

47



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

"MANTENIMIENTO PREDICTIVO POR MEDIO DEL ANALISIS  
DE VIBRACIONES"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

JAVIER HERNANDEZ VIVEROS

ASESOR: ING JOSE JUAN CONTRERAS ESPINOSA

25/1/30



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN  
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR  
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN  
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
Jefe del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicarle a usted que revisamos la TESIS.

"Mantenimiento predictivo por medio del Análisis de vibraciones"

que presenta el pasante Hernández Viveros Javier  
con número de cuenta 8806850-9 para obtener el TÍTULO de  
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

A T E N T A M E N T E

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx., a 27 de abril de 2000

PRESIDENTE Ing. José Juan Contreras Espinosa

VOCAL Ing. Marco Antonio Alarcón Ramírez

SECRETARIO Ing. Jorge de la Cruz Trejo

PRIMER SUPLENTE Ing. Antonio Trejo Lugo

SEGUNDO SUPLENTE Ing. Guillermo Santos Olmos

A MIS PADRES

COMO MUESTRA DE MI CARIÑO Y AGRADECIMIENTO A LAS PERSONAS QUE LES DEBO EL LOGRO DE MI MÁS GRANDE META, MIS PADRES

**EUSTACIO HERNÁNDEZ VARGAS Y ADELAIDA VIVEROS FRANCO**

QUIENES ME DIERON TODA SU CONFIANZA Y TODO SU APOYO DURANTE MIS ESTUDIOS, Y SABRIENDO QUE JAMAS EXISTIRÁ UNA FORMA DE AGRADECERLES UNA VIDA DE LUCHA, SACRIFICIO Y ESFUERZO CONSTANTE, SOLO DESEO QUE ENTIENDAN QUE EL LOGRO MIO, ES SUYO TAMBIÉN Y QUE MI ESFUERZO ESTÁ INSPIRADO EN USTEDES QUE SON MI ÚNICO IDEAL

POR TAL MOTIVO ESTE TRABAJO LLEVA UNA DEDICATORIA MUY ESPECIAL, PARA USTEDES, DEBIDO A QUE ES LA CULMINACION DE LA MÁS GRANDE DE MIS METAS. Y PORQUE GRACIAS A SU APOYO Y CONSEJOS HE LLEGADO A TERMINARLA, LA CUAL CONSTITUYE LA HERENCIA MÁS VALIOSA QUE PUDIERA RECIBIR DE PARTE SUYA, LES AGRADESCO LA ORIENTACION QUE SIEMPRE ME HAN DADO.

CON RESPETO Y ADMIRACION

**“ GRACIAS ”**

ATENTAMENTE

JAVIER HERNÁNDEZ VIVEROS.

JUNIO, 2000

A MIS TIOS

COMO MUESTRA DE MI CARIÑO Y AGRADECIMIENTO A DOS PERSONAS QUE PUSIERON SUS ESPERANZAS EN MI Y POR QUE FUERON LAS QUE ME DIERON LA OPORTUNIDAD DE INTEGRARME A UN AMBIENTE DE TRABAJO PARA PODER DESARROLLARME DENTRO DE UNA DE LAS RAMAS DE MI CARRERA PROFESIONAL Y LAS CUALES GRACIAS A SUS CONSEJOS HE PODIDO REALIZAR LAS PRIMERAS METAS DE MI PROFESION, POR LO QUE LES DEDICO ESTÁ TESIS A MIS TIOS:

**MARTIN VIVEROS FRANCO Y ALEJANDRO VIVEROS FRANCO**

Y AL IGUAL QUE A MIS PADRES LES DIGO QUE NO ENCUENTRO LA FORMA DE PAGARLES SU CONFIANZA Y APOYO QUE PUSIERON EN MI, POR LO QUE GRACIAS A LA OPORTUNIDAD QUE ME BRINDARON, PUDE REALIZAR ESTE TRABAJO, CON EL CUAL TERMINO UNA DE MIS METAS EN LA CUAL USTEDES ME APOYARON

CON RESPETO Y ADMIRACION

“ GRACIAS ”

ATENTAMENTE

JAVIER HERNÁNDEZ VIVEROS.

JUNIO, 2000

A MIS HERMANOS

QUIERO DARLES LAS GRACIAS A MIS HERMANOS:

ANGELICA, EDUARDO Y CLAUDIA

POR EL APOYO Y AYUDA QUE ME DIERON DURANTE EL TRANCURSO DE MIS ESTUDIOS DE MI CARRERA PROFESIONAL, YA QUE FUERON PARTE DE MI DESARROLLO EN ESTÁ ETAPA DE MI VIDA Y COMO MUESTRA DE MI CARIÑO Y AGRADECIMIENTO LES DEDICO ESTÁ TESIS QUE ES LA CULMINACION DE UNA DE MIS METAS.

“ GRACIAS ”

ATENTAMENTE

JAVIER HERNÁNDEZ VIVEROS

JUNIO, 2000

# INDICE

Introducción.....	3
-------------------	---

## **CAPITULO II**

### **Conceptos Básicos de los Tipos de Mantenimiento y la Vibración**

2.1 Tipos de Mantenimientos .....	7
2.2 ¿ Que es la vibración ?.....	12
2.3 ¿ Cual es la causa de la vibración ?.....	12
2.4 Las características de la vibración .....	13
2.5 La importancia de las características de la vibración .....	22
2.6 Evaluación de la severidad de la vibración.....	27
2.7 Las características de los ruidos. ....	52

## **CAPITULO III**

### **Medición de Vibraciones**

3.1 Captadores de velocidad.....	38
3.2 Acelerómetros .....	43
3.3 Transductores de proximidad ( de no contacto ). .....	46
3.4 Montaje de los transductores.....	49
3.5 Pautas para la selección de los transductores.....	53
3.6 Selección de un captador específico .....	57

## **CAPITULO IV**

### **Análisis de la vibración - Adquisición de datos**

4.1 Adquisición de datos.....	62
4.2 Diseño de las máquinas y características funcionales .....	63
4.3 Selección de los instrumentos de medición.....	65
4.4 Determinación de los datos requeridos.....	79
4.5 Toma de mediciones .....	80

## **CAPITULO V**

### **Análisis de la vibración - Interpretación de datos**

5.1 Interpretación de datos .....	85
5.2 Diagnostico de la vibración.....	88
5.3 Causas posibles de la vibración .....	91

## *CAPITULO VI*

Equipos de Apoyo para el sistema de Mantenimiento Predictivo	
6.1 Sistema de Mantenimiento Predictivo (Software) . . . . .	136
6.2 Termografía Infrarroja..... . . . .	142
6.3 Lámpara Estroboscópica . . . . .	149
6.4 Estetoscopio Electrónico..... . . . .	150
6.5 Osciloscopio..... . . . .	151
6.6 Registradores de Alta Velocidad... . . . .	152
6.7 Grabadoras de Cinta . . . . .	152

## *CAPITULO VII*

### Organización de un programa de Mantenimiento Predictivo

7.1 El Programa de Mantenimiento Predictivo . . . . .	154
7.2 Importancia de las máquinas dentro de una planta . . . . .	157
7.3 Como Organizar un Programa de Mantenimiento Predictivo..... . . . .	158

Conclusiones. . . . .	173
-----------------------	-----

<i>BIBLIOGRAFÍA</i> . . . . .	177
-------------------------------	-----



## INTRODUCCION

Durante la ultima década a medida que el costo y la complejidad de la maquinaria aumentan cada vez más, la aplicación de métodos fiables de mantenimiento resulta cada vez más importante. Por lo que se busca minimizar en lo posible el tiempo de interrupción del trabajo de las máquinas por razones de mantenimiento.

La organización de el mantenimiento es un punto importante, porque se trata de una estructura de relaciones prácticas para ayudar al cumplimiento de los objetivos de la empresa, y esto es algo inevitable, ya que el mantenimiento forma parte del sistema y el mantenimiento como un elemento de este sistema debe ser organizado, a su vez como otro sistema más pequeño, pero también con elementos que trabajan en equipo para alcanzar objetivos que lleven a la meta general de la empresa.

Una buena actividad de mantenimiento lleva a buscar la máxima conservación de instalaciones y maquinaria para reducir el mínimo los tiempos ociosos o suspensivos de trabajo, haciendo más eficaz el empleo de dichos elementos y de los recursos humanos, a fin de conseguir resultados que beneficien a la empresa junto con algo que es muy importante, “ al menor costo posible ”.

El objetivo de el mantenimiento es conservar en optimas condiciones de operación los equipos e instalaciones de la planta, planeando y controlando los programas de mantenimiento, apoyando la ejecución de los mismos con calidad, seguridad, orden y limpieza, para contribuir a elevar la productividad de la empresa y la competitividad de sus productos. Ya que inesperadas y catastróficas fallas producen perdidas de producción y altos costos de reparación

Anteriormente este objetivo no se cumplía con el tipo de mantenimiento correctivo, el cual no puede hablarse como un sistema pues en él no existe ninguna planeación, por lo cual tuvo que ser reemplazado por otro tipo de mantenimiento dentro de la industria que fue el mantenimiento Preventivo el cual es una forma organizada de “ preveer ”, detectar, planear y corregir anticipadamente las fallas más comunes de los equipos, las instalaciones y el inmueble

Las características clásicas de este mantenimiento para evitar tales fallas son el desensamble periódico de los equipos críticos para su inspección física y reparación. Estos procesos resultan costosos y lentos, porque casi siempre tenemos que inspeccionar una máquina que se encuentra en perfectas condiciones de operación, mientras que máquinas al límite de la falla son ignoradas.

Por la razón anterior nace la búsqueda de un sistema en el cual beneficie a los usuarios, aumentando la disponibilidad operativa de los equipos y ayudando a asegurar un uso eficaz de los recursos humanos, reduciendo la inversión en equipos de capital y disminuyendo los gastos en recambios. Por lo que dentro del mantenimiento preventivo nace otro tipo de mantenimiento conocido como:

Mantenimiento Predictivo, este tipo de mantenimiento usa modernos monitoreos y técnicas de análisis para diagnosticar la condición de los equipos durante la operación para identificar señales de deterioro de la falla inminente.

Es decir las vibraciones que ocurren en la maquinaria rotatoria y en las estructuras circundantes, es el resultado de defectos mecánicos de la maquinaria o de causas inherentes a la forma en la que dicha maquinaria opera, pero también puede proceder estas vibraciones de una fuente exterior. La mayoría de las máquinas vibran como consecuencias de defectos mecánicos y estos defectos se harán sentir en todos los casos, ya que aun no existe la máquina perfecta. Una máquina bien diseñada y construida trabajara suavemente, porque sus defectos son pequeños, pero cuando los defectos son grandes, se producirán vibraciones excesivas. Consecuentemente, las vibraciones representan una medida excelente para evaluar las condiciones mecánicas de una máquina.

Las vibraciones representan un medio de información excelente para los servicios de mantenimiento de la maquinaria. En el mantenimiento Predictivo el análisis de vibraciones es fundamental en la predicción de fallas mecánicas en equipos rotatorios y se puede decir que este tipo de mantenimiento es mejor que los dos antes mencionados, ya que el mantenimiento Predictivo es aquel que se realiza sin sacar de operación al equipo, y sus monitoreos pueden ser desde los más sencillos y económicos, por ejemplo al revisar baleros con un estetoscopio o un desarmador o el más sofisticado y caro como sería revisar

estos mismos baleros con instrumentos que detectan vibraciones de alta frecuencia y son conectados a una computadora personal, o al revisar la temperatura de un motor simplemente con la mano o hacerlo a distancia con aparato de rayos infrarrojos.

El propósito fundamental de este trabajo es que el Ingeniero Mecánico Electricista conozca cuales son los síntomas de indiferencia hacia este departamento de mantenimiento, así como cuales son las áreas potenciales de mejora para saber hacia donde dirigir sus esfuerzos además de demostrar la importancia de una filosofía de optimización con miras a implementar un proceso de mejora continua de productividad y competitividad en el mantenimiento industrial, por medio del mantenimiento Predictivo, utilizando las técnicas administrativas aplicadas en producción tales como:

- Planificación
- Planeación y programación.
- Programas de adiestramientos.
- Técnicas de motivación.
- Control de costos.

Los cuales son perfectamente aplicables a las funciones de mantenimiento, para que su labor sea bien encaminada y actúe como un eslabón sólido en la cadena que hace funcionar cualquier industria para la obtención de sus objetivos; ya que la relación entre el Ingeniero Mecánico Electricista y la industria en general es muy grande, pues conforme a la evolución tecnológica avanza se requiere la creación de mejores técnicas de trabajo con el fin de obtener mejores resultados en el cumplimiento de los objetivos; de ahí que los objetivos principales de este trabajo son:

- Conocer la importancia que tiene en el departamento de mantenimiento Predictivo dentro de la industria.
- Conocer el papel que desempeña el Ingeniero Mecánico Electricista en el departamento de mantenimiento Predictivo.
- Conocer la trascendencia que tiene para la producción y los costos el cuidar el buen estado de operación de la maquinaria.
- Implementar una metodología para la detección analítica de fallas, para obtener un más ágil y mejor control de actividades, recursos humanos y materiales.

## CAPITULO II

# **CONCEPTOS BÁSICOS DE LOS TIPOS DE MANTENIMIENTOS Y LA VIBRACIÓN.**

## **2.1 TIPOS DE MANTENIMIENTO.**

Cuando empezaron a funcionar las imperfectas máquinas primitivas, los técnicos las mantenían funcionando, pero no dedicaban tiempo para un mantenimiento metódico. Después de la segunda guerra mundial hubo pocos cambios en la actitud general hacia el mantenimiento, salvo en la industria del transporte que se vio obligada a programar las reparaciones de sus unidades motorizadas, pero las reparaciones programadas son una pequeña parte de las numerosas mejoras que pueden conseguirse en el campo del mantenimiento.

La actitud de permitir, que instalaciones y equipos continuaran funcionando, sin prestarles atención, hasta que una avería originara la disminución o suspensión del servicio; tenía su origen en las siguientes causas, indiferencia o rechazo de las técnicas de programación y demanda excesiva, temporal o permanente de la capacidad de sus equipos.

El análisis de múltiples problemas que se le han presentado al personal de mantenimiento en las instalaciones e industrias ha determinado la evolución de los sistemas de mantenimiento en tres tipos:

### **El Mantenimiento Correctivo.**

En el cual no puede hablarse como un sistema pues en él no existe ninguna planeación, fue el que más se utilizó en la historia y puede definirse de la siguiente forma.

El Mantenimiento Correctivo es la reparación de fallas a medida que se presentan, ya sea por síntomas claros y avanzados o por el paro total del equipo y las instalaciones originadas por una falla.

Las fallas pueden ser humanas, ya sean por olvidos, negligencia, mal uso de los equipos, desconocimiento de su manejo y operación; y por fallas técnicas donde tienen influencia los ajustes naturales, el desgaste, el deterioro, las vibraciones, el tiempo y la limpieza.

## El empleo del mantenimiento correctivo origina.

- Se interrumpa el servicio a la producción en el momento menos oportuno.
- Las máquinas que se dejan funcionar hasta el punto de rotura con frecuencia requieren reparaciones más extensas de lo que se necesitarían si el problema hubiese sido detectado y corregido temprano.
- Algunas fallas pueden ser catastróficas y requerir el replazo total de la máquina.
- Cargas de trabajo incontrolables que causan intensa actividad y lapsos sin trabajos.
- Problemas de seguridad para los operadores y los demás.
- Pagos de horas extras a personal, cuando las necesidades son imperiosas.
- No se controla la productividad.
- Hay necesidad de comprar refacciones y materiales en un momento dado.
- Impide el diagnóstico exacto de las causas de la falla.
- Impide estar preparado con las herramientas, personal y las refacciones necesarias para la reparación inmediata, por lo tanto este tipo de mantenimiento debe de aplicarse como emergencia.

## El Mantenimiento Preventivo.

En comparación con el mantenimiento correctivo, un programa de mantenimiento preventivo es una forma organizada de “prever”, detectar, planear y corregir anticipadamente las fallas más comunes de los equipos, las instalaciones y el inmueble.

Las característica principal del mantenimiento preventivo es la de detectar las fallas a medida que se presentan en su fase inicial a través de revisiones periódicas de desarmado e inspección, con la clara ventaja de disminuir la frecuencia de reparaciones por rotura y permitir una parada programada.

