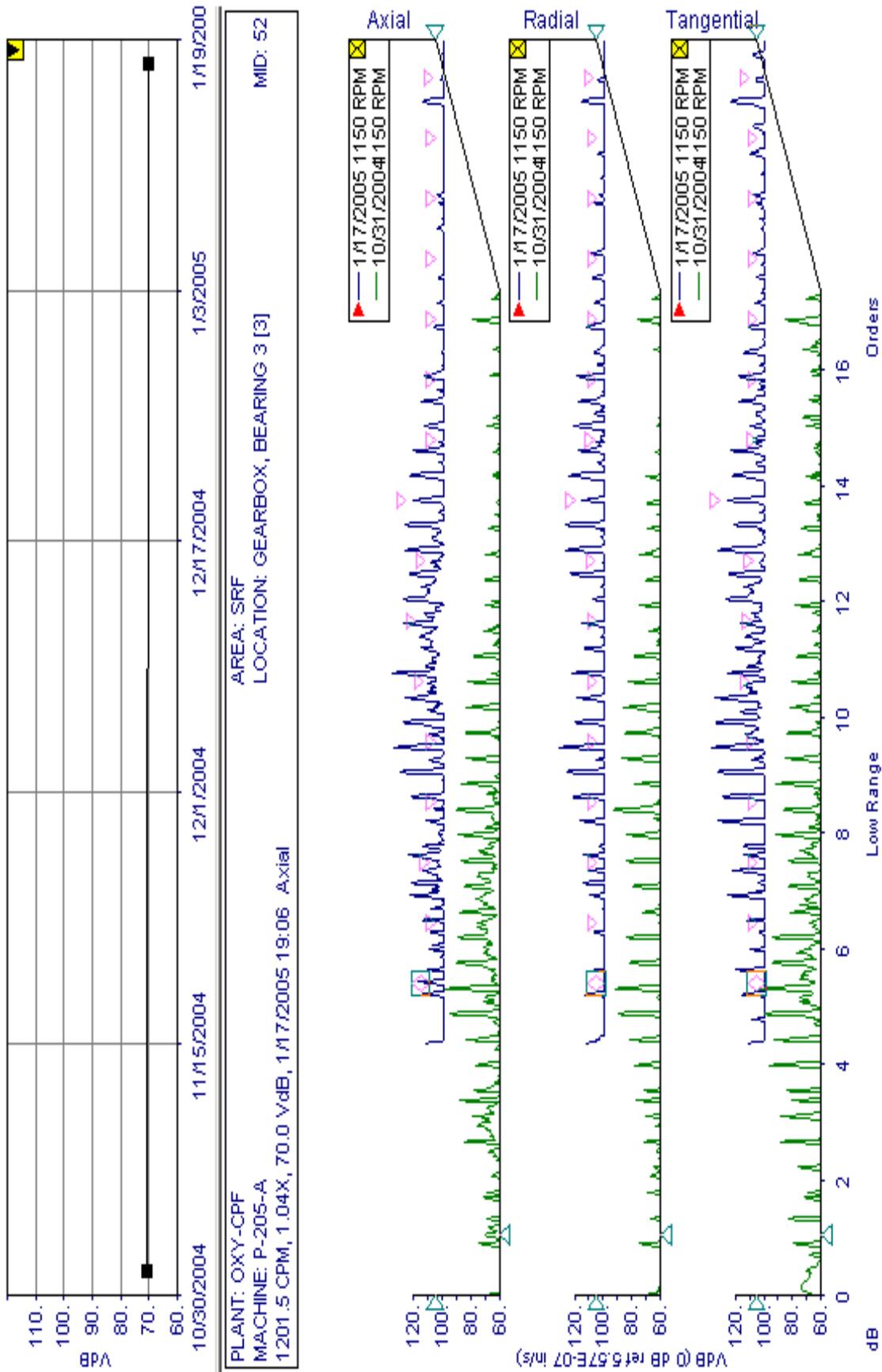
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



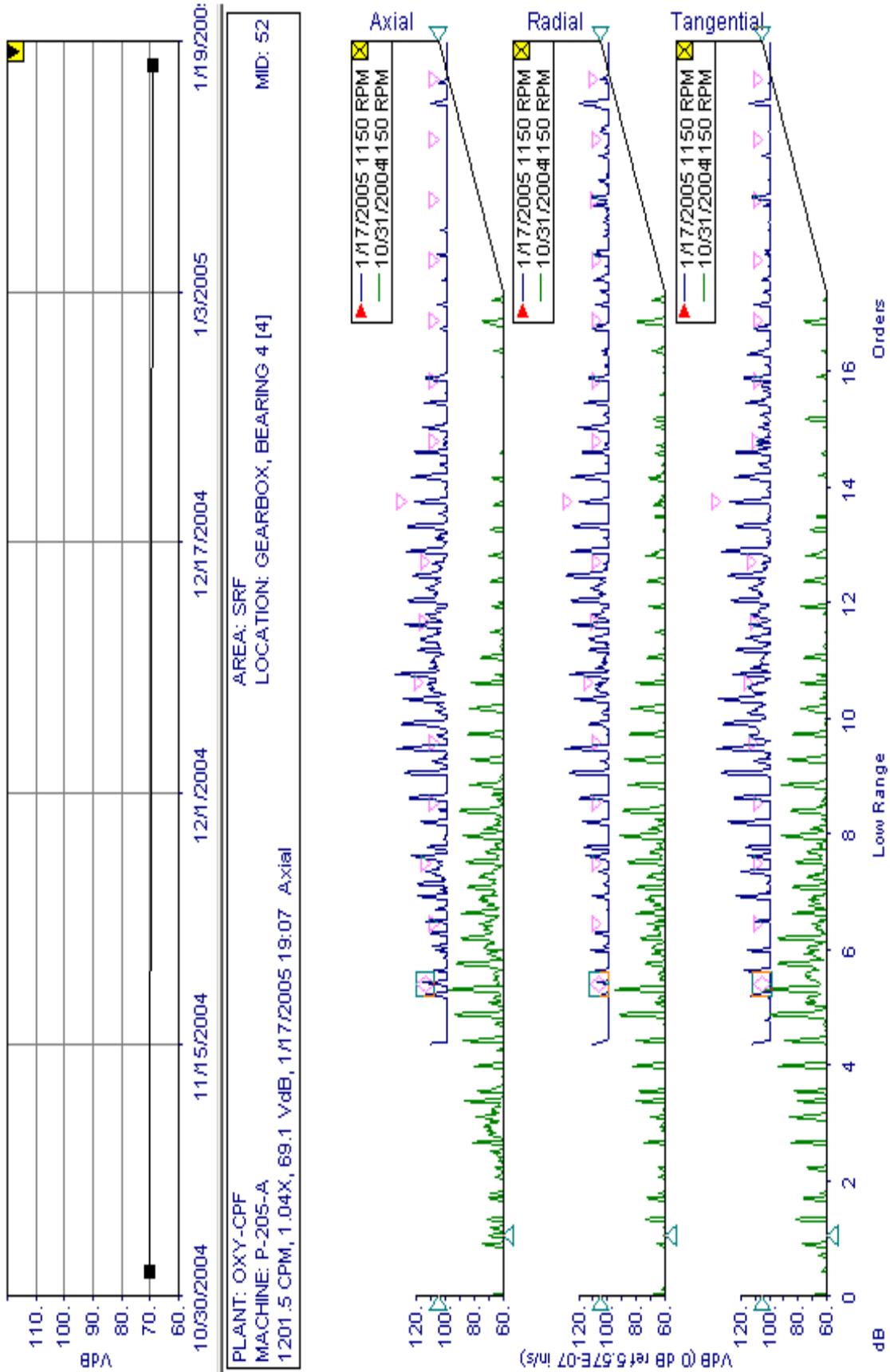
2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



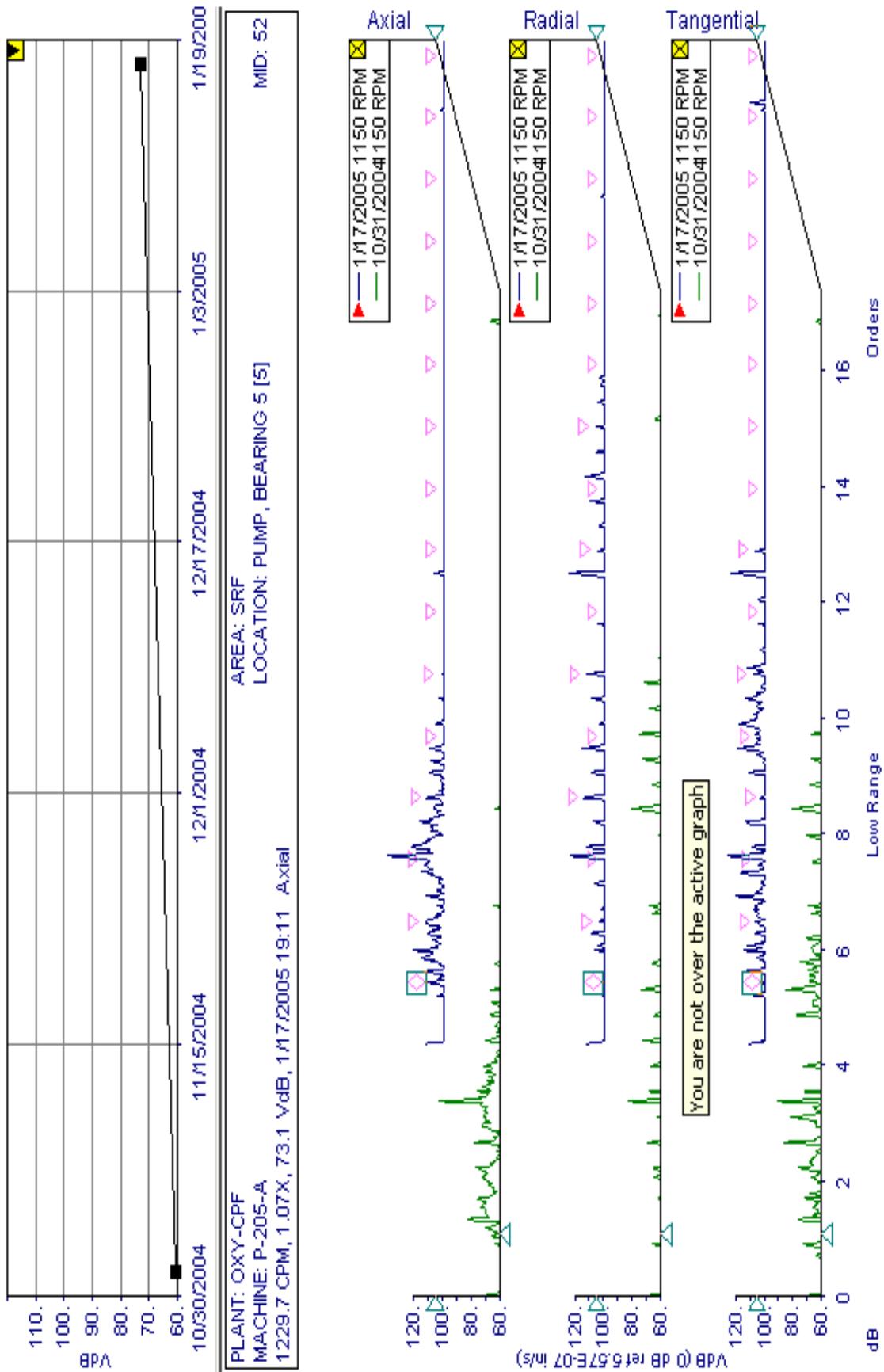
3.- Rodamiento del incrementador, lado conducido.



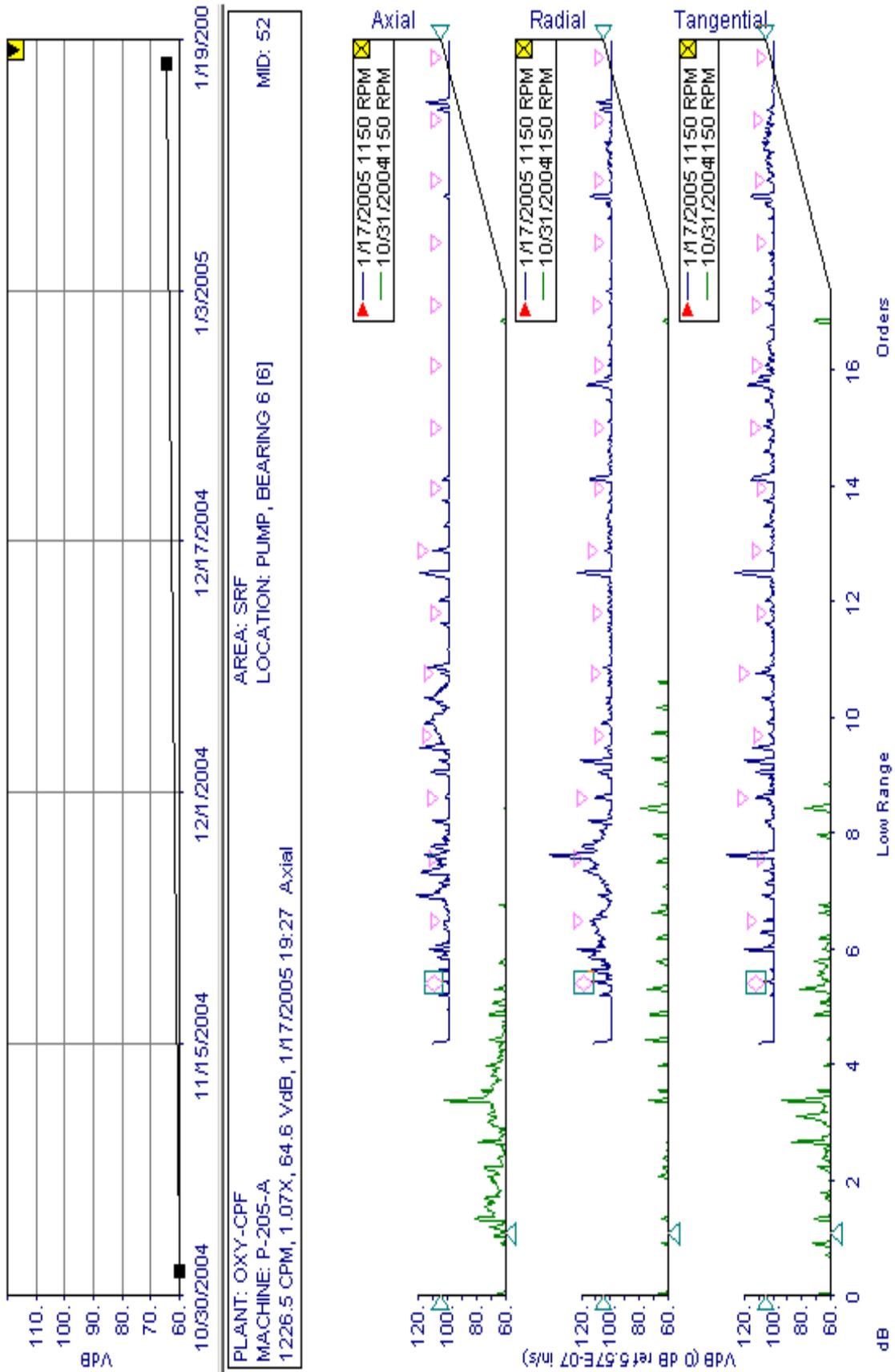
4.- Rodamiento del incrementador, lado conductor.



5.- Rodamiento de la bomba, lado conducido.



6.- Rodamiento de la bomba, lado libre.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS											
Máquina: MP-205-A			Fecha: 31 de Octubre del 2004			Período análisis de Tendencias: 31 Octubre/2004-17 Enero/2005					
Niveles de Alarma											
Unidades		Bueno			Regular			Malo			
in/s		0.5			0.6			0.7			
Vdb		119.1			120.6			122			
in/s		0.1			0.15			0.225			
Vdb		105.1			108.6			112.1			
in/s		0.125			0.2			0.3			
Vdb		107.0			111.1			114.6			
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración						Observaciones	Tendencia	Recomendaciones	
		Axial		Radial		Tang.					
		B	R	B	R	B	R	M			
Motor, MB1	0.5 XD	x		x		x		x	Los niveles de vibración son bajos, La vibración en 2X axial es ligeramente mayor que en 1X.	Podemos observar en las gráficas de tendencia que la vibración en 1X esta aumentando pero se encuentra muy por debajo de los límites admisibles.	Los síntomas de desalineación son muy ligeros para tomar una acción correctiva. Continuar con el monitoreo para detectar a tiempo cualquier cambio en la condición del equipo.
	1XD	x		x		x		x			
	2XD	x		x		x		x			
	1XP	x		x		x		x			
	2XP	x		x		x		x			
	6X:EF	x		x		x		x			
	8X	x		x		x		x			
	12X:PR	x		x		x		x			
Motor, MB2	0.5 XD	x		x		x		x	Los niveles de vibración son normales y están muy por debajo de los límites admisibles. La vibración en 2X axial es mayor que en 1X axial.	Se evidencia un ligero incremento en los niveles de vibración en el gráfico de tendencias.	La desalineación es muy ligera. No es necesario realizar ninguna acción correctiva. Continuar con el monitoreo para detectar el momento en que estas fallas puedan ser perjudiciales.
	1XD	x		x		x		x			
	2XD	x		x		x		x			
	1XP	x		x		x		x			
	2XP	x		x		x		x			
	6X:EF	x		x		x		x			
	8X	x		x		x		x			
	12X:PR	x		x		x		x			
Inc., GB1	0.5 XD	x		x		x		x	Los niveles de vibración son normales, no hay síntomas de fallas.	El espectro y los niveles de vibración se han mantenido constantes durante el periodo de monitoreo.	No hay recomendaciones
	1XD	x		x		x		x			
	2XD	x		x		x		x			
	1XP	x		x		x		x			
	2XP	x		x		x		x			
	6X:EF	x		x		x		x			
	8X	x		x		x		x			
	12X:PR	x		x		x		x			

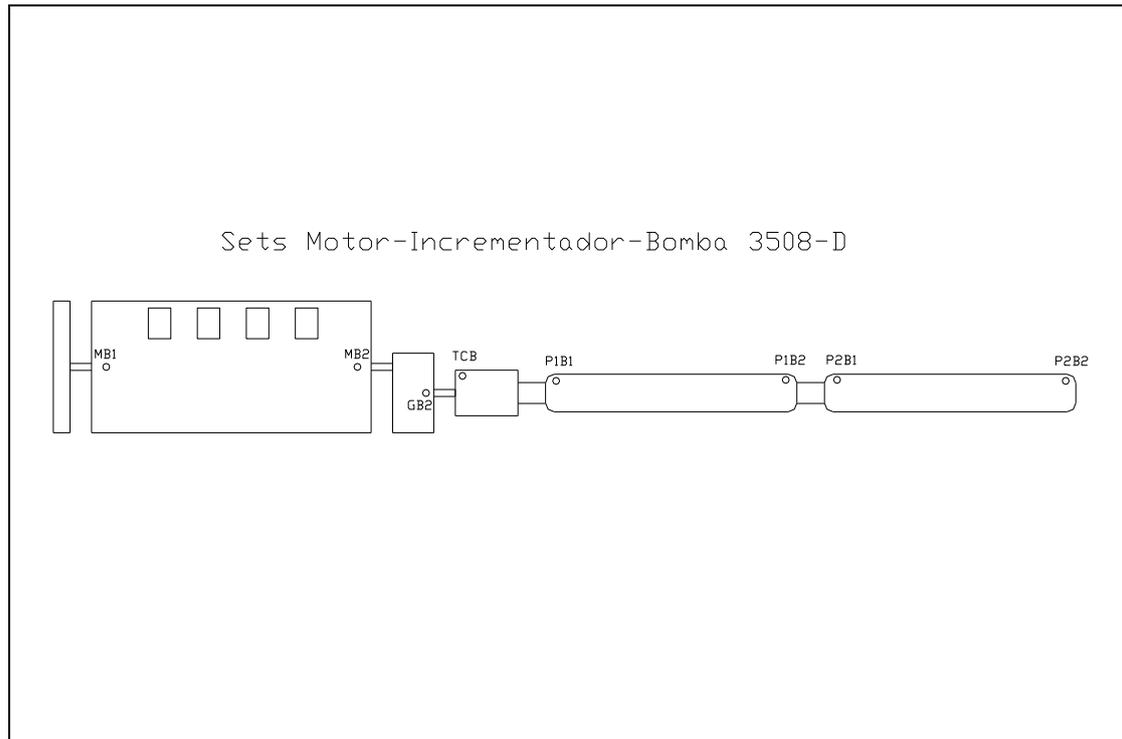
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración												Observaciones	Tendencia	Recomendaciones		
		Axial						Radial									Tang.	
		B	R	M	B	R	M	B	R	M	B	R	M					
Inc., GB2	0,5 XD	x			x				x							Los niveles de vibración son normales, el espectro no muestra síntomas de fallas.	No se ha evidenciado cambios en los niveles de vibración o en la forma del espectro.	No hay recomendaciones
	1XD	x			x				x									
	2XD	x			x				x									
	1XP	x			x				x									
	2XP	x			x				x									
	6X,EF	x			x				x									
	8X	x			x				x									
12X,PR	x			x				x										
Bomba, PB1	0,5 XD	x			x				x							Los niveles de vibración son normales. Existe vibración aleatoria.	El nivel de vibraciones ha aumentado ligeramente	Las vibraciones aleatorias son producto de las turbulencias generadas a la entrada de la bomba. Se recomienda vigilar la bomba para verificar si el nivel de vibraciones continua en aumento.
	1XD	x			x				x									
	2XD	x			x				x									
	1XP	x			x				x									
	2XP	x			x				x									
	6X,EF	x			x				x									
	8X	x			x				x									
12X,PR	x			x				x										
Bomba, PB2	0,5 XD	x			x				x							Los niveles de vibración son normales, existe vibración aleatoria.	El nivel de vibraciones ha aumentado ligeramente.	Se recomienda vigilar la bomba por un posible incremento del nivel de vibraciones.
	1XD	x			x				x									
	2XD	x			x				x									
	1XP	x			x				x									
	2XP	x			x				x									
	6X,EF	x			x				x									
	8X	x			x				x									
12X,PR	x			x				x										

HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MP-330-A

Ubicación: Jivino B

Esquema General de la Máquina

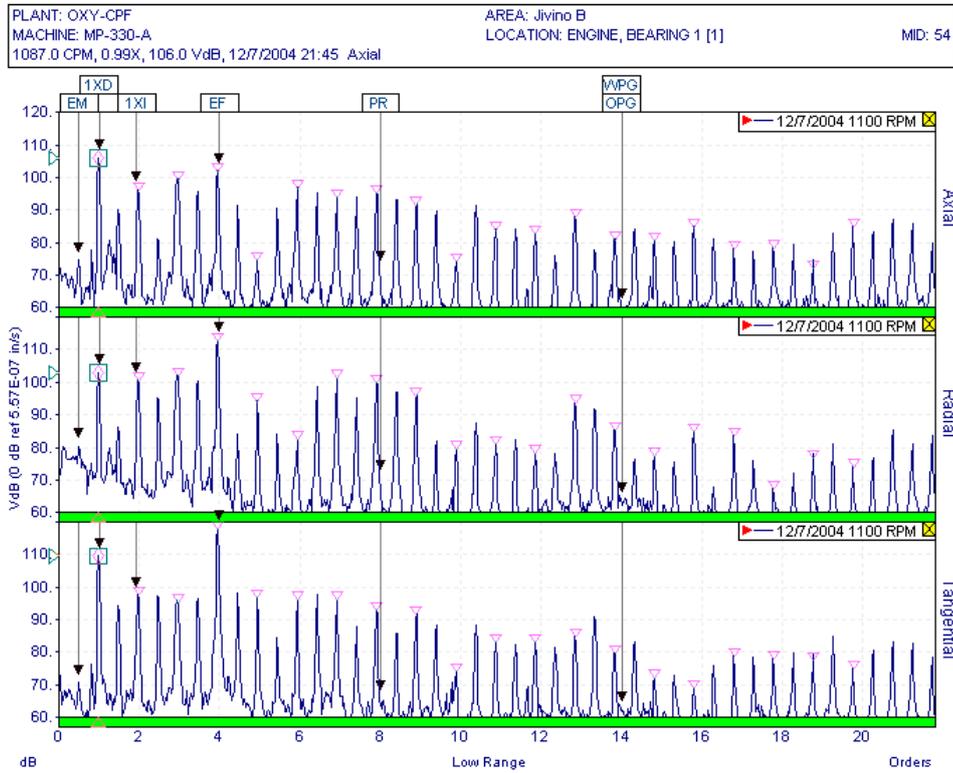


Información General

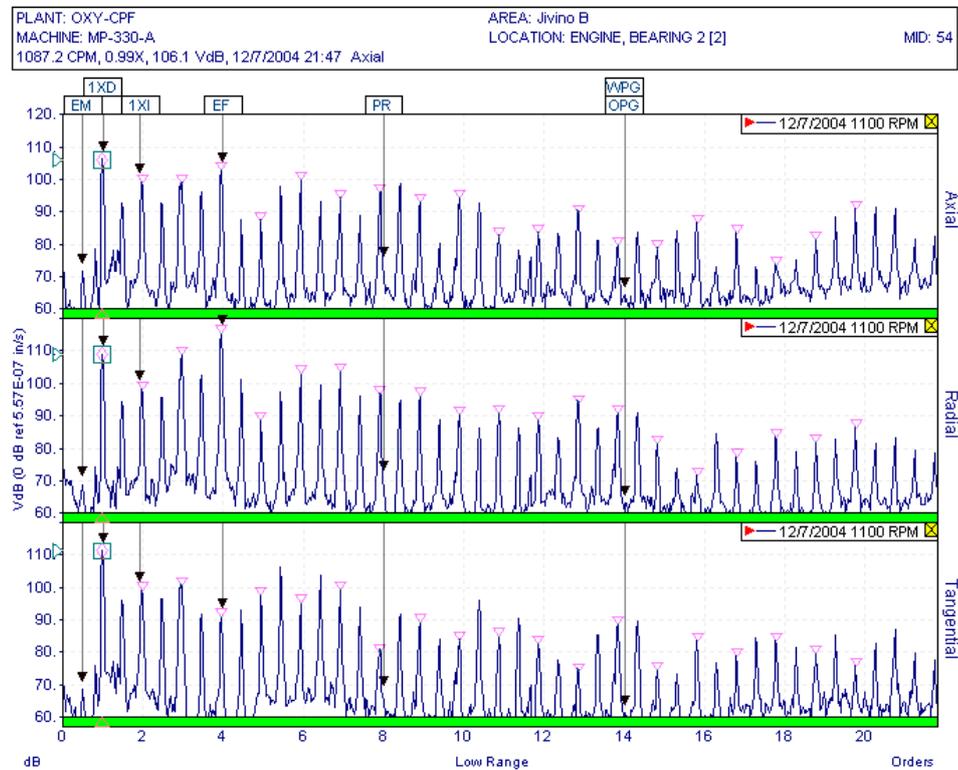
Velocidad Nominal (rpm): 1100
Número de Cilindros: 8
Engranés Bomba de Aceite: 14
Engranés Bomba de Agua: 14
Engranés Distribución: 92
Engrane Auxiliar: 183
Polos del Generador:
Alabes Ventilador: 12
Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial
Carga del Equipo (kW): 350

Etapas del Incrementador: 2
Relación de Velocidad: 2.9474
Tipo de Apoyos: Rodamientos
Tipo de Bomba: Centrifuga
Número de Etapas:
Número de Paletas:
Tipo de Apoyo: Rodamientos

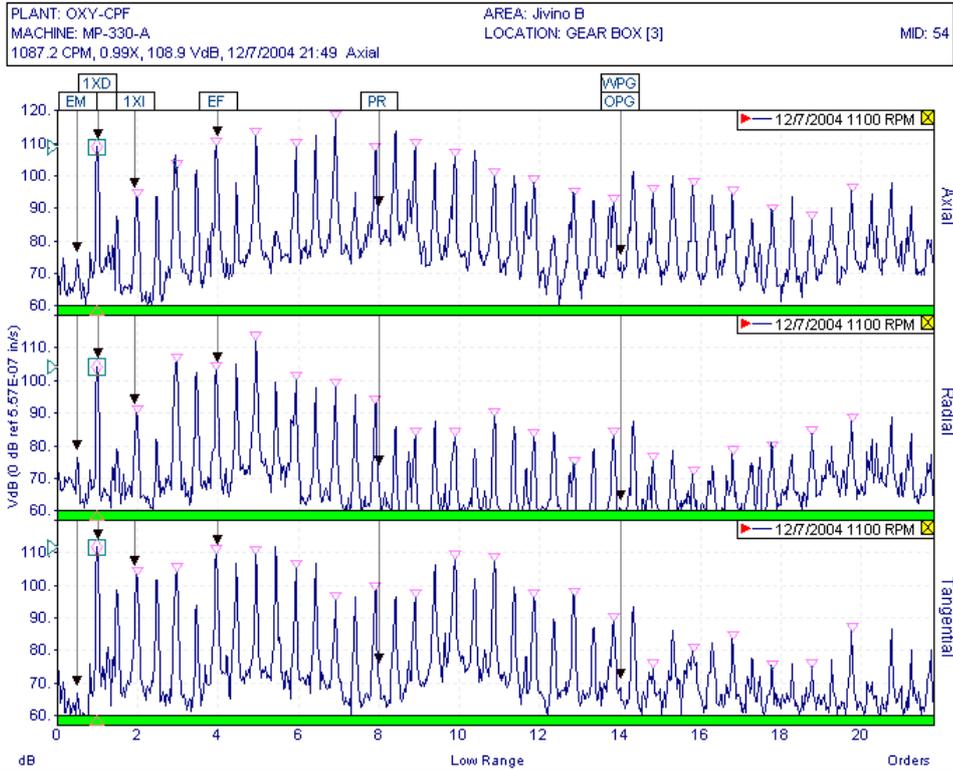
ESPECTROS DE REFERENCIA



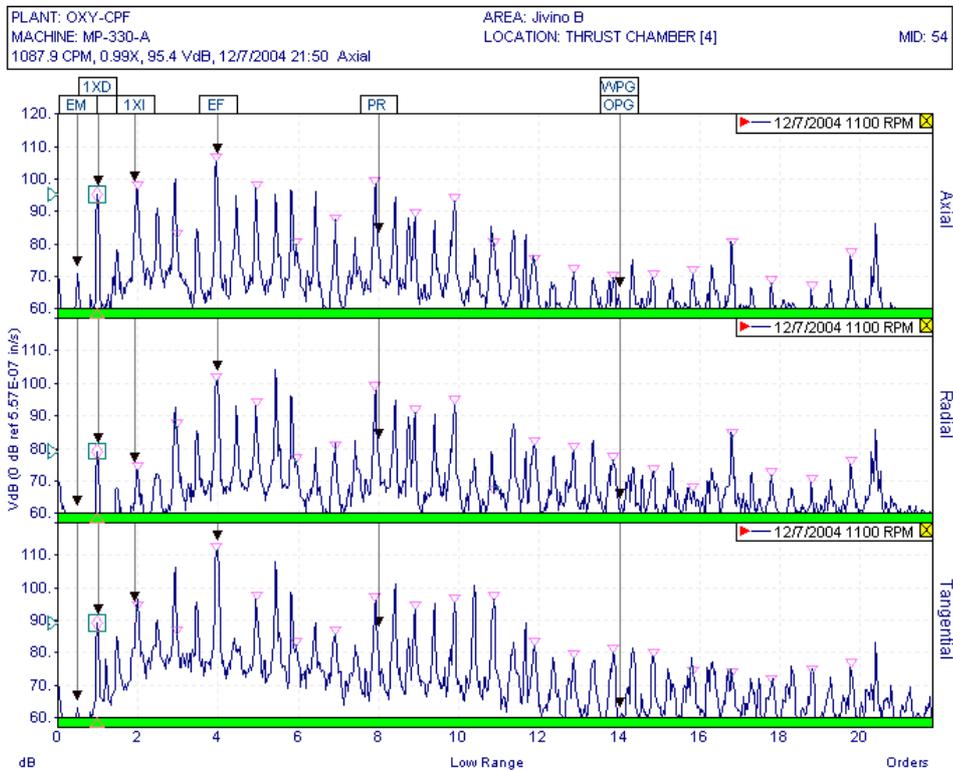
Motor, Posición 1 (MB1)



Motor, Posición 2 (MB2)

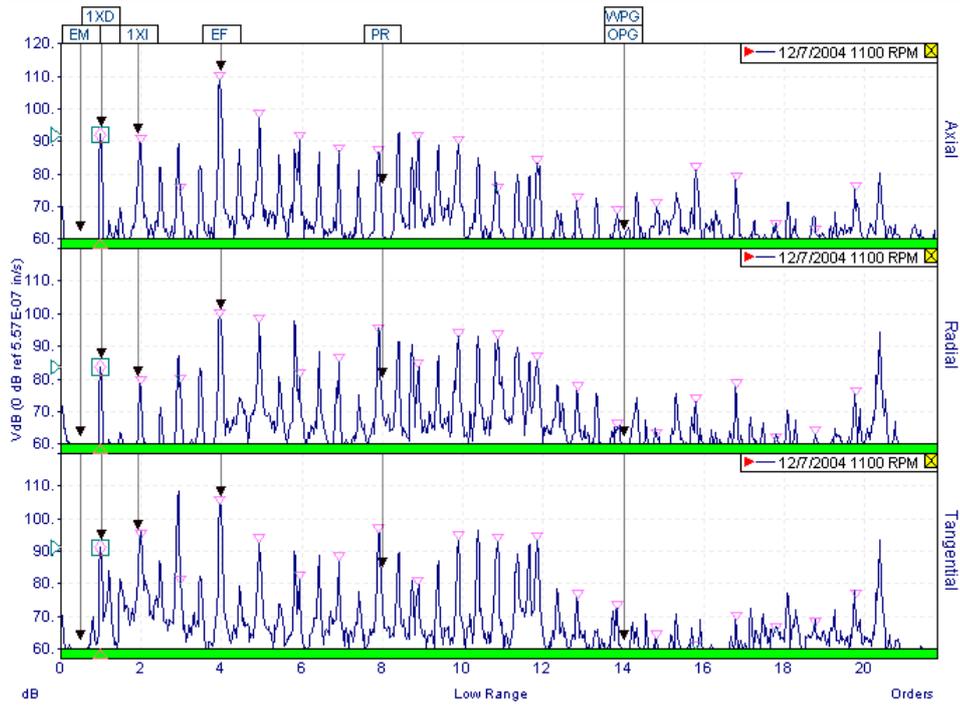


Incrementador, Posición 3 (GB1)