Una justificación económica de la implantación de este tipo de mantenimiento, es raramente factible en un corto tiempo, pues su implantación inicial refleja un elevado costo, para los beneficios que se obtienen a largo plazo son *alargadores que justifican la inversión.*

Por eso es necesario distinguir desde el principio los beneficios y las ventajas que alcanza este programa ya que los resultados directos que se preveen son los siguientes:

- Los trabajos están señalados en forma prevista, resultados de las revisiones periódicas detectando las fallas en su fase inicial.
- Da tiempo a preparar y a programar las reparaciones con las herramientas, personal y refacciones necesarias en tiempo normal de trabajo y en menor tiempo.
- Da confiabilidad a las instalaciones, pues los equipos operan dentro de las mejores condiciones.
- Disminuye los tiempos muertos porque el tiempo llega a ser menor, cuando se aplica este programa.
- Da mayor vida útil, porque a tiempo se detecta las anomalías en su fase inicial, evitando que la falla llegue a ser total inutilizando el equipo.
- Reduce los gastos por reparación porque hay existencia de refacciones y materiales en el almacén, de las piezas sujetas a desgaste.
- Disminuye las existencias de almacén, ya que existe un control de máximos y mínimos de las refacciones y materiales.
- Da uniformidad a la carga de trabajo porque el personal de mantenimiento trabajara su turno normal y dentro de su especialidad, pudiendo disfrutar de sus vacaciones otorgadas y como consecuencia de la misma cantidad de horas hombre, se podrá mantener el nivel de *mantenimiento*.
- Aumenta la productividad por el aprovechamiento de las horas hombre del personal, trabajadas en su turno normal, en relación a sus jornadas de trabajo.

De lo anterior con la implantación de un programa de Mantenimiento Preventivo se puede fijar un objetivo desde el punto de vista técnico, que será el de mantener en operación continua, confiable, segura y económica la totalidad de las instalaciones del inmueble y los equipos.

También este enfoque de mantenimiento de máquinas tiene sus desventajas. Ante todo, el desarmar periódicamente cada pieza crítica del equipo de una planta es costoso tanto en dinero como en tiempo. En segundo lugar el intervalo entre inspecciones periódicas es difícil de predecir. Si el programa tiene mucho éxito y no ocurren fallas, significa que el intervalo es demasiado breve y se está derrochando dinero. En tercer lugar, una máquina

que funcione satisfactoriamente puede, en realidad, ser perjudicada por un desarmado frecuente. Existe siempre la probabilidad de que una empaquetadura o un sello sea instalado incorrectamente, que los pernos no estén debidamente apretados, o que el alineamiento o balanceo original de la máquina sea alterado durante el rearmado.

### **El mantenimiento Predictivo.**

El Mantenimiento Predictivo es más una filosofía que un método de trabajo, se basa al igual que el mantenimiento Preventivo en detectar la falla antes que suceda, para dar a programar su reparación. La diferencia entre estos dos tipos de mantenimiento es usar para ello instrumentos de diagnóstico.

*Un factor importante para la determinación al implantar el mantenimiento predictivo, es usar para ello instrumentos de diagnóstico. Con los cuales la detección en línea y el diagnóstico de problemas de una máquina es obviamente el método de mantenimiento más conveniente.*

Otro aspecto del mantenimiento predictivo es la obtención de la información más completa que se pueda usar para tomar decisiones, además permite el afinamiento de la técnica del mantenimiento Preventivo.

El mantenimiento predictivo define con exactitud por métodos científicos la obtención de resultados en pruebas de laboratorio. A diferencia del mantenimiento Preventivo puede aplicarse paso a paso. El mantenimiento predictivo puede considerarse como resultado de cierta experiencia obtenida de la aplicación del mantenimiento Preventivo

Si un problema puede detectarse anticipadamente, cuando los defectos son leves y no afectan el funcionamiento de la máquina y si podemos diagnosticar la naturaleza del problema mientras la máquina está funcionando se podrá

- Programarse una parada por reparación para un momento oportuno.
- Organizarse un cronograma de los trabajos junto con los requerimientos de personal, herramienta y piezas de repuesto, antes de llevar a cabo la parada programada.
- Reducirse al mínimo la posibilidad de daños considerables a la máquina como resultado de los esfuerzos de una falla .



- Mantenerse a un mínimo el tiempo de reparaciones con la siguiente ventaja de un menor tiempo de paralización de la máquina.
- Desde luego, las máquinas en buenas condiciones operativas podrán seguir funcionando mientras no se presenten problemas. No hace falta desperdiciar tiempo y dinero desarmando máquinas que funcionan normalmente.

Por otra parte se podrá acabar con ciertos problemas como:

- Subsistir en forma rutinaria, partes costosas solo para estar del lado seguro.
- Adivinar que tiempo de vida útil le queda a los baleros, los aislamientos, los recipientes, los motores etc.
- Dudar si el operario estará realmente siguiendo las instrucciones de operación.
- Suspender el servicio fuera del programa, por fallas imprevistas.

Durante los siguientes capítulos de este trabajo se explicara un poco más detallado los conocimientos sobre las técnicas que se deben de conocer para la implantación de un mantenimiento predictivo que nos genere un mejor beneficio y cumpla con los objetivos del mantenimiento en la industria.

## 2.2 ¿ QUE ES LA VIBRACION ?

La vibración es simplemente el movimiento de vaivén de una máquina o pieza desde su posición de descanso.

El modo más sencillo para demostrar la vibración el movimiento de un peso suspendido en el extremo de un resorte, tal como se ilustra en la Figura 2-1. Esto es típico de todas las máquinas puesto que también ellas tienen propiedades similares a peso y resorte.

Hasta que no se aplique una fuerza al peso para producir sus movimiento no habrá vibración. Al aplicar una fuerza ascendente, el peso se moverá hacia arriba, comprimiendo el resorte. Al soltarlo, el peso caerá por debajo de su punto neutro hasta el límite inferior del recorrido, en cuyo punto el resorte detendrá al peso. Este emprenderá inmediatamente el recorrido hacia arriba pasando por el punto neutro hasta llegar al límite superior del movimiento y de vuelta otra vez por el punto neutro. Este movimiento seguirá exactamente de la misma manera mientras quede aplicada la fuerza. Por lo tanto, la vibración es la reacción de un sistema a una excitación ( estímulo ) o fuerza interna o externa aplicada al mismo.

## 2.3 ¿ CUAL ES LA CAUSA DE LA VIBRACION ?

Salvo algunas excepciones, la causa de la vibración reside en los problemas mecánicos de una máquina. A continuación se presenta una lista de los problemas más comunes que producen vibración, a saber:

- Desbalance de las piezas rotativas
- Falta de alineamiento de acoplamiento y rodamientos
- Ejes vencidos
- Engranajes desgastados, excéntricos o dañados
- Bandas o cadenas de transmisión en mala condición
- Rodamientos - del tipo antifricción - deteriorados
- Desviaciones del par de torsión
- Fuerzas electromagnéticas
- Fuerzas aerodinámicas

- Fuerzas hidráulicas
- Aflojamiento
- Rozamiento
- Resonancia

## 2.4 LAS CARACTERÍSTICAS DE LA VIBRACION

Independientemente del tipo, la causa de la vibración es indudablemente una fuerza que cambia de dirección o de intensidad y las características consiguiente serán determinadas en base al modo en que se generan las fuerzas. Es por ello que cada causa de vibración tiene sus propias características individuales. La condición de una máquina y sus problemas mecánicos se determinan midiendo las características de su vibración, entre sus características mas importantes se encuentran las siguientes:

- Frecuencia
- Desplazamiento
- Velocidad
- Aceleración
- Fase
- Energía de impulsos

Con referencia al peso suspendido de un resorte, podemos estudiar en detalle las características de la vibración trazando un gráfico del movimiento del peso en función del tiempo, tal como se representa en la Figura 2-2. El movimiento del peso desde su punto neutro hasta el limite superior del recorrido, de vuelta a través del punto neutro representa un ciclo de movimiento y cuenta con todas las características necesarias para medir la vibración. El movimiento continuo del peso sencillamente repetirá dichas características.

FIGURA 2-1  
Vibración de un simple sistema de resorte-masa

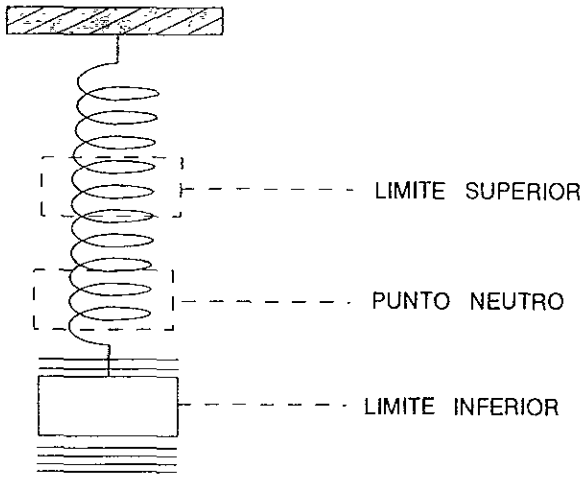
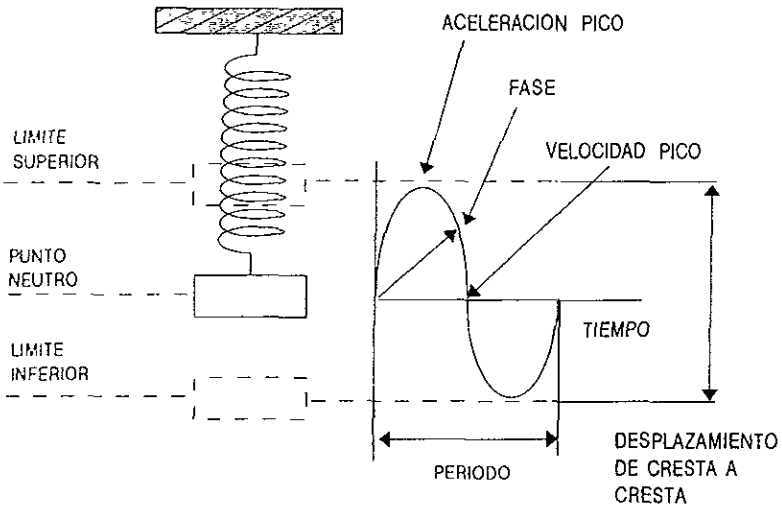


FIGURA 2-2  
Movimiento de un peso en vibración en función del tiempo



## FRECUENCIA DE LA VIBRACIÓN

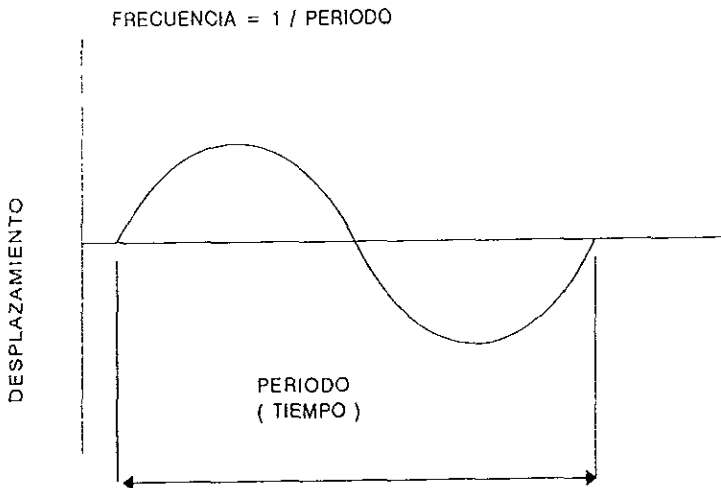
Como se puede apreciar en la figura 2-3, la cantidad de tiempo requerida para llevar a cabo un ciclo completo de un espectro de vibración se llama "período de vibración". El período de vibración es una característica simple y significativa empleada con frecuencia en la detección y análisis de la vibración. Otra característica de igual simplicidad y de mayor significado es la frecuencia.

La frecuencia de la vibración es la medida de la cantidad de ciclos completos que acontecen en un período de tiempo específico. La relación entre la frecuencia y el período de un patrón de vibración es expresada mediante la siguiente fórmula:

$$\text{frecuencia} = 1 / \text{período}$$

La frecuencia de la vibración por lo general es expresada como cantidad de ciclos que acontecen cada minuto, de aquí el origen de la expresión "ciclos por minuto", o sea , cpm.

Figura 2-3  
Período de un patrón de vibración.



El poder especificar la frecuencia de la vibración en términos de “cpm” facilita la relación entre dicha característica y otro dato importante de los equipos rotativos - las “r.p.m.” - es decir, la cantidad de revoluciones por minuto. Por lo cual, si se tiene una máquina que gira a una velocidad de 3600 r.p.m., es posible que ciertos problemas generan vibración a una frecuencia de 3600 cpm.

Un tercer modo de especificar la frecuencia es en términos de cantidad de ciclos por segundo, o sea en hertz (abreviado como Hz) Puesto que 1 Hz es igual a 60 cpm.

#### ***DESPAZAMIENTO DE LA VIBRACIÓN (CRESTA A CRESTA)***

La distancia total recorrida por la pieza vibrante de uno a otro limite extremo del recorrido se conoce como “desplazamiento de cresta a cresta”. El desplazamiento de la vibración de cresta a cresta se expresa generalmente en milésimas de pulgada o mils (0.001 pulg.). Según las unidades de medida del sistema métrico, el desplazamiento de la vibración de cresta a cresta se expresa en micrones, donde 1 micrón es igual a una milésima de milímetro (0.001 mm).

#### ***VELOCIDAD DE LA VIBRACIÓN (VALOR DE CRESTA)***

Puesto que el peso vibrante esta en movimiento (véase figura 2-4 ), es obvio que se mueve a cierta velocidad. Sin embargo, la velocidad del peso cambia constantemente. Al llegar al limite superior del movimiento la velocidad es cero dado que el peso se detiene antes de proceder en la dirección opuesta, alcanzando el valor máximo al pasar el peso por su punto neutro, La velocidad del movimiento es indudablemente una característica de la vibración, pero considerando que cambia constantemente durante el ciclo, para la medición se selecciona la velocidad de “cresta” más elevada. Cuando se utilizan las unidades de medida del sistema ingles, la velocidad de la vibración se expresa como valor de cresta en pulgadas por segundo, mientras si se emplean unidades del sistema métrico se expresará como valor de cresta en milímetros por segundo.

Al explicar la velocidad de la vibración se menciona que la velocidad de la pieza alcanza un valor cero al llegar a los limites extremos del recorrido.

Figura 2-4  
Velocidad de un objeto vibrante

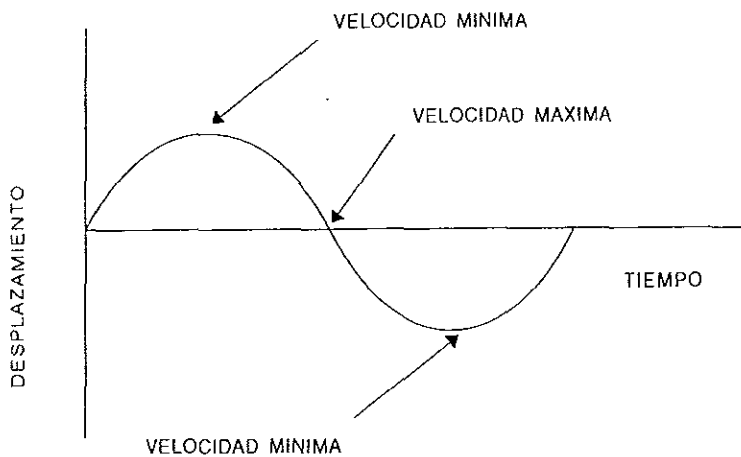
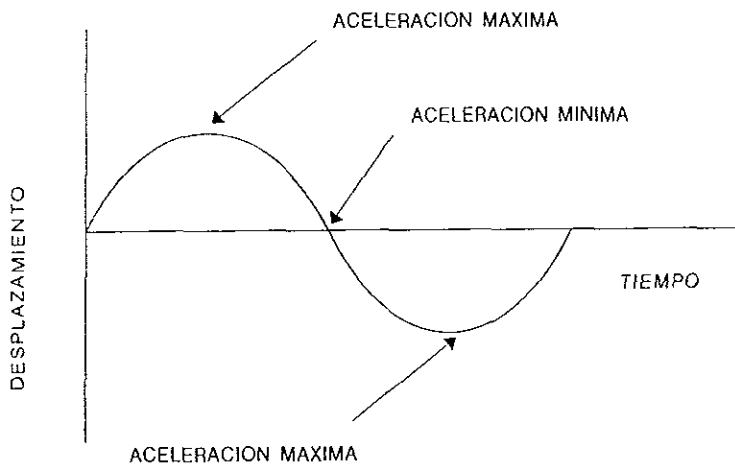


Figura 2-5  
Aceleracion de un objeto vibrante



Desde luego, cada vez que la pieza se detiene al final del recorrido tiene que "acelerar" para adquirir velocidad mientras se dirige hacia el otro extremo. La aceleración es otra característica importante de la vibración. Desde el punto de vista técnico, la aceleración es el coeficiente de cambio de la velocidad.

Con referencia al gráfico de movimiento representado en la Figura 2-5, la aceleración de la pieza alcanza su valor máximo en el límite extremo del recorrido donde la velocidad es cero, punto "A". A medida que aumenta la velocidad, disminuye la aceleración. En el punto "B", a sea, en el punto neutro, la velocidad alcanza su valor máximo mientras que la aceleración es cero. Cuando la pieza pasa por el punto neutro comienza a "desacelerar" a medida que se acerca al otro extremo del recorrido. En el punto "C", la aceleración alcanza su valor máximo.