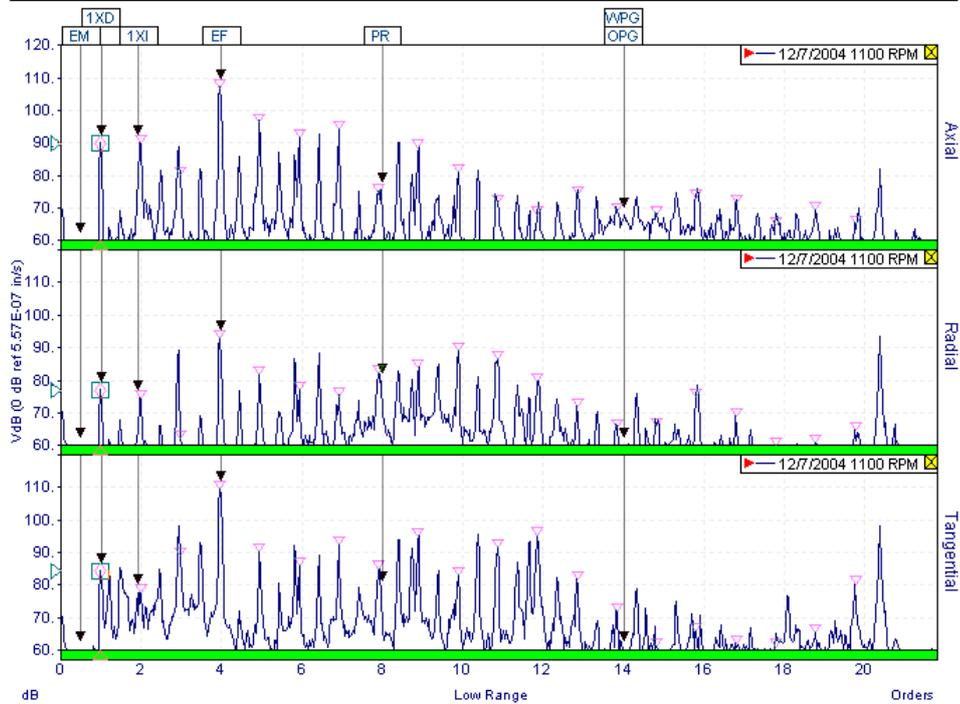
Cámara de Empuje, Posición 4 (TC1)

PLANT: OXY-CPF AREA: Jivino B
 MACHINE: MP-330-A LOCATION: PUMP 1, BEARING 1 [5] MID: 54
 1087.0 CPM, 0.99X, 92.0 VdB, 12/7/2004 21:52 Axial

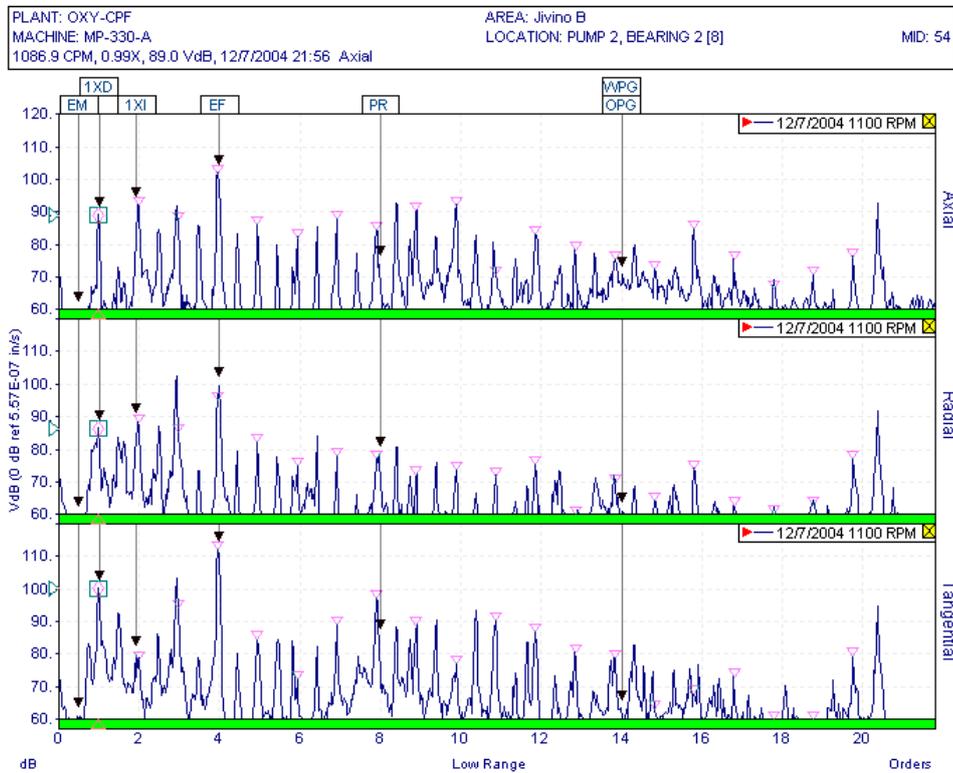
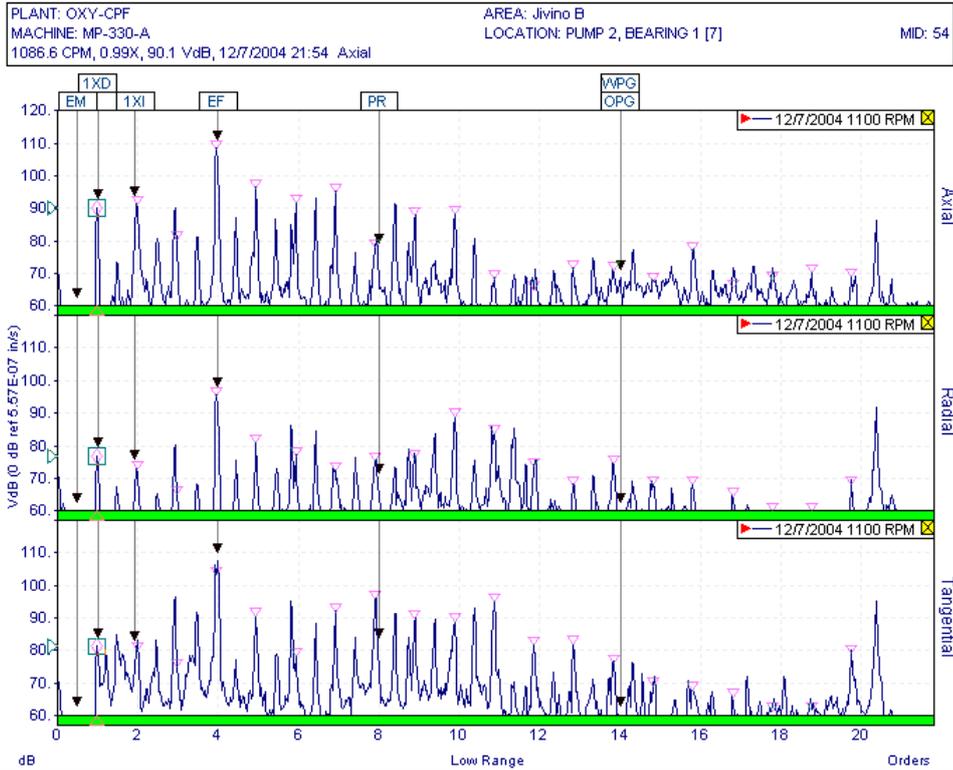


Bomba 1, Posición 5 (P1B1)

PLANT: OXY-CPF AREA: Jivino B
 MACHINE: MP-330-A LOCATION: PUMP 1, BEARING 2 [6] MID: 54
 1087.0 CPM, 0.99X, 89.9 VdB, 12/7/2004 21:53 Axial



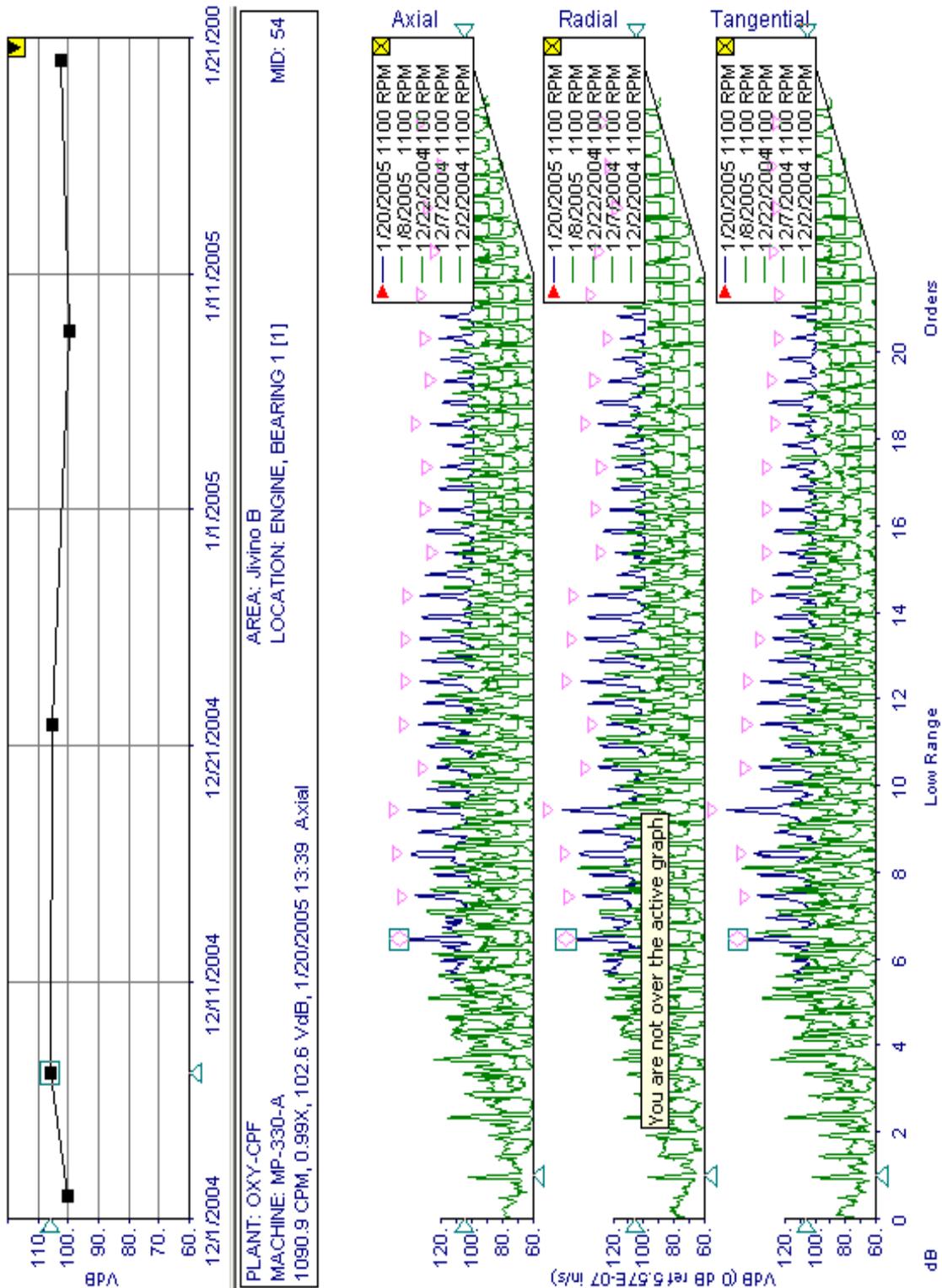
Bomba 1, Posición 6 (P1B2)



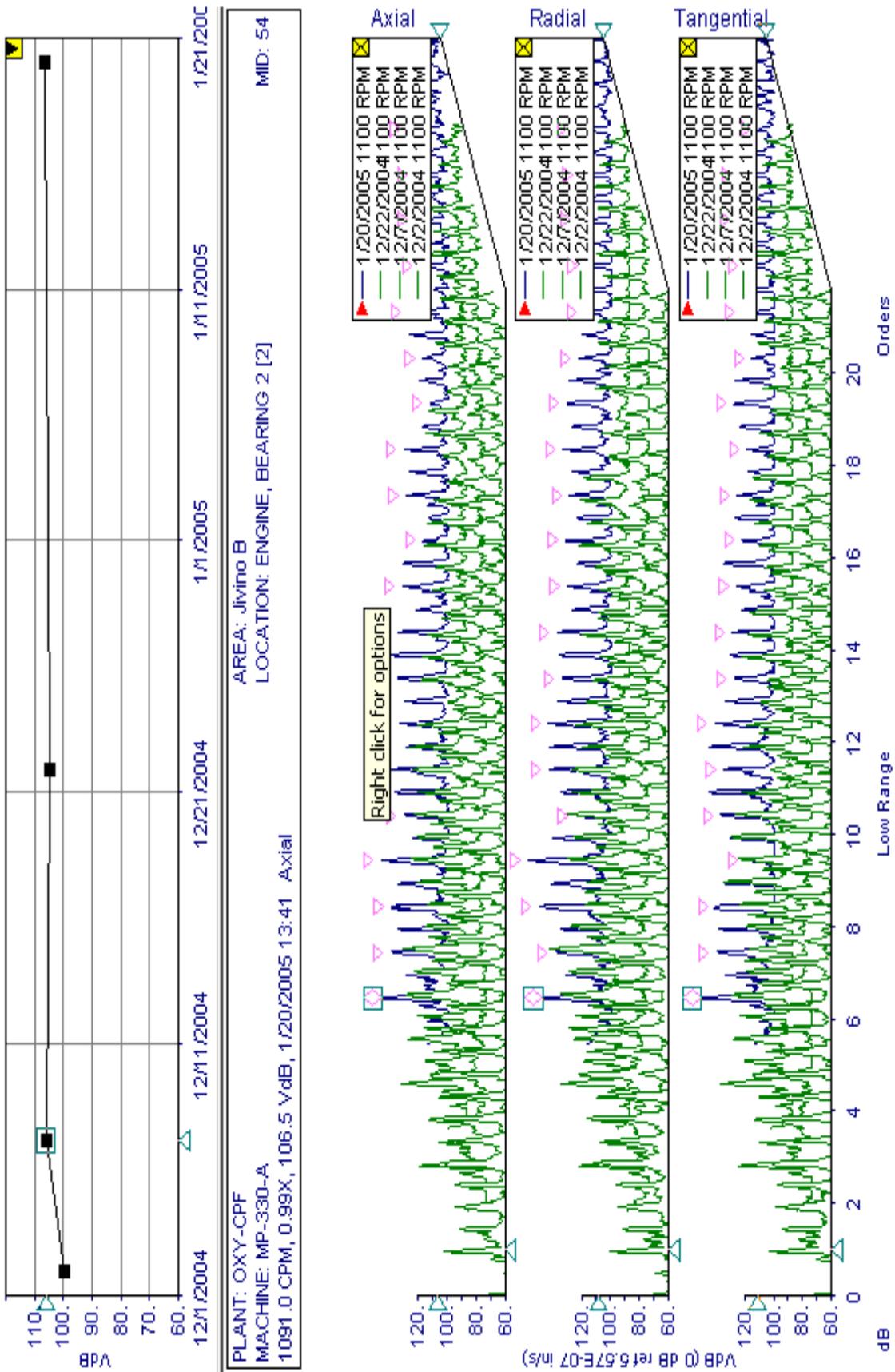
Gráficas de Cascada y Tendencia

Máquina: MP-330-A
Ubicación: Jivino B

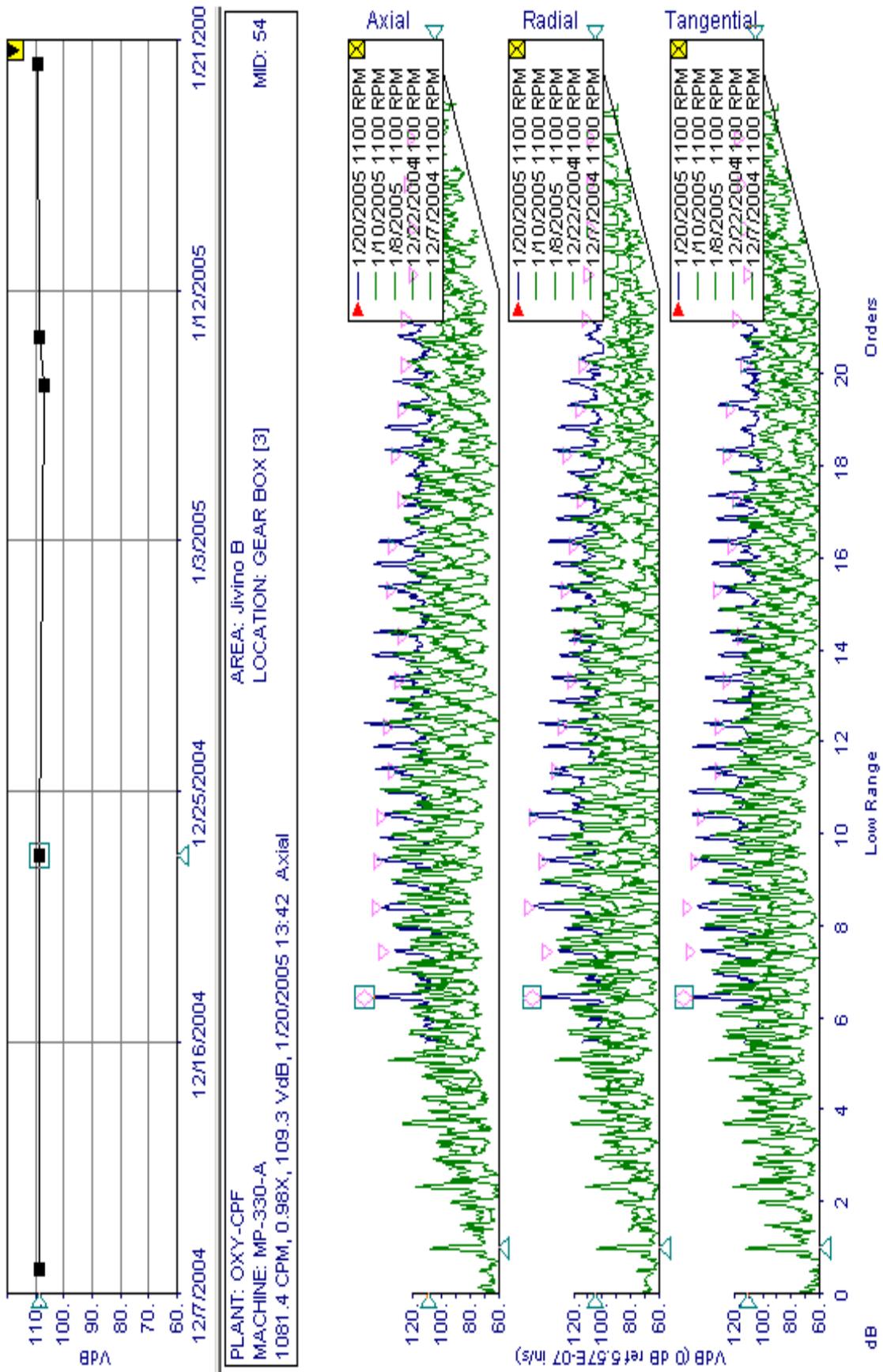
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



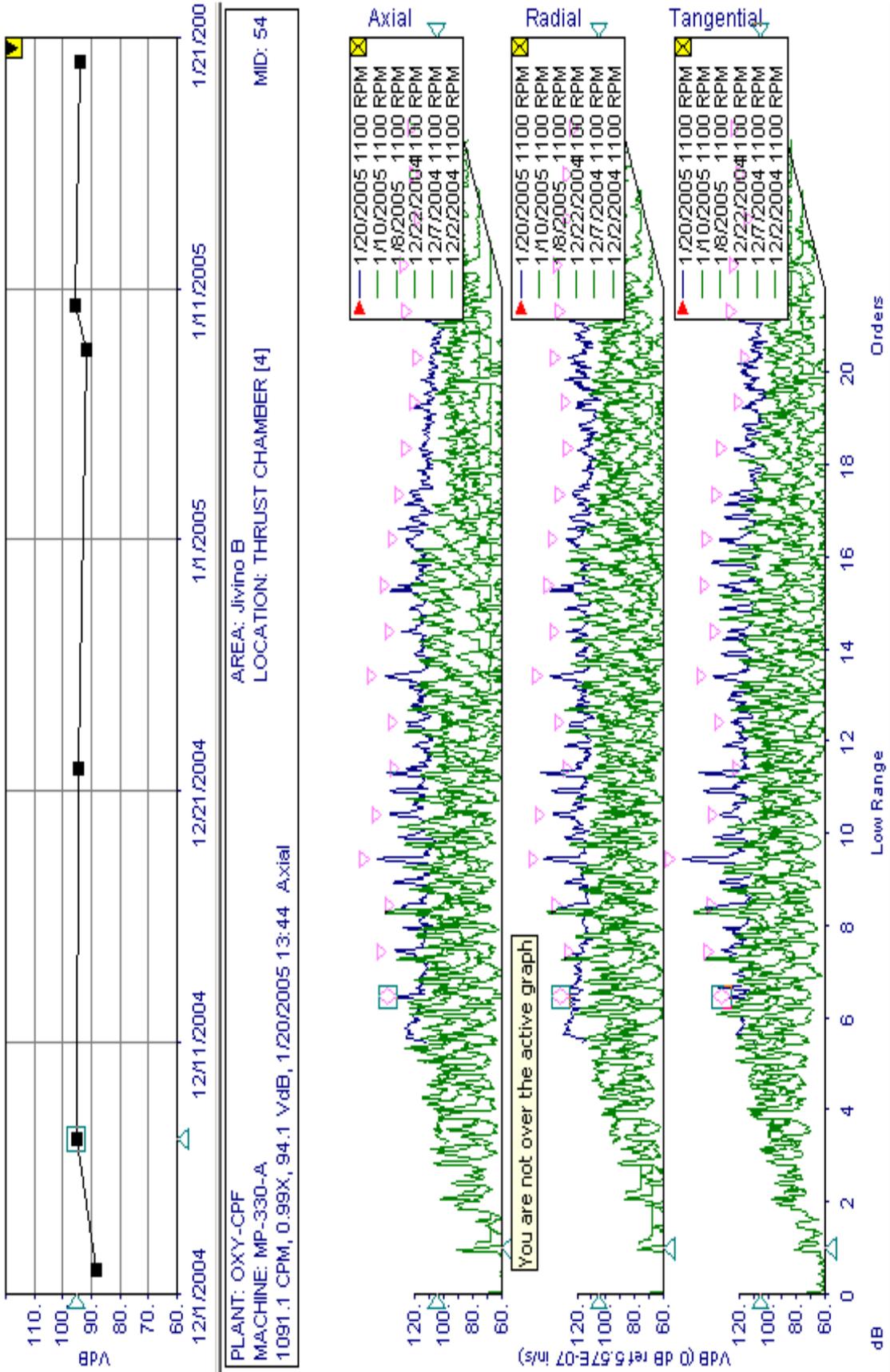
2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



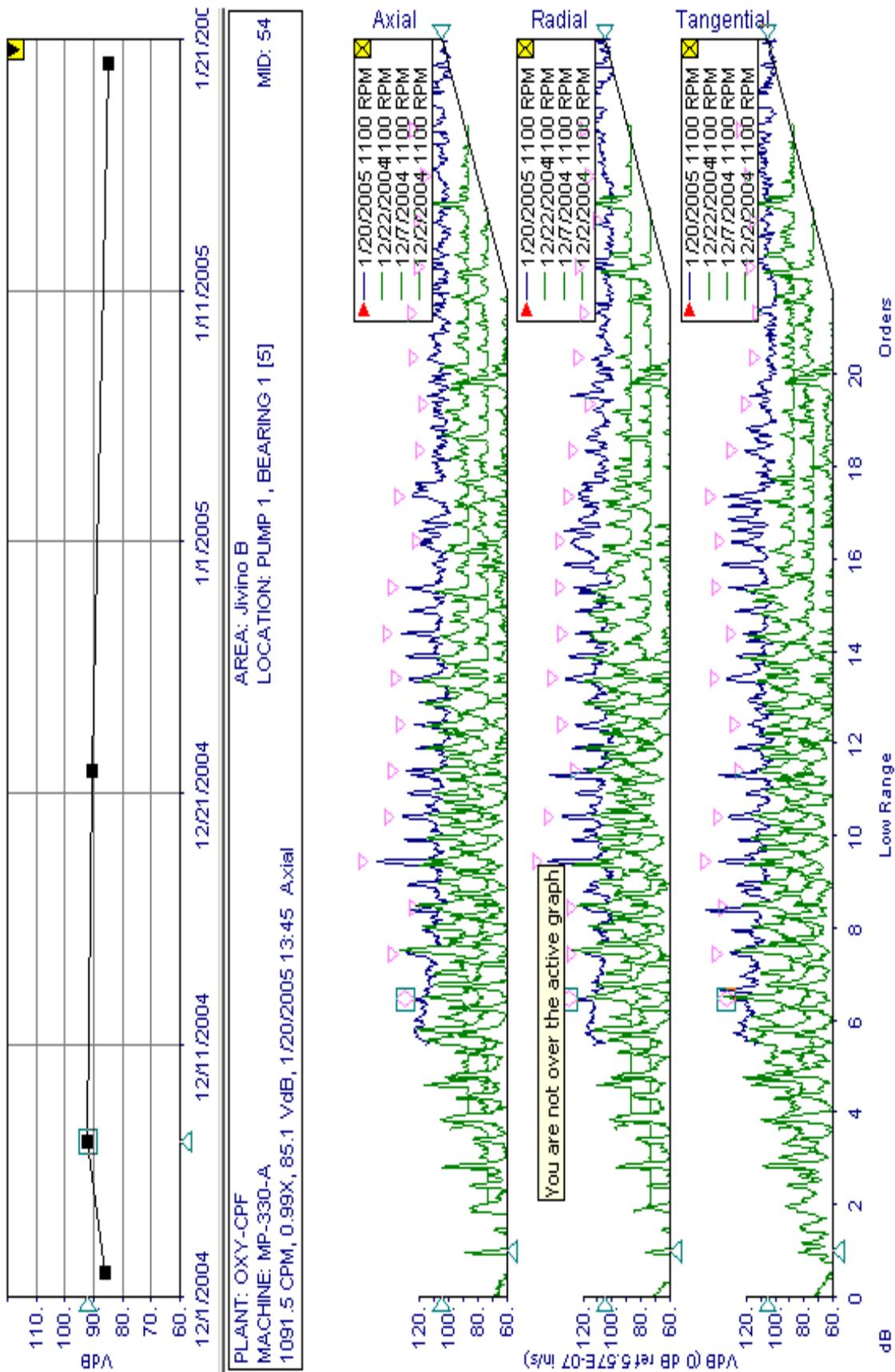
3.- Rodamiento del incrementador.



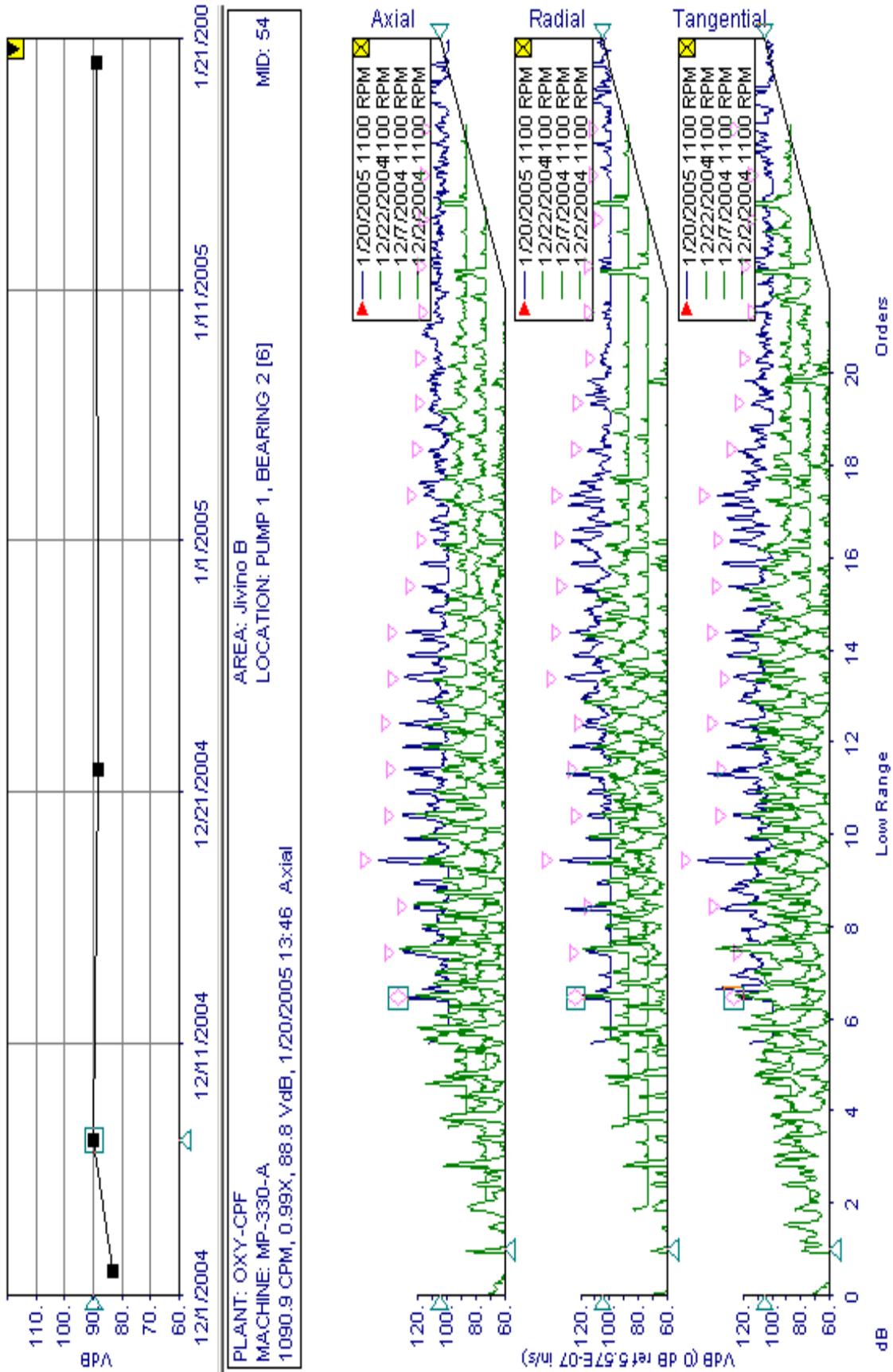
4.- Cámara de Empuje.



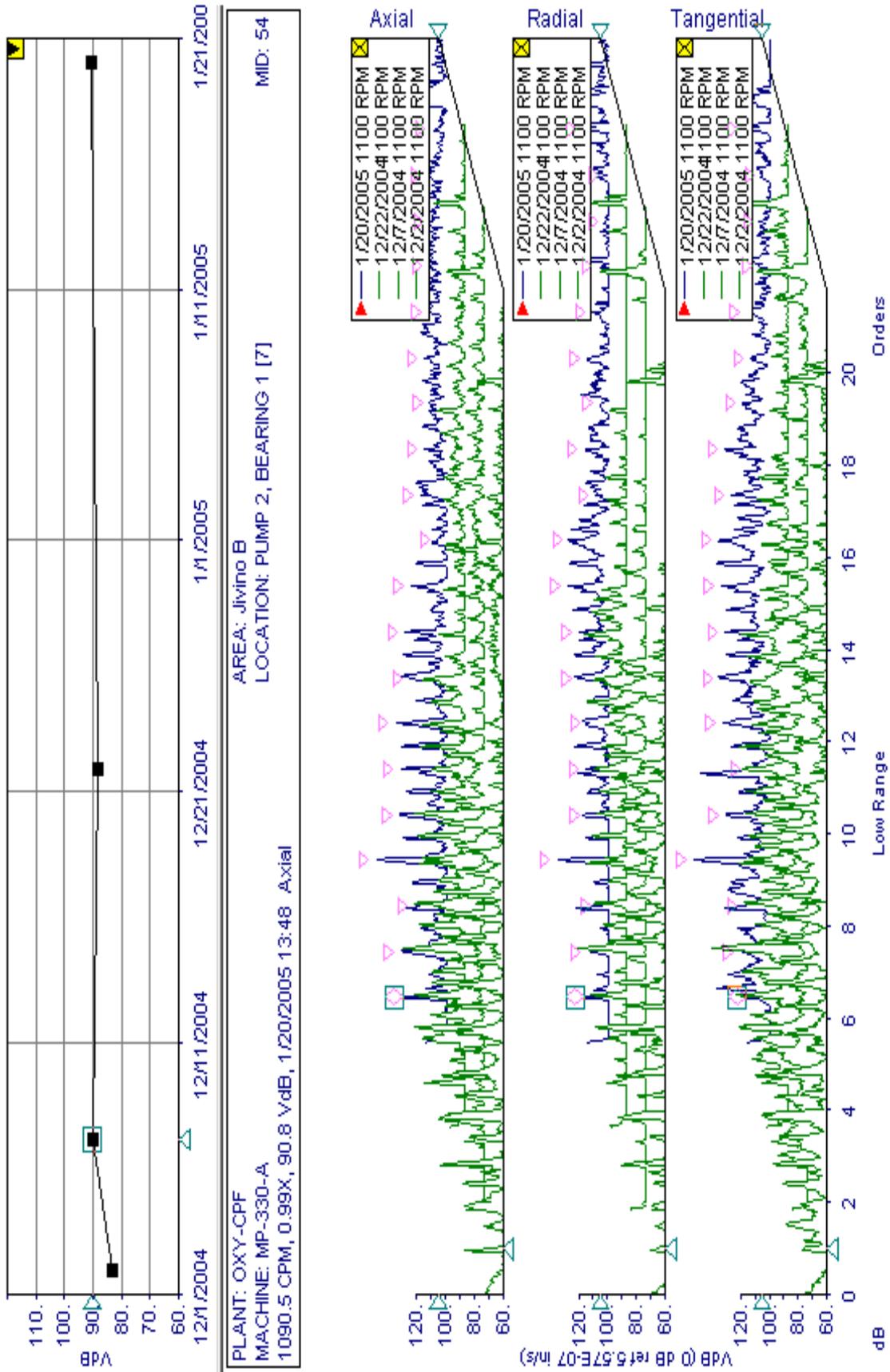
5.- Rodamiento de la bomba 1, lado conducido.



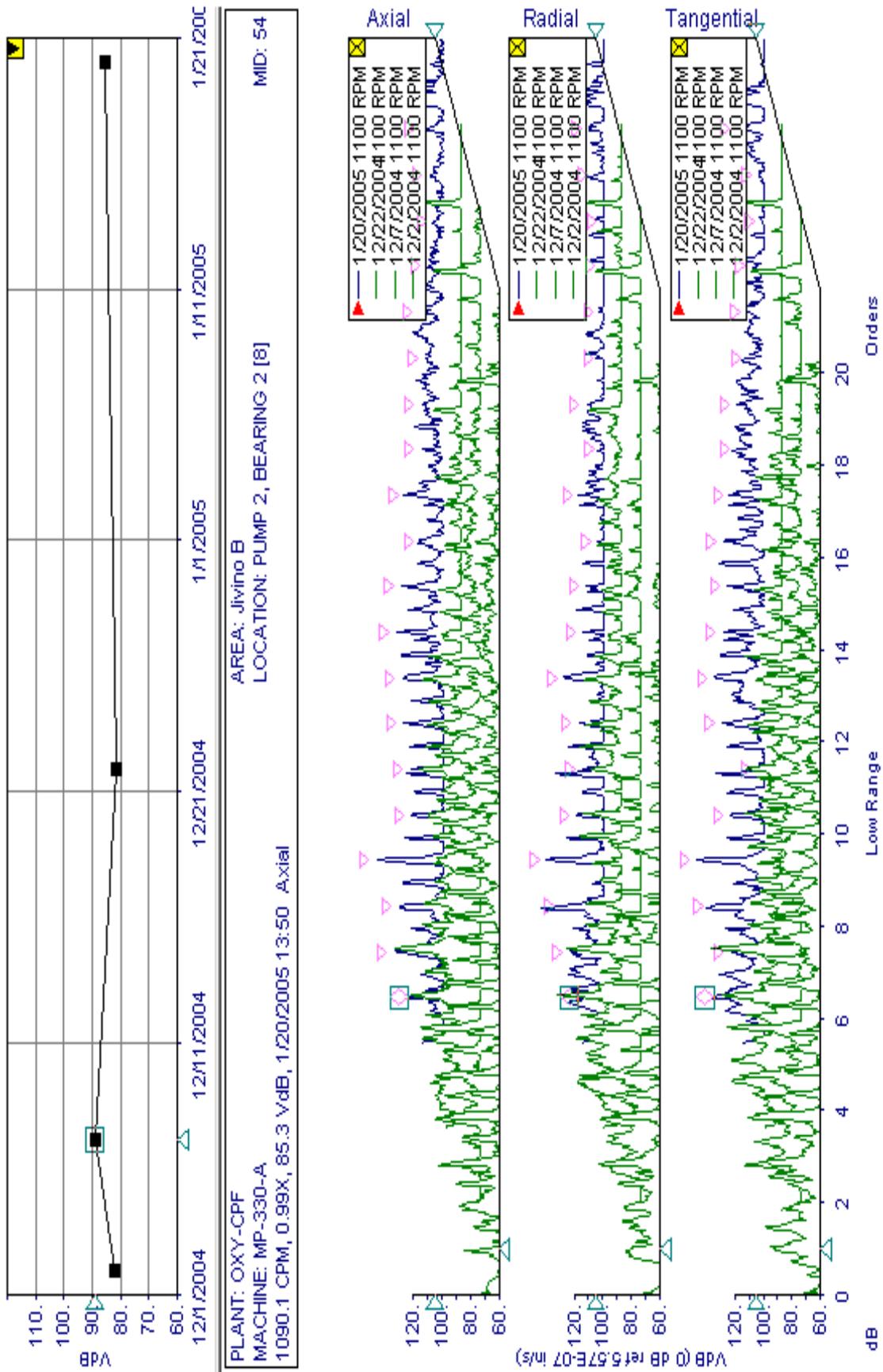
6.- Rodamiento de la bomba 1, lado conductor.



7.- Rodamiento de la bomba 2, lado conducido.



8.- Rodamiento de la bomba 2, lado libre.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS													
Máquina: MP-330-A			Fecha: 7 de Diciembre del 2004			Período análisis de Tendencias: 7 Diciembre/2004-20 Enero/2005							
Unidades		Niveles de Alarma											
		Bueno			Regular			Malo					
in/s		0.5			0.6			0.7					
Vdb		119.1			120.6			122					
in/s		0.1			0.15			0.225					
Vdb		105.1			108.6			112.1					
in/s		0.125			0.2			0.3					
Vdb		107.0			111.1			114.6					
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración								Observaciones	Tendencia	Recomendaciones	
		Axial		Radial		Tang.							
		B	R	M	B	R	M	B	R	M			
Motor, MB1	0.5 XD	x			x			x			Existe picos altos de vibración a la velocidad de 1X Axial y a la velocidad de 4X Radial y Tangencial.	Los gráficos de tendencia muestran que no ha habido cambios significativos durante el período de monitoreo.	Existen síntomas de desbalanceo. La alta vibración en 4X es una indicación de problemas con uno o varios pistones.
	1XD	x			x			x					
	2XD	x			x			x					
	1XP	x			x			x					
	2XP	x			x			x					
	4XD, EF	x			x			x					
	8XD, PR	x			x			x					
14XD	x			x			x						
Motor, MB2	0.5 XD	x			x			x			Los niveles de vibración son normales, pero se puede ver picos altos a la velocidad de 1X y 4X	Se detecto un ligero incremento en la segunda medición, pero a partir de allí los niveles de vibración se han mantenido constantes.	Este espectro comprueba que existen problemas de desbalanceo pero este se encuentra dentro de los límites admisibles. También se confirma el problema de encendido en el motor.
	1XD	x			x			x					
	2XD	x			x			x					
	1XP	x			x			x					
	2XP	x			x			x					
	4XD, EF	x			x			x					
	8XD, PR	x			x			x					
14XD	x			x			x						
Inc., GB1	0.5 XD	x			x			x			Los niveles de vibración son altos para las especificaciones del equipo.	Los niveles de vibración se han mantenido constantes a pesar de estar en niveles muy altos.	Los niveles de vibración en este incrementador nos demuestran que es necesario plantear niveles de vibración mas altos para este tipo de incrementadores.
	1XD		x						x				
	2XD	x			x			x					
	1XP	x			x			x					
	2XP	x			x			x					
	4XD, EF		x						x				
	8XD, PR	x			x			x					
14XD	x			x			x						

Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración										Observaciones	Tendencia	Recomendaciones		
		Axial					Radial								Tang.	
		B	R	M	B	R	B	R	M	B	R					
C.E., TC1	0,5 XD	x			x		x			x				Los niveles de vibración son normales, el espectro no muestra síntomas de fallas.	Durante el análisis de tendencias en el período de monitoreo existieron dos aumentos de los niveles de vibración, pero en general estos se encuentran dentro de los límites admisibles.	Vigilar este punto por un posible incremento en los niveles de vibración.
	1XD	x			x		x			x						
	2XD	x			x		x			x						
	1XP	x			x		x			x						
	2XP	x			x		x			x						
	4XD, EF	x			x		x			x						
	8XD, PR	x			x		x			x						
14XD	x			x		x			x							
Bomba, P1B1	0,5 XD	x			x		x			x				Los niveles de vibración se han mantenido constantes, incluso existió una ligera disminución.	Continuar con el monitoreo de vibraciones para detectar cualquier cambio en el funcionamiento de la bomba.	
	1XD	x			x		x			x						
	2XD	x			x		x			x						
	1XP	x			x		x			x						
	2XP	x			x		x			x						
	4XD, EF	x			x		x			x						
	8XD, PR	x			x		x			x						
14XD	x			x		x			x							
Bomba, P1B2	0,5 XD	x			x		x			x				Los niveles de vibración son normales. Existe un pico alto de vibración en 4X pero dentro de los límites admisibles	El gráfico de tendencias muestra que los niveles de vibración se han mantenido constantes durante el periodo de monitoreo.	Se recomienda continuar con el monitoreo de vibración para detectar a tiempo cualquier variación en el funcionamiento de la bomba.
	1XD	x			x		x			x						
	2XD	x			x		x			x						
	1XP	x			x		x			x						
	2XP	x			x		x			x						
	4XD, EF	x			x		x			x						
	8XD, PR	x			x		x			x						
14XD	x			x		x			x							

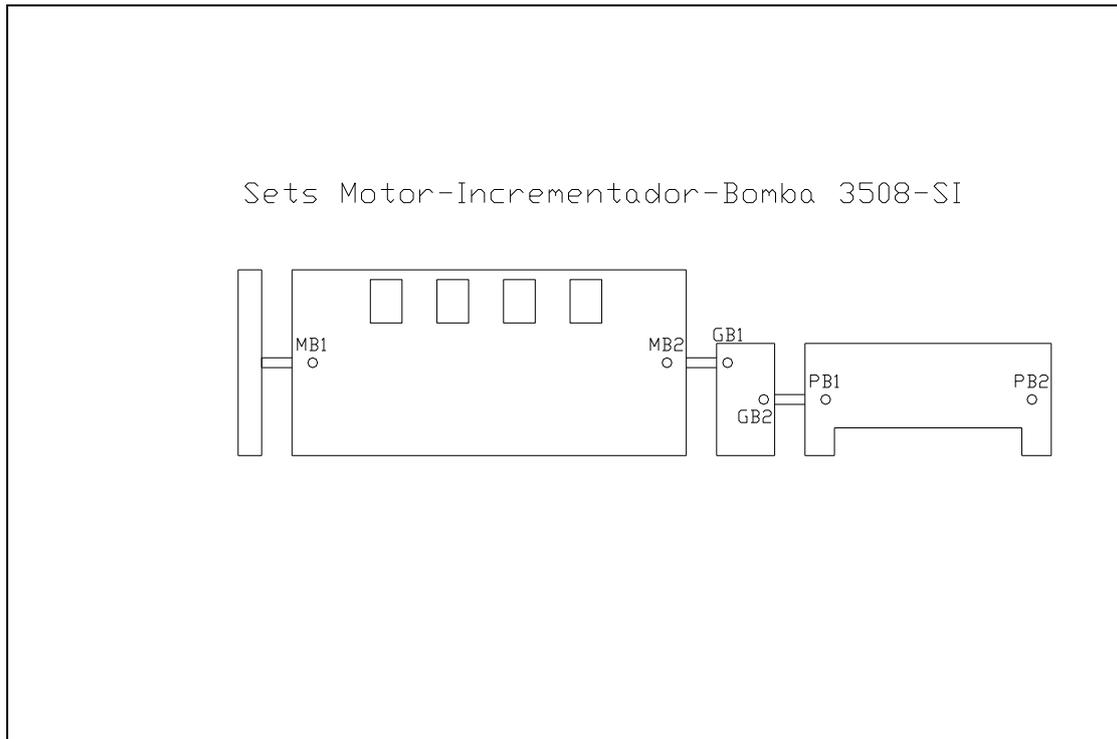
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración										Observaciones	Tendencia	Recomendaciones		
		Axial					Radial								Tang.	
		B	R	M	B	R	B	R	M	B	R					
Bomba, P2B1	0,5 XD	x			x				x			x		Los niveles de vibración son normales, el espectro no muestra síntomas de fallas.	No se ha evidenciado cambios en los niveles de vibración o en la forma del espectro.	Se recomienda continuar con el monitoreo de vibración para detectar a tiempo cualquier variación en el funcionamiento de la bomba.
	1XD	x			x				x			x				
	2XD	x			x				x			x				
	1XP	x			x				x			x				
	2XP	x			x				x			x				
	4XD, EF															
	8XD, PR	x			x				x			x				
	14XD	x			x				x			x				
Bomba, P2B2	0,5 XD	x			x				x			x		Los niveles de vibración son normales, el espectro no muestra síntomas de fallas.	El nivel de vibraciones se ha mantenido constante.	Se recomienda vigilar la bomba para verificar si el nivel de vibraciones sufre alguna variación.
	1XD	x			x				x			x				
	2XD	x			x				x			x				
	1XP	x			x				x			x				
	2XP	x			x				x			x				
	4XD, EF	x			x				x			x				
	8XD, PR	x			x				x			x				
	14XD	x			x				x			x				

HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MP-105-B

Ubicación: CPF

Esquema General de la Máquina

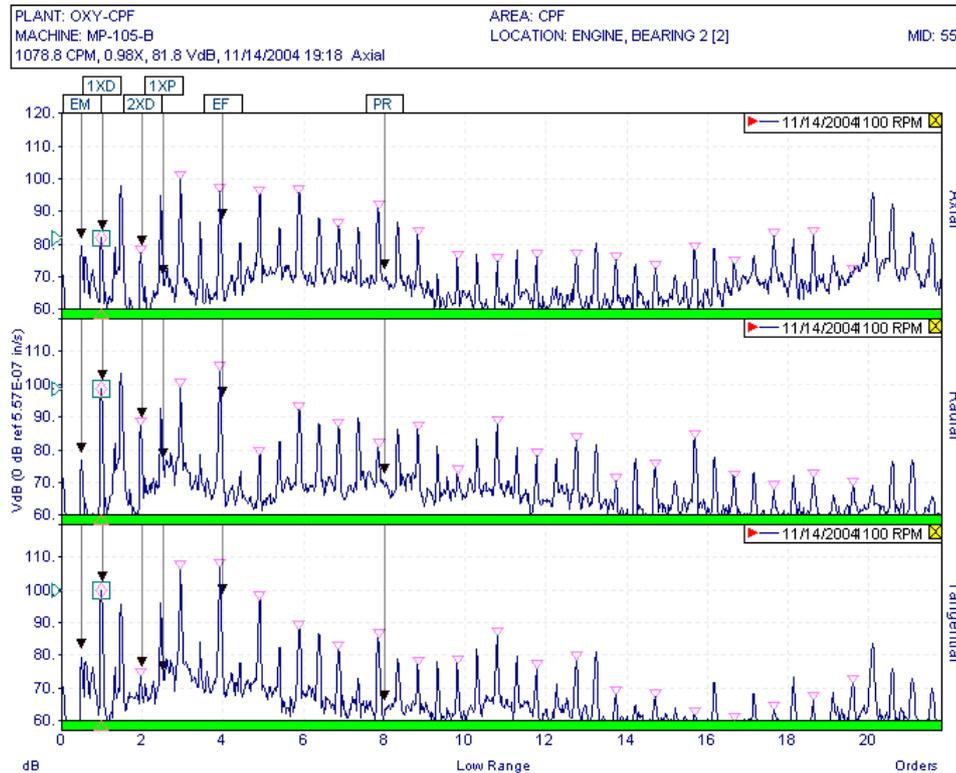
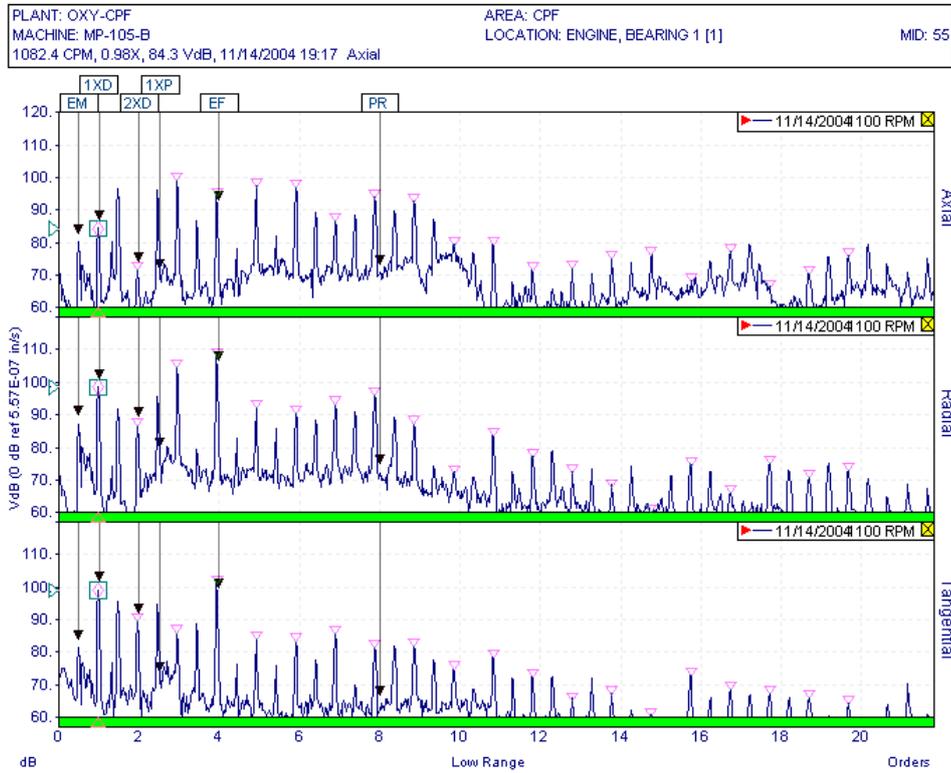


Información General

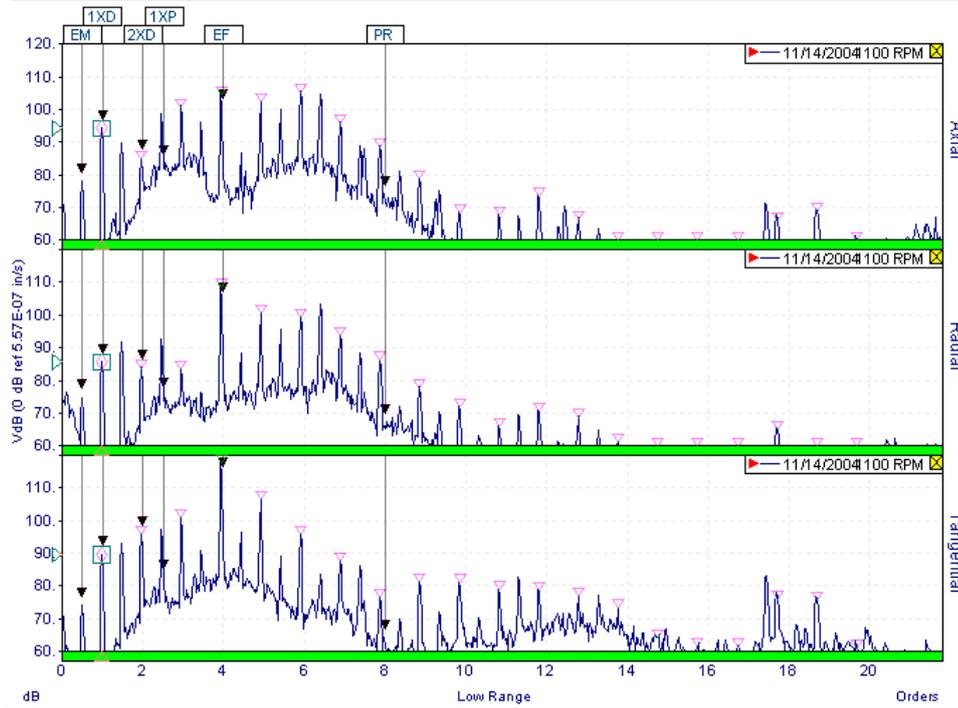
Velocidad Nominal (rpm): 1100
Número de Cilindros: 12
Engranés Bomba de Aceite: 14
Engranés Bomba de Agua: 14
Engranés Distribución: 92
Engrane Auxiliar: 183
Polos del Generador:
Alabes Ventilador: 12
Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial
Carga del Equipo (kW): 350

Etapas del Incrementador: 2
Relación de Velocidad: 2.532
Tipo de Apoyos: Rodamientos
Tipo de Bomba: Centrifuga
Número de Etapas:
Número de Paletas:
Tipo de Apoyo: Rodamientos

ESPECTROS DE REFERENCIA

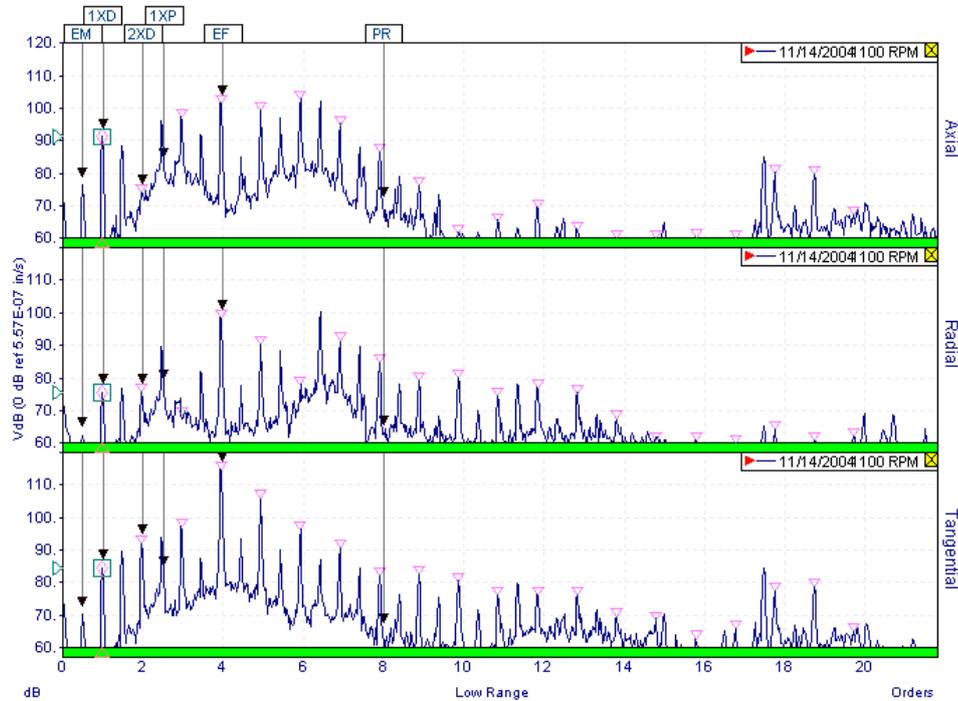


PLANT: OXY-CPF AREA: CPF
 MACHINE: MP-105-B LOCATION: GEAR BOX 1 [3] MID: 55
 1082.3 CPM, 0.98X, 94.3 VdB, 11/14/2004 19:20 Axial



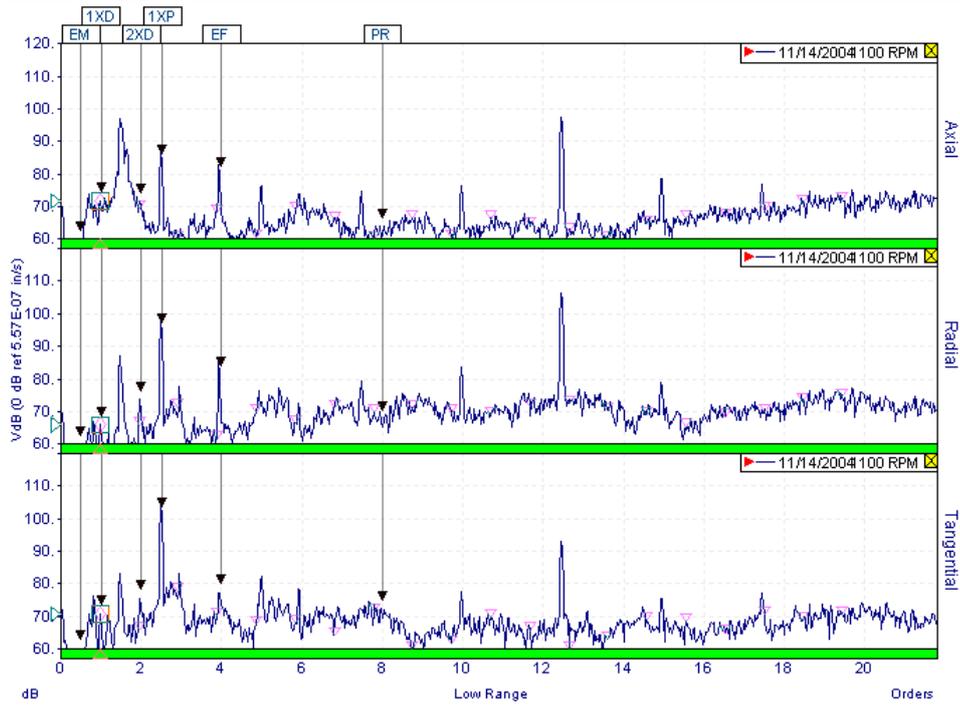
Incrementador, Posición 3 (GB1)

PLANT: OXY-CPF AREA: CPF
 MACHINE: MP-105-B LOCATION: GEAR BOX 2 [4] MID: 55
 1085.0 CPM, 0.99X, 91.3 VdB, 11/14/2004 19:24 Axial



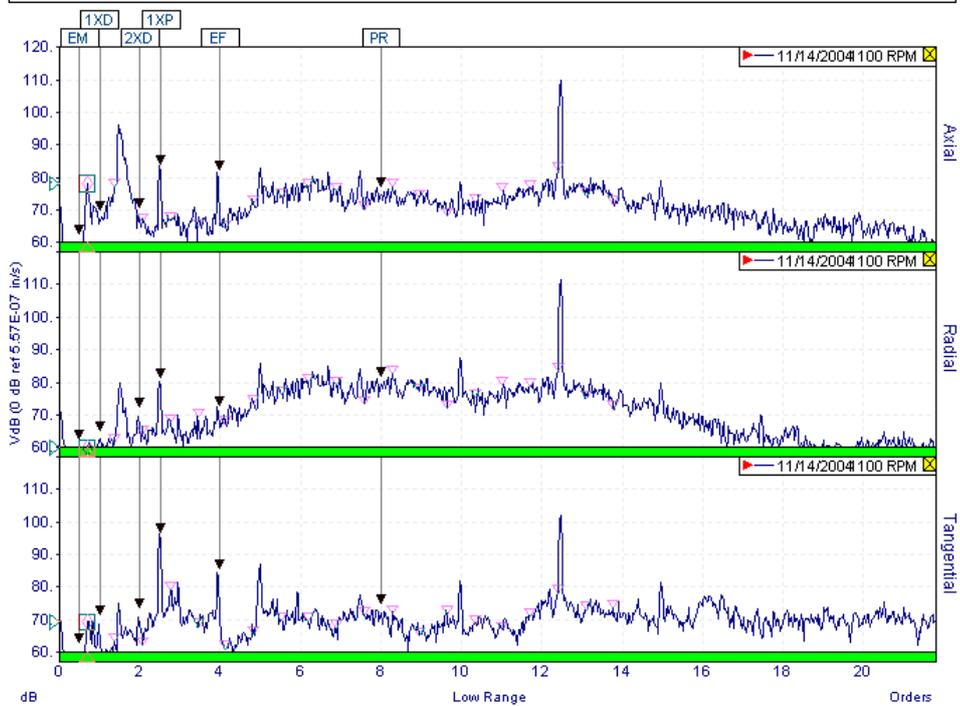
Incrementador, Posición 4 (GB2)

PLANT: OXY-CPF AREA: CPF
 MACHINE: MP-105-B LOCATION: PUMP, BEARING 1 [5] MID: 55
 1069.2 CPM, 0.97X, 71.7 VdB, 11/14/2004 19:22 Axial



Bomba, Posición 5 (PB1)

PLANT: OXY-CPF AREA: CPF
 MACHINE: MP-105-B LOCATION: PUMP, BEARING 2 [6] MID: 55
 757.9 CPM, 0.69X, 78.2 VdB, 11/14/2004 19:26 Axial

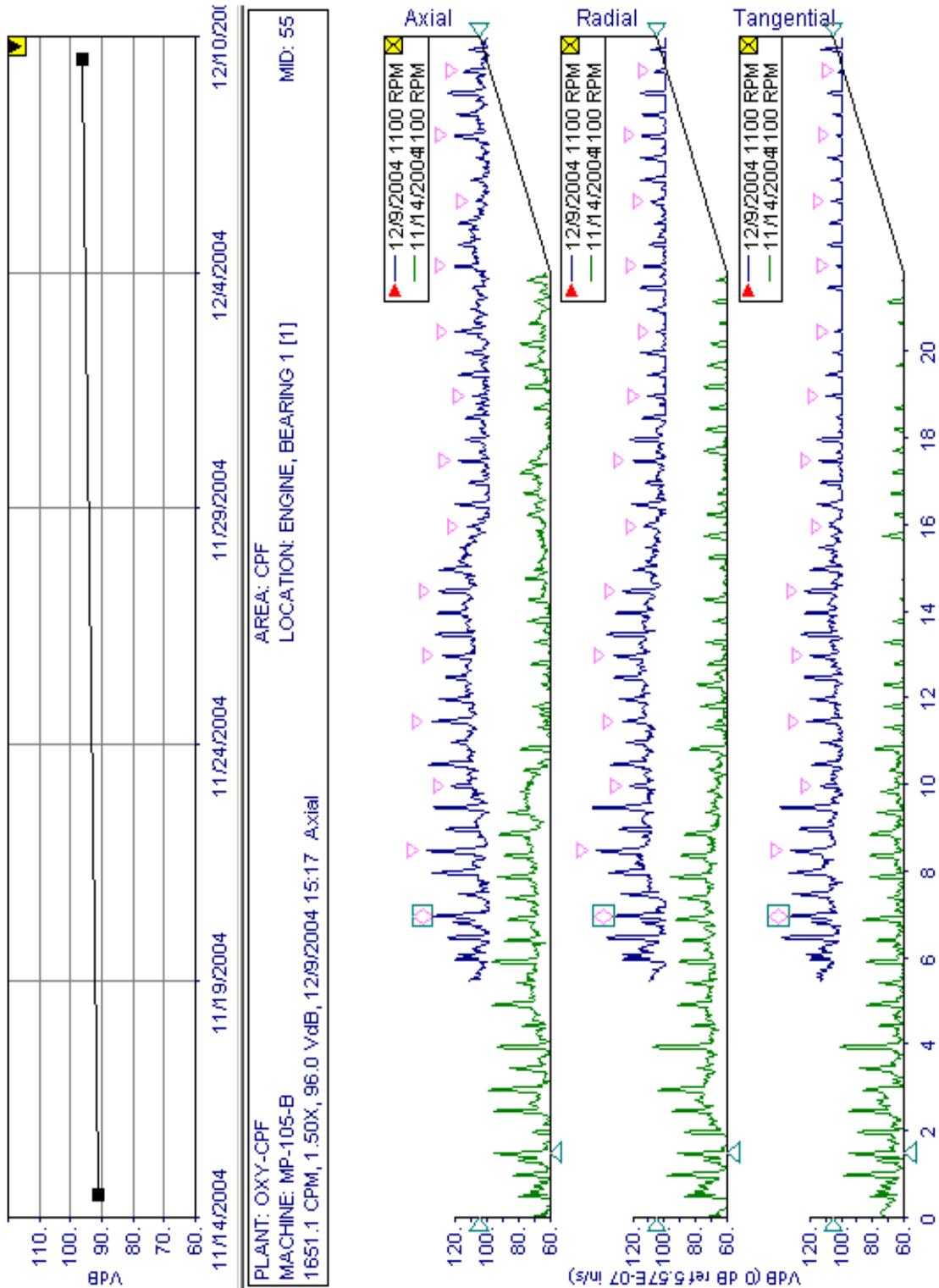


Bomba, Posición 6 (PB2)

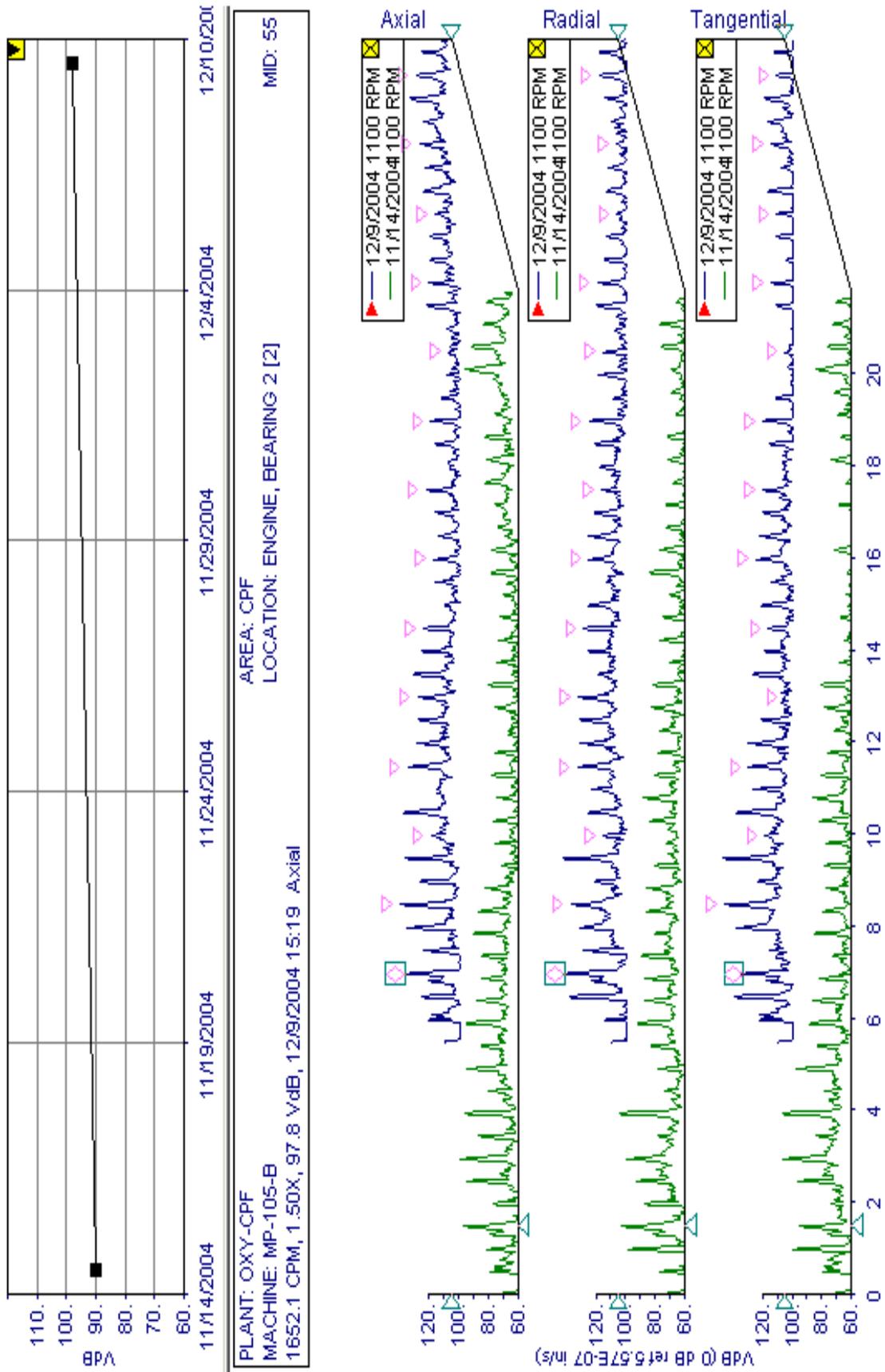
Gráficas de Cascada y Tendencia

Máquina: MP-105-B
Ubicación: CPF

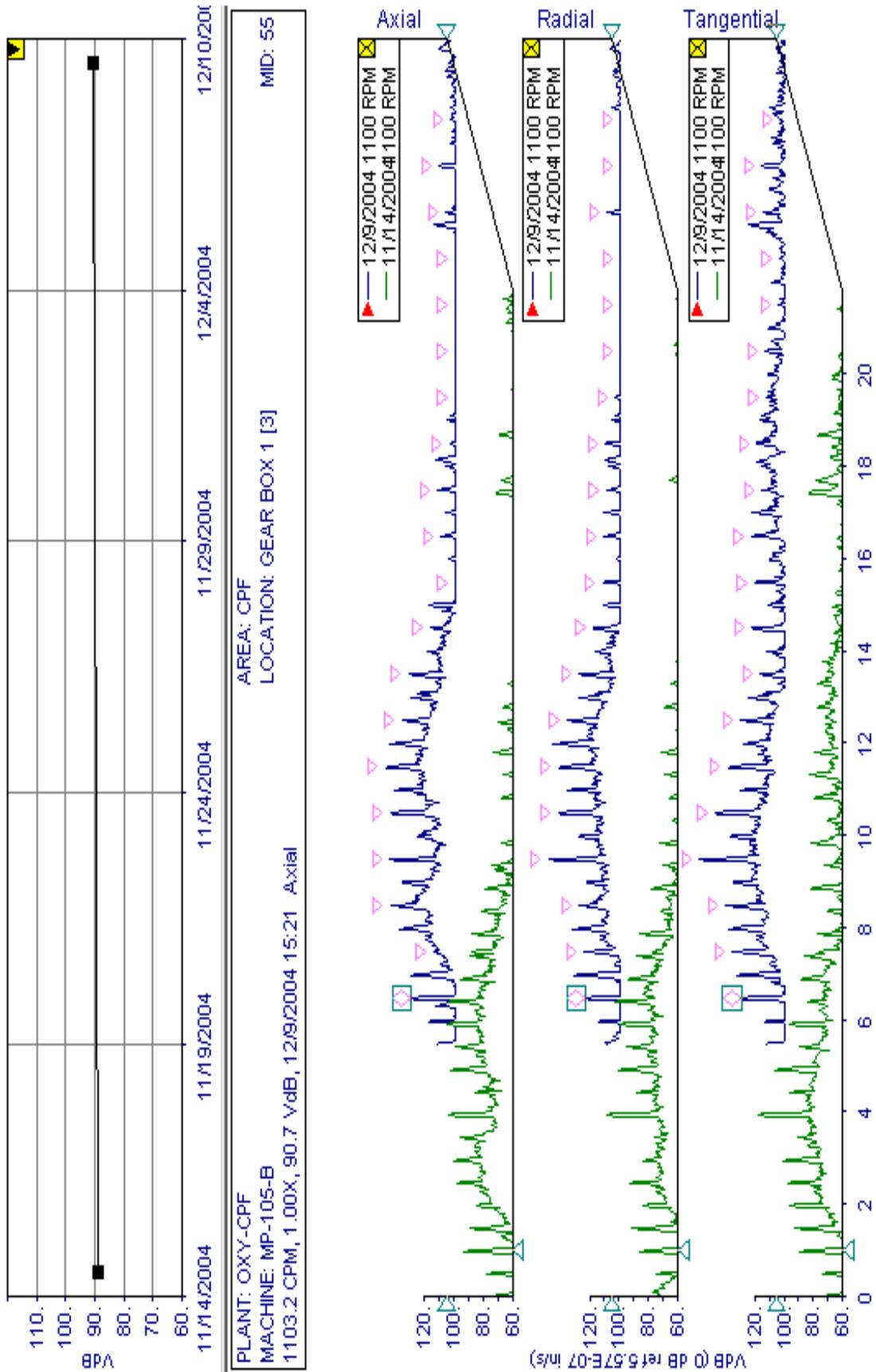
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