La aceleración de la vibración normalmente se expresa como valor de cresta en "g", siendo "g" la aceleración generada por la fuerza de gravedad en la superficie terrestre. Por convenio internacional ha sido escogido el valor de 980,665 cm/seg. <sup>2</sup> (386.087 pulg./seg. <sup>2</sup>, o bien 32.1739 pies/seg. <sup>2</sup>) como aceleración estándar debida a la gravedad.

### ***FASE DE LA VIBRACIÓN***

Otra característica importante de la vibración es la "fase", definida, "la posición de una pieza vibrante en un momento dado con referencia a un punto fijo u otra pieza vibrante".

En el sentido práctico las mediciones de fase a menudo ofrecen un modo conveniente para comparar un movimiento vibratorio con otro, o para determinar el tipo de vibración de una pieza en relación a otra. En la Figura 2-6 se representa dos pesos que vibran con la misma frecuencia y desplazamiento; sin embargo, el peso "A", se encuentra en el límite superior del recorrido en el mismo momento en que el peso "B" se encuentra en el límite inferior. Podemos emplear la fase para expresar la comparación. Gráficando un ciclo completo de movimiento de estos dos pesos comenzando el mismo instante dado, podemos notar que las crestas del desplazamiento de pico están separadas de 180° (siendo un ciclo completo a 360°) por lo tanto, se dice que estos dos pesos vibran con un desfase de 180°.



FIGURA 2.6

Relacion entre fases Dos objetos que vibran con un desfase de  $180^\circ$

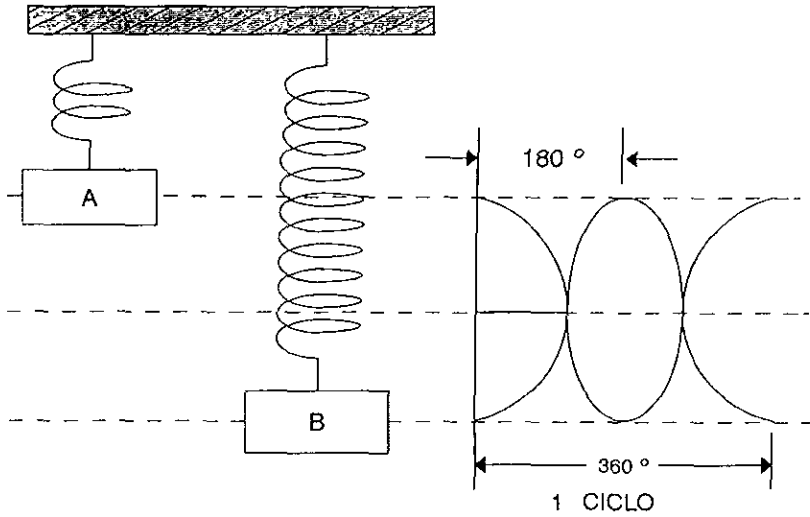
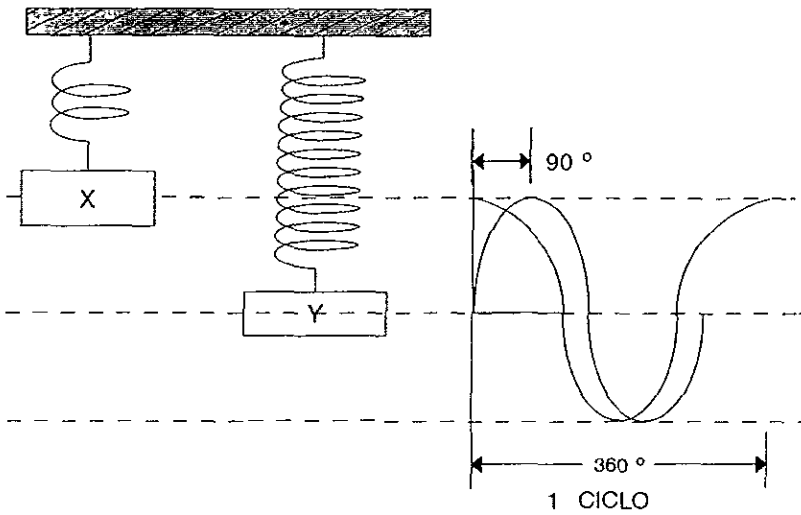


FIGURA 2-7

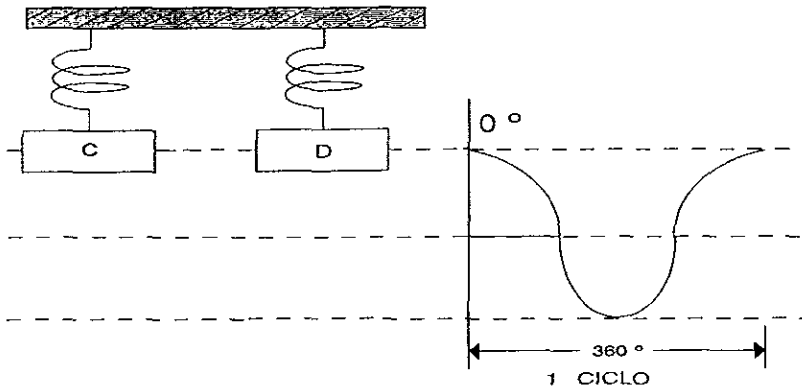
Dos objetos que vibran con un desfase de  $90^\circ$



En la Figura 2-7 el peso "X" se encuentra en el límite superior del recorrido en el mismo instante en que el peso "Y" se encuentra en el punto neutro, en dirección hacia el límite inferior. Estos dos pesos están vibrando con un desfase de  $90^\circ$ .

En la Figura 2-8 ambos pesos "C" y "D" alcanzan el límite superior del recorrido en el mismo instante. Por lo cual, dichos pesos están "en fase". Las mediciones de fase son importantes cuando se deban analizar problemas mecánicos de las máquinas.

FIGURA 2-8  
Dos objetos que vibran exactamente en fase



### **MEDICIONES DE VIBRACION EN ENERGIA DE IMPULSOS O SPIKE ENERGY**

Otra característica mas de la vibración, de especial interés, es el parámetro de medición SPIKE ENERGY ( es decir, medida de la energía de impulsos ). Se trata de una cantidad más bien abstracta que no puede relacionarse inmediatamente con un cuadro de pesos de vibración.

Los parámetros de medición SPIKE ENERGY incluyen impulsos de energía de vibración de muy breve duración, alta frecuencia y similares a picos, que acontecen en una máquina como resultado de:

- 1 Defectos en la superficie de los elementos rodantes de rodamientos o engranajes.
- 2 Rozamiento, impacto y contacto entre metal y metal en máquinas rotativas.
- 3 Fugas de vapor o pérdidas de aire bajo alta presión.
- 4 Cavitación causada por turbulencia del flujo en fluidos.

Hasta la introducción del parámetro de energía de impulsos era difícil detectar y analizar los primeros indicios de aviso con respecto a la presencia de rodamientos y engranajes defectuosos. Gracias a las mediciones de energía de impulsos, sin embargo, ahora es posible detectar inmediatamente vibraciones de alta frecuencia debidas a defectos presentes en rodamientos y engranajes.

La energía de impulsos utiliza sus propias unidades de medición. Aun cuando los valores de la energía de los impulsos de vibración sean básicamente una medida de la aceleración de la vibración, los circuitos electrónicos especiales que procesan las señales aumentan de modo particular su sensibilidad a la vibración de alta frecuencia generada por defectos en rodamientos y engranajes. Por este motivo, los valores de energía de impulsos son expresados en unidades "g-SE".

#### *CARACTERÍSTICAS ADICIONALES*

Existen varias características adicionales con las cuales se debe de familiarizar para facilitar la comprensión de la vibración de los equipos.

**Vibración inducida :** es aquella causada por una fuerza vibratoria, como en el caso del desbalance, que obliga la máquina o estructura a vibrar a la misma frecuencia de la fuerza vibratoria.

**Vibración espontánea :** es la vibración que se genera cuando se deja que una máquina o estructura vibre sin la presencia de fuerzas externas (por ejemplo, después de haber eliminado la Vibración inducida).

**Frecuencia de inducción :** es la frecuencia de una Vibración inducida.

**Frecuencia natural** : es la frecuencia a la cual vibrará una máquina o una estructura cuando este sometida a una Vibración Espontánea. Se trata de la frecuencia al cual una máquina “prefiere” vibrar. Por ejemplo una campana al tocarla, esta vibrará al frecuencia para la cual fue diseñada. La mayoría de las máquinas y estructuras tienen muchas frecuencias naturales a las cuales vibrarán.

**Frecuencia de resonancia** : es al frecuencia a la cual se produce la *coincidencia entre una Frecuencia Natural y una Frecuencia Inducción*. Por lo general, la vibración aumenta a medida que la Frecuencia de Inducción se acerca a la Frecuencia Natural, alcanzando su punto máximo cuando ambas coinciden

**Velocidad crítica** : se trata de un caso especial de Frecuencia de resonancia que se produce cuando la velocidad de rotación ( r.p.m., revoluciones por minuto), es decir la Frecuencia de Inducción, de una máquina coincide con una Frecuencia Natural de la misma. En la mayoría de los casos, se trata de una Frecuencia Natural del eje que causa su vencimiento con grandes amplitudes de vibración consiguientes.

## **2.5 LA IMPORTANCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA VIBRACIÓN**

La verdadera importancia de las características de la vibración reside en el hecho de que las mismas se utilizan para detectar y describir el movimiento vibratorio indeseable de una máquina. Cada una de las características puede ser considerada como síntoma a utilizarse para diagnosticar el funcionamiento ineficiente de la máquina o un problema inminente.

En la tabla 2-1 se presenta un resumen de las características principales de la vibración, junto con las unidades de medición más comunes.

### ***LO QUE NOS REVELA LA FRECUENCIA DE VIBRACIÓN***

Cuando se analiza la vibración de una máquina para localizar un problema en particular, es esencial saber la frecuencia de la vibración. Esto permitirá identificar el problema y la pieza responsable.

Tabla 2-1

Resumen de las características de la vibración y ejemplos de las unidades de medición

Características de la vibración.	Unidades Comunes de Medición.	
	Sistema Inglés	Sistema Métrico
Frecuencia	cpm	cpm
Desplazamiento	mils, cresta a cresta	mm, cresta a cresta
Velocidad	pulg./seg. valor efectivo	mm./seg. valor efectivo
	pulg./seg. cresta	mm /seg. cresta
Aceleración	g cresta	g cresta
Fase	grados	grados
Spike Energy (Energía de Impulsos)	g - SE	g - SE

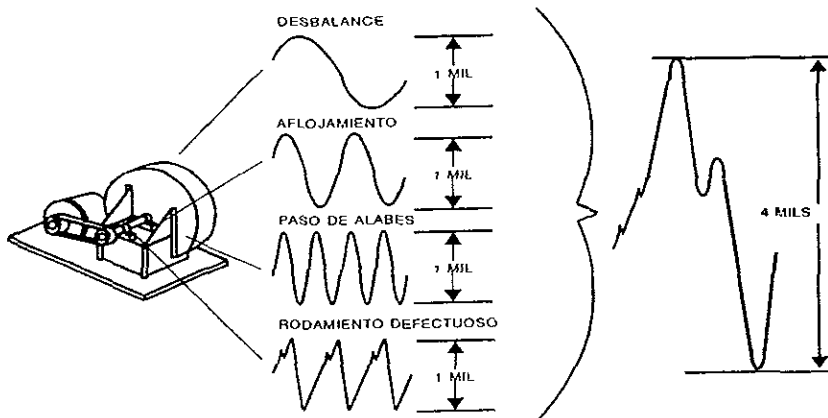
Las fuerzas que provocan la vibración son generadas por el movimiento rotativo de las piezas de la máquina. Debido a que dichas fuerzas cambian de dirección y amplitud de acuerdo a la velocidad de rotación de las piezas, se deduce que muchos problemas de vibración tengan frecuencias estrechamente relacionadas con la velocidad de rotación. Por lo tanto, será posible identificar con precisión la pieza defectuosa tomando nota de la frecuencia de su vibración y relacionando dicha frecuencia con la velocidad de rotación de las varias piezas de la máquina. Supónganse que se esta trabajando con un motor eléctrico que funciona a 3600 r.p.m El motor acciona un ventilador que funciona a 2400 r.p.m. Si el sistema demuestra una vibración excesiva a 2400 cpm, descarte inmediatamente la posibilidad de que el motor tenga algo que ver con el problema. Es plenamente evidente que la falla reside en el conjunto del ventilador.

No todos los problemas demuestran frecuencias exactamente iguales a la velocidad de rotación de las piezas de la máquina. Es importante recordar que diferentes problemas crean diferentes frecuencias de vibración.

Las bandas de transmisión en mal estado y la turbulencia de aceite producen frecuencias de vibración inferiores a 1 x r.p.m., mientras un mal alineamiento junto con el aflojamiento pueden generar un sinfín de frecuencias vibracionales.

La siguiente ilustración de la figura 2-9 nos indica que la vibración de la mayoría de las máquinas consta de muchas frecuencias diferentes.

Figura 2-9  
Combinación de frecuencias de vibración.



### LO QUE NOS REVELA LA AMPLITUD DE LA VIBRACIÓN: (desplazamiento, velocidad, aceleración)

Las características de la vibración causadas por desplazamiento, velocidad y aceleración son medidas para poder determinar la severidad de la vibración. Estas características son a menudo definidas como la amplitud de la vibración.

Con referencia al funcionamiento de una máquina, la amplitud de la vibración es el primer indicador de la condición de la misma. Cuando mayor la amplitud tanto más grave será la vibración. Sin embargo, el hecho de que la amplitud de la vibración pueda ser medida en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración da lugar a la pregunta:

¿Cuál deberé usar?

### **Cuando se utiliza la medición de la velocidad**

Puesto que la velocidad de vibración está en relación directa con la severidad de la vibración, para la mayoría de los fines generales de medición de la vibración, éste es el parámetro de medición preferido. En líneas generales, las mediciones que acontecen en la gama de frecuencias comprendida entre 600 y 60,000 cpm se miden mejor utilizando la velocidad de vibración.

### **Cuando se utiliza la medición del desplazamiento**

En condiciones de esfuerzos dinámicos, el desplazamiento de por sí se puede ser un mejor indicador de la severidad de la situación.

Por ejemplo, consideremos una máquina de rotación lenta como un tambor de izaje en uso de las minas, que tenga una rotación de 60 r.p.m. con vibración de desplazamiento de 20 mils de cresta a cresta generada por un desbalance del rotor. En términos de velocidad de vibración, 20 mils a 60 cpm representa solamente 0.0585 pulg./seg. (cresta), lo que sería considerado "BUENO" para maquinaria en general, con poco motivo de preocupación inmediata. Sin embargo, hay que considerar que el rodamiento de esta máquina está sometido a una deflexión de 20 mils. En estas condiciones puede ocurrir una rotura debida a esfuerzo (desplazamiento) más bien que fatiga (velocidad).

Generalmente, es en las bajas frecuencias que el desplazamiento puede ser el mejor indicador de la severidad de la vibración; típicamente, en la gama de frecuencias por debajo de los 600 cpm.

### **Cuando se utiliza la medición de la aceleración**

La aceleración está estrechamente relacionada con la fuerza, y fuerzas relativamente significativas pueden presentarse a altas frecuencias, aunque el desplazamiento y la velocidad sean mínimas. Por ejemplo, considerando una vibración medida de 1.5 mils a 60,000 cpm. Esto corresponde a una lectura de velocidad de 0.471 pulg./seg. (cresta), lo que puede ser considerado como "RUDO" para maquinaria en general. Esto equivale también a una lectura de aceleración de 0.7 g. A continuación, consideremos una vibración de 0.015 mils a una frecuencia de 600,000 cpm. Esta vibración también corresponde a una lectura de velocidad de 0.471 pulg./seg. (cresta). Pero con una lectura de

aceleración de 70 g. A 6,000 cpm la rotura puede producirse debido a la fatiga (velocidad), pero la frecuencia más elevada de 600,000 cpm la rotura ocurrirá con toda probabilidad a causa de la fuerza aplicada (aceleración). La aplicación de una fuerza excesiva puede tener como resultado una falla de la lubricación, ocasionando la rotura de la superficie de soporte de los rodamientos. Por lo tanto, a altas frecuencias, es decir de 60,000 cpm y más, la aceleración puede ser el mejor indicador de la severidad de la vibración

### *LO QUE NOS REVELA LA FASE*

La medición de fase es esencial en el análisis de la vibración para diagnosticar problemas específicos de las máquinas. Mediciones comparativas de fase se usan como sigue:

- Balanceo - La fase se usa para determinar el tipo de desbalanceo, estático o dinámico, y para calcular la cantidad y la ubicación angular de los pesos de corrección. Se usa también para evaluar los efectos de temperatura, carga, etc
- Falta de Alineamiento - Las mediciones comparativas de fase revelan el tipo de falta de alineamiento (angular o descentramiento) y la ubicación del defecto
- Aflojamiento - Se usa la fase para detectar la existencia de movimiento relativo de los componentes de las máquinas causado por un enlechado de mala calidad, por cimentaciones rotas o resquebrajadas, etc.
- Estudios de modalidad - Las lecturas comparativas de fase pueden revelar formas de modalidad en todos los tipos de estructuras para maquinaria.