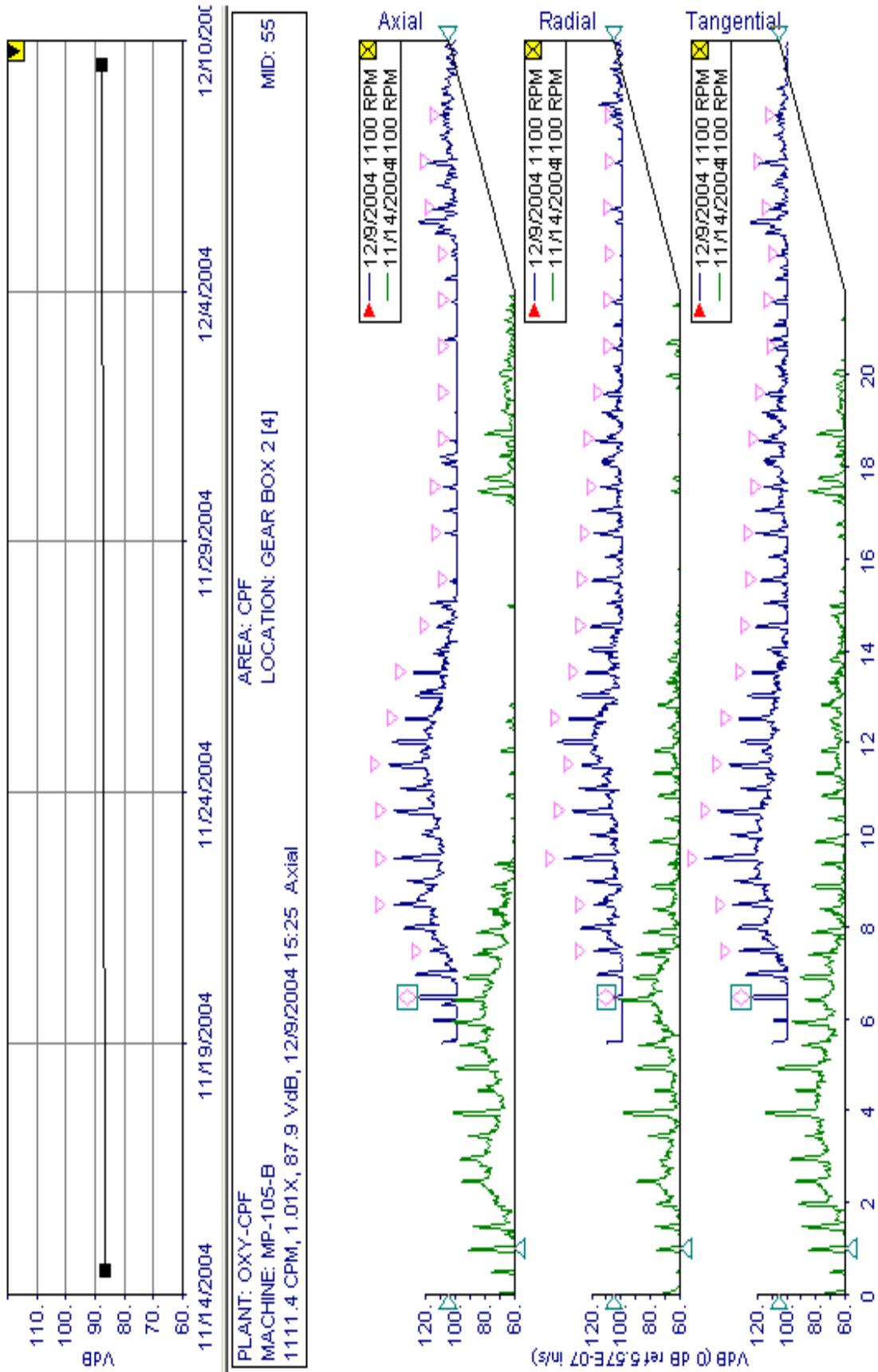
2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



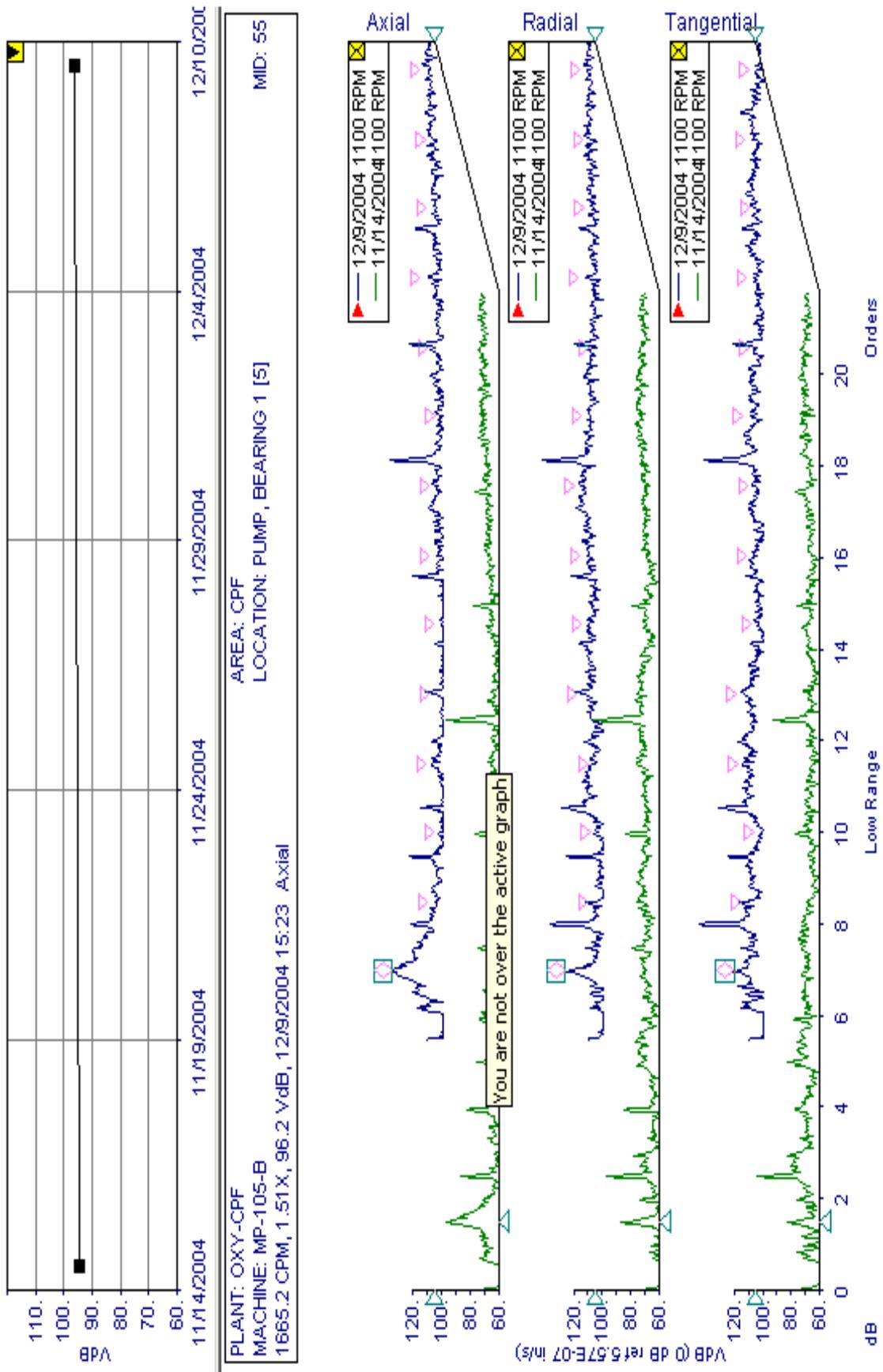
3.- Rodamiento del incrementador, lado conducido.



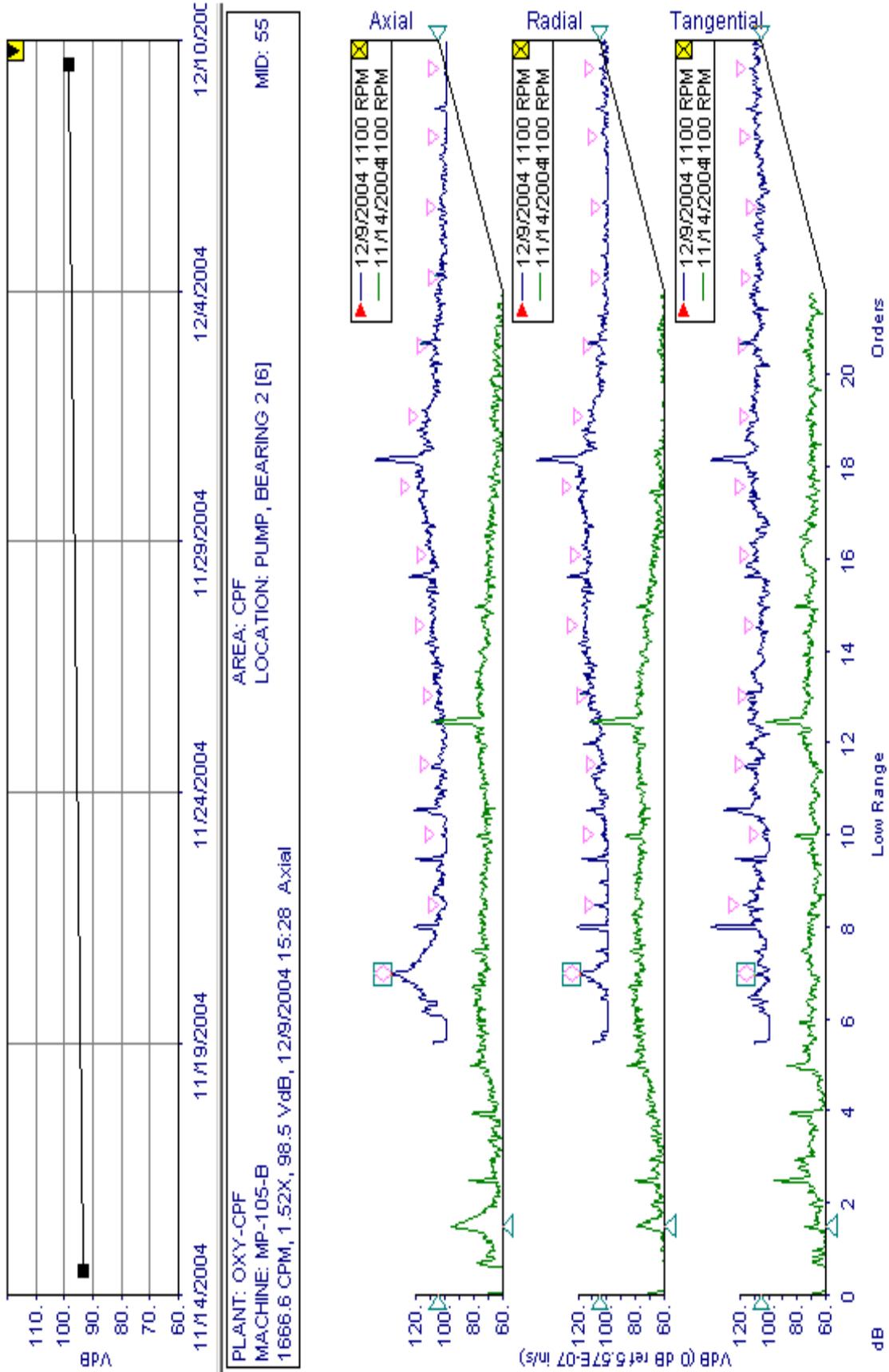
4.- Rodamiento del incrementador, lado conductor.



5.- Rodamiento de la bomba, lado conducido.



6.- Rodamiento de la bomba, lado libre.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS											
Máquina: MP-105-B			Fecha: 14 de Noviembre del 2004			Período análisis de Tendencias: 14 Noviembre-9 Diciembre/2004					
Unidades			Niveles de Alarma								
			Bueno		Regular		Malo				
in/s			0.5		0.6		0.7				
Vdb			119.1		120.6		122				
in/s			0.1		0.15		0.225				
Vdb			105.1		108.6		112.1				
in/s			0.125		0.2		0.3				
Vdb			107.0		111.1		114.6				
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración						Observaciones	Tendencia	Recomendaciones	
		Axial		Radial		Tang.					
		B	R	M	B	R	M				
Motor, MB1	0,5 XD	x			x		x	Existen vibraciones aleatorias. Se detectaron picos altos de vibración a la velocidad de 4X en la dirección tangencial y radial.	Se evidencia un ligero incremento en los niveles de vibración, pero estos se encuentran bajo los límites admisibles.	Las vibraciones aleatorias son un síntoma de soltura o de aflojamiento, se recomienda revisar el equipo para corregir estas fallas. La alta vibración n 4X es un síntoma de problemas en el encendido	
	1XD	x			x		x				
	2XD	x			x		x				
	1XP	x			x		x				
	2XP	x			x		x				
	4X,EF	x			x		x				
	8X,PR	x			x		x				
12X	x			x		x					
Motor, MB2	0,5 XD	x			x		x	Se puede observar los mismos síntomas de falla detectados en el espectro anterior.	La gráfica de tendencia muestra que ha existido un ligero incremento en el nivel de vibraciones, pero estas están bajo los límites admisibles.	Revisar el equipo por fallas de soltura, aflojamiento y problemas en el encendido.	
	1XD	x			x		x				
	2XD	x			x		x				
	1XP	x			x		x				
	2XP	x			x		x				
	4X,EF	x			x		x				
	8X,PR	x			x		x				
12X	x			x		x					
Inc., GB1	0,5 XD	x			x		x	Los picos a la velocidad de 4X, especialmente en las direcciones tangencial y radial son altos. Se evidencia la presencia de vibración aleatoria especialmente en la dirección axial.	Los niveles de vibración se han mantenido constantes en este punto durante el periodo de monitoreo.	Se debe revisar el equipo por problemas de soltura o aflojamiento.	
	1XD	x			x		x				
	2XD	x			x		x				
	1XP	x			x		x				
	2XP	x			x		x				
	4X,EF	x			x		x				
	8X,PR	x			x		x				
12X	x			x		x					

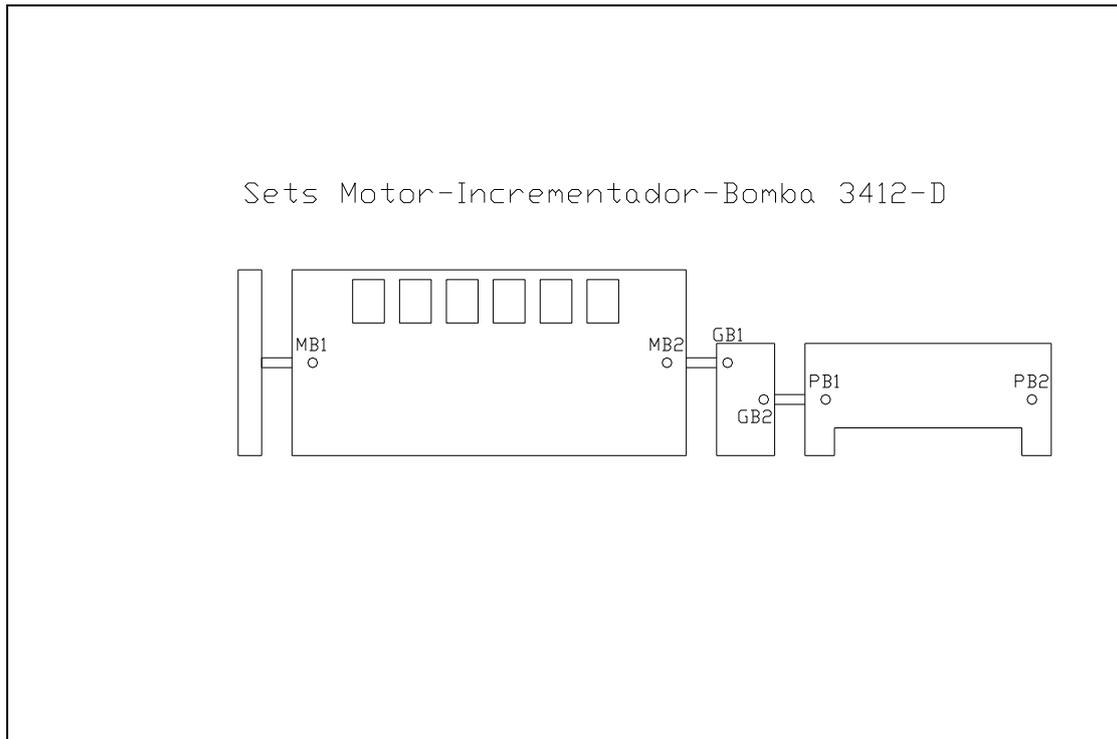
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración												Observaciones	Tendencia	Recomendaciones	
		Axial						Radial									Tang.
		B	R	M	B	R	M	B	R	M	B	R	M				
Inc., GB2	0,5 XD	x			x			x			x				Los niveles de vibración están bajo los límites admisibles, existe vibración aleatoria y picos altos a la velocidad de 4X en la dirección tangencial.	La gráfica de tendencia no muestra ningún incremento durante el periodo de análisis.	No hay recomendaciones
	1XD	x			x			x			x						
	2XD	x			x			x			x						
	1XP	x			x			x			x						
	2XP	x			x			x			x						
	4X,EF	x			x			x			x			x			
	8X,PR	x			x			x			x			x			
12X	x			x			x			x			x				
Bomba, PB1	0,5 XD	x			x			x			x				Los niveles de vibración están bajo los límites admisibles, la velocidad de 12X existen picos altos.	No se evidencia ningún cambio en la forma del espectro ni en los niveles de vibración.	La vibración aleatoria que se presenta en este espectro se debe a la cercanía de la entrada del agua. La vibración en 12X esta bajo los límites admisibles.
	1XD	x			x			x			x						
	2XD	x			x			x			x						
	1XP	x			x			x			x						
	2XP	x			x			x			x						
	4X,EF	x			x			x			x			x			
	8X,PR	x			x			x			x			x			
12X	x			x			x			x			x				
Bomba, PB2	0,5 XD	x			x			x			x				Se evidencia la existencia de vibraciones aleatorias. Los niveles de vibración son normales. Se evidencia la presencia de picos a la velocidad de 12X.	Existe un ligero incremento en el nivel de vibraciones.	Se recomienda vigilar la bomba por un posible incremento del nivel de vibraciones.
	1XD	x			x			x			x						
	2XD	x			x			x			x						
	1XP	x			x			x			x						
	2XP	x			x			x			x						
	4X,EF	x			x			x			x			x			
	8X,PR	x			x			x			x			x			
12X	x			x			x			x			x				

HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MP-105-A

Ubicación: CPF

Esquema General de la Máquina



Información General

Velocidad Nominal (rpm): 1100
Número de Cilindros: 12
Engranés Bomba de Aceite: 18
Engranés Bomba de Agua: 18
Engranés Distribución: 99
Engrane Auxiliar: 136
Polos del Generador:
Alabes Ventilador: 12
Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial
Carga del Equipo (kW): 250

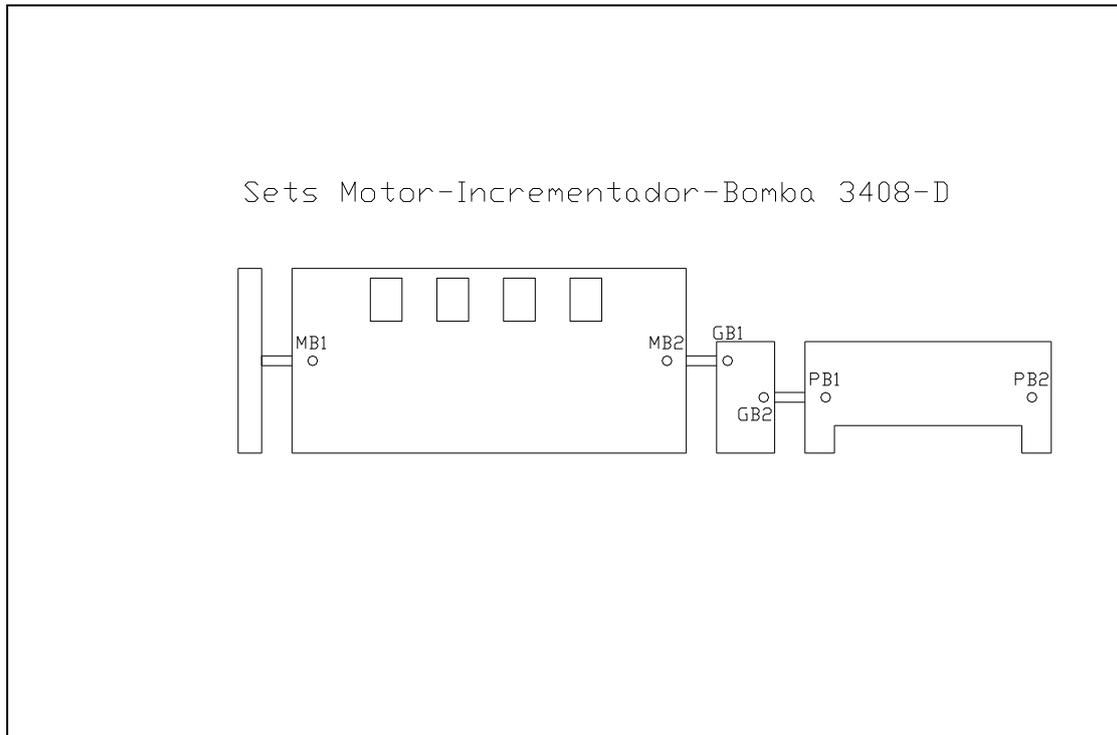
Etapas del Incrementador: 2
Relación de Velocidad: 1.966
Tipo de Apoyos: Rodamientos
Tipo de Bomba: Centrifuga
Número de Etapas:
Número de Paletas:
Tipo de Apoyo: Rodamientos

HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MP-2105-A

Ubicación: Limoncocha

Esquema General de la Máquina

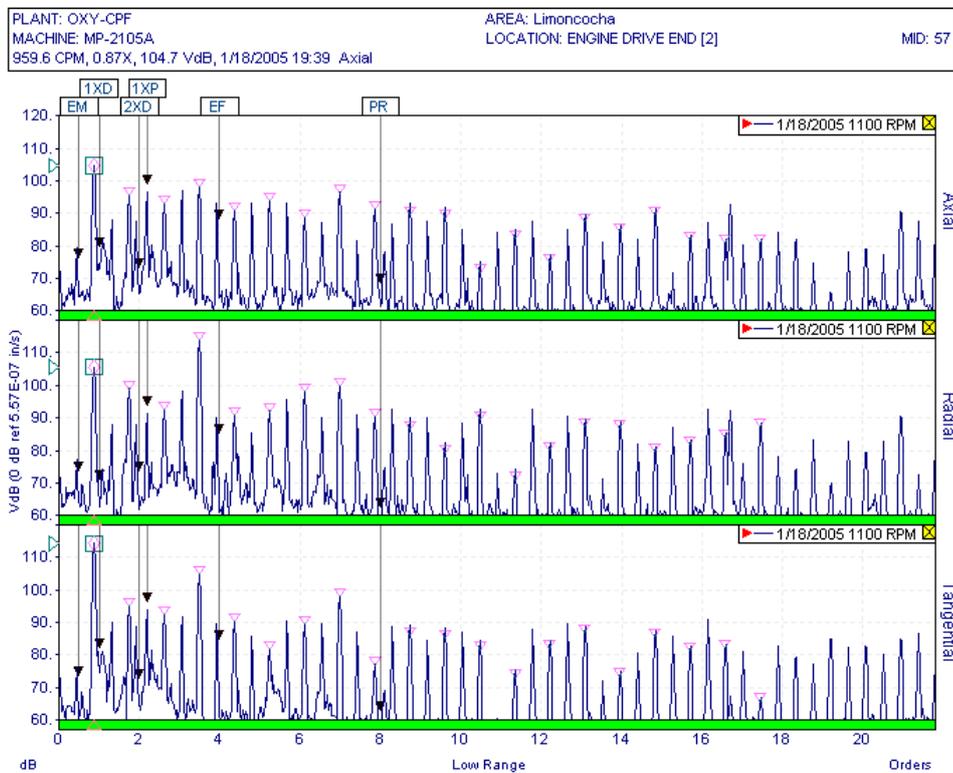
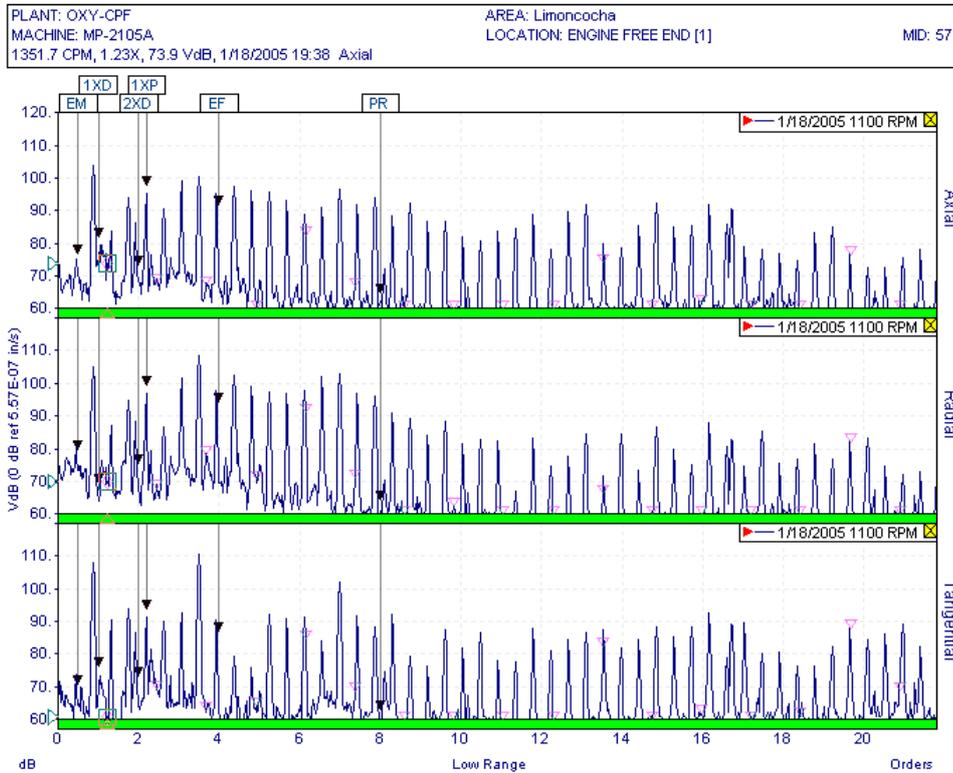


Información General

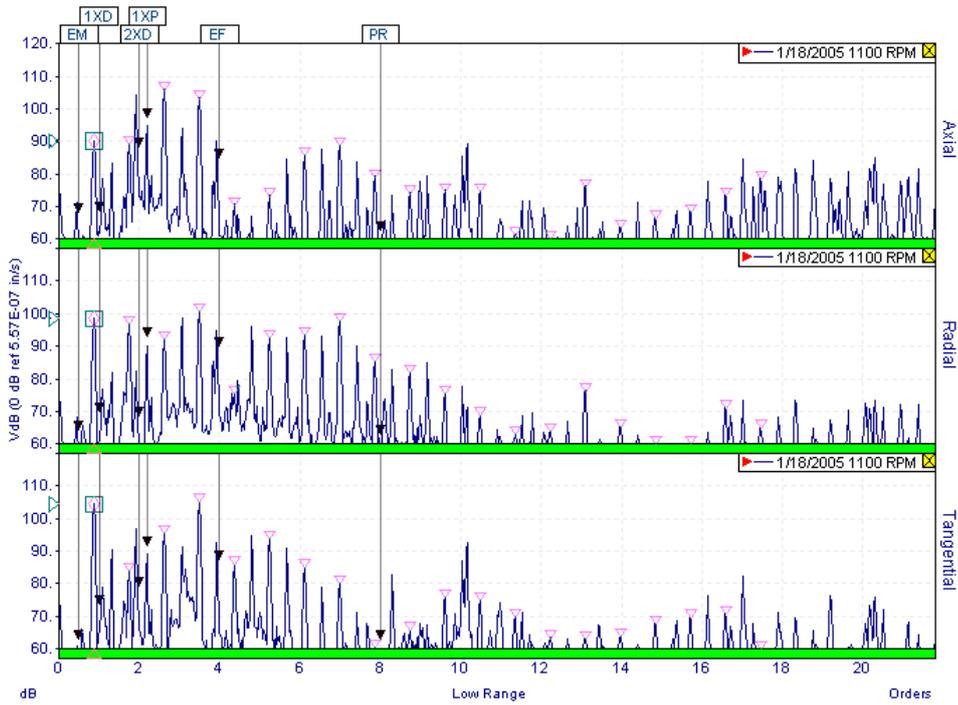
Velocidad Nominal (rpm): 1100
Número de Cilindros: 8
Engranés Bomba de Aceite: 18
Engranés Bomba de Agua: 18
Engranés Distribución: 99
Engrane Auxiliar: 136
Polos del Generador:
Alabes Ventilador: 12
Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial
Carga del Equipo (kW): 230

Etapas del Incrementador: 2
Relación de Velocidad: 2.2
Tipo de Apoyos: Rodamientos
Tipo de Bomba: Centrifuga
Número de Etapas:
Número de Paletas:
Tipo de Apoyo: Rodamientos

ESPECTROS DE REFERENCIA

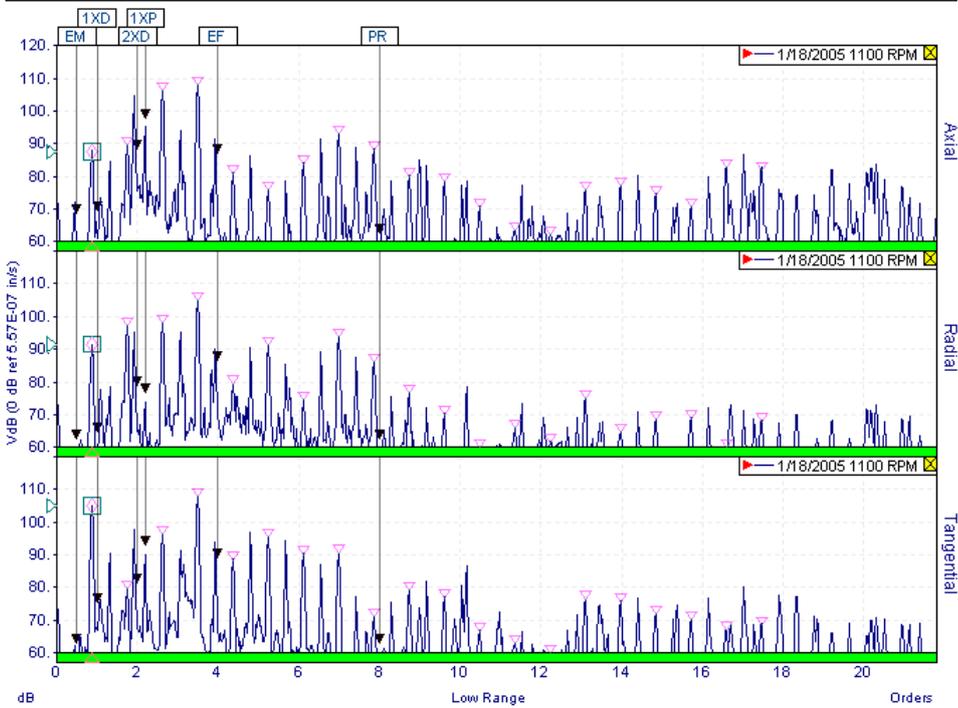


PLANT: OXY-CPF AREA: Limoncocha
MACHINE: MP-2105A LOCATION: GEARBOX 1 [3] MID: 57
960.3 CPM, 0.87X, 90.1 VdB, 1/18/2005 19:40 Axial

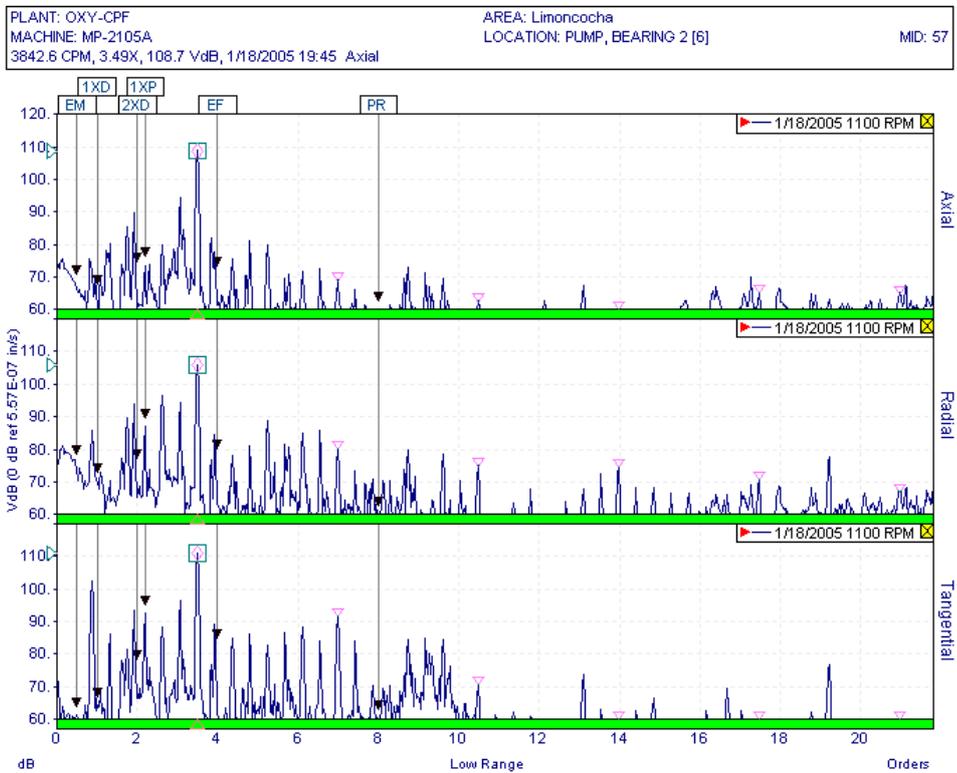
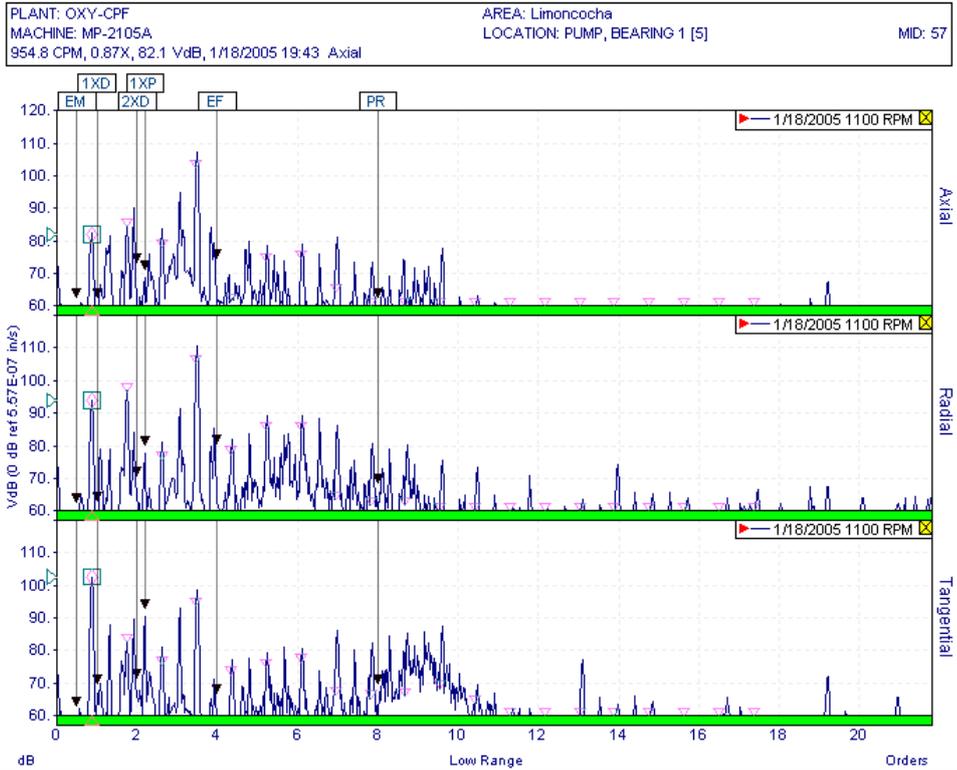


Incrementador, Posición 3 (GB1)

PLANT: OXY-CPF AREA: Limoncocha
MACHINE: MP-2105A LOCATION: GEARBOX 2 [4] MID: 57
960.4 CPM, 0.87X, 87.6 VdB, 1/18/2005 19:42 Axial



Incrementador, Posición 4 (GB2)



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS																
Máquina: MP-2105-A			Fecha: 18 de Enero del 2005			Período análisis de Tendencias: 18 Enero del 2005										
Unidades		Niveles de Alarma														
		Bueno					Regular					Malo				
in/s		0.5					0.6					0.7				
Vdb		119.1					120.6					122				
in/s		0.1					0.15					0.225				
Vdb		105.1					108.6					112.1				
in/s		0.125					0.2					0.3				
Vdb		107.0					111.1					114.6				
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración										Observaciones	Tendencia	Recomendaciones		
		Axial		Radial		Tang.		B		R					M	
Motor, MB1	0.5 XD	x		x		x		x		x		x		Los niveles de vibración se encuentran dentro de los límites admisibles. El espectro no muestra señales de fallas.	En este equipo se realizó únicamente una toma de datos.	Continuar con el monitoreo de vibración para detectar cambios en el funcionamiento del equipo.
	1XD	x		x		x		x		x		x				
	2XD	x		x		x		x		x		x				
	1XP	x		x		x		x		x		x				
	2XP	x		x		x		x		x		x				
	4X,EF	x		x		x		x		x		x				
	8X,PR	x		x		x		x		x		x				
12X	x		x		x		x		x		x					
Motor, MB2	0.5 XD	x		x		x		x		x		x		Los niveles de vibración se encuentran dentro de los límites admisibles. Existen picos altos de vibración a la velocidad de 1X en la dirección tangencial.		Se debe vigilar el equipo por un posible incremento del problema de desbalanceo.
	1XD	x		x		x		x		x		x				
	2XD	x		x		x		x		x		x				
	1XP	x		x		x		x		x		x				
	2XP	x		x		x		x		x		x				
	4X,EF	x		x		x		x		x		x				
	8X,PR	x		x		x		x		x		x				
12X	x		x		x		x		x		x					
Inc., GB1	0.5 XD	x		x		x		x		x		x		Los niveles de vibración son normales, no se evidencia ningún síntoma de falla.		Se debe continuar con el monitoreo de vibración para realizar un diagnóstico del verdadero estado del equipo y poder comparar los niveles de vibración.
	1XD	x		x		x		x		x		x				
	2XD	x		x		x		x		x		x				
	1XP	x		x		x		x		x		x				
	2XP	x		x		x		x		x		x				
	4X,EF	x		x		x		x		x		x				
	8X,PR	x		x		x		x		x		x				
12X	x		x		x		x		x		x					

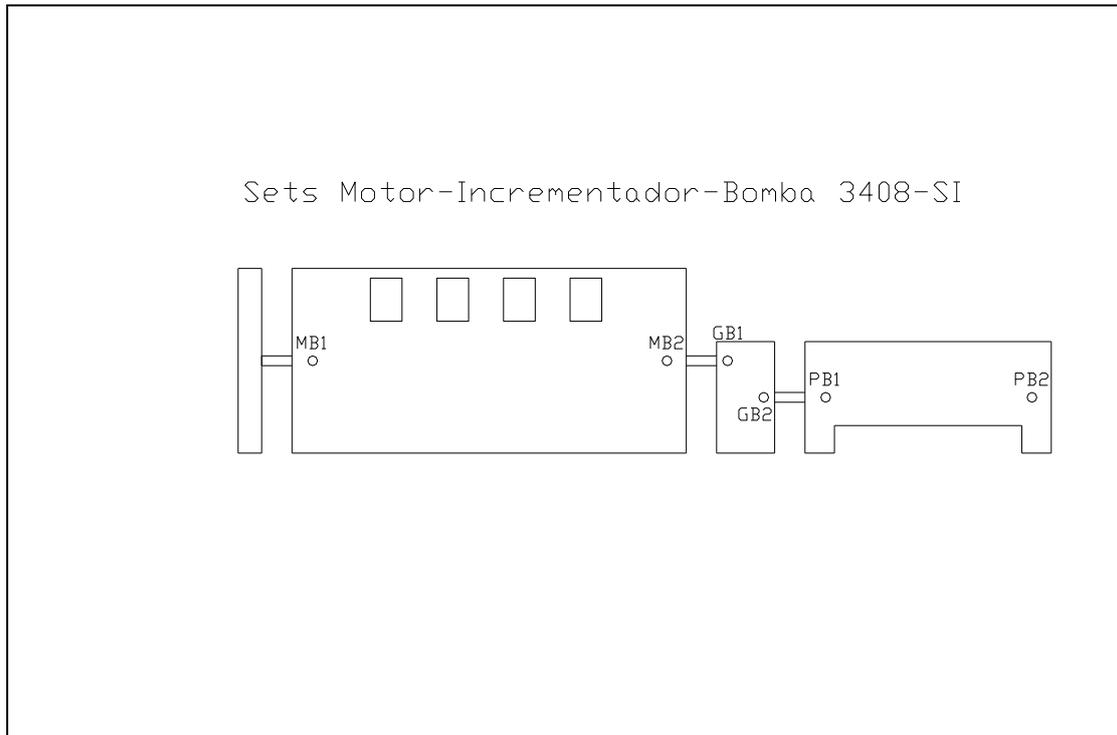
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración												Observaciones	Tendencia	Recomendaciones	
		Axial						Radial									
		B	R	M	B	R	M	B	R	M	B	R	M				
Inc., GB2	0,5 XD	x			x			x			x				El espectro no muestra fallas en esta parte del equipo.		Seguir con el monitoreo de vibración para controlar el estado de la máquina.
	1XD	x			x			x			x						
	2XD	x			x			x			x						
	1XP	x			x			x			x						
	2XP	x			x			x			x						
	4X,EF	x			x			x			x						
	8X,PR	x			x			x			x						
12X	x			x			x			x							
Bomba, PB1	0,5 XD	x			x			x			x				Se evidencia la presencia de vibraciones aleatorias. Los niveles de vibración en general están bajo los rangos admisibles.		Las vibraciones aleatorias tienen su origen en la entrada y la salida del agua.
	1XD	x			x			x			x						
	2XD	x			x			x			x						
	1XP	x			x			x			x						
	2XP	x			x			x			x						
	4X,EF	x			x			x			x						
	8X,PR	x			x			x			x						
12X	x			x			x			x							
Bomba, PB2	0,5 XD	x			x			x			x				El espectro no muestra evidencia de fallas en la bomba.		Se recomienda vigilar la bomba por un posible incremento del nivel de vibraciones.
	1XD	x			x			x			x						
	2XD	x			x			x			x						
	1XP	x			x			x			x						
	2XP	x			x			x			x						
	4X,EF	x			x			x			x						
	8X,PR	x			x			x			x						
12X	x			x			x			x							

HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: MP-2105-C

Ubicación: Limoncocha

Esquema General de la Máquina



Información General

Velocidad Nominal (rpm): 1100
Número de Cilindros: 8
Engranés Bomba de Aceite: 18
Engranés Bomba de Agua: 18
Engranés Distribución: 99
Engrane Auxiliar: 136
Polos del Generador:
Alabes Ventilador: 12
Tipo de Apoyos: Rodamientos
Carga del Equipo (kW):

Etapas del Incrementador: 2
Relación de Velocidad: 2.968
Tipo de Apoyos: Rodamientos
Tipo de Bomba: Centrifuga
Número de Etapas:
Número de Paletas:
Tipo de Apoyo: Rodamientos

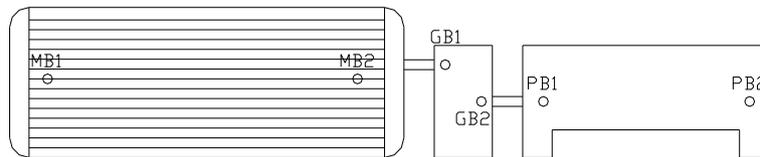
HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: P-601-A

Ubicación: Laguna

Esquema General de la Máquina

Sets Motor Electrico-Incrementador-Bomba P-601

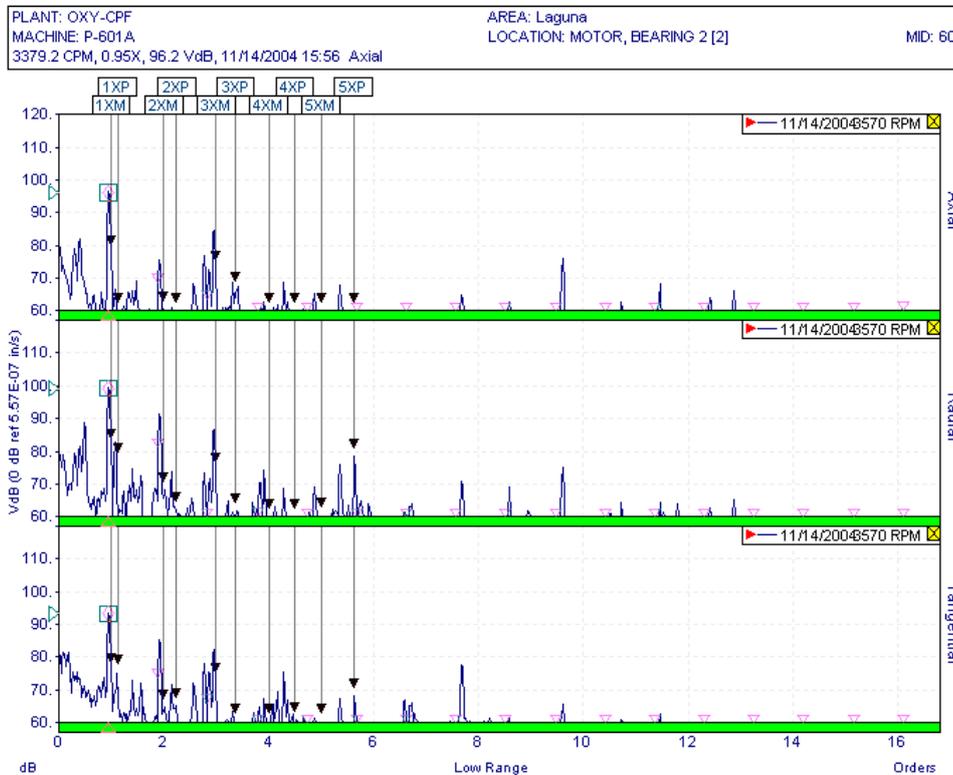
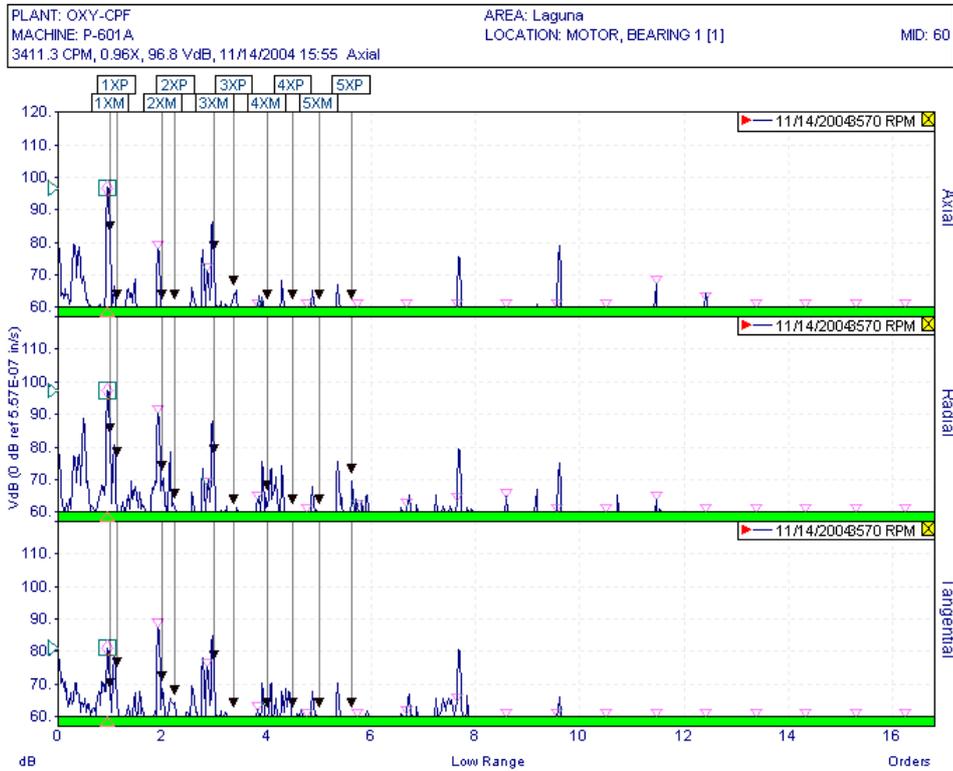


Información General

Velocidad Nominal (rpm): 3570
Número de Barras del Motor:
Alabes Ventilador: 12
Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial
Carga del Equipo (kW): 746

Etapas del Incrementador: 2
Relación de Velocidad: 1.123
Tipo de Apoyos: Rodamientos
Tipo de Bomba: Centrifuga
Número de Etapas:
Número de Paletas:
Tipo de Apoyo: Rodamientos

ESPECTROS DE REFERENCIA



PLANT: OXY-CPF AREA: Laguna
 MACHINE: P-601A LOCATION: GEARBOX 1 [3] MID: 60
 3379.2 CPM, 0.95X, 101.7 VdB, 11/14/2004 15:57 Axial



Incrementador, Posición 3 (GB1)

PLANT: OXY-CPF AREA: Laguna
 MACHINE: P-601A LOCATION: GEARBOX 2 [4] MID: 60
 3379.2 CPM, 0.95X, 101.1 VdB, 11/14/2004 15:58 Axial



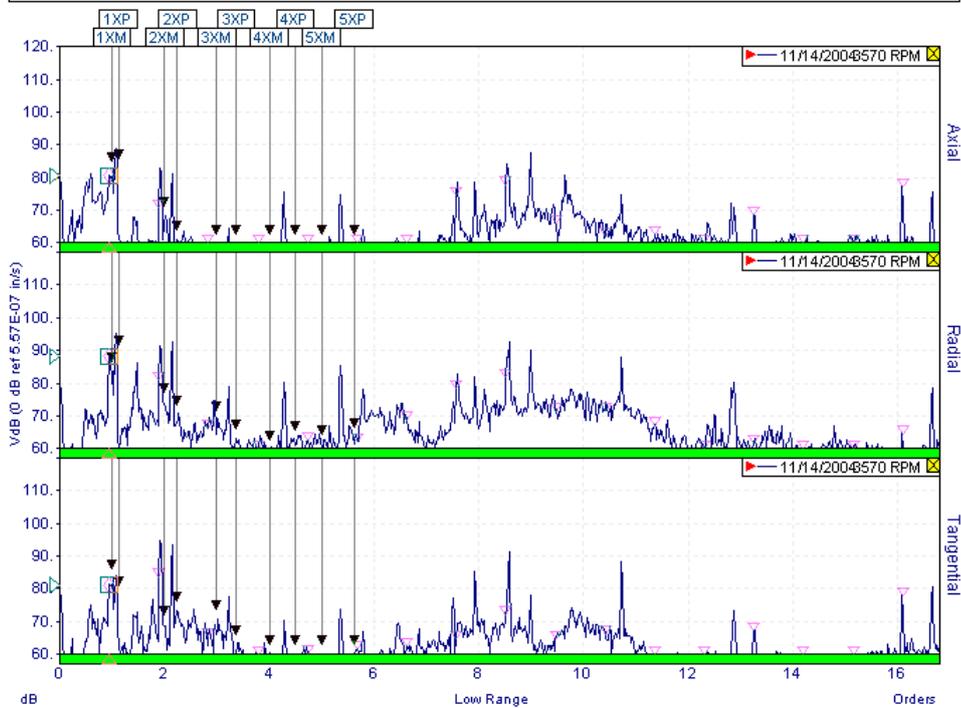
Incrementador, Posición 4 (GB2)

PLANT: OXY-CPF	AREA: Laguna	MID: 60
MACHINE: P-601A	LOCATION: PUMP, BEARING 1 [5]	
3379.2 CPM, 0.95X, 82.2 VdB, 11/14/2004 15:59 Axial		



Bomba, Posición 5 (PB1)

PLANT: OXY-CPF	AREA: Laguna	MID: 60
MACHINE: P-601A	LOCATION: PUMP, BEARING 2 [6]	
3379.2 CPM, 0.95X, 80.6 VdB, 11/14/2004 16:00 Axial		

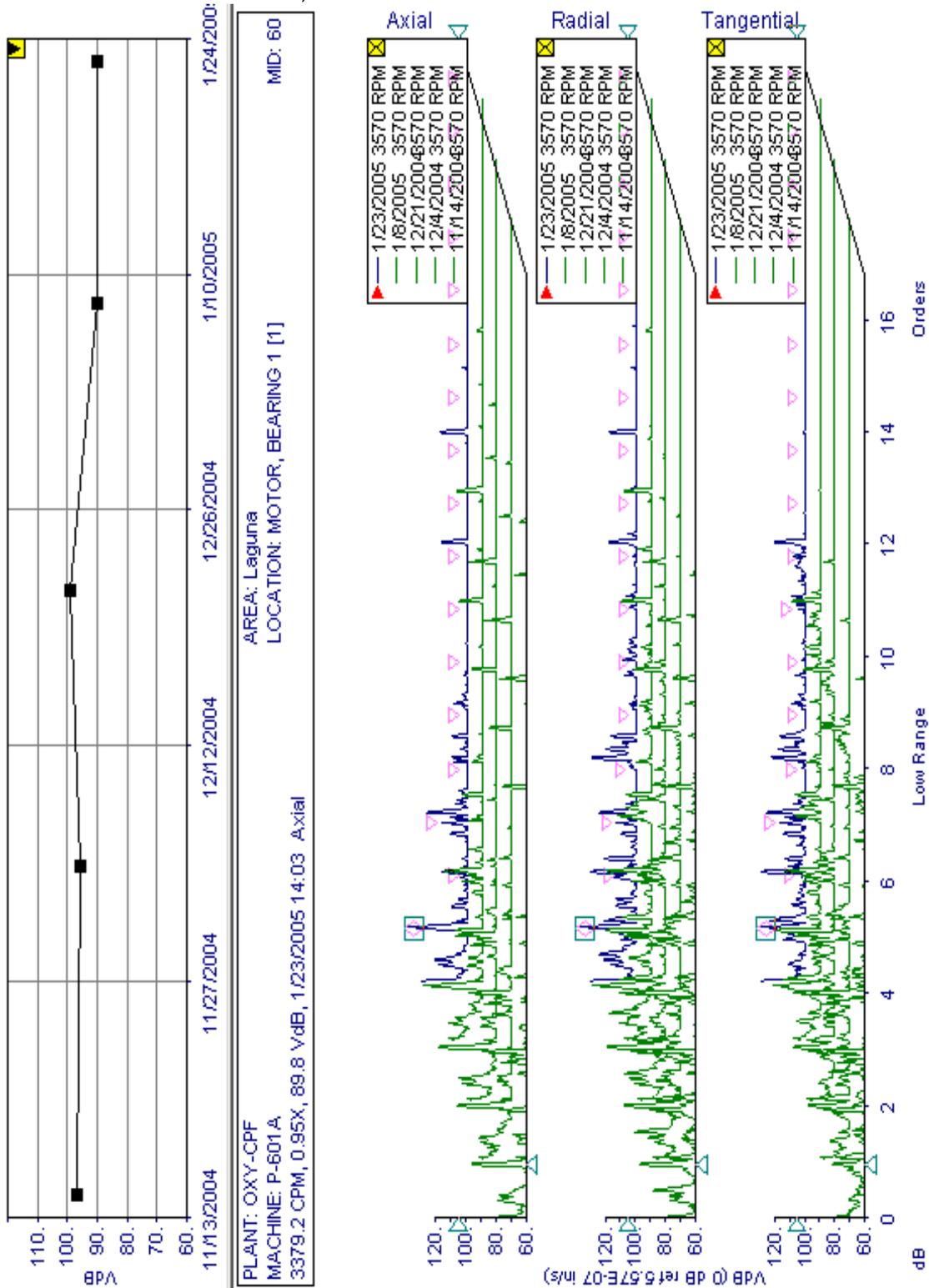


Bomba, Posición 6 (PB2)

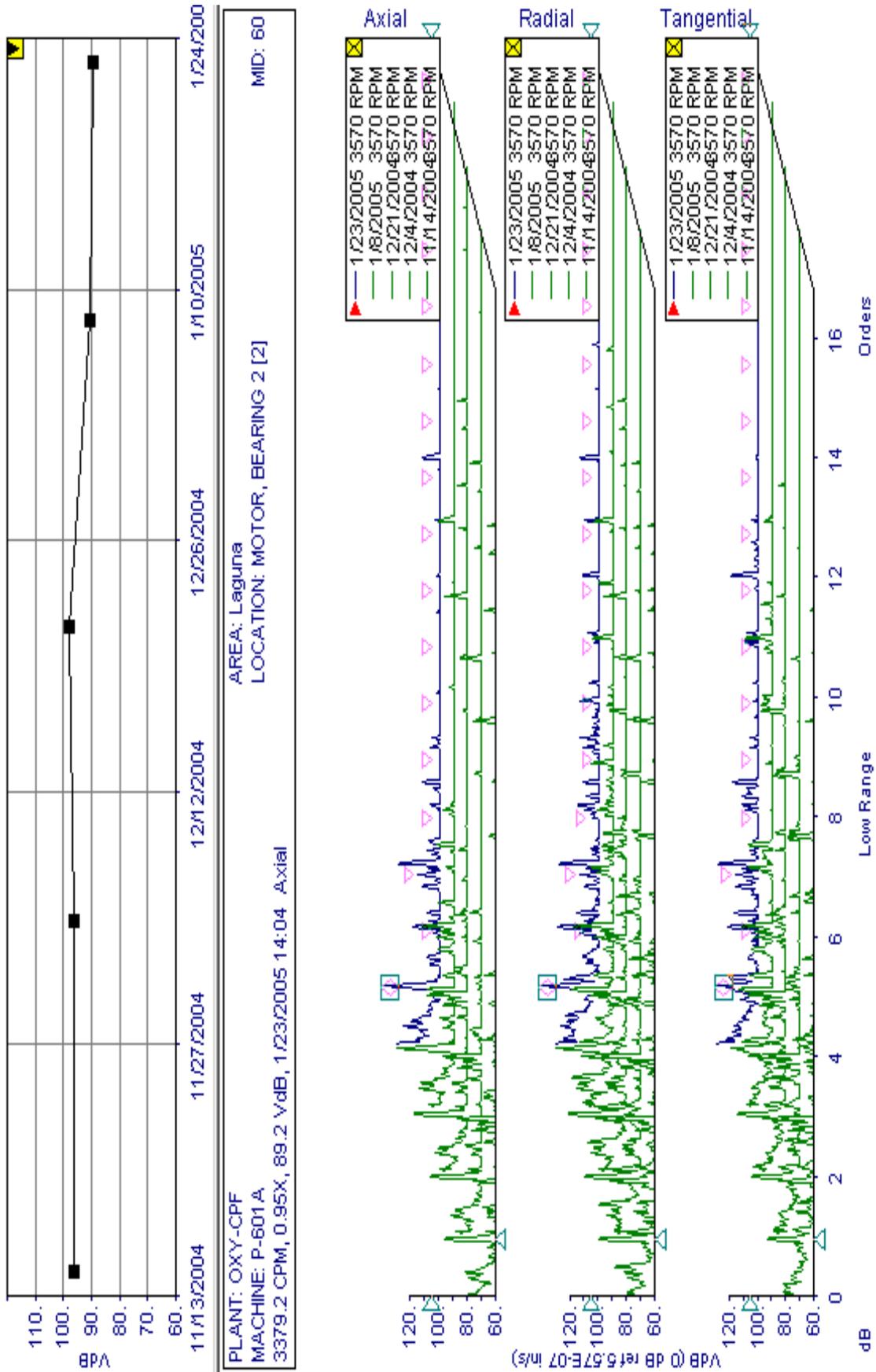
Gráficas de Cascada y Tendencia

Máquina: P-601-A
Ubicación: Laguna

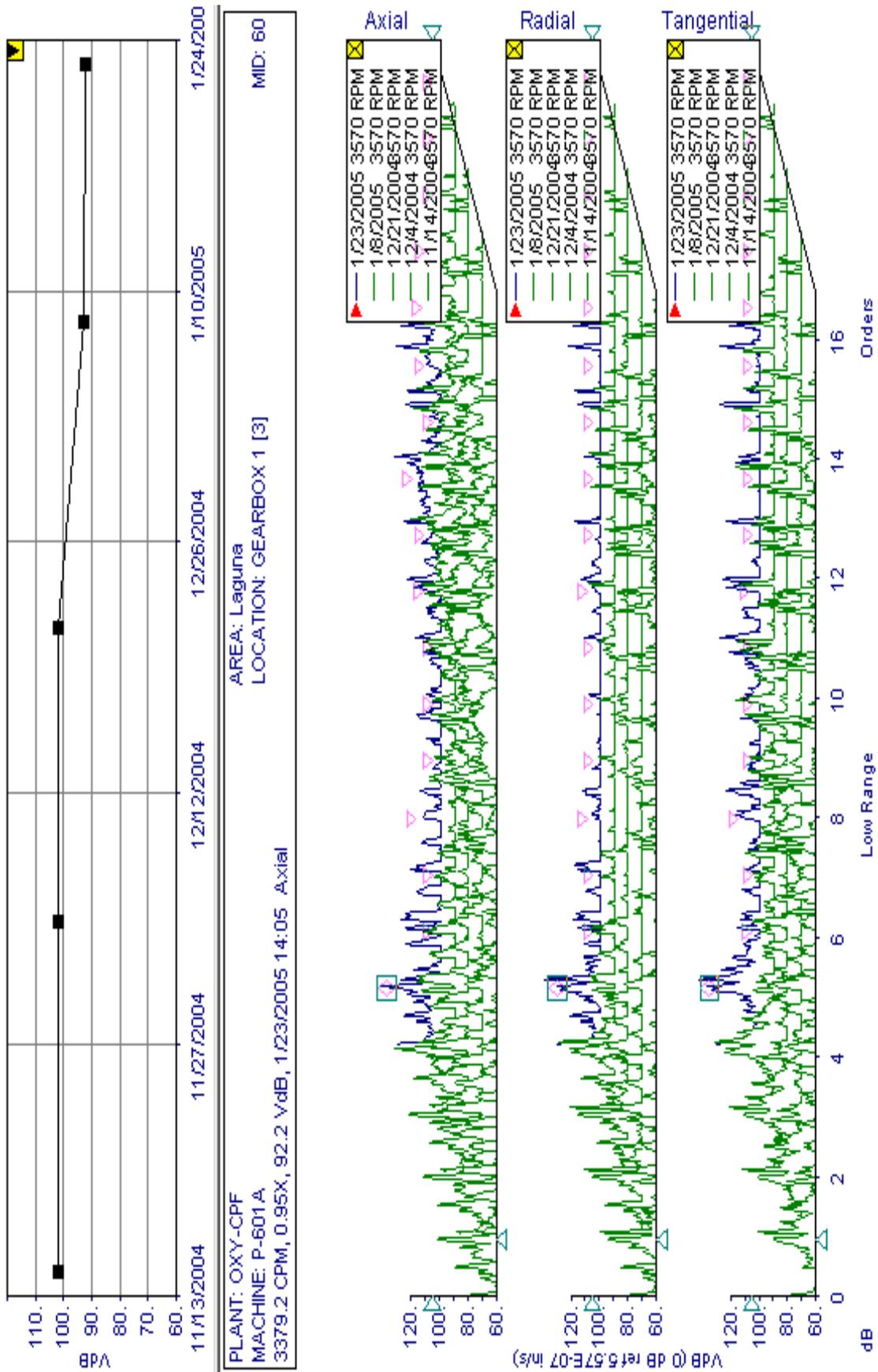
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