Las informaciones relacionadas con la fase se obtienen por medio de una luz estroboscópica accionada por una señal de vibración, de un captador de referencia de fase o, en algunos casos, de un osciloscopio.



## 2.6 EVALUACION DE LA SEVERIDAD DE LA VIBRACIÓN

Puesto que la amplitud de la vibración es una medida de la gravedad del problema para una máquina, la pregunta siguiente debería ser ¿ qué cantidad de vibración se considera excesiva ? Para responder a esta pregunta es importante no olvidar que el objetivo es usar el control de la vibración para detectar los problemas en su etapa inicial y poder programar el procedimiento de corrección adecuado. La finalidad principal es obtener un aviso con suficiente anticipo de los problemas en formación, y no determinar cuanta vibración una máquina puede soportar antes de que falle.

No hay cifras significativas para la selección de un límite de vibración que, si se sobrepasa, tendría como resultado una rotura inmediata de la máquina. Los eventos que rodean el desarrollo de una falla mecánica son demasiado complejos para poder establecer unos límites confiables. Por otra parte, hay que tener una indicación general de la condición de las máquinas, que puedan ser evaluadas en base a la amplitud de la vibración. Esto es posible utilizando unas pautas generales que han sido desarrolladas a través de la experiencia adquirida durante muchos años.

### *GRAFICOS GENERALES DE LA SEVERIDAD DE LA VIBRACIÓN*

El gráfico de severidad de la vibración que aparece en la figura 2-10 es un ejemplo de lo que puede ser utilizado como guía general para determinar la condición de una máquina. En este gráfico, el eje horizontal esta calibrado en términos de frecuencia de la vibración, y el eje vertical en términos de desplazamiento. La zona entre las líneas diagonales representa varios niveles de severidad de la vibración, desde **EXTREMADAMENTE SUAVE** hasta **MUY RUDO**.

Si se mide una amplitud de desplazamiento de 0.30 mils de pulgada, cresta a cresta, a una frecuencia de 3600 cpm, en el punto de cruce de estos dos valores en el gráfico se vera que la máquina esta funcionando en la gama de niveles "**BUENOS**". El gráfico indica claramente que la severidad de la vibración de una máquina depende de la amplitud de desplazamiento y de la frecuencia de la vibración. Al aumentar la frecuencia de la vibración, se reduce la amplitud del desplazamiento para una condición dada de la máquina (por ejemplo, un nivel **BUENO**).

El mismo gráfico es de uso mucho más sencillo considerando la velocidad de la vibración. Tómese nota que cada una de las líneas que dividen las áreas de severidad esta identificada con una cifra que indica la velocidad de la vibración. El área de nivel **LEVEMENTE RUDO**, por ejemplo, comienza en 0.157 pulg./seg. Y termina en 0.314 pulg./seg. Por lo tanto, por una velocidad medida de 0.20 pulg./seg. el gráfico, independientemente de la frecuencia, indicara que la máquina esta en un nivel **LEVEMENTE RUDO**.

El gráfico de severidad que aparece en la figura 2-11 funciona prácticamente de la misma manera, pero usa los parámetros de velocidad y aceleración y cubre una gama de cpm más elevada. La gama de frecuencias, de 18,000 a 600,000 cpm, esta trazada a lo largo del eje horizontal, la aceleración de pico a lo largo del eje vertical. Hay que asociar una lectura dada de aceleración con una frecuencia filtrada para poder determinar la severidad de la condición de una máquina. Pero téngase presente que se puede hacer referencia a las líneas diagonales, las que indican velocidad, para determinar la condición solamente sobre la base de la velocidad de la vibración.

Las pautas ofrecidas por estos dos gráficos de severidad son aplicables a la maquinaria rotativa en general, donde la vibración no afecta directamente la calidad del producto terminado - motores, ventiladores, sopladores y bombas. Obviamente, dichos gráficos no tienen significado para maquinas que funcionan con niveles de vibración inherentemente altos, como trituradoras de martillos, quebrantadoras de piedra, machacadoras de carbón, etc. La guía es útil solamente cuando la experiencia, los registros de mantenimiento, el desarrollo tecnológico, y el sentido común indican que se le puede utilizar.

### ***GRÁFICO DE LA SEVERIDAD DE LA ENERGÍA DE IMPULSOS (SPIKE ENERGY)***

La figura 2-12 indica un ejemplo de gráfico de severidad que puede ser utilizado para evaluar la condición de rodamientos de elementos rodantes, sobre la base de la velocidad del eje y de los impulsos o picos de energía. La velocidad del eje (en r.p.m.) esta indicada a lo largo del eje horizontal, y las unidades de g-SE a lo largo del eje vertical. La delineación de los límites de severidad para rodamientos buenos y malos se alcanza mejor por los métodos de "comparación" o "tendencias" descritos a continuación.

Figura 2-10

Gráfico de severidad de velocidad y desplazamiento.

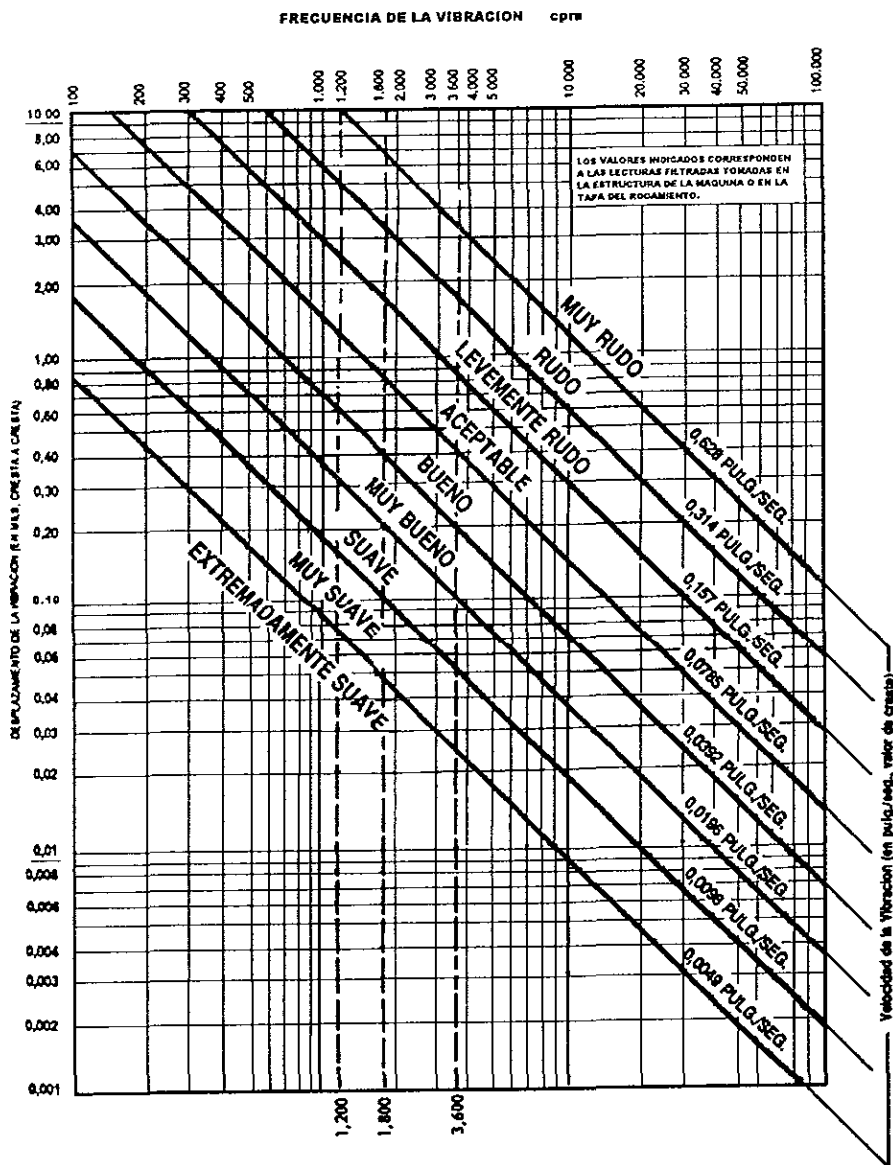


Figura 2-11

Gráfico de severidad de velocidad y aceleración.

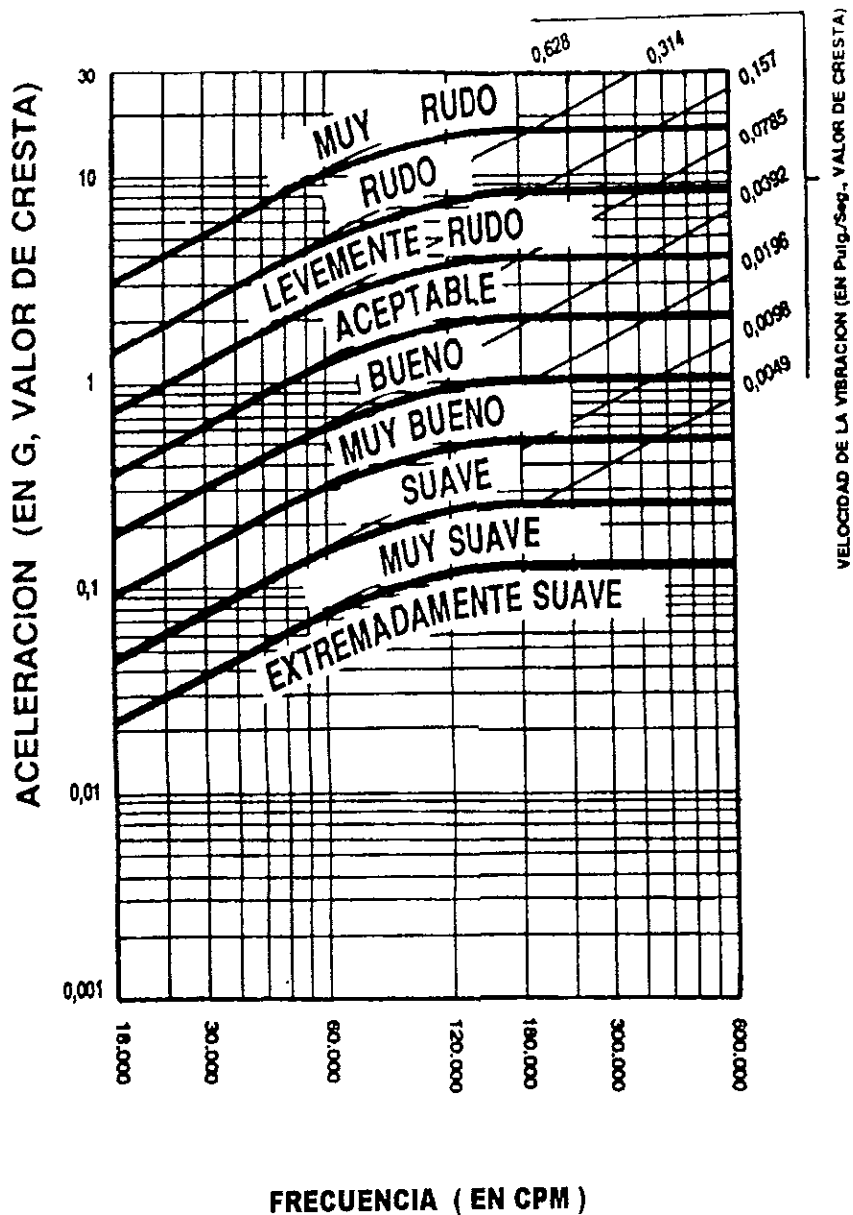
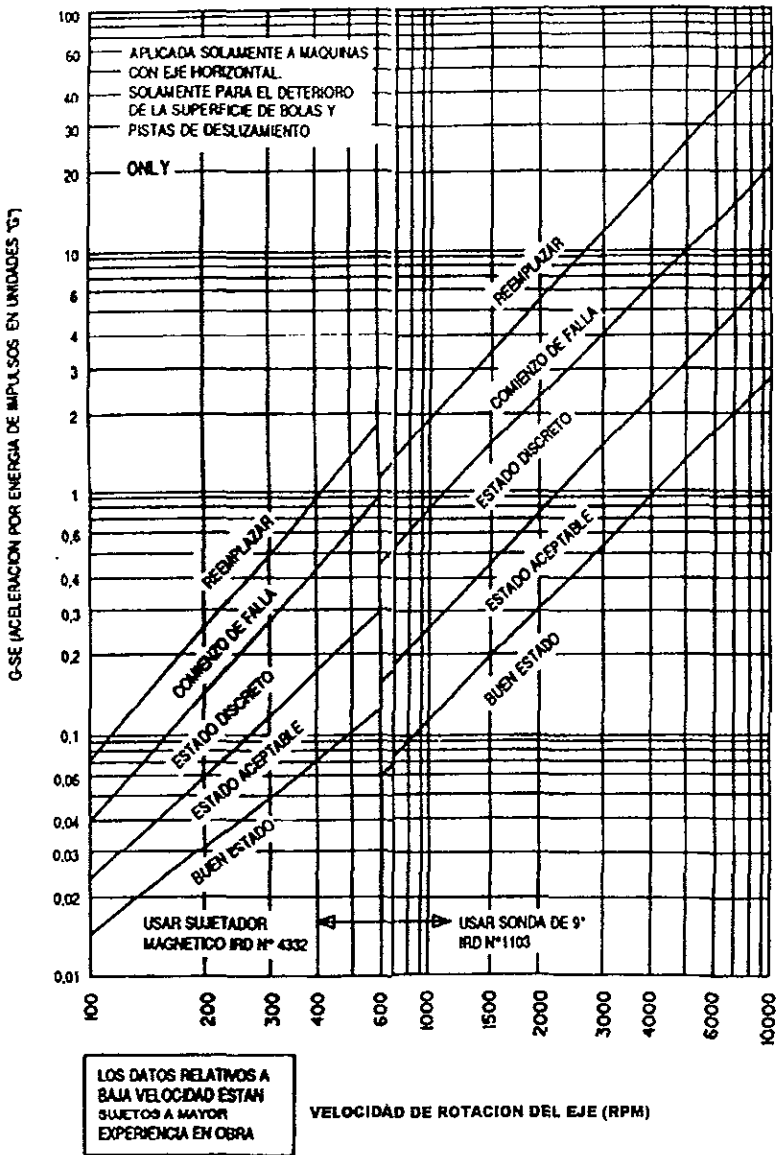


Figura 2-12.

Gráfico de severidad en g-SE para elementos rodantes y rodamientos.



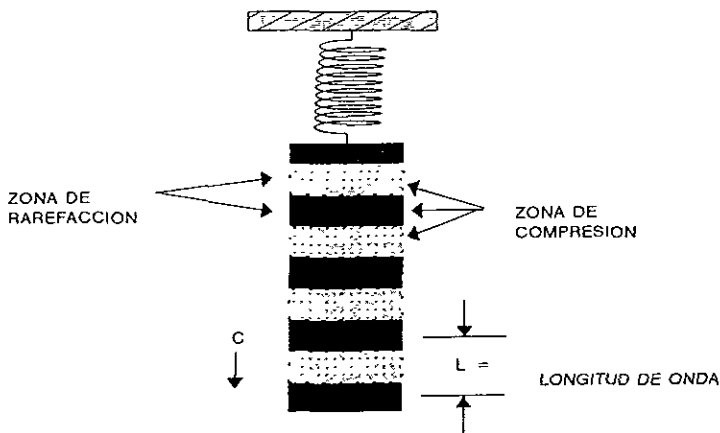
Cuando se establezca un programa para el control de la condición de rodamientos de elementos rodantes se recomienda el método de "comparación". Es decir, los niveles de g-SE de máquinas similares son medidos y comparados; los niveles que se apartan considerablemente de los valores medidos son separados para análisis ulterior de la posibilidad de problemas en los rodamientos. Este método conduce rápidamente a la determinación de criterios para identificar los niveles buenos y malos con respecto a la condición de los rodamientos.

Establecer "tendencias" es otra manera para detectar rodamientos defectuosos. Con este método los rodamientos de una máquina son medidos periódicamente, registrando los niveles de g-SE. Ningún cambio de nivel durante un cierto período de tiempo indica un buen rodamiento, mientras que una tendencia considerablemente en aumento indica un rodamiento que se esta deteriorando.