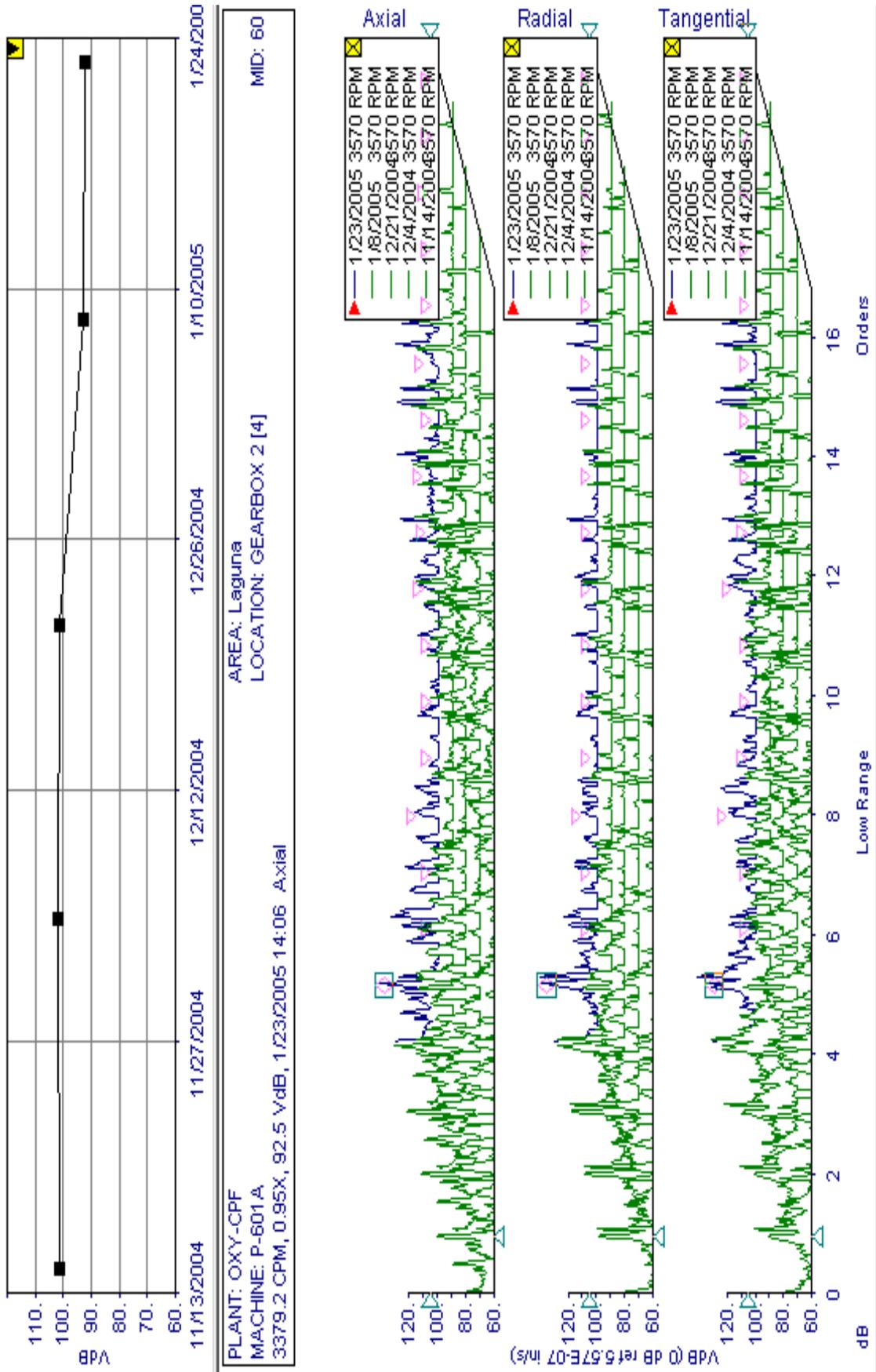
2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



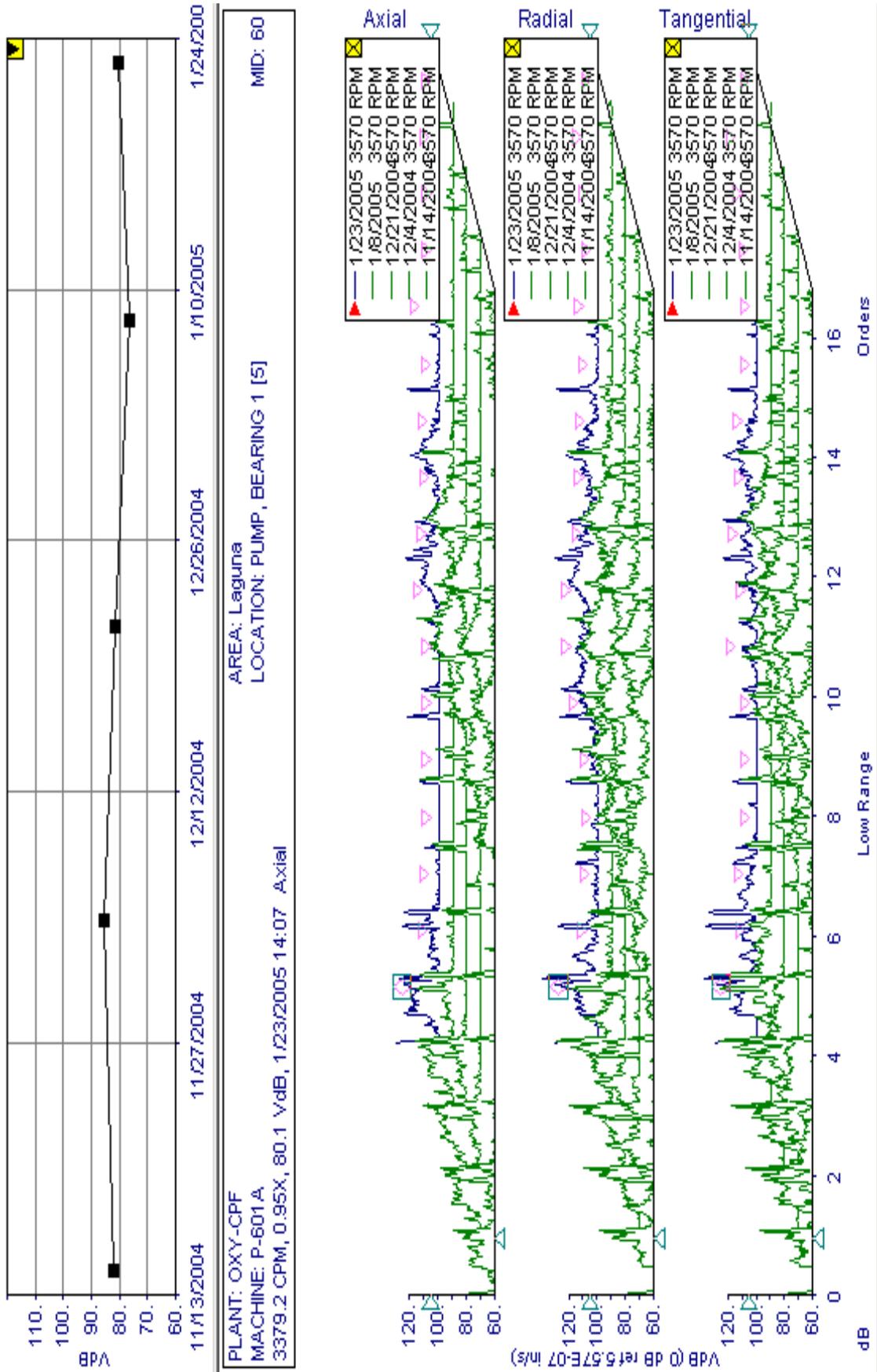
3.- Rodamiento del incrementador, lado conducido.



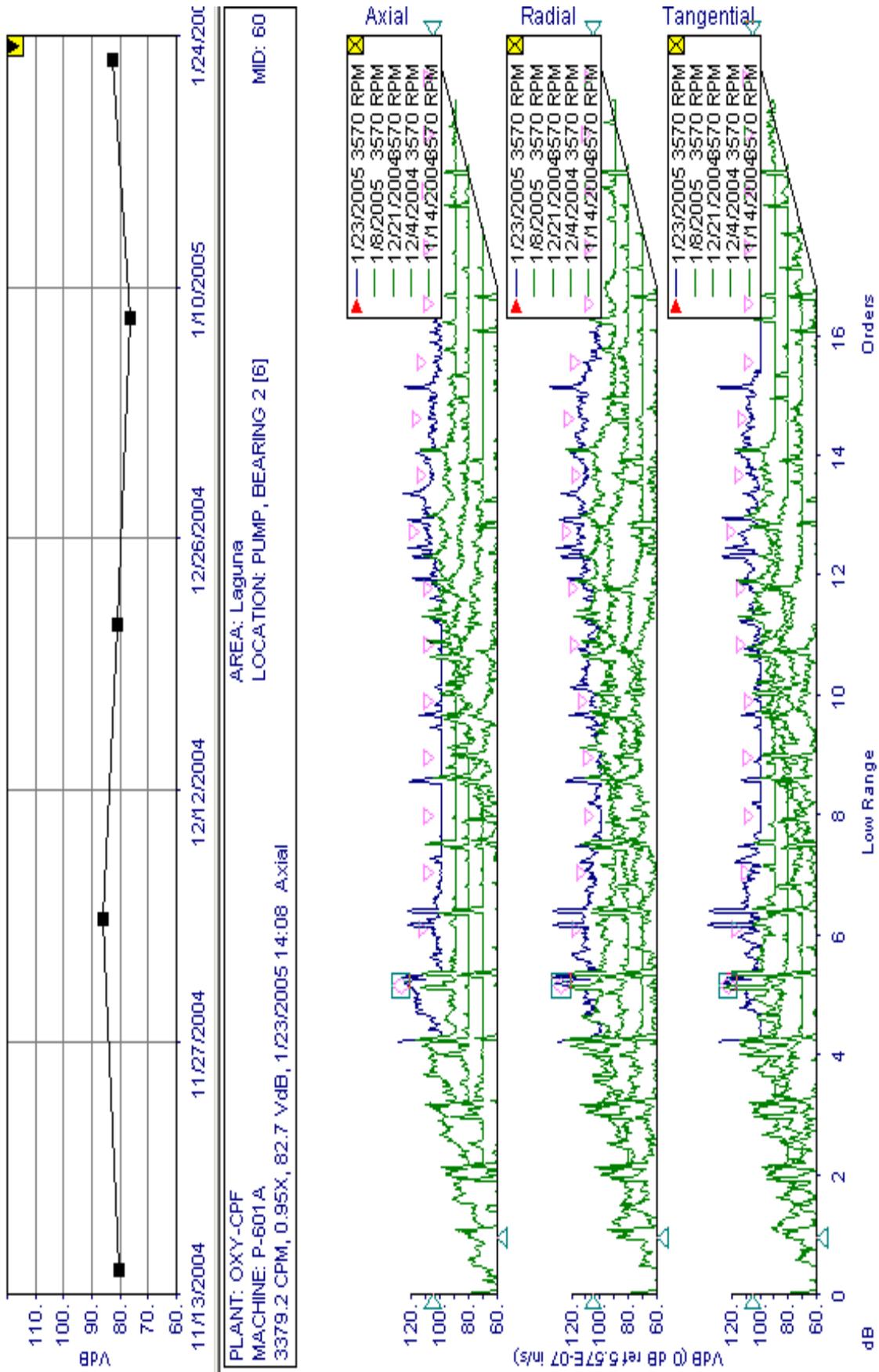
4.- Rodamiento del incrementador, lado conductor.



5.- Rodamiento de la bomba, lado conducido.



6.- Rodamiento de la bomba, lado libre.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS											
Máquina: P-601-A			Fecha: 14 de Noviembre del 2004			Período análisis de Tendencias: 14 Noviembre/2004-23 Enero/2005					
Niveles de Alarma											
Unidades		Bueno			Regular			Malo			
in/s		0.065			0.1			0.15			
Vdb		101.3			105.1			108.6			
in/s		0.1			0.15			0.225			
Vdb		105.1			108.6			112.1			
in/s		0.125			0.2			0.3			
Vdb		107.0			111.1			114.6			
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración						Observaciones	Tendencia	Recomendaciones	
		Axial		Radial		Tang.					
		B	R	B	R	B	R	M			
Motor, MB1	1XM	x		x		x		x	Los niveles de vibración se encuentran dentro de los límites admisibles. Se evidencia la presencia de vibración a velocidades menores a la de rotación del motor.	Los niveles de vibración se han mantenido sin variación durante el periodo de análisis.	Los bajos niveles de vibración nos demuestran que la maquina se encuentra trabajando en buenas condiciones.
	2XM	x		x		x		x			
	3XM	x		x		x		x			
	4XM	x		x		x		x			
	1XP	x		x		x		x			
	2XP	x		x		x		x			
	3XP	x		x		x		x			
	4XP	x		x		x		x			
Motor, MB2	1XM	x		x		x		x	Se evidencia la presencia de picos de vibración a velocidades inferiores a la velocidad nominal del motor. Los niveles generales de vibración están bajo límites admisibles.	La gráfica de tendencias muestra que no han progresado los síntomas de falla.	El motor esta trabajando en buenas condiciones, se debe continuar con el monitoreo de vibraciones para detectar a tiempo posibles problemas que puedan aparecer.
	2XM	x		x		x		x			
	3XM	x		x		x		x			
	4XM	x		x		x		x			
	1XP	x		x		x		x			
	2XP	x		x		x		x			
	3XP	x		x		x		x			
	4XP	x		x		x		x			
Inc., GB1	1XM	x		x		x		x	Los niveles de vibración están bajo los rangos admisibles. Se evidencia la presencia de vibraciones aleatorias.	Los niveles de vibración se han mantenido constantes.	La presencia de vibración aleatoria puede ser una indicación de soltura o aflojamiento. Los niveles son muy bajos pero se recomienda monitorear el avance de estas fallas.
	2XM	x		x		x		x			
	3XM	x		x		x		x			
	4XM	x		x		x		x			
	1XP	x		x		x		x			
	2XP	x		x		x		x			
	3XP	x		x		x		x			
	4XP	x		x		x		x			

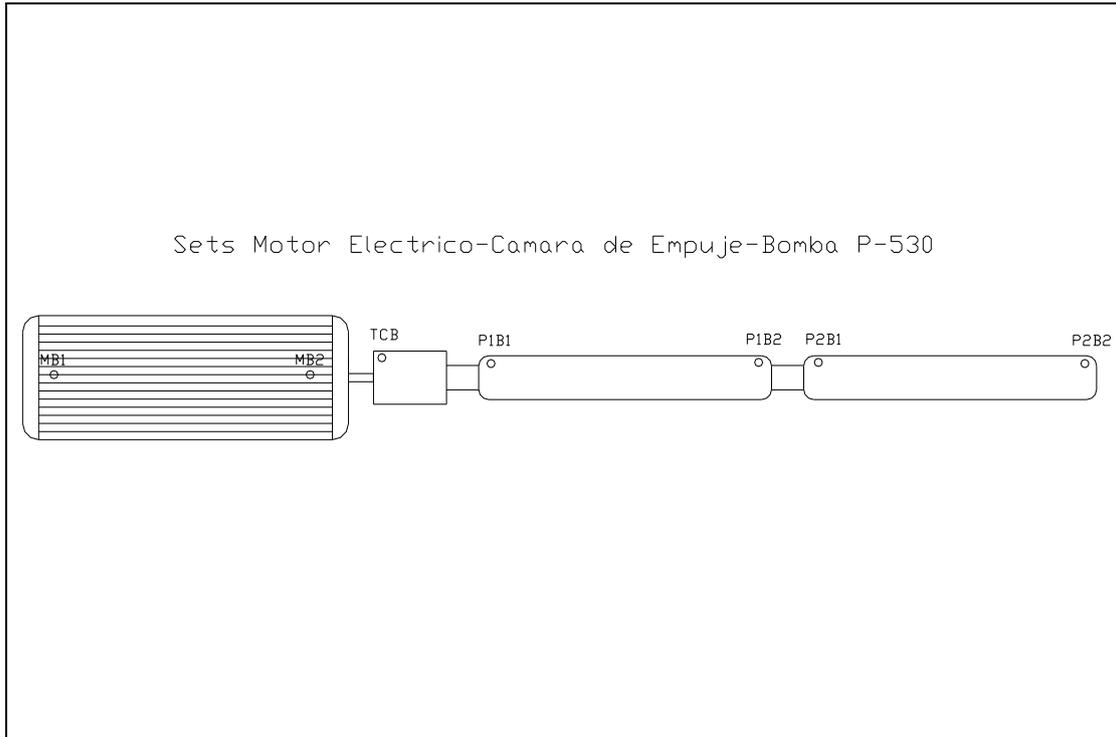
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración										Observaciones	Tendencia	Recomendaciones		
		Axial					Radial								Tang.	
		B	R	M	B	R	B	R	M	B	R					
Inc., GB2	1XM	x				x					x			Se evidencia la presencia de vibraciones aleatorias, pero los niveles de vibración están bajo los límites admisibles.	El gráfico de tendencias muestra que no ha habido cambios en la condición del equipo.	Revisar el equipo por problemas de soltura o aflojamiento.
	2XM	x				x					x					
	3XM	x				x					x					
	4XM	x				x					x					
	1XP	x				x					x					
	2XP	x				x					x					
	3XP	x				x					x					
	4XP	x				x					x					
Bomba, PB1	1XM	x				x					x			Se evidencia la presencia de vibraciones aleatorias. Los niveles de vibración en general están bajo los rangos admisibles.	Los niveles de vibración se han mantenido constantes durante el periodo de monitoreo.	Las vibraciones aleatorias tienen su origen en la entrada y la salida del agua.
	2XM	x				x					x					
	3XM	x				x					x					
	4XM	x				x					x					
	1XP	x				x					x					
	2XP	x				x					x					
	3XP	x				x					x					
	4XP	x				x					x					
Bomba, PB2	1XM	x				x					x			El espectro no muestra evidencia de fallas en la bomba.	No se evidencia ningún cambio en la forma del espectro ni en el nivel de las vibraciones.	Se recomienda vigilar la bomba por un posible incremento del nivel de vibraciones.
	2XM	x				x					x					
	3XM	x				x					x					
	4XM	x				x					x					
	1XP	x				x					x					
	2XP	x				x					x					
	3XP	x				x					x					
	4XP	x				x					x					

HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: P-530-C

Ubicación: Jivino E

Esquema General de la Máquina

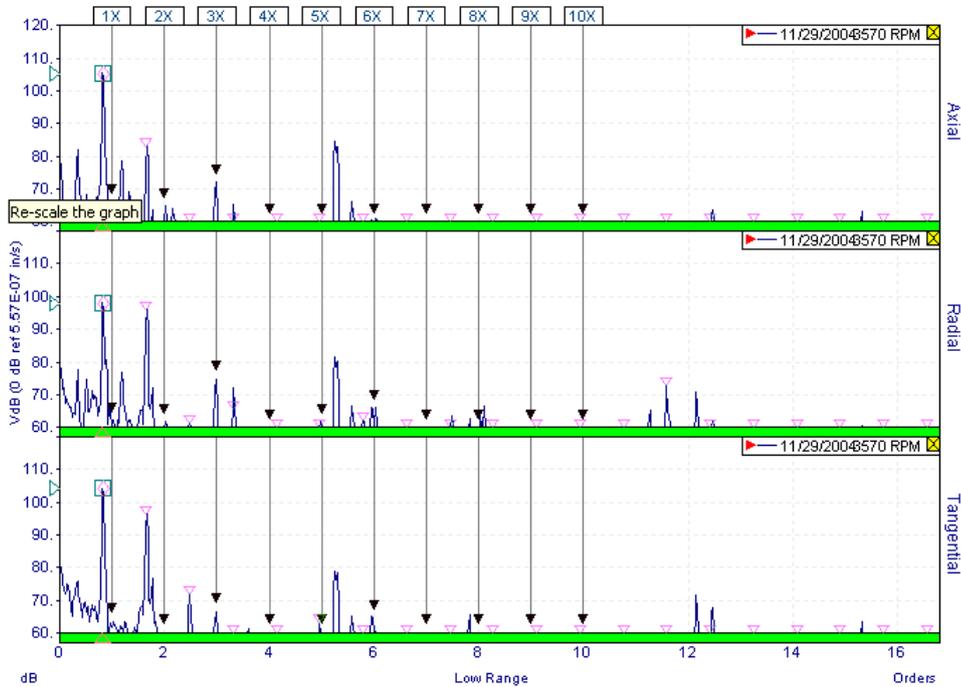


Información General

Velocidad Nominal (rpm): 3570	Tipo de Bomba: Centrifuga
Número de Barras del Motor:	Número de Etapas:
Alabes Ventilador: 14	Número de Paletas:
Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial	Tipo de Apoyo: Rodamientos
Carga del Equipo (kW): 440	

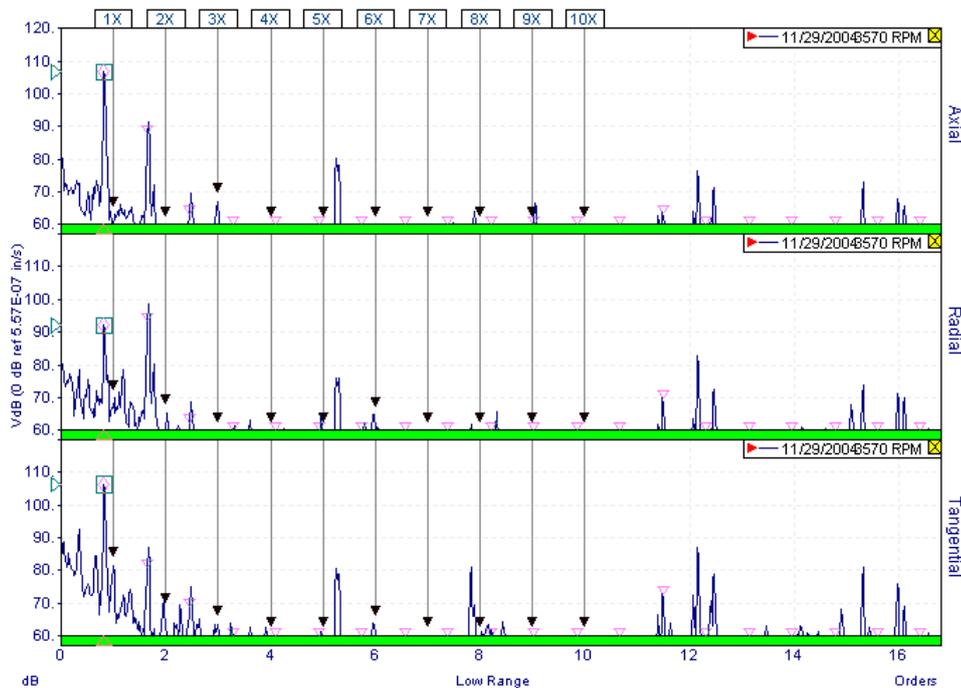
ESPECTROS DE REFERENCIA

PLANT: OXY-CPF AREA: Jivino E
 MACHINE: P-530-C LOCATION: MOTOR, FREE END [1] MID: 62
 2954.6 CPM, 0.83X, 105.3 VdB, 11/29/2004 14:48 Axial

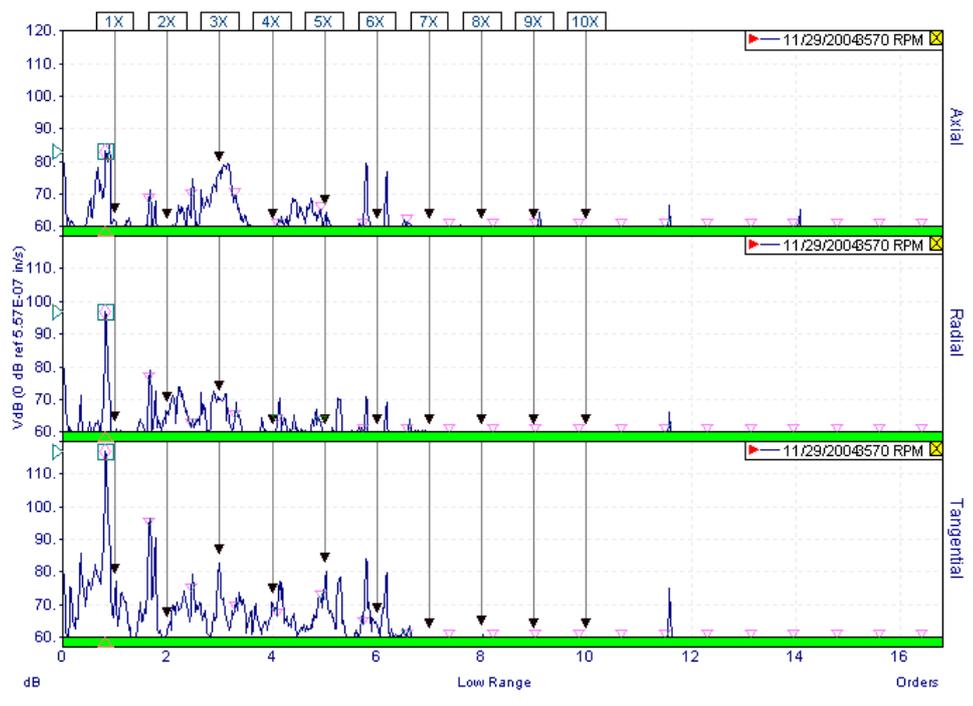


Motor, Posición 1 (MB1)

PLANT: OXY-CPF AREA: Jivino E
 MACHINE: P-530-C LOCATION: MOTOR, DRIVING END [2] MID: 62
 2928.7 CPM, 0.82X, 106.7 VdB, 11/29/2004 14:49 Axial



Motor, Posición 2 (MB2)

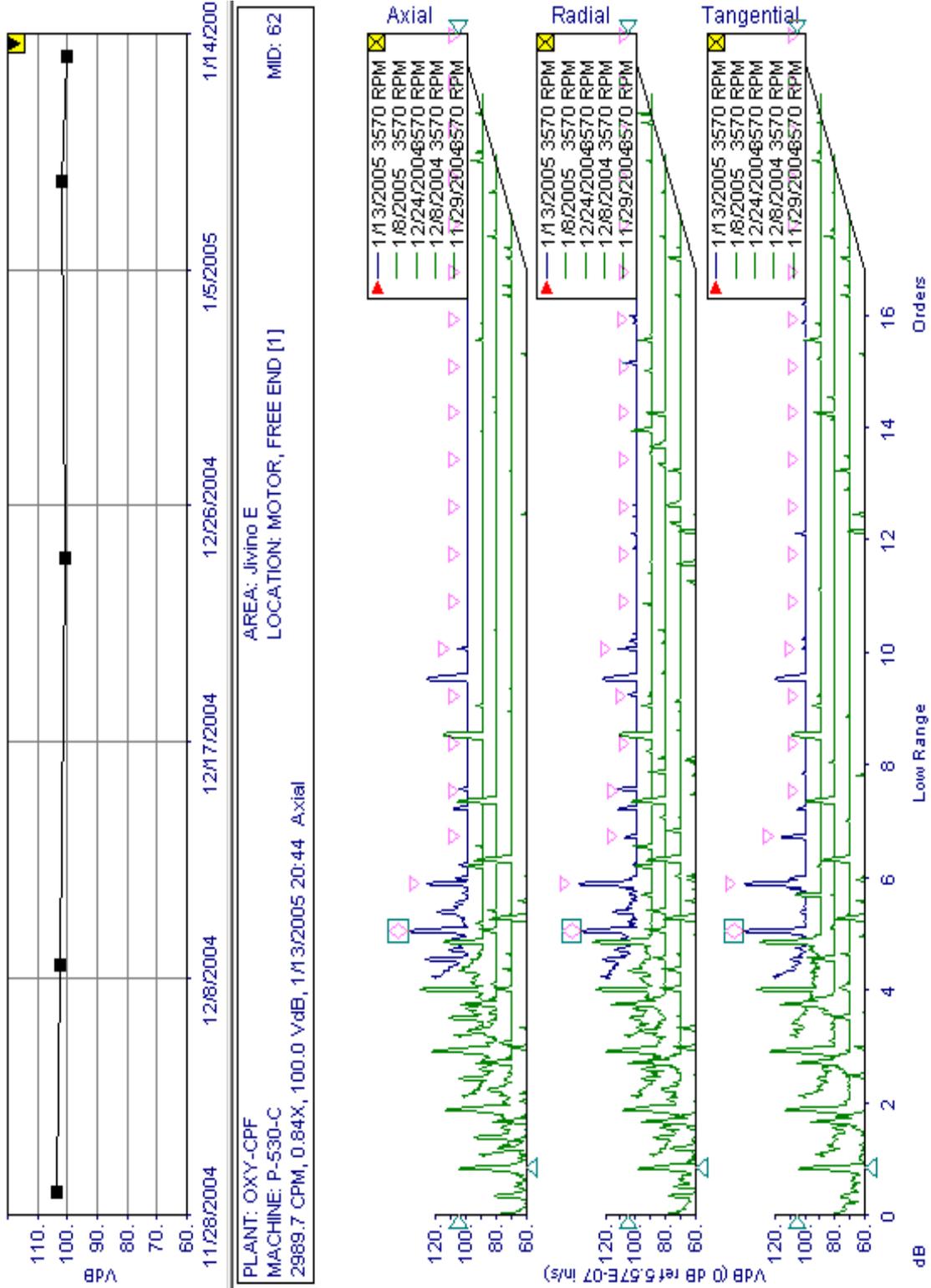


Bomba 2, Posición 7 (P2B2)

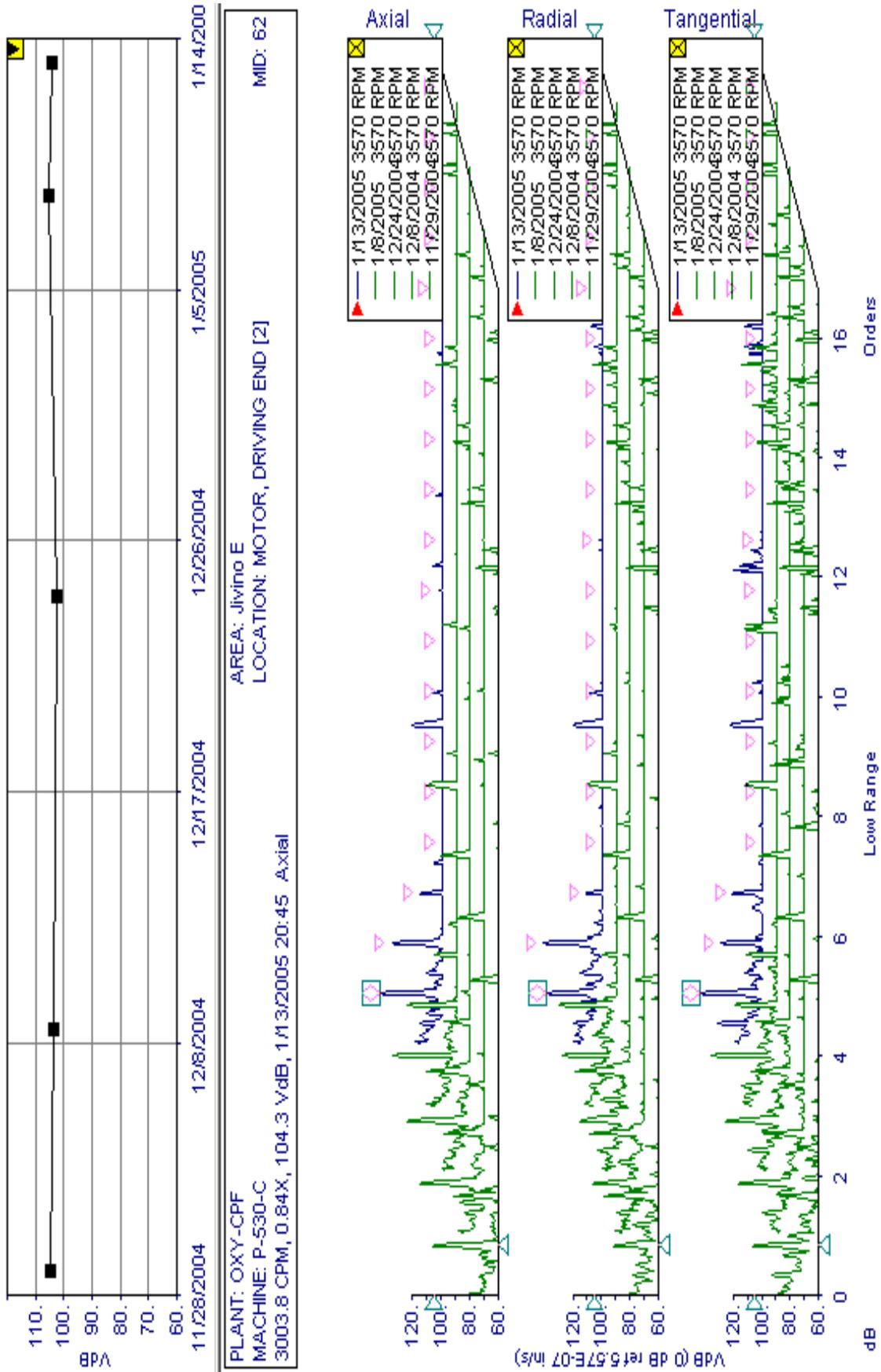
Gráficas de Cascada y Tendencia

Máquina: P-530-C
Ubicación: Jivino E

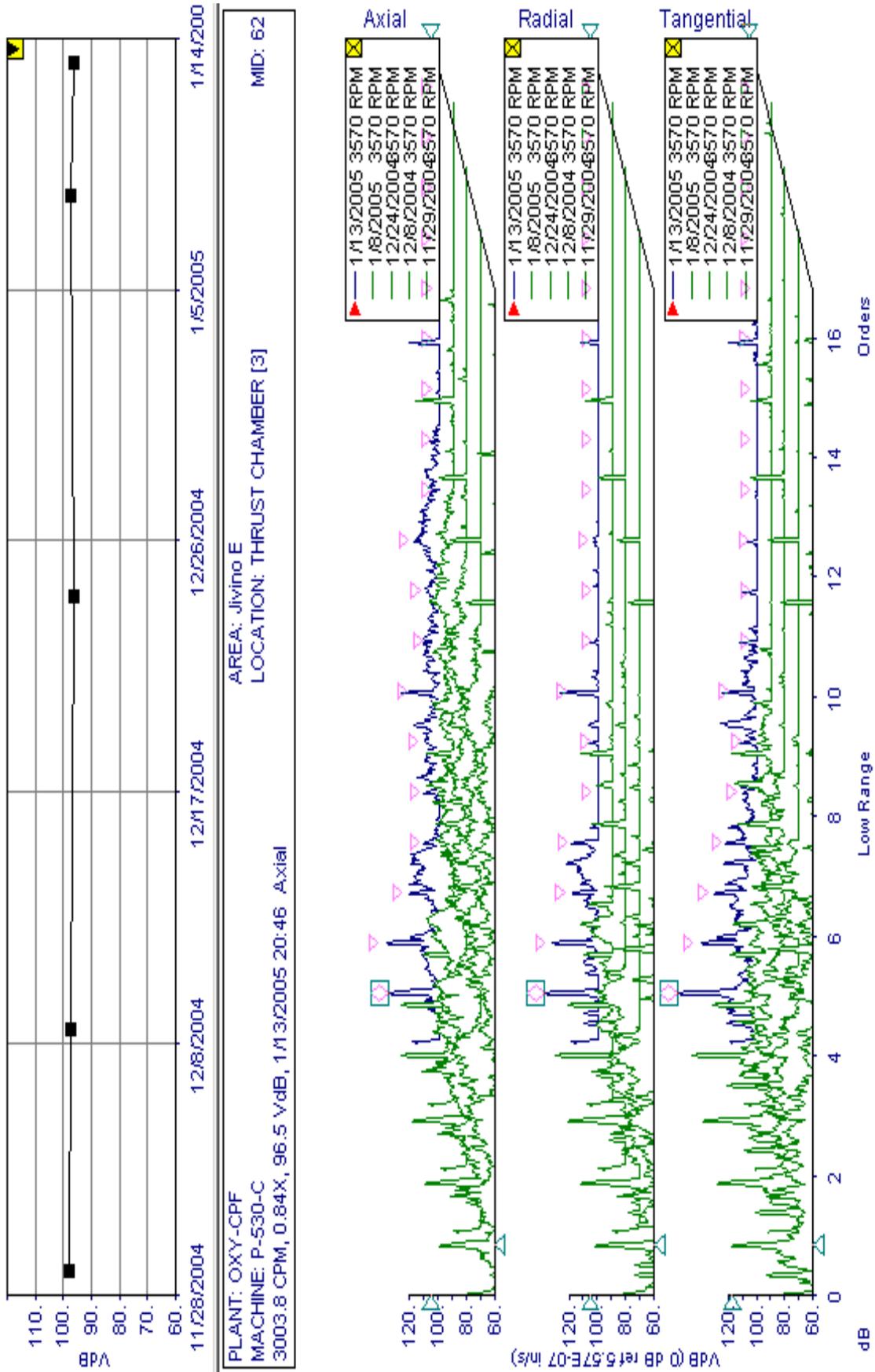
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