## 2.7 LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS RUIDOS

Como la vibración, los ruidos tienen un numero de características que los definen o describen. Examinando las oscilaciones a presión producidas por la pesa vibradora de la figura 2-13, podemos comprender mejor las características del ruido.

FIGURA 2-13  
La oscilacion constante de la pesa genera zonas correspondientes de compresion y rarefaccion que emanan de la fuente.



## *VELOCIDAD DE PROPAGACION*

Las zonas de compresión y rarefacción se alejan radiadas del punto de su origen. La velocidad con que se irradian las ondas sonoras se llama "velocidad de propagación" ( $c$ ) o sea, sencillamente la velocidad del sonido. La velocidad del sonido en el aire a una temperatura y presión normales es una constante de como 1130 pies por segundo (346 metros por segundo). No hay que confundir la velocidad del sonido con la de la vibración ya que esta es medida de la amplitud de la vibración mientras que la velocidad del sonido es una constante, esencialmente independiente de la amplitud del sonido.

## *FRECUENCIA*

Otra característica que tiene el sonido es la frecuencia ( $f$ ), que puede definirse para fines prácticos, como el número de ondas sonoras o zonas de compresión que pasan en un punto dado durante un tiempo específico, como ejemplo un minuto o un segundo. Así es que si hay 100 regiones de moléculas de aire comprimidas, pongamos por caso, que pasan un punto fijo (como un micrófono) durante un minuto, se trata de un sonido con una frecuencia de 100 ciclos por minuto.

Las frecuencias sonoras que se midan con relación a los problemas mecánicos se expresan normalmente en ciclos por minuto (CPM) para poder relacionarlos directamente con las velocidades rotativas y múltiples de las mismas que se expresan a su vez en R.P.M. Las frecuencias sonoras expresadas en ciclos por minuto pueden fácilmente convertirse en Hz (ciclos por segundo) solamente dividiendo los CPM por 60 Hz ( $\text{Hz} = \text{CPM} / 60$ ).

En lo que respecta al oído humano, las frecuencias sonoras se descomponen por lo general en las tres categorías que siguen:

- 1.- Infrasonica - sonidos cuyas frecuencias quedan por debajo de la gama audible ( esto es, menor que 15 Hz ).
- 2.- Audiosonica - sonidos cuyas frecuencias están comprendidas dentro de la gama audible ( es decir, de 15 Hz hasta 20,000 Hz )
- 3.- Ultrasonica - sonidos cuyas frecuencias quedan por encima de la gama audible ( esto es, superior a 20,000 Hz ).

En cuanto a los ruidos industriales nos ocupamos casi siempre de los ruidos audiosónicos únicamente puesto que son los que más afectan al personal

### *LONGITUD DE ONDAS*

En la figura 2-13 se ve que las zonas de compresión presentan un espaciado regularmente definido. Esta distancia que separa las regiones de compresión se llama la longitud de onda, concepto que por lo general está representado por el símbolo griego Lambda ( $\lambda$ ).

Existe una relación particular entre la frecuencia ( $f$ ), la velocidad de propagación ( $c$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ) de un sonido, relación que se expresa por la siguiente ecuación sencilla:

$$F = c / \lambda$$

Esta expresión quiere decir que la frecuencia de un sonido guarda con respecto a la longitud de su onda una proporción inversa. Es decir, los sonidos de frecuencia muy elevada tienen una longitud de onda muy corta mientras que los sonidos de baja frecuencia la tienen relativamente larga.

### *LA IMPORTANCIA DE LA FRECUENCIA Y LONGITUD DE ONDA DE LOS RUIDOS*

Es importante conocer la frecuencia de un ruido (e indirectamente la longitud de onda correspondiente) En primer lugar, la frecuencia de un ruido es la clave que identifica la fuente del ruido, al igual que la frecuencia vibratoria que nos ayuda a identificar un problema de vibración que afecte una máquina dada. Lo que más comúnmente produce el ruido es la vibración de las estructuras sólidas tales como las máquinas o secciones de pared. La tasa o frecuencia de vibración de dichas estructuras determinan la frecuencia de los ruidos que emanan de ellas. Así que una vibración de 100 Hz. (6,000 CPM) dará lugar a un ruido de 100 Hz (6,000 CPM).

Lo molesto que son las frecuencias de ruido que se generan determinan también, en muchos casos, qué método deberá ser empleado para controlar el ruido. Por ejemplo, aunque la vibración mecánica genere un ruido, puede ser que sea relativamente bajo en nivel de dicha vibración lo que indica que no existe problema mecánico significativo. En semejante caso, puede clasificarse



el ruido generado como “inherente” en el funcionamiento de la máquina, por lo que habrá de hechar mano a otros métodos de control para reducir el nivel de ruido. Siendo así, estos otros métodos pueden incluir las barreras antruido o encerrados acústicos que limiten o hasta absorban el sonido. Hasta cierto punto el tipo y la configuración de los materiales a emplear serán determinados por las frecuencias ( longitud de onda ) de los ruidos que se propone controlar.

### *EL RUIDO ¿ CUÁNTO ES MUCHO ?*

Hoy día están vigentes muchos reglamentos federales, estatales, providenciales y locales para proteger al personal contra la perdida del oído que pudiera resultar de estar expuesto a un tiempo prolongado a los niveles de ruido excesivos. Y hasta hace poco, la mayor preocupación de la industria en lo que atañe al ruido es la conservación del oído. Sin embargo, existen también otros motivos por preocuparse de los ruidos mecánicos. En primer lugar, queda aceptado que hay ciertas zonas de trabajo como las oficinas, consultorios, y bibliotecas que exigen niveles de ruidos muy reducidos, muy inferiores a los que se consideran peligrosos.

Segundo se ha reconocido que el ruido constituye otro parámetro que afecta el funcionamiento de la maquinaria, que se puede medir a fin de detectar los problemas mecánicos inminentes.

### *LOS NIVELES DE RUIDO ESTABLECIDOS POR LA LEGISLACION*

Cuando uno esta expuesto por un periodo prolongado a los niveles de ruido elevado se ha demostrado que esto puede provocar una perdida permanente del oído. Durante los últimos años se han acumulado suficientes conocimientos de la materia para definir los limites aceptables en los niveles frecuencias del ruido, así como la duración de permanecer expuesto a los mismos a fin de proteger a la mayoría de las personas interesadas contra la pérdida permanente del oído.

Un conjunto típico de limites aparece en la tabla 2-2. Según dicho gráfico se permite que un empleado trabaje en un ambiente de 90 dBA de ruido hasta 8 horas diarias. Pero al rebasar dicho nivel de ruido se tiene que reducir el tiempo de estar expuesto a el, hasta que el nivel de 115 dBA no se permite sino 15 minutos de exposición. En el caso de un empleado que trabaje en zonas de

nivel sonoro distinto durante un turno, la duración admisible debe ser calculada como se indica.

Tabla 2-2

Exposiciones permisibles al ruido.

Duración por día-hora	Niveles de sonido	dBA
8	.....	90
6	.....	92
4	.....	96
3	.....	97
2	.....	100
1 1/2	.....	102
1	.....	105
1/2	.....	110
1/4 ó menos	.....	115

## *CAPITULO III*

## **MEDICIÓN DE VIBRACIONES.**

Para iniciar las funciones de control se hace necesario el poder cuantificar o medir el desplazamiento de la vibración. El convertir una energía mecánica en una señal eléctrica hace necesario el uso de un dispositivo que realice la conversión el cual recibe el nombre de **Transductor**. Ya que con una señal eléctrica podremos manejarla en forma adecuada en la medición y análisis enfocados a funciones de control de equipos mecánicos

Los instrumentos electrónicos utilizados para la medición de la vibración de la maquinaria son clasificados generalmente, como medidores, monitores y analizadores. Aunque los analizadores de vibración pueden realizar las mismas funciones de los medidores y monitores, también pueden llevar a cabo operaciones mas complejas, por ejemplo un analizador es un filtro que puede ser sintonizado de manera de separar las frecuencias individuales de una onda vibratoria compleja. Los analizadores pueden también incluir una lámpara estroboscópica, que se usa en el análisis de fase y en el balanceo dinámico.

Independientemente del tipo de instrumento que se use para medir la vibración, el corazón del sistema de medición es el transductor ( o sea el captador ). Hay una amplia variedad de transductores de vibración disponible. Todos los medidores de vibración, monitores y analizadores usan un transductor de vibración, el cual a menudo es llamado captador de vibración o sensor; además muchos de los analizadores y medidores de vibración pueden ser usados con diferentes transductores.

No hay un solo tipo de transductor que puede satisfacer todos los requerimientos de medición para la detección y análisis de la vibración en los tiempos modernos. Por lo tanto, se deberá seleccionar el transductor de acuerdo a la tarea de medición que deba realizarse.

### **3.1 CAPTADORES DE VELOCIDAD**

Los captadores de velocidad, o transductores responden directamente a la velocidad de la vibración. La mayoría de los instrumentos para la medición de la vibración están equipados para procesar las señales eléctricas generadas por un captador de velocidad e indicar también el desplazamiento de la vibración. Teóricamente, es también posible convertir las señales de los captadores de velocidad en unidades de aceleración; sin embargo, en la practica

esto no se hace porque los resultados obtenidos no son confiables. Para la medición de desplazamiento y velocidad de la vibración se usan los captadores de velocidad.

### *CAPTADORES SISMICOS DE VELOCIDAD ( TIPO DE BOBINA MOVIL )*

Los transductores de velocidad se usan extensamente para requerimientos generales de medición, análisis y balanceo. Esto se debe al hecho de que los captadores de velocidad son robustos, de fácil aplicación, y pueden ser sostenidos en la mano. Además tienen relativamente altos niveles de erogación eléctrica, y el calibrado del sistema no se ve afectado por la longitud del cable. Estos sensores autogeneran la corriente que precisan y no necesitan ninguna alimentación eléctrica. Los captadores son en general más grandes y más pesados que otros tipos. Y al igual que todos los transductores tienen limitaciones con respecto a los límites máximo y mínimo de amplitud y frecuencia de la vibración que puede ser medida.

La tensión de la corriente generada en un transductor sísmico de velocidad normalmente se expresa en milivoltios por pulgada por segundo. Esta es la especificación de la sensibilidad del captador. La sensibilidad de los transductores de velocidad IRD Modelos 544 y 544M, por ejemplo, es de 1080 mV-pico por pulgada por segundo-pico. Cuando se asegura el transductor o se le retiene firmemente apoyado contra un elemento de máquina que este vibrando a la velocidad de 1 pulg./seg. (pico), en las conexiones de salida del transductor se deberá leer una tensión de cresta de 1080 mV.

La sensibilidad de un transductor de velocidad es constante en una amplia gama de frecuencias de operación, pero hay limitaciones. Con bajas frecuencias de vibración, la sensibilidad se reduce debido a que la bobina ya no se queda fija en el espacio, tendiendo a seguir el movimiento del imán.

El significado práctico de este hecho es que las lecturas de amplitud que típicamente se encuentren por debajo de los 600 cpm ( ciclos por minuto ) en los transductores sísmicos de velocidad estándar no son lecturas reales; un medidor de vibración indicara valores menores de los que corresponden a la amplitud real de las vibraciones que se están midiendo.

El transductor sísmico de velocidad utiliza un campo magnético interno, fijo como parte de su funcionamiento normal. Cualquier deformación de ese campo magnético acabara seguramente por interferir con la precisión de las mediciones. La medición de la vibración en motores de corriente alterna o alternadores de gran envergadura, a veces presenta problemas a este respecto. Tales máquinas producen de por si fuertes campos magnéticos, los cuales pueden inducir una correspondiente señal eléctrica en los transductores sísmicos de velocidad. la frecuencia de esta falsa señal de vibración es igual a la frecuencia del campo magnético externo de corriente alterna. La amplitud de la señal inducida es proporcional a la fuerza del campo magnético en la ubicación del transductor.

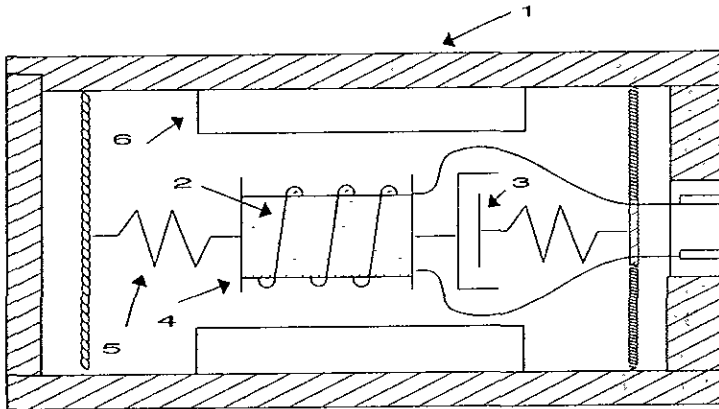
Si se encuentra que hay una gran cantidad de interferencia de corriente alterna, se recomienda instalar el captador dentro de una cubierta antimagnética, que puede contribuir a reducir la interferencia magnética en una relación de 100 a 1. Otra solución provisional para la interferencia magnética es usar una sonda con una extensión larga. Una sonda larga sencillamente permite ubicar el captador en una posición alejada del campo magnético, reduciendo así el nivel de interferencia. Esto se recomienda solamente como solución temporal, puesto que el empleo de una sonda larga limita la respuesta a altas frecuencias.

La figura 3-1 ilustra un diagrama simplificado de un transductor sísmico de velocidad. El sistema consta de una bobina de alambre muy delgado, soportada por resortes suaves. Un imán permanente, asegurado firmemente al estuche del transductor, provee un fuerte campo magnético alrededor de la bobina.

### ***CAPTADORES DE VELOCIDAD DIRECT-PROD DE VASTAGO DIRECTO***

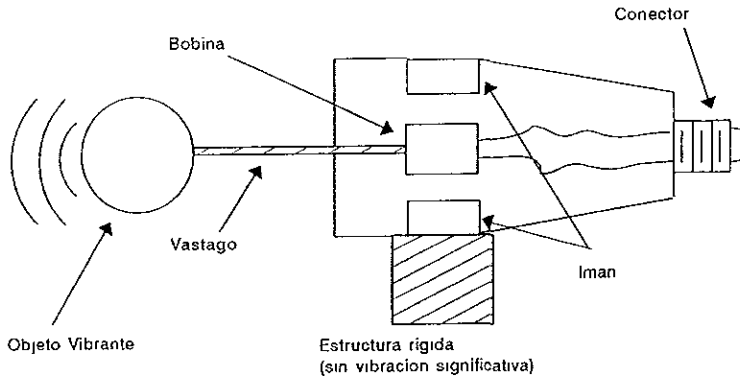
El principio de funcionamiento de un captador de vástago directo es idéntico al de un captador sísmico de velocidad. sin embargo, con el captador de vástago directo, un vástago delgado sobresale a través del capicete del captador, y está asegurado a un extremo directamente a la bobina móvil que esta adentro. Para medir la vibración con un captador de vástago directo, es necesario sujetar el cuerpo principal de la unidad a una estructura rígida (que no tenga un nivel de vibración significativo) que sirva de punto de referencia. Seguidamente, se asegura la punta del vástago a la parte vibrante mediante una punta roscada o una punta magnética especial.

Figura 3-1  
Transductor sismico de velocidad



- |                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 1) Caja de captador             | 4) Masa    |
| 2) Bobina de alambre            | 5) Resorte |
| 3) Dispositivo de amortiguacion | 6) Imán    |

Figura 3-2  
Plano esquemático del captador de vástago directo



De ser necesario, las unidades de vástago directo pueden ser sostenidas en la mano, pero hay que tener en cuenta los movimientos de la mano que resultarán naturalmente.

Una de las ventajas del captador de velocidad de vástago directo es que se añade solamente el peso del vástago y de la bobina que se mueve a las piezas en vibración. Esto hace que el captador sea extremadamente útil con objetos pequeños y livianos, donde la masa intrínseca de un captador sísmico de velocidad estándar puede afectar la vibración misma.

Debido a que la bobina del captador es movida directamente por el vástago, mientras que la caja del captador permanece estacionaria, la sensibilidad de este tipo de sensor no disminuye con las bajas de frecuencias. Este tipo de captador es por lo tanto adecuado para mediciones de frecuencias muy bajas como 50 cpm, lo que lo hace valioso aplicado a maquinas de balanceo.

El captador de velocidad de vástago directo resiente de los mismos problemas de interferencia magnética que afectan al captador sísmico de velocidad y esta sujeto al mismo tipo de corrección. Véase esquema del captador de vástago directo en la figura 3-2.

### ***CAPTADORES SÍSMICOS DE VELOCIDAD ( TIPO PIEZOELÉCTRICO )***

Hay un segundo tipo de transductor de velocidad que sirve para todos los fines descritos hasta ahora pero usan diferente principio de funcionamiento. Se trata del transductor de velocidad piezoeléctrico. Estas unidades tienen una salida que es proporcional a la velocidad, pero no tiene partes móviles internas. Los esfuerzos debidos a las fuerzas vibratorias aplicadas al captador originan una carga eléctrica en una pieza de cristal o de cerámica especial.