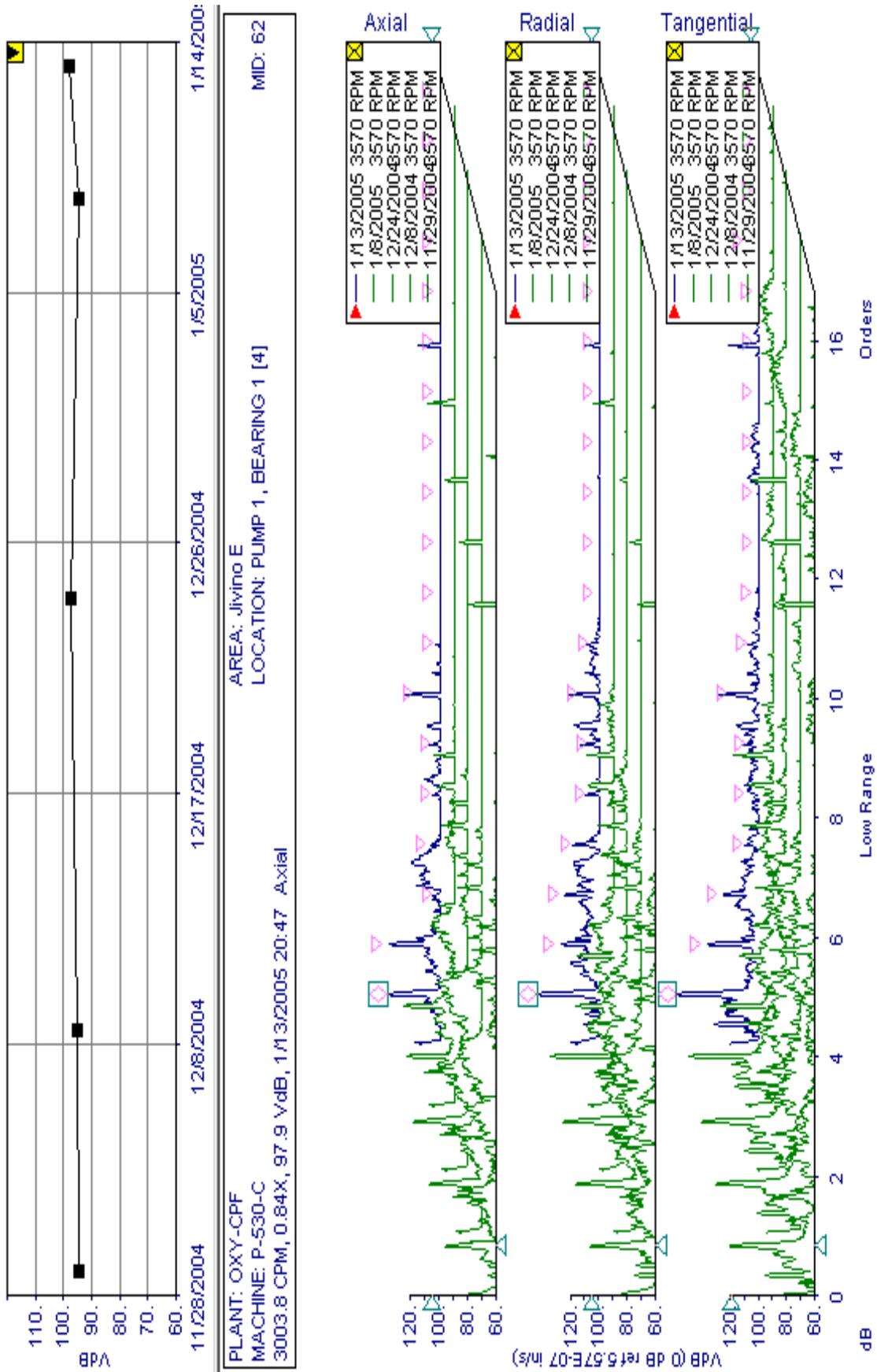
2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



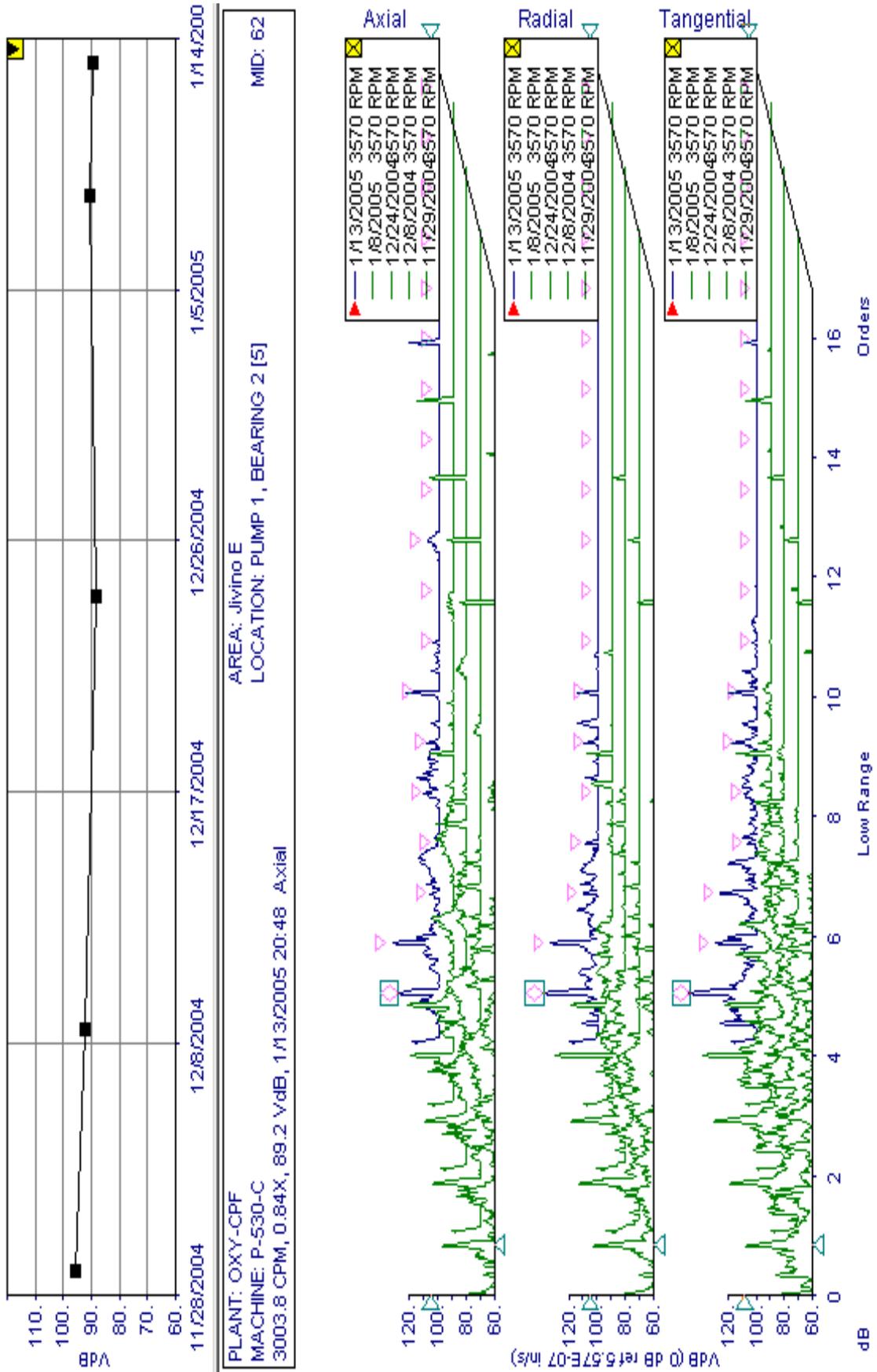
3.- Cámara de Empuje.



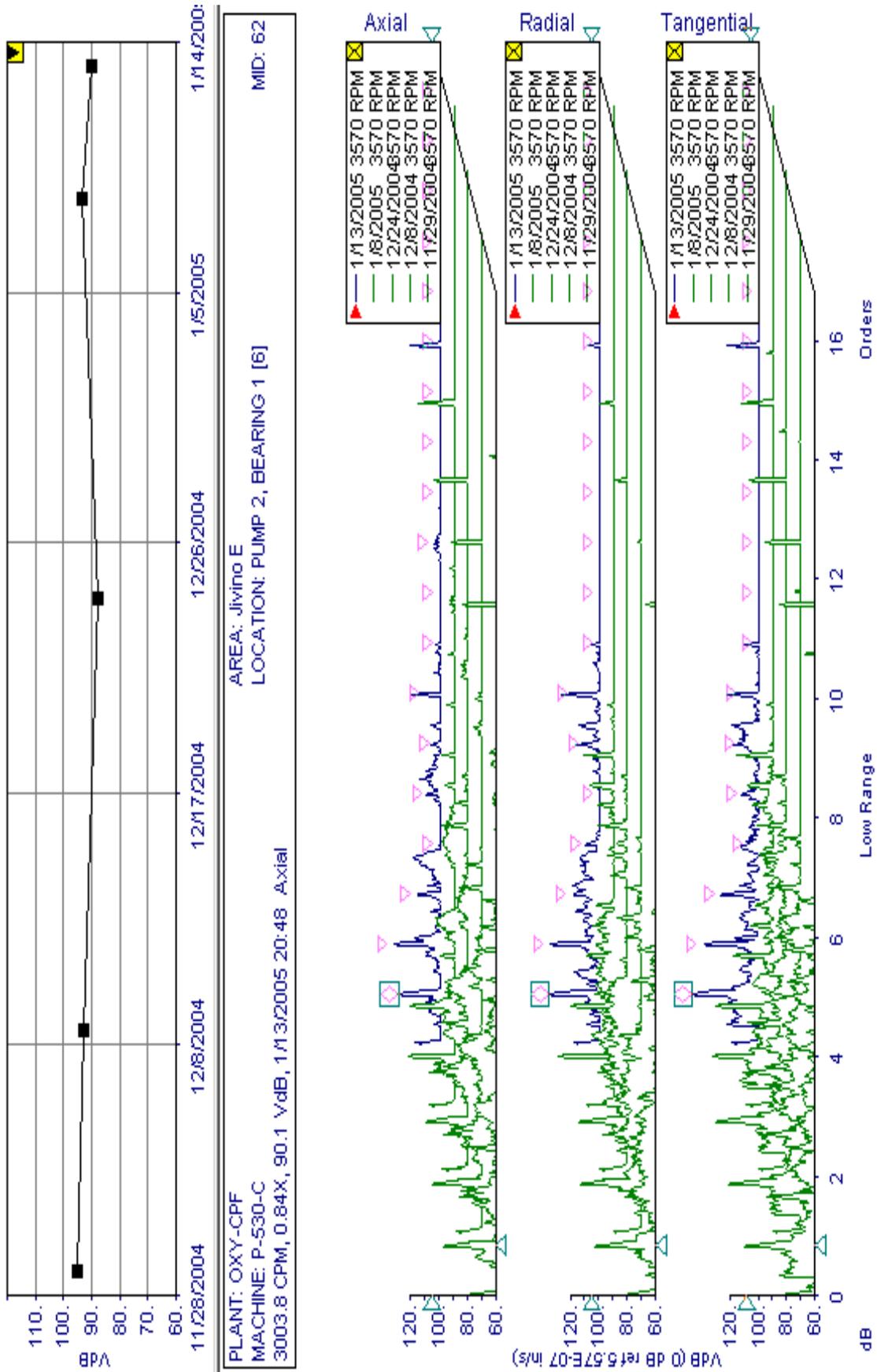
4.- Rodamiento de la bomba 1, lado conducido.



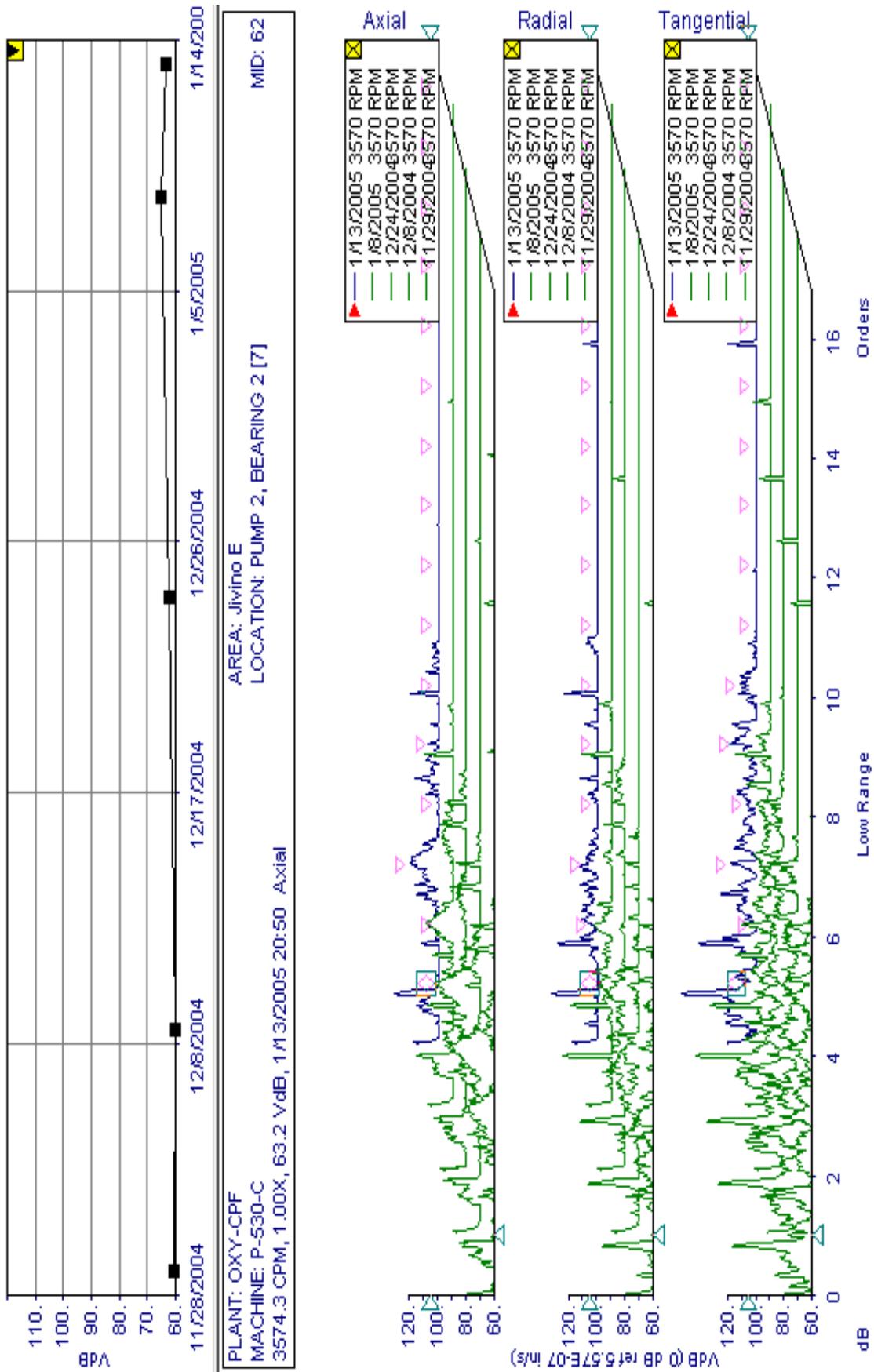
5.- Rodamiento de la bomba 1, lado conductor.



6.- Rodamiento de la bomba 2, lado conducido.



7.- Rodamiento de la bomba 2, lado libre.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS													
Máquina: P-530-C		Fecha: 29 de Noviembre del 2004			Período análisis de Tendencias: 29 Noviembre/2004-13 Enero/2005								
Unidades		Niveles de Alarma											
		Bueno		Regular		Malo							
in/s		0.065		0.1		0.15							
Vdb		101.3		105.1		108.6							
in/s		0.1		0.15		0.225							
Vdb		105.1		108.6		112.1							
in/s		0.125		0.2		0.3							
Vdb		107.0		111.1		114.6							
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración								Observaciones	Tendencia	Recomendaciones	
		Axial		Radial		Tang.							
		B	R	M	B	R	M	B	R	M			
Motor, MB1	1X		x		x		x		x				El motor presenta síntomas de desbalanceo. Estos síntomas se encuentran todavía dentro de los límites admisibles, pero se debe vigilar el motor por un posible incremento de vibraciones.
	2X		x		x		x		x				
	3X		x		x		x		x				
	4X		x		x		x		x				
	5X		x		x		x		x				
	6X		x		x		x		x				
	7X		x		x		x		x				
	8X		x		x		x		x				
Motor, MB2	1X		x		x		x		x				Este espectro comprueba que existen problemas de desbalanceo pero este se encuentra dentro de los límites admisibles.
	2X		x		x		x		x				
	3X		x		x		x		x				
	4X		x		x		x		x				
	5X		x		x		x		x				
	6X		x		x		x		x				
	7X		x		x		x		x				
	8X		x		x		x		x				
C.E, TC1	1X		x		x		x		x				Es recomendable mantener vigilada a esta bomba debido a que los niveles de vibración en 1X son muy altos.
	2X		x		x		x		x				
	3X		x		x		x		x				
	4X		x		x		x		x				
	5X		x		x		x		x				
	6X		x		x		x		x				
	7X		x		x		x		x				
	8X		x		x		x		x				

Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración												Observaciones	Tendencia	Recomendaciones			
		Axial						Radial									Tang.		
		B	R	M	B	R	M	B	R	M	B	R	M						
Bomba, P1B1	1X	x									x						Los niveles de vibración a la velocidad de 1X en la dirección tangencial y radial son demasiado altos.	A pesar de que los niveles de vibración en la bomba son excesivamente altos, estos se han mantenido sin ninguna variación durante el periodo de análisis.	El monitoreo de vibraciones debe realizarse con mayor frecuencia para detectar la causa del problema. Se debe considerar que el ingreso del agua esta cerca y es en dirección tangencial.
	2X	x										x							
	3X	x											x						
	4X	x											x						
	5X	x											x						
	6X	x											x						
	7X	x											x						
	8X	x											x						
Bomba, P1B2	1X	x														x	Existen alta vibración en 1X en dirección tangencial.	Los niveles de vibración se han mantenido constantes, incluso existió una ligera disminución.	La alta vibración observada en este punto puede ser una repercusión del problema encontrado en el punto anterior.
	2X	x														x			
	3X	x														x			
	4X	x														x			
	5X	x														x			
	6X	x														x			
	7X	x														x			
	8X	x														x			
Bomba, P2B1	1X	x														x	Los niveles de vibración son normales. Se puede observar la presencia e vibración aleatoria.	El gráfico de tendencias muestra que los niveles de vibración se han mantenido constantes durante el periodo de monitoreo.	La vibración aleatoria es producto de la presión del agua conducida. Se recomienda continuar con el monitoreo de vibración para detectar a tiempo cualquier variación en el funcionamiento del equipo.
	2X	x														x			
	3X	x														x			
	4X	x														x			
	5X	x														x			
	6X	x														x			
	7X	x														x			
	8X	x														x			
Bomba, P2B2	1X	x														x	Existe alta vibración en sentido tangencial a la velocidad de giro del motor.	No se ha evidenciado cambios en los niveles de vibración o en la forma del espectro.	La vibración esta en la dirección de salida del agua, esta puede ser causada por problemas en el diseño, por lo que se debe monitorear las vibraciones para detectar un posible cambio.
	2X	x														x			
	3X	x														x			
	4X	x														x			
	5X	x														x			
	6X	x														x			
	7X	x														x			
	8X	x														x			

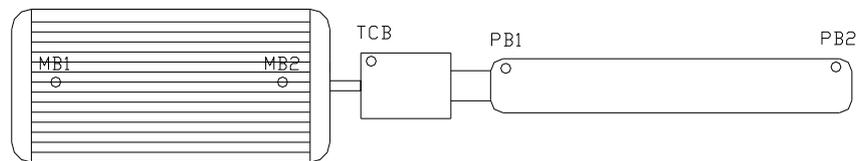
HOJA DE DATOS PARA EL ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Máquina: P-112-N

Ubicación: CPF

Esquema General de la Máquina

Sets Motor Electrico-Camara de Empuje-Bomba P-112



Información General

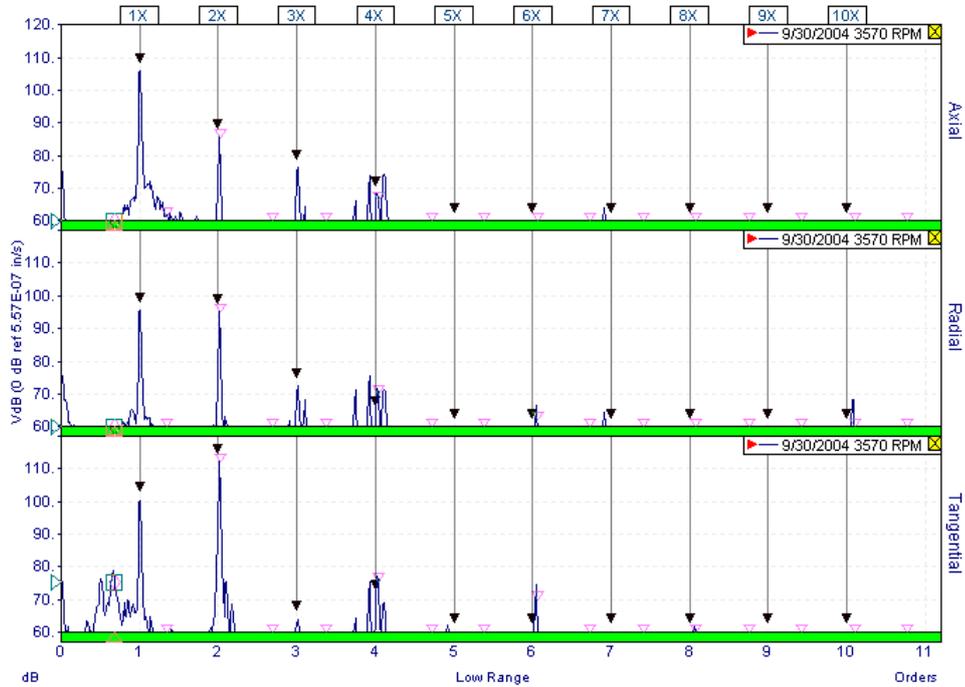
Velocidad Nominal (rpm): 3570
Número de Barras del Motor:
Alabes Ventilador: 14
Tipo de Apoyos: Rodamientos Axial y Radial
Carga del Equipo (kW): 190

Tipo de Bomba: Centrifuga
Número de Etapas:
Número de Paletas:
Tipo de Apoyo: Rodamientos

ESPECTROS DE REFERENCIA

PLANT: OXY-CPF
MACHINE: P-112-N
2403.0 CPM, 0.67X, 57.6 VdB, 9/30/2004 20:14 Axial

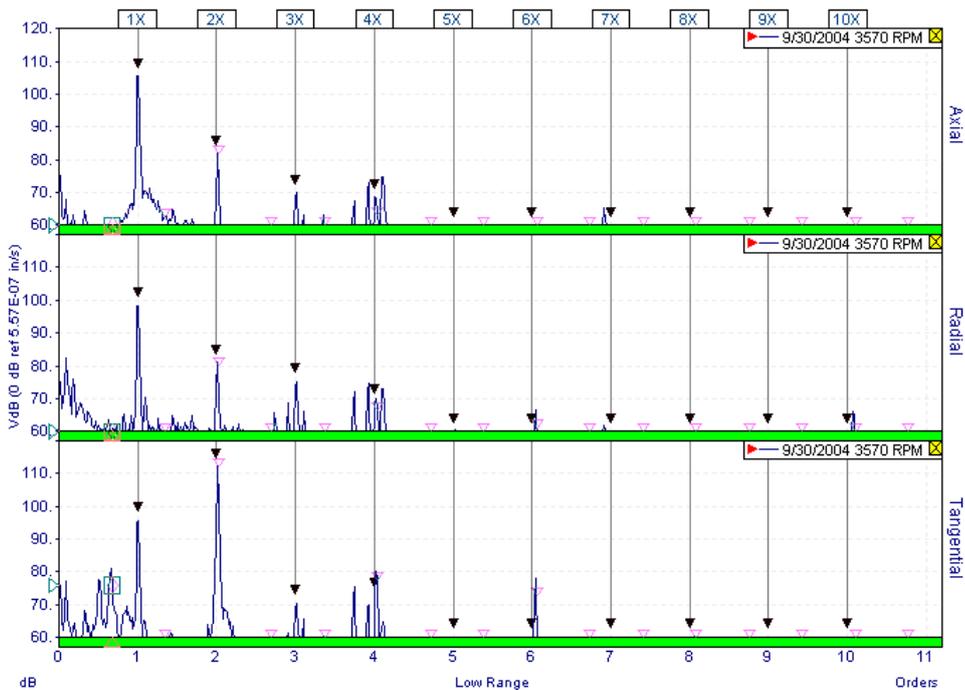
AREA: CPF
LOCATION: MOTOR, BEARING 1 [1]
MID: 63



Motor, Posición 1 (MB1)

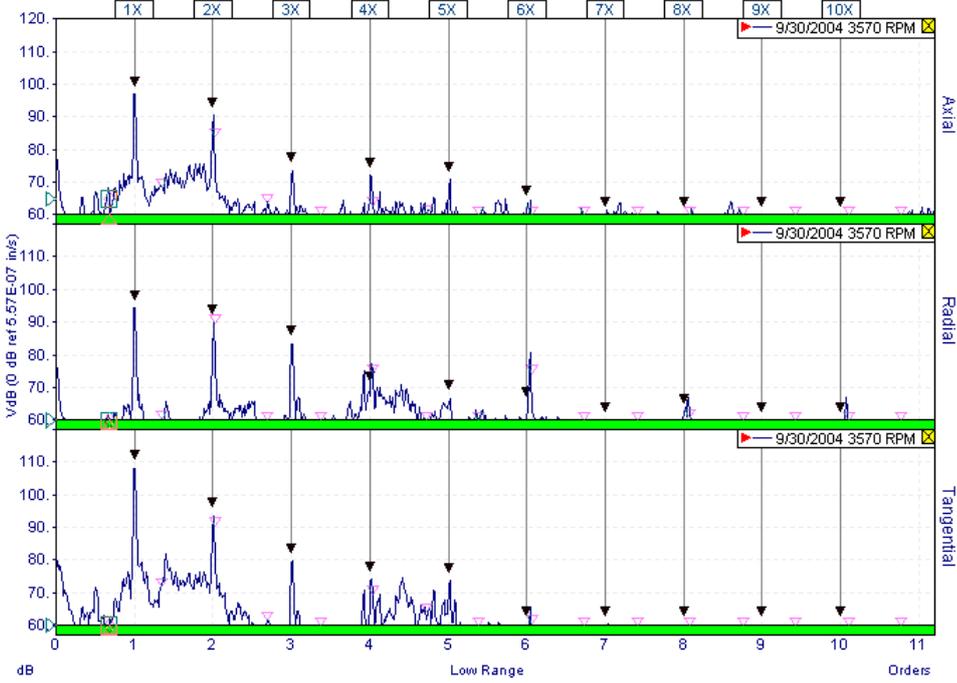
PLANT: OXY-CPF
MACHINE: P-112-N
2403.0 CPM, 0.67X, 56.8 VdB, 9/30/2004 20:15 Axial

AREA: CPF
LOCATION: MOTOR, BEARING 2 [2]
MID: 63



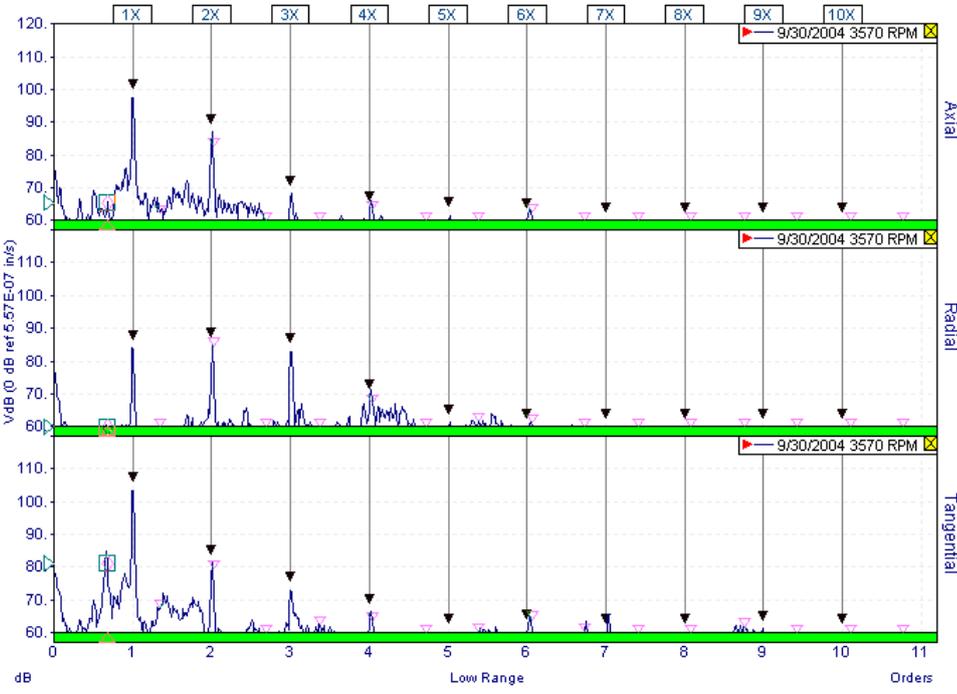
Motor, Posición 2 (MB2)

PLANT: OXY-CPF AREA: CPF MID: 63
 MACHINE: P-112-N LOCATION: THRUST CHAMBER [3]
 2403.0 CPM, 0.67X, 64.9 VdB, 9/30/2004 20:17 Axial



Cámara de Empuje, Posición 3 (TC1)

PLANT: OXY-CPF AREA: CPF MID: 63
 MACHINE: P-112-N LOCATION: PUMP, BEARING 3 [4]
 2403.0 CPM, 0.67X, 65.5 VdB, 9/30/2004 20:18 Axial

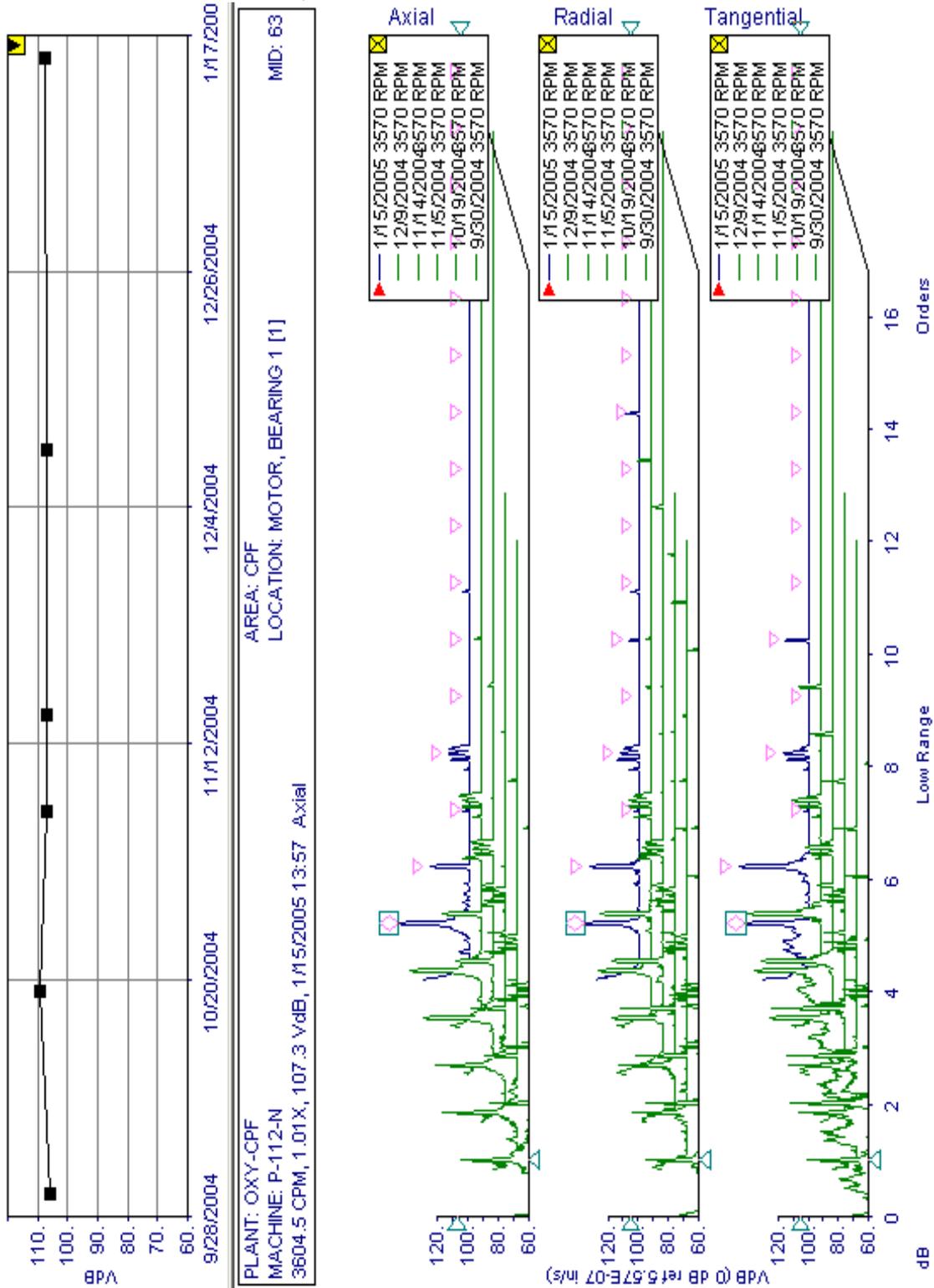


Bomba, Posición 4 (PB1)