La carga eléctrica producida por el elemento piezoeléctrico es tan reducida que la señal debe ser amplificada antes de poder medirla. El modelo 560 de IRD es un captador de velocidad de este tipo y cuenta con un amplificador incorporado.

El Modelo 560 ha sido diseñado específicamente para aplicaciones de bajas frecuencias. Puede medir frecuencias tan bajas de hasta sólo 1 Hz (60 ciclos por minuto).



El amplificador incorporado proporciona una elevada señal de salida y baja impedancia, para permitir la utilización de cables de gran longitud sin pérdidas de la señal. El bajo ruido residual combinado con un pequeño desplazamiento de fase hace que éste sea el transductor ideal para aplicaciones de balanceo a baja velocidad.

En la mayor parte de las condiciones de empleo el captador de velocidad piezoeléctrico no es afectado por la presencia de campos magnéticos. En la figura 3-3 se ve el plano esquemático del captador de velocidad piezoeléctrico.

### **3.2 ACELERÓMETROS**

Un acelerómetro es un dispositivo autogenerador, con una salida de tensión o carga proporcional a la aceleración de la vibración.

La aceleración es una medida del coeficiente (o incremento) de cambio de la velocidad y se expresa normalmente en términos de “g”, siendo “g” la unidad de aceleración definida como la aceleración producida por la fuerza de gravedad en la superficie de la Tierra. El valor exacto de un “g” varía de acuerdo a la altura sobre el nivel del mar del punto de observación. Sin embargo, por convenio internacional el valor de la aceleración estándar debida a la gravedad ha sido establecido en  $980.665 \text{ cm/seg.}^2 = 386.089 \text{ pulg./seg.}^2 = 32.1740 \text{ pies/seg.}^2$ . En el sistema internacional de unidades un “g” equivale a  $9.80665 \text{ m/seg.}^2$ . La aceleración es una función del desplazamiento y la frecuencia al cuadrado. Como resultado el acelerómetro es un instrumento extremadamente sensible a la vibración que ocurre en altas frecuencias.

#### ***CAPTADORES SÍSMICOS ( TIPO PIEZOELECTRICO, CON AMPLIFICADOR INCORPORADO )***

Los transductores de aceleración, o acelerómetros producen una corriente cuya tensión es proporcional a las características de aceleración de la vibración. Puesto que la aceleración es una función del desplazamiento y la frecuencia al cuadrado, los acelerómetros son especialmente sensibles a las amplitudes de la vibración que ocurre a altas frecuencias. Esto hace que el acelerómetro sea particularmente útil para medir y analizar la vibración producida por engranes y por rodamientos de elementos rodantes. A menudo los acelerómetros son montados en forma permanente, para monitorear y

Figura 3-3  
 Plano esquemático del captador de velocidad piezoeléctrico,  
 Modelo 560

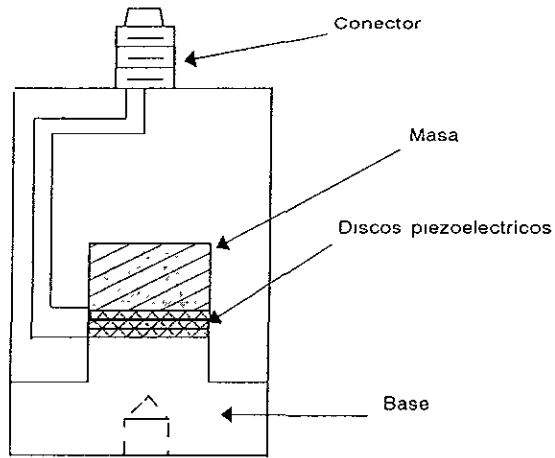
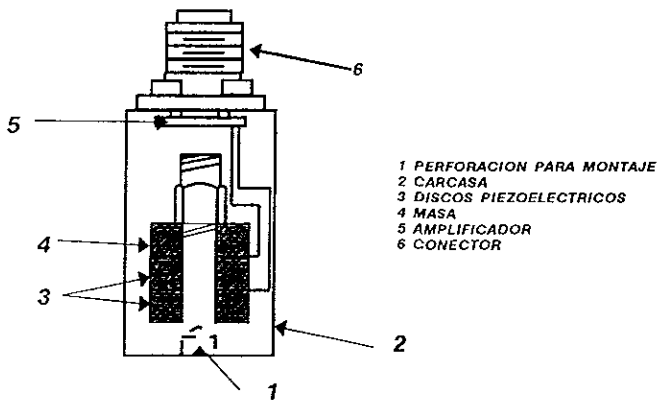


Figura 3-4  
 Plano esquemático de un acelerómetro con amplificador  
 incorporado.



verificar continuamente la vibración de elementos tales como turbinas de gas y otros tipos de máquinas que funcionan a velocidades de rotación muy elevadas.

Los acelerómetros son transductores pequeños, livianos y robustos, que funcionan en una gama muy amplia de frecuencias y de temperaturas y resisten a niveles de vibración muy elevados. Son un tipo importante de sensores de vibración y encuentran un amplio campo de aplicación en los sistemas de monitoreo de la vibración así como el análisis de la misma. Además de sus sensibilidad a la vibración de alta frecuencia, sus dimensiones reducidas y su poco peso hacen que el acelerómetro sea especialmente adecuado en aquellas aplicaciones donde el espacio es limitado, o donde la masa del captador tienen mucha importancia.

Los acelerómetros no son afectados por los campos magnéticos externos, pero son más susceptibles a los retornos de corriente (debidos a las puestas a tierra), a las interferencias de las frecuencias radiofónicas, a la presencia de suciedad en los contactos eléctricos y a los contactos eléctricos sueltos o no bien apretados. La longitud del cable puede ocasionar una reducción de la sensibilidad.

La figura 3-4 muestra un diagrama simplificado de un acelerómetro típico o transductor de aceleración, con amplificador incorporado. Asegurando este captador a una pieza de una máquina que vibra, o manteniéndolo adherido a la misma, la vibración mecánica pasa a través de la carcasa y llega al material piezoeléctrico. Este material tiene la capacidad de generar una carga eléctrica en respuesta a una fuerza mecánica aplicada al mismo. En este caso la vibración mecánica produce la fuerza y el material piezoeléctrico responde generando una carga eléctrica que es proporcional a la cantidad de aceleración de la vibración.

El hecho que un acelerómetro responda directamente a la característica de aceleración de la vibración explica su nombre.

La carga eléctrica generada por el material piezoeléctrico es muy pequeña comparada con la salida de un transductor de velocidad. Es una carga que puede ser medida en términos de picocoulomb por g ; donde el coulomb es la unidad estándar de las cargas eléctricas y un picocoulomb es una millonésima parte de un microcoulomb.

Siendo que la carga eléctrica generada directamente dentro de un acelerómetro es tan pequeña, muchos de los modelos comerciales incorporan un amplificador electrónico de alta ganancia. El acelerómetro IRD Modelo 970 comprende un amplificador incorporado que da al transductor una sensibilidad de 50 mV por g.

### **3.3 TRANSDUCTORES DE PROXIMIDAD ( DE NO CONTACTO )**

Muchas de las máquinas que funcionan a velocidades muy elevadas, tales como turbinas compresores y bombas centrífugas, constan de rotores relativamente livianos montados en carcasas robustas y rodamientos rígidos. Debido al peso y rigidez de la carcasa de gran tamaño de la máquina y de los rodamientos, los captadores de aceleración y vibración montados externamente a menudo no logran mostrar evidencia de la vibración que podría afectar el eje y/o el rotor. Sin embargo, el rotor podría estar vibrando excesivamente dentro de las tolerancias de los rodamientos. En tales casos es necesario medir la vibración real del eje, para poder determinar cuando exista peligro para las tolerancias de sellos y rodamientos. Esta es la función de los transductores de proximidad.

Los transductores de proximidad pueden ser usados con los medidores y analizadores portátiles, al igual que los monitores montados permanentemente. Sin embargo a diferencia de los transductores de velocidad y de aceleración, un transductor de proximidad no cuenta con un elemento que genere una tensión o una carga eléctrica en respuesta a una vibración.

En la figura 3-5 se muestra un diagrama esquemático de un captador de proximidad (de no contacto). Un sensor de proximidad requiere un dispositivo electrónico externo que genere una señal de corriente alterna de frecuencia muy elevada y detecte la vibración inducida en la señal de corriente alterna causada por la vibración del eje.

El dispositivo electrónico llamado sensor de señales, genera una señal eléctrica de muy alta frecuencia, llamada señal portadora. Esta señal por medio de un cable coaxial, es conducida hasta una pequeña bobina de alambre, ubicada en la punta del captador de proximidad. La señal eléctrica de alta frecuencia aplicada a la bobina genera un campo magnético. Ese efecto de absorción coloca una "carga" eléctrica en la señal, reduciendo así su potencia.

Figura 3-5  
 Diagrama esquemático de captadores de proximidad (de no contacto).

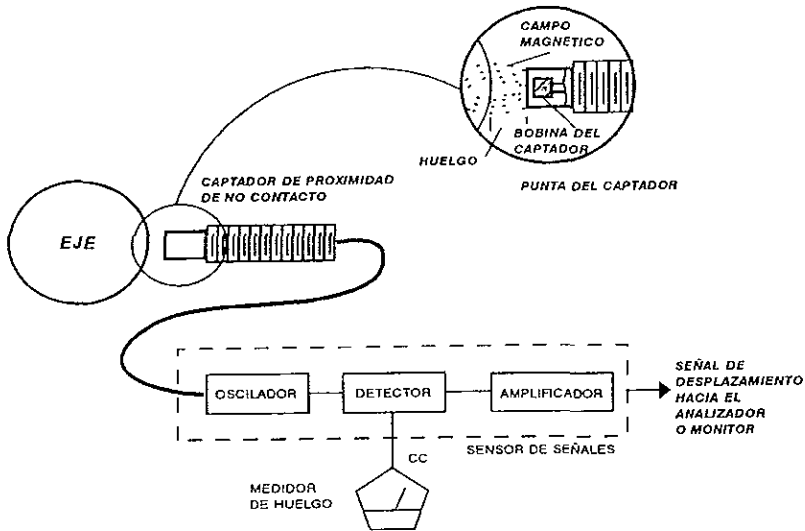


Figura 3-6

Valores típicos de regulación del huelgo para captadores de proximidad.

Sistema Ingles	Sistema Métrico
0.020 pulg..	0.50 micrones
0.030 pulg.	0.75 micrones
0.050 pulg .	1.25 micrones
0.060 pulg .	1.50 micrones
0.100 pulg.	2.50 micrones

La cantidad de esa carga - reducción de potencia de la señal - es inversamente proporcional a la distancia entre la bobina y el eje. Cuando más cerca está la bobina del eje, más fuerte será el efecto de carga, y más pequeña la cantidad de señal portadora.

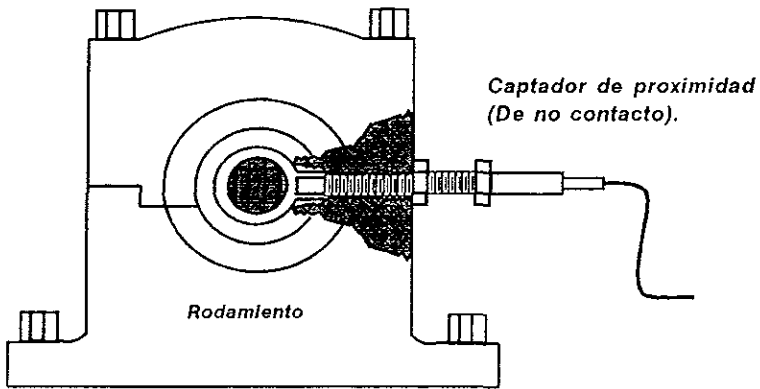
A medida que el eje se mueve en relación con la punta del captador, la fuerza de la señal eléctrica cambia, proporcionalmente con el movimiento. El sensor de señales produce una tensión de corriente alterna proporcional a la vibración y una señal de corriente continua proporcional a la separación existente. La variación de la "fuerza" de la señal portadora es por lo tanto proporcional a la cantidad de vibración. Esta señal de "desplazamiento" es enviada, por medio de un cable, a un medidor de vibración, a un monitor o a un analizador.

Los transductores de proximidad se instalan en la máquina con la punta del transductor ubicada muy cerca del eje rotante. La distancia de separación entre la punta del transductor y el eje se llama "huelgo" ("gap"). La figura 3-6 ilustra valores típicos de huelgo para los sensores de proximidad. Tales valores son críticos, puesto que son los que determinan la calibración del sistema.

Los captadores de proximidad pueden ser suministrados en muchos tipos de configuración. Algunos tienen solamente  $\frac{3}{4}$  de pulg. de longitud, mientras otros pueden medir varias pulgadas de largo. Mientras que algunos captadores son suministrados con el cuerpo roscado, otros tienen el cuerpo liso, para ser instalados en forma permanente mediante tornillos de fijación o cemento epóxico. Algunos captadores de proximidad están dotados de conectores integrales, impermeables y a prueba de aceite; otros tienen cables de Teflon. Para proporcionar la máxima protección posible contra daños al cable, algunos cables están equipados con un armazón de blindaje. La figura 3-7 ilustra un transductor de proximidad montado a través del alojamiento del rodamiento. Básicamente se trata de un transductor de desplazamiento; pero en lugar de medir el desplazamiento del rodamiento o la carcasa, éste mide el desplazamiento del eje en relación con el soporte y el alojamiento.

**Figura 3-7**

**Transductor de proximidad (de no contacto) montado en el alojamiento de un rodamiento.**



### **3.4 MONTAJE DE LOS TRANSDUCTORES**

#### **( CAPTADORES SÍSMICOS DE VELOCIDAD Y ACELEROMETROS )**

Los transductores de contacto están montados directamente sobre la pieza que vibra. Hay una variedad de métodos disponibles para el montaje de los transductores de contacto. Al igual que cuando se trata de escoger un transductor, la selección del método de montaje a menudo afecta la calidad y confiabilidad de las mediciones que se efectúan.

La técnica de montaje que se presenta a continuación se refiere en su mayoría a los transductores de velocidad y acelerómetros. Los transductores con características de montaje especiales, es decir principalmente los transductores de proximidad y los de montaje sobre el eje, esta descritos a continuación.

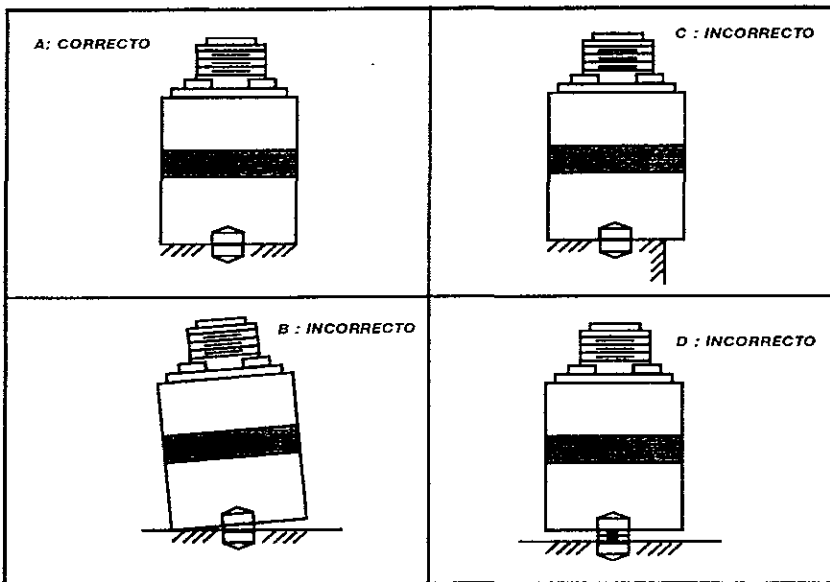
### Montaje con perno roscado.

Una técnica muy confiable es asegurar el transductor a la superficie de medición por medio de un perno roscado. Como se ve en la figura 3-8 A, la entera cara del transductor deberá apoyarse, en plano contra la superficie de montaje. Deberá de evitarse los errores de montaje ilustrados en las figuras 3-8 B, 3-8 C y 3-8 D.

Muchas máquinas no están provistas de pernos de montaje adecuados para los transductores. En tales casos es posible asegurar pernos de montaje sobre la tapa del rodamiento soldando o encolando una almohadilla de tamaño adecuado, en la cual se enroscarán los pernos de montaje.

Es importante que el perno roscado tenga una longitud adecuada para retener el transductor firmemente en posición, puesto que, si es demasiado largo, aplicara una presión excesiva en la parte interna de la tapa del transductor cuando éste se apriete en su lugar.

Figura 3-8  
Métodos de montaje correctos e incorrectos.





### **Montaje con resina epóxica.**

Muchas veces no es posible ejecutar una perforación en la superficie de montaje. En estos casos son útiles las técnicas de montaje que hacen recurso a la cementación o a las resinas epóxicas que endurezcan a baja temperatura. Habrá que prestar especial cuidado para que la cara del captador quede asegurada rígidamente y en contacto directo con la superficie de medición, de manera que no haya desacoplamientos.

### **Manual, sin sonda.**

Un transductor manual, sin sonda, es suficientemente satisfactorio para *ejecutar verificaciones periódicas* de la vibración y para su análisis. El transductor deberá mantenerse firmemente apoyado contra una superficie razonablemente plana. Cuando se aplique el transductor contra superficies curvas o irregulares, hay que tener presente que el transductor mide la vibración solamente en sentido paralelo al eje del transductor mismo y cualquier movimiento de la mano que lo sostiene, variando ese eje, se traducirá en lecturas no estables de la vibración. Úsese solamente la fuerza para evitar que el transductor vibre contra la superficie de medición o se desplace sobre la misma. Una sensación de cosquillas en la mano indicara la presencia de vibración de alta frecuencia, y se deberá aplicar una mayor presión contra el captador para obtener una lectura confiable.

### **Manual, con sonda estándar de 9 pulgadas.**

La sonda estándar de 9 pulgadas (23 cm) es un dispositivo cómodo para llegar hasta puntos difíciles de alcanzar y para ubicar el transductor en puntos muy específicos de la máquina. Esta sonda puede ser utilizada para aplicaciones de verificación periódica y análisis, pero hay que ejercer cuidado puesto que su uso reduce de manera significativa la gama de frecuencias del transductor con el cual se le usa.

### **- ADVERTENCIA -**

**Los análisis detallados de altas frecuencias deberán hacerse con el captador asegurado rígidamente.**

### **Sujetador magnético.**

El sujetador o soporte magnético proporciona un método rápido y conveniente para el montaje de los captadores. El sujetador magnético deberá ser montado en superficies razonablemente planas, lisas y limpias. Si la superficie magnética no está bien asentada sobre la superficie de medición el sujetador podrá oscilar con frecuencias impredeciblemente bajas, produciendo así lecturas erróneas. La presencia de suciedad o grasa entre la cara magnética y la superficie de medición reducirá la capacidad de sujeción del sujetador magnético, y por lo tanto reducirá la gama de frecuencias alcanzadas por el captador.

### **Pinzas sujetadoras.**

Los transductores pueden mantenerse adheridos a la superficie de una máquina con la ayuda de unas pinzas sujetadoras, las quijadas de las pinzas deberán de estar en contacto con la superficie de montaje a lo largo de toda su longitud.

La técnica de montaje por medio de pinzas sujetadoras es en realidad muy conveniente para ser utilizada durante el balanceo en la obra o sitio de la instalación. No es recomendable para el análisis de la vibración debido a su limitada gama de frecuencias.

### **Estacas para ejes.**

Muchas veces es útil conocer la vibración real de un eje, para hacer comparaciones con la vibración del alojamiento del rodamiento. Esto es especialmente válido en el caso de las máquinas que giran a altas velocidades, tales como turbinas, bombas centrifugas y compresores, en las cuales la carcasa de la máquina y el alojamiento del rodamiento a menudo presentan poca vibración aunque el rotor y el eje puedan estar vibrando excesivamente dentro de las tolerancias de los rodamientos. Una estaca para ejes, debidamente equipada con un captador de vibración, proporciona un medio conveniente para medir la vibración del eje.

Una estaca para ejes es sencillamente una tira de madera dura, con una extremidad cortada en “cola de pescado” y un perno roscado en la otra para asegurar el transductor. La forma de cola de pescado proporciona los dos puntos de contacto requeridos para mantener la estaca sobre la circunferencia de un eje en rotación, y permite también que la estaca pueda ser aplicada a ejes de casi cualquier diámetro. El extremo de cola de pescado es también ahusado, para proporcionar un área de contacto de pequeñas dimensiones, reduciendo así el rozamiento y el “castañeteo” de la estaca

La estaca para ejes normalmente requiere el uso de las dos manos. Con una mano se impide que la estaca se desplace longitudinalmente por sobre el eje; y con la otra mano se aplica presión y se regula la posición angular del transductor.

Los ejes deberán ser razonablemente lisos, de preferencia torneados o pulidos. La aplicación de la estaca sobre ejes con herrumbre, abolladuras, picaduras o de todas maneras, sobre una superficie escabrosa producirá lecturas dudosas de los valores de vibración y existirá el riesgo de arruinar la estaca.

De la misma forma que una estaca detecta la vibración del eje, detectara también la “falla de redondez” y la excentricidad de un eje. Aunque los efectos del descentramiento del eje son de muy poca cantidad y no representan un problema del cual uno de deba preocupar, es posible aumentar la validez de las lecturas sintonizando el filtro del analizador con la velocidad del eje, y utilizando una estaca para medir los niveles de vibración. Toda vez que se sospeche una condición de descentramiento, se deberá corroborar la medición mediante una lectura con micrómetro.

### **3.5 PAUTAS PARA LA SELECCIÓN DE LOS TRANSDUCTORES**

#### ***SELECCIÓN DE UN TRANSDUCTOR.***

Ningún transductor puede ser definido el transductor perfecto para todas las aplicaciones. Sin embargo, siempre habrá un transductor que será “mejor” para cada determinado tipo de aplicación. La tarea del operador es de identificar el transductor que sea el mejor y el más adecuado para su aplicación específica.

Hay varios puntos importantes que considerar en este proceso de selección. Uno de los puntos principales es elegir los parámetros de medición - desplazamiento, velocidad, aceleración, o energía de impulsos. También hay que considerar la gama de frecuencias de la medición, comparándola con la gama útil de frecuencias del transductor. La sensibilidad es también importante, así como lo son las posibles limitaciones del tamaño y peso del transductor, temperatura ambiente, humedad y demás condiciones ambientales.

La selección del transductor correcto para cada aplicación particular es un paso muy importante en el proceso de la obtención de datos precisos y confiables sobre la vibración.

Cada tipo de máquina que requiera análisis tendrá características propias. Por ejemplo, una caja de engranes con rodamientos de elementos rodantes tendrá vibración de alta frecuencia que no existe en un ventilador accionado por un motor de baja velocidad. Otro ejemplo podría ser una bomba o un compresor de gran tamaño con rodamientos hidrodinámicos, en los cuales se puede querer observar el desplazamiento del eje a medida que aumenta la temperatura de funcionamiento, para determinar los efectos de los cambios de temperatura en las condiciones de balanceo del rotor de la máquina.

De estos dos ejemplos resulta evidente que los parámetros a medir son diferentes y por lo tanto se requieren diferentes transductores para obtener la información necesaria. La selección de un transductor dependerá de lo siguiente:

- Las características mecánicas de la máquina
- Los parámetros que hay que medir
- La gama de frecuencias de la vibración
- Las consideraciones relativas al montaje

### *CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA MÁQUINA*

Para medir el huelgo de los rodamientos, la posición del rotor, o la vibración del eje hace falta la medición del desplazamiento usando un transductor de proximidad o un accesorio de contacto directo con eje. El transductor de proximidad mide la vibración del eje en relación con el alojamiento del rodamiento. El accesorio de contacto directo con eje

combinado con un transductor (sísmico) de velocidad mide la vibración del eje en relación con el espacio.

Para máquinas con carcasas robustas y rotores livianos el captador de proximidad es una buena selección para hacer mediciones del desplazamiento relativo.

### *CONSIDERACIONES DE LOS PARÁMETROS DE MEDICIÓN.*

Lo primero que hay que considerar en el proceso de selección de un captador son los parámetros que se quieren medir. La lista normalmente comprende desplazamiento, velocidad, aceleración y energía de impulsos (Spike Energy). Sin embargo la energía de impulsos solo puede ser medida con un acelerómetro; por lo tanto, por lo que se refiere a esta exposición, la lista de posibilidades queda limitada a desplazamiento, velocidad y aceleración.

Desplazamiento: el desplazamiento puede ser medido tanto con captadores de velocidad como captadores de aceleración. La medición se logra por medio de circuitos integradores, que normalmente están incluidos en los circuitos de medidores y analizadores de vibración. Los captadores de proximidad responden directamente al desplazamiento de la vibración y son fácilmente accesibles en el mercado.

Para medir el desplazamiento pueden usarse transductores de velocidad, tales como los Modelos 544 y 560 de IRD junto a un integrador sencillo. Si se trabaja en la gama de frecuencias más bajas, hay que tomar en cuenta que los transductores sísmicos de velocidad reducen la amplitud a menos de 600 cpm.

En los casos en los cuales la medición de las frecuencias muy bajas es importante, se puede considerar un transductor de vibración del tipo piezoelectrico. Este tipo de captadores, usados con integración sencilla, puede dar mediciones de desplazamiento confiables, llegando hasta 1 Hz, o sea 60 cpm.

Los acelerómetros, tales como los Modelos 910, 940, 960 y 970 de IRD pueden ser usados con un circuito de doble integración para medir el desplazamiento. Al igual que un captador sísmico de velocidad, el uso de un captador acelerómetro para medir el desplazamiento introduce atenuación y ruido a frecuencias más bajas. En este caso, es muy difícil obtener datos confiables por debajo de los 5 Hz, o sea 300 cpm.

Velocidad: también la velocidad puede ser medida con ambos tipos de captadores, de velocidad y de aceleración. Los captadores sísmicos de velocidad y piezoeléctricos obtienen la velocidad de la vibración en forma directa

La salida de un acelerómetro puede ser integrado una vez para producir el equivalente de una medición de velocidad, llegando a frecuencias bajas hasta aproximadamente 3 Hz, o sea 180 cpm.

Aceleración y energía de impulsos. La aceleración y la energía de impulsos deberán medirse solamente con un acelerómetro. Es teóricamente posible diferenciar las señales provenientes de un transductor de velocidad para que produzcan lecturas de aceleración, pero sería innecesariamente complicado y costoso.

#### *PARÁMETROS DE MEDICIÓN.*

Es mejor elegir un captador que mida directamente el parámetro requerido: captadores de desplazamiento para medir desplazamientos, captadores de velocidad para lecturas de velocidad, y acelerómetros para las mediciones de aceleración. Por integración, es posible convertir, con excelentes resultados, las lecturas de velocidades en desplazamientos y las de aceleración en velocidad o desplazamiento.

#### *GAMA DE FRECUENCIAS.*

La gama de frecuencias de la vibración generada en una máquina influirá en la selección del captador. En general, las pautas para la frecuencia son:

(a) Utilice transductores de desplazamiento para

- 1 bajas frecuencias, por debajo de aproximadamente 600 cpm
- 2 mediciones relativas
- 3 máquinas pesadas con rotores livianos
- 4 posición del rotor

(b) Utilice transductores de velocidad o los parámetros de velocidad cuando:

- 1 la gama de frecuencias a medir se encuentra entre 600 y 100,000 cpm\*
- 2 el transductor se sostiene en la mano
- 3 se quieran medir los niveles de vibración total de la máquina
- 4 se utilizan procedimientos generales de análisis
5. la longitud de los cables llega a los 1000 pies ( 305 m).

\* Para frecuencias en una gama de 60 a 600 cpm y para balanceos a baja velocidad, se recomienda el uso de un captador sísmico de velocidad ( piezoeléctrico ).

(c) Utilice transductores acelerómetros o los parámetros correspondientes, cuando:

1. la gama de frecuencia esta entre los 600 y los 600,000 cpm
- 2 se mida respuestas estructurales a altas frecuencias
3. se haga mediciones de la energía de impulso en rodamientos de elementos rodantes, engranajes y trenes de engranajes, así como en fuentes de vibración aerodinámica de alta frecuencia ( frecuencias del paso de alabes ).

### 3.6 SELECCIÓN DE UN CAPTADOR ESPECIFICO

Una vez que se haya determinado el tipo de captadores, de conformidad con los parámetros de medición, el paso siguiente es la selección de un captador específico. Esta selección generalmente se hace sobre la base de requisitos tales como excursión térmica ( gama de temperaturas ), humedad, características eléctricas, y factores ambientales. Los párrafos que siguen presentan indicaciones sobre la selección de captadores específicos identificados por el número de modelos del producto.

### *Transductor sísmico de velocidad Modelo 544*

Es una unidad muy confiable cuando se utilizan dentro de los límites de diseño. Está dotado de baja impedancia interna ( 2000 ohm ) y elevada sensibilidad. Estas características significan que la unidad no es sensible al ruido del cable, y puede tolerar un alto grado de suciedad y humedad en el conector del cable.

Por debajo de los 10 Hz, la respuesta disminuye a un ritmo de 12 dB/octava. Sin embargo, puede ser usado por debajo de los 10 Hz, siempre y cuando se utilice solamente para lecturas de comparación en una sola frecuencia.

El Modelo 544 no deberá ser usado en maquinas que tengan un alto nivel de vibración transversal al eje sensible del transductor. La unidad no esta amortiguada en esa dirección, y la fatiga terminara por destruir el diafragma.

### *Transductor de velocidad piezoeléctrico Modelo 560*

La ventaja principal de este transductor piezoeléctrico es su respuesta plana ( o sea, uniforme) hacia abajo, hasta 1 Hz ( 60 cpm ), lo que permite realizar mediciones directas de velocidad y obtener lecturas de desplazamiento confiables a frecuencias bajas.

Todos los transductores piezoeléctricos requieren un cierto grado de amplificación electrónica antes de que la señal pueda ser registrada en un instrumento de medición. El amplificador incorporado en el Modelo 560 limita su alcance de temperatura ambiental a 120°C ( contra los 260°C de otros Transductores de velocidad ).

Muchos de los materiales que son piezoeléctricos también son piroelectricos; es decir, generan una corriente eléctrica en respuesta a los cambios de temperatura. El resultado es un cambio falso en las mediciones de velocidad de baja frecuencia. Esto puede ser ocasionado por cambios en la temperatura de las estructuras de montaje, pero a menudo se debe al paso de corrientes de aire contra o sobre la unidad. Si se sospecha la presencia de este ultimo tipo de problema, el transductor deberá ser recubierto con algún material aislador térmico, tal como una cubierta de fibra de vidrio.



### *Acelerómetros Modelo 960 y 970*

Estos acelerómetros piezoeléctricos son útiles para la medición de la energía de impulso, aceleración y velocidad. el Modelo 960 ha sido diseñado específicamente para ser usado con monitores, mientras el Modelo 970 es mas adecuado para medidores portátiles y analizadores

Ambos incorporan los necesarios amplificadores electrónicos. La ventaja de esta característica consiste en una impedancia reducida del captador, haciendo que las lecturas sean insensibles al ruido del cable y a la suciedad en los conectores Sin embargo, el uso de circuitos electrónicos incorporados reduce la temperatura ambiental operativa máxima a 120°C ( 248°F ).

### *Acelerómetro Modelo 910*

Este acelerómetro no tiene circuitos electrónicos internos, de manera que puede hacerse funcionar con temperaturas ambientales de hasta 260°C ( 500 °F ) Su alta impedancia de salida ( 10 @ ohm ), sin embargo, lo hace muy sensible a las interferencias eléctricas externas y a la contaminación en los conectores Por lo tanto esta unidad se usa con cable especial de bajo ruido, y se recomienda solo en aquellos casos donde no es práctico utilizar los Modelos 960 ó 970.

La tabla de selección de parámetros/transductores ilustrada aquí abajo figura 3-9 resume las pautas para la selección de un transductor.

Figura 3-9

Tabla de selección de parámetros / transductores

Descripción de la máquina	Parámetro	Gama de frecuencias en cpm.	Ubicación del transductor	Tipo de transductor
Turbinas de vapor / bombas de gran tamaño.	Desplazamiento	600 - 6000	En relación con el eje	De proximidad o con accesorio de contacto directo con eje
Compresor de gran tamaño con rodamientos hidráulicos.	Velocidad	600 - 60,000	Montado sobre el rodamiento.	De velocidad o acelerómetro
Turbinas de vapor / bombas de gran tamaño.	Velocidad	600 - 60,000	Montaje sobre el rodamiento	De velocidad o acelerómetro
Motores eléctricos, ventiladores	Aceleración Energía de impulsos	600 - 600,000 *	Montaje sobre el rodamiento	Acelerómetro
Ventiladores y sopladores de accionamiento por motor, con rodamientos de elementos rodantes	Velocidad Energía de impulsos Aceleración	600 - 60,000 600 - 600,000 *	Sobre la caja Sobre la caja	De velocidad o acelerómetro Acelerómetro
Cajas de engranajes con rodamientos de elementos rodantes.	Aceleración Energía de impulsos	600 - 600,000 *	Sobre la caja	Acelerómetro
Caja de engranajes con rodamientos de película hidrodinámica.	Desplazamiento Aceleración Energía de impulsos	600 - 6000 600 - 600,000 *	En relación con el eje Sobre la caja	De proximidad Acelerómetro
Cajas especiales Muy bajas frecuencias.				
Torres de enfriamiento Generadores hidroeléctricos, Ventiladores de baja velocidad	Desplazamiento	600 - 60,000	Sobre la caja	De velocidad (piezoelectrico)

\* La gama de frecuencias se verá afectada por la longitud del cable

## *CAPITULO IV*

## **ANÁLISIS DE LA VIBRACIÓN - ADQUISICIÓN DE DATOS**

El análisis de la vibración es un procedimiento en dos etapas que involucra la **ADQUISICIÓN** y la **INTERPRETACION** de los datos relacionados con la vibración de la maquinaria.