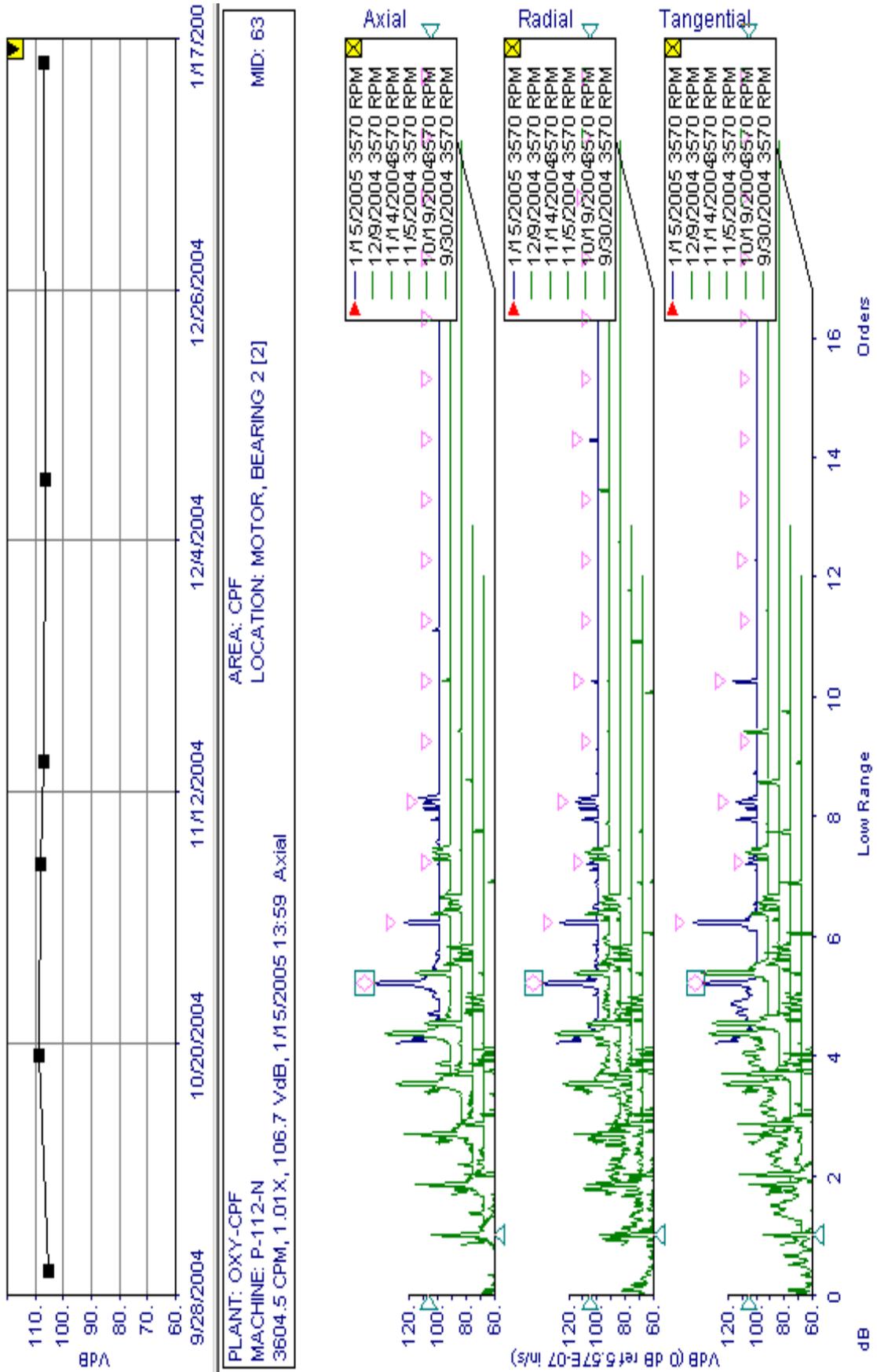
Gráficas de Cascada y Tendencia

Máquina: P-112-N
Ubicación: CPF

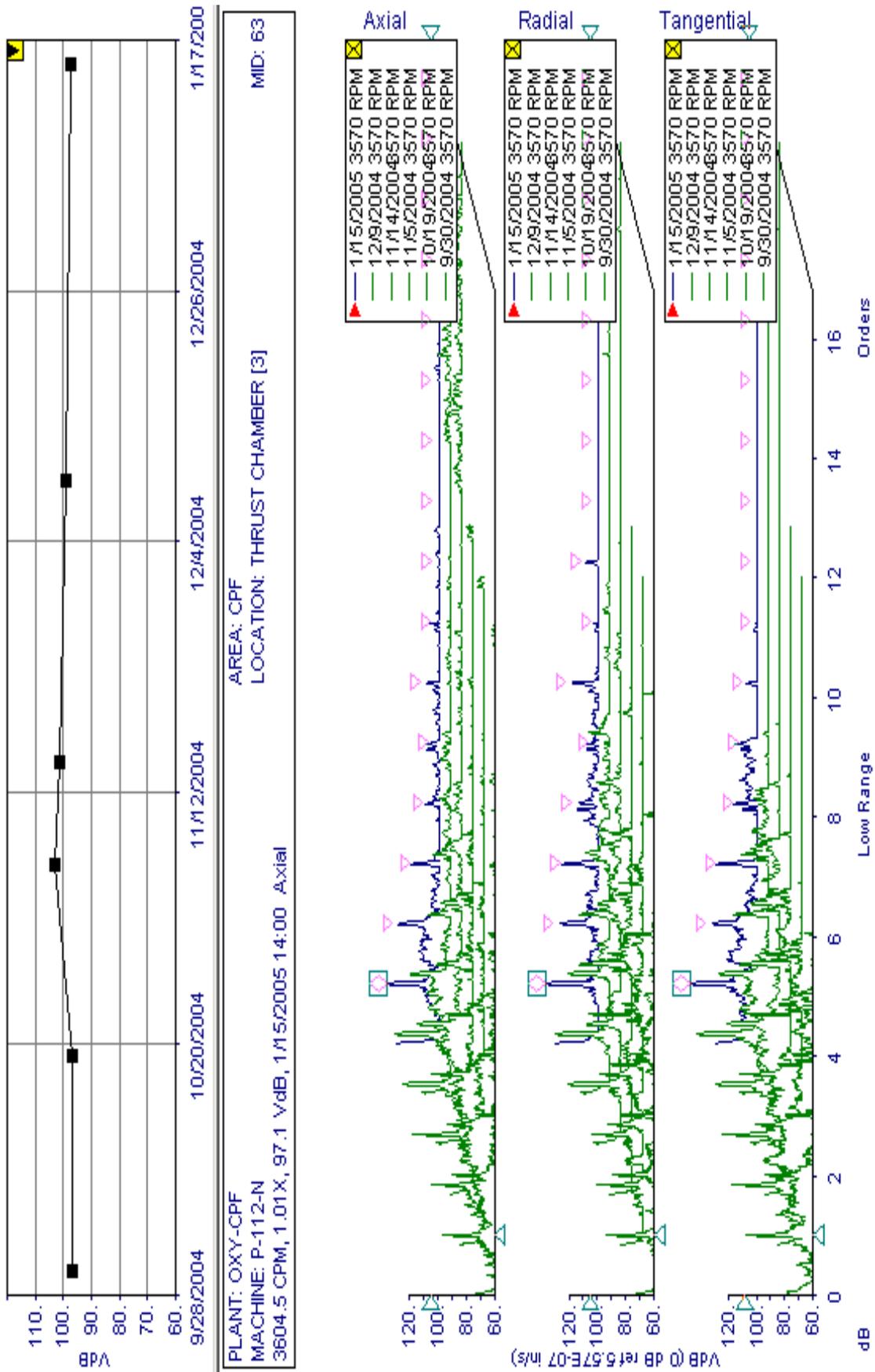
1.- Rodamiento del motor, lado libre.



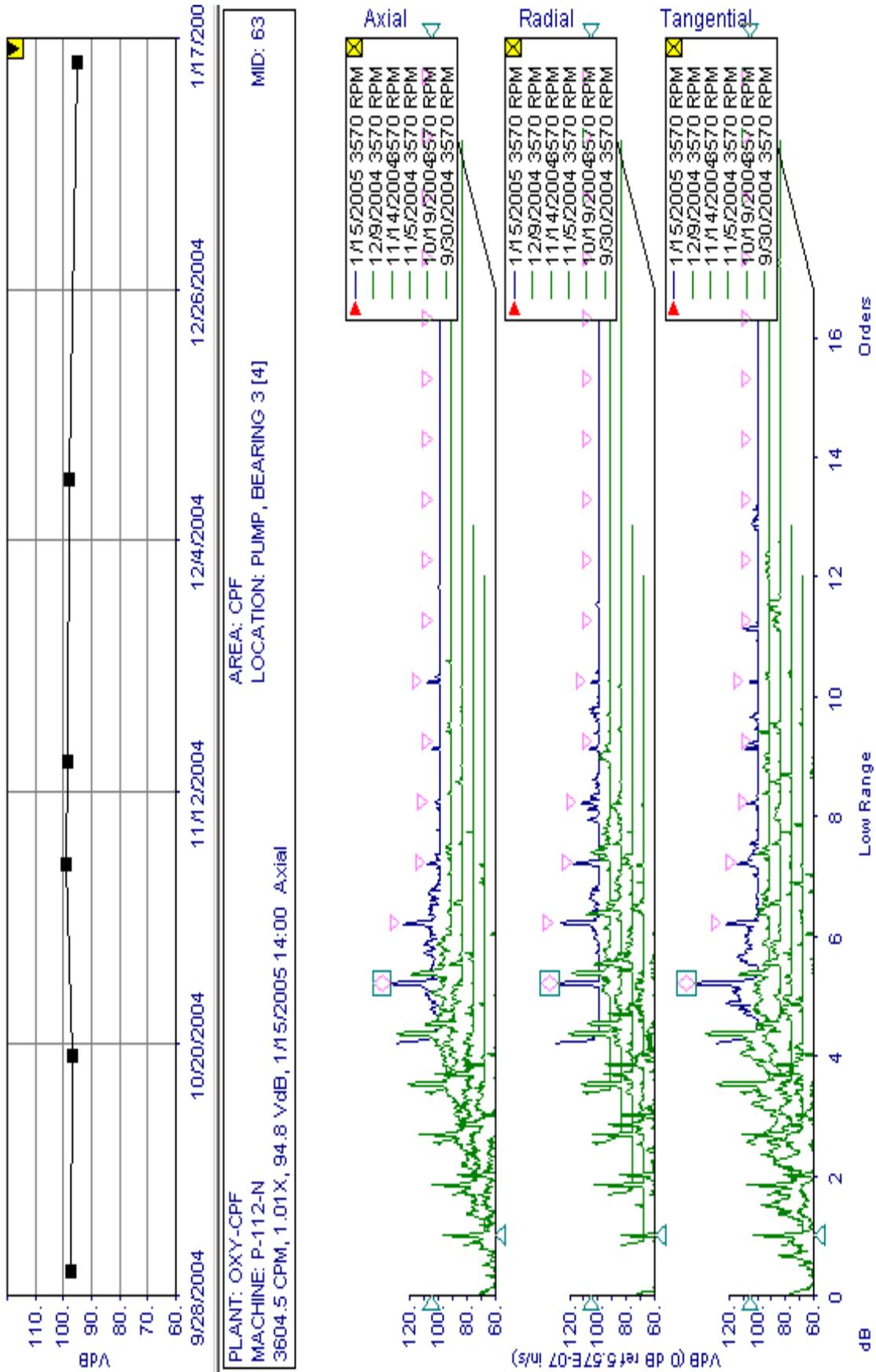
2.- Rodamiento del motor, lado conductor.



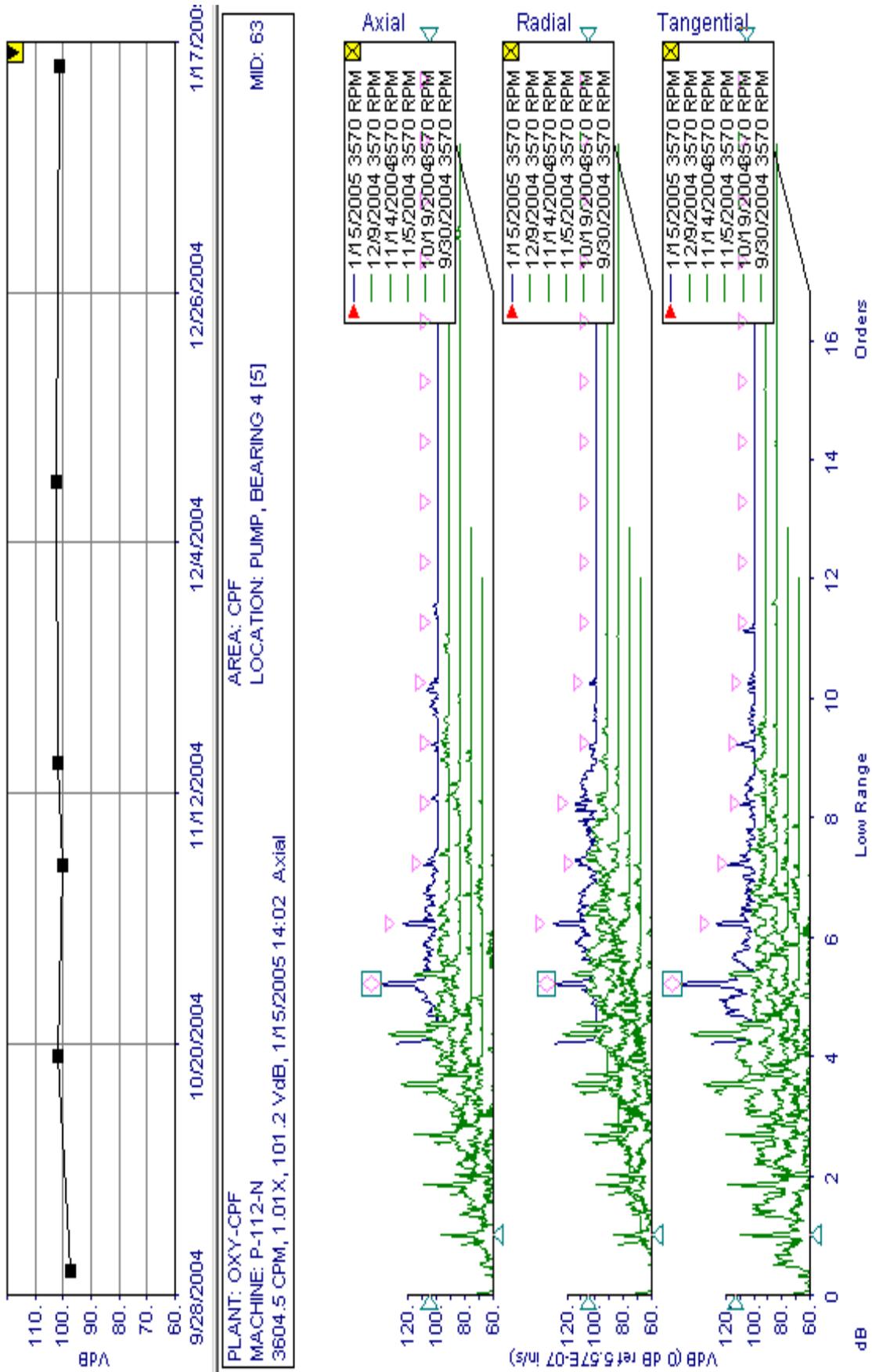
3.- Cámara de Empuje.



4.- Rodamiento de la bomba, lado conducido.



5.- Rodamiento de la bomba, lado libre.



ANÁLISIS DE RESULTADOS

CUADRO DE ANÁLISIS													
Máquina: P-112-N			Fecha: 30 de Septiembre del 2004			Período análisis de Tendencias: 30 Septiembre/2004-15 Enero/2005							
Niveles de Alarma													
Unidades		Bueno			Regular			Malo					
in/s		0.065			0.1			0.15					
Vdb		101.3			105.1			108.6					
in/s		0.1			0.15			0.225					
Vdb		105.1			108.6			112.1					
in/s		0.125			0.2			0.3					
Vdb		107.0			111.1			114.6					
Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración								Observaciones	Tendencia	Recomendaciones	
		Axial				Radial							Tang.
		B	R	M	B	R	M	B	R	M			
Motor, MB1	1X				x					x	Se puede ver picos altos de vibración a la velocidad de 1X en dirección axial y en 2X en dirección tangencial.	Los niveles de vibración y la forma del espectro se han mantenido constantes durante el período de análisis.	Los problemas encontrados en este punto son señales de problemas con los rodamientos. Se recomienda vigilar los niveles de vibración para detectar algún cambio y tomar medidas correctivas.
	2X				x					x			
	3X				x					x			
	4X				x					x			
	5X				x					x			
	6X				x					x			
	7X				x					x			
	8X				x					x			
Motor, MB2	1X	x			x					x	El rodamiento presenta los mismos síntomas de falla detectadas en el rodamiento del lado conductor	No se evidencia ningún cambio en los niveles de vibración.	Es posible que existan problemas en los dos rodamientos del motor. Se recomienda continuar con el monitoreo para detectar a tiempo un incremento en el nivel de vibraciones.
	2X	x			x					x			
	3X	x			x					x			
	4X	x			x					x			
	5X	x			x					x			
	6X	x			x					x			
	7X	x			x					x			
	8X	x			x					x			
C.E, TC1	1X	x			x					x	Los niveles de vibración son normales, no se evidencia ningún síntoma de falla.	El análisis de tendencias muestra que los niveles de vibración y la forma del espectro en este punto se han mantenido constantes.	El equipo se encuentra trabajando en muy buenas condiciones, se debe continuar con el monitoreo de vibraciones para detectar cualquier cambio.
	2X	x			x					x			
	3X	x			x					x			
	4X	x			x					x			
	5X	x			x					x			
	6X	x			x					x			
	7X	x			x					x			
	8X	x			x					x			

Posición	Frecuencia	Nivel de Vibración										Observaciones	Tendencia	Recomendaciones			
		Axial					Radial								Tang.		
		B	R	M	B	R	M	B	R	M	B					R	M
Bomba, PB1	1X	x			x				x			x			El espectro no muestra fallas en la bomba, se puede ver un pico alto a la velocidad de giro del motor en la dirección tangencial.	Los niveles de vibración se han mantenido constantes.	El nivel alto de vibración en la dirección tangencial puede ser causada por el ingreso del agua que se encuentra en esta dirección.
	2X	x			x				x			x					
	3X	x			x				x			x					
	4X	x			x				x			x					
	5X	x			x				x			x					
	6X	x			x				x			x					
	7X	x			x				x			x					
	8X	x			x				x			x					
Bomba, PB2	1X	x			x				x			x			Los niveles de vibración son normales, se evidencia la presencia de un pico alto a la velocidad de giro del motor en la dirección tangencial.	El análisis de tendencia muestra que las fallas o problemas se han mantenido sin incremento.	La salida de agua dispuesta en dirección tangencial puede ser la causante del pico en esta dirección. Además se puede ver que es mayor a la salida que a la entrada de la bomba.
	2X	x			x				x			x					
	3X	x			x				x			x					
	4X	x			x				x			x					
	5X	x			x				x			x					
	6X	x			x				x			x					
	7X	x			x				x			x					
	8X	x			x				x			x					

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES.

- El exceso de vibraciones o los niveles altos de las mismas en la maquinaria rotativa es el indicador de fallas más importante del que la empresa puede servirse para tener una planificación efectiva del mantenimiento.
- La gran mayoría de los problemas que se pueden presentar en la maquinaria analizada pueden ser detectados gracias al análisis de vibraciones, estos son desalineación, desbalanceo, problemas de soldadura, rodamientos, engranes, problemas eléctricos, etc., lo que prueba la efectividad del análisis de vibraciones como una herramienta fundamental dentro del mantenimiento predictivo.
- Una correcta organización del mantenimiento predictivo es lograda únicamente con la cooperación de todas las personas involucradas en el mantenimiento de la maquinaria de la empresa.
- Para que el plan de mantenimiento predictivo sea efectivo, es necesario un entendimiento global de las técnicas que se utilizarán, en este caso el análisis de vibraciones, el funcionamiento de cada máquina analizada y además un conocimiento total de la planta y los procesos que en ella se llevan a cabo.
- El análisis de vibraciones como base de un plan de mantenimiento predictivo es un proceso en el cual los resultados se dan a largo plazo debido a que el objetivo más importante de este tipo de mantenimiento es el de alargar la vida útil de las máquinas, detectando a tiempo fallas y evitando que estas afecten el funcionamiento general de la maquinaria.

- El correcto funcionamiento del plan de mantenimiento predictivo logra generar ahorros muy importantes de recursos y tiempo. La continuación de este proyecto en la planta implicaría una importante prolongación de los períodos entre los mantenimientos generales en los equipos analizados debido a que estos períodos no serían preestablecidos de acuerdo a especificaciones, sino que se los realizaría el momento en que la máquina lo requiera.
- El análisis de vibraciones implementado en la empresa optimiza la utilización de los recursos del departamento de mantenimiento, primero al comprobar el correcto montaje de piezas nuevas, y segundo al aprovechar al máximo la vida útil de las máquinas y sus partes gracias a la capacidad de diagnosticar el estado de las partes durante el funcionamiento de la maquinaria.
- Para conseguir un espectro de vibración que muestre claramente los problemas de una máquina es necesario seleccionar correctamente los parámetros de amplitud de acuerdo a las frecuencias forzantes características de cada parte de la máquina.
- Muchas veces los espectros de vibración pueden tener picos característicos de fallas, pero esto no significa que haya un problema, ya que la máquina puede estar operando bajo condiciones normales. El problema se presenta cuando estos picos comienzan a aumentar su nivel y es aquí donde el análisis de tendencias empieza a ser parte fundamental del mantenimiento predictivo al poder anticipar el tiempo en que esta falla será peligrosa para el equipo.
- Luego de estudiar los espectros de todas las máquinas que formaron parte de este estudio se pudo comprobar que la gran mayoría de estas tenían problemas de desalineación, que aunque en una gran parte de casos no era grave, reduce paulatinamente la vida útil de la

máquina. Esto confirma la teoría de que la desalineación es la principal causa de los problemas con maquinaria rotativa.

- A pesar de que se hizo un estudio sobre los factores que afectarían la clasificación de la maquinaria, estos no fueron fundamentales en la práctica debido a la configuración de la planta, donde entraron en escena otros factores como la distancia de las islas donde se encontraba la maquinaria que fue el factor que mas influyó el momento de tomar las decisiones.
- Para seleccionar los puntos de medición en cada máquina fue necesario estudiar los manuales de mantenimiento, donde se ubicó los rodamientos, para luego, estando junto a la máquina seleccionar un lugar accesible, cómodo, seguro y lo mas cercano a estos rodamientos para así obtener las lecturas de vibración mas adecuadas en cada caso.
- Hubo casos en donde las lecturas de vibración en las máquinas no llegaban a los límites críticos, establecidos basándonos en las normas existentes o en los manuales de la maquinaria, y a pesar de esto las máquinas fallaban. Esto se debe a que cada máquina obtiene características únicas de funcionamiento debido a factores como el montaje, el clima, la carga, etc. Debido a esto no se debe confiar totalmente en los límites obtenidos de esta manera sino con el tiempo y la experiencia ir creando límites individuales, dentro de los rangos emitidos por el fabricante, para cada máquina basándonos en los datos que se obtienen en el campo.
- Otro factor muy importante que se debe tener en cuenta el momento de establecer alarmas espectrales es el amortiguamiento. En generadores exactamente iguales, los unos montados sobre una cimentación fuerte y los otros montados sobre plataformas móviles como es el caso de los Power Trailers, se presentaban niveles de vibración muy diferentes sin que esto implique que existía una falla o

que los Power Trailers estaban más cercanos a una parada que los generadores montados sobre tierra firme. Esto confirma la importancia de crear límites individuales para cada máquina basándonos en los datos espectrales particulares.

- Se pudo observar una gran diferencia entre los niveles de vibración de los generadores Caterpillar con un rodamiento en el generador y el generador MG-2930 de la misma marca pero que tiene dos rodamientos en el generador. Es evidente que el segundo modelo de generador, a pesar de que por ser más nuevo que los demás generadores es de esperar que este funcionando en mejores condiciones, tiene un diseño que ayuda a disminuir el nivel de vibración.
- Como en el caso del generador MG-2101-9G, que fue montado y puesto en funcionamiento por primera vez mientras se realizaba este proyecto, el análisis de vibraciones puede ser una herramienta muy útil para comprobar y verificar que estos montajes estén dentro de los límites y especificaciones dadas el momento de la compra.

RECOMENDACIONES.

- Los resultados del análisis de vibraciones no se los obtiene inmediatamente, por lo que, se deberá en lo posible continuar con esta práctica para poder observar los resultados finales y más importantes.
- En este momento la empresa utiliza el mantenimiento preventivo para realizar los mantenimientos generales (Overhauls) de los generadores, y el mantenimiento correctivo para la mayor parte de las bombas. Una continuidad con el monitoreo de condición rebajaría al mínimo la utilización de estos tipos de mantenimiento poco económicos y generaría importantes ahorros en el mantenimiento de esta maquinaria.

- Dada la gran cantidad de casos de desalineación en la maquinaria rotativa estudiada, es recomendable utilizar nuevos sistemas de alineación como es, por ejemplo, la alineación de precisión láser, y una comprobación de la efectividad de los mismos por medio del análisis de vibraciones para extender la vida útil de los equipos.
- La implementación de un plan de mantenimiento predictivo en una planta tan grande como esta se lo debe realizar por etapas, es decir, no se debe implementar el análisis de vibraciones en todas las máquinas, sino, empezar con un grupo pequeño de máquinas de un mismo tipo y después ir aumentando poco a poco el número de máquinas a ser monitoreadas.
- Continuar con la investigación sobre el análisis de vibraciones, ya que este es un tema complejo en el cual existen muchas más técnicas que las utilizadas en el proyecto y las cuales pueden ir reforzando la calidad y la precisión de los diagnósticos, tanto en las fallas detectadas, los niveles de gravedad y el tiempo en que las fallas llegarán a ser críticas.
- Implementar como parte de este programa de mantenimiento predictivo otras tecnologías como la termografía y el análisis de aceites para poder confirmar fallas detectadas por el análisis de vibraciones.
- Una vez implementado este proyecto en las máquinas que formaron parte del mismo, se debería extenderlo a toda la maquinaria rotativa del campamento, ya sea esta maquinaria rotativa mayor o menor, especialmente los motores eléctricos de baja potencia, en los que se puede aprovechar tanto el análisis de vibraciones como la termografía para evitar paros en la planta o retrasos en la producción.

- Es importante capacitar a todo el personal de mantenimiento en las técnicas de mantenimiento predictivo para que así todo el equipo de mantenimiento forme parte del programa.
- Un registro confiable de toda la información que se obtiene con el programa de mantenimiento será con el tiempo una base de datos muy importante, la que facilitará en el futuro tanto innovaciones en el programa como el diagnóstico de problemas.
- El departamento de mantenimiento podría fusionar el mantenimiento preventivo con el mantenimiento predictivo haciendo de este último parte del programa de mantenimiento preventivo y utilizando los diagnósticos y recomendaciones obtenidos para planificar más efectivamente el uso de recursos de mantenimiento.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A

Aceleración: Razón de cambio de la velocidad respecto al tiempo.

Acelerómetro: Sensor y transductor cuya entrada es la amplitud de aceleración y tiene una salida de voltaje de baja impedancia.

Alineación: Posición en la cual las líneas centro de dos ejes deben ser lo mas colineales posible, en el momento de operación de la máquina.

Amplitud: Es el máximo valor que presenta una onda sinusoidal.

Análisis Espectral: Es la interpretación que se le hace a un espectro para determinar el significado físico de lo que pasa en una máquina.

Armónico: Son frecuencias de vibración que son múltiples integrales de una frecuencia fundamental específica.

Axial: Posición del sensor que va en el sentido de la línea del eje.

B

Backlash: Juego que presentan dos elementos móviles conectados que han tenido mal montaje o presentan desgaste.

Balanceo: Procedimiento por medio del cual se trata de hacer coincidir el centro de masa de un rotor con su centro de rotación.

Bandas Laterales: Son líneas espectrales que aparecen espaciadas a igual frecuencia, alrededor de una línea central. Esta es la mezcla de dos señales, en la cual la línea central pertenece a una y las líneas laterales pertenecen a la otra.

C

Centro de Gravedad: Es la representación de la masa de un cuerpo en un punto.

Ciclo: Es un rango de valores en los cuales un fenómeno periódico se repite.

D

Decibel: Unidad logarítmica de amplitud medida (muy usada en vibraciones y acústica).

Desplazamiento: Cambio de posición de un objeto o partícula de acuerdo a una sistema de referencia.

Diagnóstico: Proceso por medio del cual se juzga el estado de una máquina.

Dominio de la Frecuencia: Es la representación gráfica de la vibración en la cual se enfrentan Amplitud vs. Frecuencia.

Dominio del Tiempo: Es la representación gráfica de una señal de vibración en la cual se enfrentan Amplitud vs. Tiempo.

E

Entrehierro: Espacio de aire comprendido entre Estator y el Rotor de un motor eléctrico.

Espectro: Sinónimo de dominio de la frecuencia.

Excentricidad: Variación del centro de rotación del eje con respecto al centro geométrico del rotor.

F

Factor de Servicio: Factor que corrige los niveles normalizados, para máquinas especiales que requieren niveles en particular.

Fase: Es un retardo en el tiempo de dos señales, expresado en grados de rotación.

Frecuencia: Es el recíproco del período y significa número de oscilaciones completas por unidad de tiempo.

Frecuencia de Engrane (GMF Gear Mesh Frequency): Es la velocidad nominal del engranaje multiplicado por el número de dientes. La GMF es igual para ambos engranajes.

Frecuencia de falla de Jaula: Es la frecuencia de un rodamiento que se excita cuando se presenta deterioro en su jaula.

Frecuencia de falla de Elemento Rodante: Es la frecuencia de un rodamiento que se excita cuando se presenta un daño en algún elemento rodante.

Frecuencia de falla de Pista Externa: Es la frecuencia de un rodamiento que se excita cuando se presenta un daño en la pista externa.

Frecuencia de falla de Pista Interna: Es la frecuencia de un rodamiento que se excita cuando se presenta un daño en la pista interna.

Frecuencia de Línea (FL): Es la frecuencia eléctrica que entra al motor. En América son 60 Hz y en Europa son 50 Hz.

Frecuencia Natural (Fn): Es la frecuencia que presenta cada componente por su propia naturaleza. Esta frecuencia oscilará si es excitada por agente externo que opere a una frecuencia muy cercana.

Frecuencia de Paso de Aspas: Es el número de aspas o paletas de una bomba o ventilador por su velocidad de rotación.

G

G: Unidades de aceleración de la gravedad. Equivale a 9800 mm/s^2 y a 32.2 pie/s^2 .

H

Horizontal: Generalmente es la posición que se le da al sensor, que va perpendicular al sentido de la gravedad.

Hz: Unidad mas común de la frecuencia. Equivale a ciclos por segundo.

M

Masa Equilibrante: Masa utilizada en balanceo, para contrarrestar la masa desbalanceadora.

Micra: Medida de longitud o distancia. Equivale a la milésima parte de un milímetro.

Mil: Medida de longitud o distancia. Equivale a una milésima de pulgada.

O

Onda en el tiempo: Es la representación instantánea de una señal dinámica con respecto al tiempo.

Orden: Es otra de las unidades de frecuencia, utilizadas para maquinaria rotativa. Una orden es equivalente a la velocidad nominal de la máquina.

P

Período: Es el tiempo necesario para que ocurra una oscilación o se complete un ciclo. Generalmente está dada en minutos y segundos.

Pico: Cada una de las líneas que componen el espectro.

Pulsación: Elevación y caída en la amplitud de vibración causada por dos fuentes de vibración que están a frecuencias muy cercanas.

R

Radial: Posición del sensor que va perpendicular a la línea del eje.

Resonancia: Se presenta cuando la frecuencia natural de un componente es excitada por un agente externo. La amplitud de vibración de la máquina se incrementará enormemente causando perjuicios que en algún momento pueden llegar a ser catastróficos.

Rotor Flexible: Son rotores que giran muy cerca de su velocidad crítica, por lo cual presentan una deformación significativa.

Rotor Rígido: Rotor que no se deforma significativamente operando a su velocidad nominal.

RPM: Otra de las unidades de frecuencia. Equivale al número de ciclos por minuto que presenta la máquina.

Ruido: Es información de la señal que no representa alguna importancia. Representa contaminación de la señal.

Ruido de Piso o Blanco: Es el límite mas bajo de sensibilidad de un instrumento de medición electrónico, expresado en micro-voltios (10^{-6} V). Se localiza a través de todo el espectro.

S

Sensor: Es un dispositivo de medición que transforma una variable física en una señal eléctrica. En nuestro caso pasa de una señal física de vibración y la convierte en una señal eléctrica.

Señal: Es toda información de magnitud física variable que se convierte a magnitud eléctrica mediante un transductor.

Subarmónicos: Son frecuencias que se encuentran a una fracción fija de una frecuencia fundamental, tal como la velocidad nominal de la máquina.

T

Transformada Rápida de Fourier (FFT): Es una técnica para calcular por medio de un computador la frecuencia de las series que conforman la onda en el dominio del tiempo.

V

Velocidad: Razón de cambio del desplazamiento respecto al tiempo.

Velocidad Nominal: Velocidad de entrada de una máquina.

Vertical: Posición que se le da al sensor, que va en el sentido de la aceleración de la gravedad.

Vibración: Es un movimiento oscilatorio.

Vibración Aleatoria: Frecuencias que no cumplen con patrones especiales que se repiten.

REFERENCIAS

Ron Bodre, Introduction to Machine Vibration, DLI Engineering Corp. Estados Unidos de América, <http://www.dliengineering.com/vibman-spanish.htm>.

Asociación Colombiana de Ingenieros, Cundinamarca, Seminario Taller: Mantenimiento Predictivo Basado en Vibraciones y Termografía, Colombia 2003.

Ahorro de Energía y Mantenimiento Industrial S.A.C (ADEMINSAC, Ecuador), Curso de Análisis Vibracional Intermedio Tópicos de Nivel I y II, Guayaquil, Ecuador 2003.

A-Maq S.A. Tutorial de Vibraciones para Mantenimiento Mecánico, Enero 2005
<http://www.a-predictor.com/tutoriales/Tutorial%20Vibraciones%20para%20Mantenimiento%20Mecanico%20A-MAQ%202005.pdf>

John N. Macduff, Vibration Control, McGraw-Hill, Nueva York, 1958.

JP Den Hartog, Mecánica de las Vibraciones, Traducción de la Cuarta Edición, CECSA, México, 1980.

William T. Thomson, Mechanical Vibrations, Segunda Edición, Prentice-Hall, Nueva York, 1960.

William T. Thomson, Vibrations Theory: Applications, Prentice-Hall, Nueva York, 1981.

Robert K. Vierck, Vibration Analysis, International Textbook Company, Pensilvania, 1967.

Fernando Torres, Análisis de Vibraciones e Interpretación de Datos, DIDYF Universidad de Zaragoza, España.

<http://www.guemisa.com/articul/pdf/vibraciones.pdf>

Technical Associates of Charlotte, Inc., EE.UU, 1994.

<http://www.technicalassociates.com>