Su finalidad es determinar las condiciones mecánicas de una máquina, y señalar con precisión los eventuales defectos específicos, mecánicos o funcionales.

### **4.1 ADQUISICION DE DATOS**

La adquisición de los datos es el primer paso esencial para el análisis de las vibraciones, puesto que los datos para ser adecuados deben ser obtenidos en las condiciones justas para la correcta interpretación de las condiciones de una máquina. Por ejemplo, para determinar las condiciones de un motor eléctrico de 1750 r.p.m. se deberá obtener datos de la velocidad de la vibración; en cambio, si la máquina es una caja de engranes de alta velocidad, que esté funcionando a 6000 r.p.m., para evaluar las condiciones de la máquina será importante obtener datos relativos a la aceleración, además de la velocidad de la vibración.

La adquisición de datos requiere que se lleven a cabo los siguientes pasos:

- 1) Determinación de las características de diseño y funcionamiento de la máquina: velocidad de rotación ( rpm ), tipo de rodamientos, tipo de engranajes, etc.; su historial de mantenimiento ( problemas registrados ); y sus condiciones físicas según se observen ( cimentación poco firme, ruidos, etc. ). Además, las condiciones operativas, la temperatura, cargas, velocidad de funcionamiento, etc.
- 2) Determinación de la finalidad de la medición: una verificación periódica rápida de las condiciones de la máquina, identificación y eliminación de un problema del cual se sospecha la existencia, adquisición de datos para establecer la línea de base, etc.
- 3) Selección del parámetro o parámetros de medición: desplazamiento velocidad, aceleración, unidades de energía de impulsos y fase.

- 4) Determinación de posiciones y sentido de medición para los transductores.
- 5) Selección de los instrumentos de medición: medidores de vibración, analizadores de vibración, osciloscopios, etc.
- 6) Selección de los transductores para la medición: captadores de velocidad, acelerómetros, captadores de proximidad.
- 7) Determinación del tipo específico de datos requeridos: totales ( banda ancha ), amplitud, frecuencia, amplitud vs. tiempo, energía de impulso, y/o fase.
- 8) Toma de mediciones: hay que determinar el orden mas eficientes para la toma de mediciones, vigilar la aparición de resultados inesperados, estar preparados para tomar datos adicionales, revisar los datos obtenidos para asegurar su validez e idoneidad.

## 4.2 DISEÑO DE LAS MÁQUINAS Y CARACTERÍSTICAS FUNCIONALES

### *Características de las máquinas*

Una de las características de la máquina, tales como velocidad de rotación ( en r.p.m.), tipo de rodamiento, frecuencias de los engranajes, frecuencias aerodinámicas/hidráulicas, etc. podrá ser útil para establecer la gama de frecuencia de vibración que pueden esperarse, lo cual ayudara en la determinación del tipo de instrumentación de vibración que se necesitaran para efectuar el análisis.

A su vez, las características de funcionamiento de la máquina podrá dictar el tipo de equipo de análisis requerido. Por ejemplo, máquinas herramientas de producción, con ciclos de trabajo muy cortos, podrán requerir formas de ondas de tiempo detalladas, debido al tiempo de análisis limitado que esta disponible. Maquinas que funcionan a velocidad o condiciones de carga continuamente variables podrán requerir el uso de análisis en tiempo real o de instrumentación especial, dotada de filtros rastreadores. Máquinas con vibración extremadamente compleja o completamente al azar podrán requerir un análisis promedial del espectro o alguna otra técnica especial.

El conocimiento de las características de la máquina proporcionara también la información necesaria para decidir sobre la mejor ubicación y sentido de los captadores para detectar y medir fallas específicas.

Condiciones de funcionamiento: las condiciones de funcionamiento de una máquina a menudo afectaran las lecturas de vibración. Por ejemplo, una turbina de vapor podrá presentar lecturas de una cierta cantidad de vibración y/o una lectura de fase en condiciones de funcionamiento sin cargas. Una vez que la turbina este bajo carga, las lecturas podrán variar significativamente.

### *Finalidad de la medición*

La finalidad de la medición de la vibración podrá incluir:

- Verificaciones periódicas de rutina
- Mediciones para determinar la línea de base
- Verificaciones pre - y post - (antes y después de las) reparaciones generales
- Identificación y eliminación de fallas de una máquina

### *Verificaciones periódicas de rutina*

Unas verificaciones periódicas a intervalos regulares podrán permitir la detección de problemas de una máquina al comienzo de su formación, y así poderla incluir en un cronograma de reparaciones.

### *Mediciones para determinar la línea de base*

Una medición para línea de base es, por definición, una serie de mediciones realizadas sobre una máquina bien equilibrada, bien alineada, y que este funcionando en condiciones operativas normales en su configuración de instalación final. Los niveles de vibración “normales” en dichas condiciones servirán como “línea de base” contra la cual se podrán comparar todos los datos obtenidos subsecuentemente.

### *Verificaciones pre - y post - (antes y después de las) reparaciones generales*

Las mediciones de la vibración antes de efectuar las reparaciones generales podrán decirnos cuales máquinas necesitan ser sometidas a dichas reparaciones y cuales otras no las requieren. Las mediciones después de las reparaciones generales nos podrán indicar si los problemas que aquejaban las máquinas reparadas fueron corregidos o no y si la calidad de los trabajos de reparación ha sido satisfactoria o no.

### *Identificación y eliminación de fallas de una máquina*

La medición de la vibración se realiza a menudo para establecer con exactitud las causas de la excesiva vibración de una máquina. También, en algunas maquinas, como maquinas herramientas por ejemplo, la finalidad de la medición y análisis de la vibración podría ser para determinar la causa de un acabado de mala calidad, de marca debidas a vibraciones de la herramienta, o de piezas fuera de tolerancia.

## **4.3 SELECCIÓN DE LOS INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN**

El requisito previo de informaciones significativas sobre la vibración es una buena comprensión de los instrumentos que se usan. En los párrafos que siguen se delinean las características de vibrometros, analizadores de verificación avanzada, analizadores completos y de otros instrumentos. La selección de un tipo específico de instrumento dependerá de la correspondencia entre capacidades del instrumento y finalidad de las mediciones, así como de los requisitos de la aplicación individual.

### *Medidores de vibración*

Los medidores de vibración, o vibrometros, son instrumentos pequeños, accionados por baterías y sostenidos en la mano, y se usan para obtener rápidamente la medición de las vibraciones de una máquina. Normalmente constan de un captador, de un cable, y del medidor. El medidor cuenta con un computador para la selección de gamas y un conmutador de funciones para la prueba de la batería y la selección de los parámetros que se quieran medir. Algunos vibrometros podrán incluir características adicionales, como: preparación para medición del sonido, salidas para grabadoras y osciloscopio, y selección de filtros.

Otra clase de medidores de vibración la constituyen el Recopilador de Datos, que se basa en un microprocesador. Este es un instrumento que puede ser programado para tomar una serie de mediciones de la vibración, registrando los datos para transferirlos después a una computadora, donde serán conservados.

Los medidores de vibración pueden ser catalogados como:

Vibrometros o medidores sencillo - leen desplazamiento, velocidad, aceleración y energía de impulso por ejemplo, desplazamiento y/o velocidad.

Medidores avanzados - leen desplazamiento, velocidad, aceleración y energía de impulso. Pueden incorporar filtros sencillo de paso alto o de paso bajo.

Medidores combinados - combinan las características necesarias para medir otros parámetros, tales como el sonido.

Recopiladores de datos - vibrometros dotados de microprocesador programable, pueden ser programados para medir y almacenar grandes cantidades de datos sobre vibración, en una amplia variedad de parámetros.

Los medidores de vibraciones se seleccionan de manera de proporcionar capacidades específicas, de acuerdo con la aplicación.

#### *Analizadores de vibración -*

En esta sección se cubren las características de analizadores de vibraciones, los denominados “de verificación avanzada” y los “analizadores completos”. Aunque en líneas generales estos dos tipos son similares, el de “verificación avanzada” tiene capacidades limitadas, que normalmente limitan su uso a la medición de amplitud y frecuencia (sin fase), y omite la incorporación de muchas de las características de los “analizadores completos”. La descripción que sigue de estos dos tipos de analizadores es generalizada y su finalidad es la de servir como introducción a estos importantes instrumentos. Para informaciones específicas habrá que recurrir a los correspondientes manuales de instrucciones.



Los párrafos a continuación resumen características, mandos y medidores que generalmente se encuentran en los analizadores de “verificación avanzada” y en los analizadores “completos”. La descripción de las varias características de diferentes analizadores proporcionara la base para la selección del tipo de analizadores mas idóneo en la adquisición de los datos requeridos para cada aplicación particular.

#### *Alimentación de corrientes alterna y por batería*

Algunos analizadores funcionan solamente con alimentación de corriente de la línea, otros son alimentados por batería, y otros mas están equipados para funcionar en ambos modos.

La Figura 4-1 ilustra una muestra de la unidad que puede funcionar tanto con corriente alterna ( de la línea ) o con batería. Colocando el conmutador en la posición de AC ( corriente alterna ) el instrumento podrá funcionar con alimentación proveniente de una fuente normal de corriente alterna. En la modalidad de alimentación por batería ( colocando el conmutador en la posición de BATTERY ) el analizador energizado completamente por la batería incorporada en su interior.

Toda vez que sea necesario recargar la batería, se enchufa el conjunto del cable eléctrico de alimentación en un tomacorriente de C.A. colocando el conmutador selector en la posición de CHARGE (recarga). Recargas regulares del analizador durante la noche harán que el instrumento este siempre listo a la mañana siguiente, para la utilización durante el día, en modalidad portátil.

Los medidores o analizadores de vibración que funcionan solamente con batería generalmente disponen de un recargador externo que cumple la misma tarea.

#### *Selección de los Parámetros de Medición*

La mayoría de los analizadores de vibración pueden medir varios parámetros de vibración: desplazamiento, velocidad, aceleración y energía de impulso. El parámetro de medición deseado, debe ser seleccionado antes de tomar la medición de la vibración.

La Figura 4-1 ilustra un analizador típico con el selector de los parámetros de medición. Será suficiente colocar la perilla del selector en DISP, VEL, ACCEL, o SE par seleccionar desplazamiento, velocidad, aceleración o “Spike Energy” (energía de impulsos) respectivamente.

### *Medidores de Amplitud*

La amplitud de la vibración es leída en el medidor de amplitud de un analizador. En la Figura 4-1 se muestra un medidor de amplitud de tipo analógico. El mismo tiene dos escalas: una para lecturas variantes entre 0 y 1, y la otra para lecturas en la gama de 0 a 3. El significado real de esas dos escalas dependerá de la regulación del conmutador de gamas de amplitud que se describe en lo que sigue.

Alguno analizadores tienen escalas de lectura digitales, además del medidor analógico recién descrito. Una muestra de ese tipo de medidor está ilustrada en la Figura 4-2. Los medidores digitales son lo mejor para la medición exacta de las amplitudes, mientras que los medidores analógicos son particularmente útiles para la medición de amplitud que fluctúan en el tiempo.

### *Medidores de frecuencia*

La frecuencia de las vibraciones se lee en el medidor de frecuencias del analizador. Así como para el medidor de amplitud, este medidor puede ser analógico o digital. La Figura 4-1 es una muestra de un medidor de frecuencia y con el conmutador selector de gamas de frecuencia, se deberá ajustar el selector de gamas de frecuencias, descrito más abajo.

Típicamente, el medidor de frecuencias no funciona a menos que el medidor de amplitud esté registrado por lo menos el 10 por ciento de la escala completa. Por lo tanto, antes de comenzar a trabajar con el medidor de frecuencias y con el conmutador selector de gamas de frecuencia, descrito más abajo.

Algunos analizadores tienen indicadores digitales de las lecturas de frecuencia. Una muestra de ese tipo de indicación está ilustrada en la Figura 4-2.

Figura 4.1  
 Vista frontal de un medidor de amplitud tipo anelógico

Model 360 VIBRATION ANALYZER / DYNAMIC BALANCER

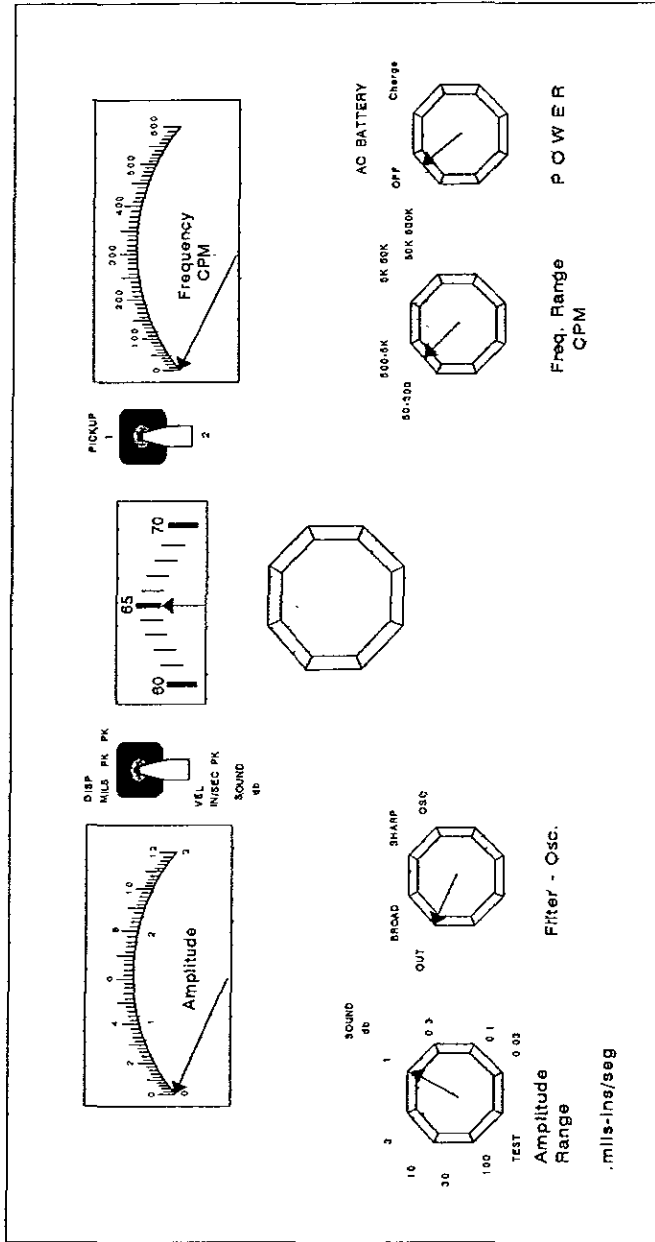
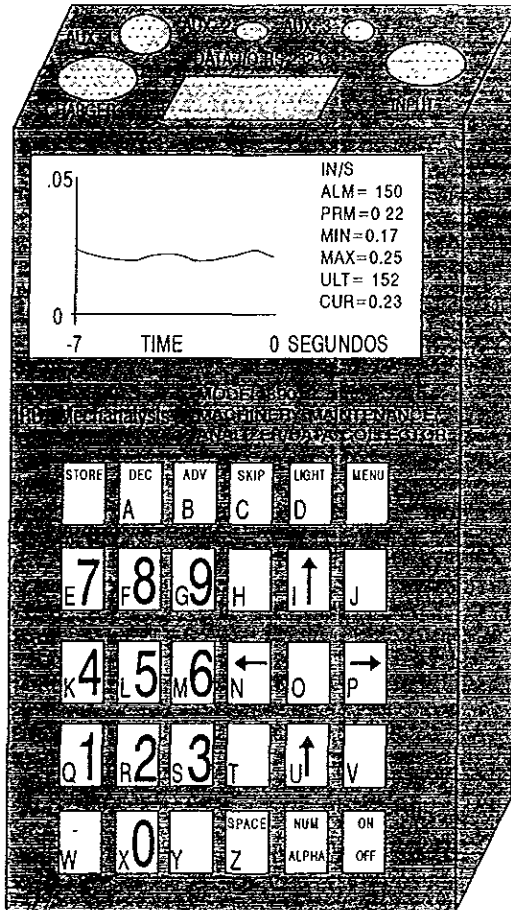


Figura 4-2  
 Representacion de un Analizador y Colector  
 Digital IRD Modelo 890



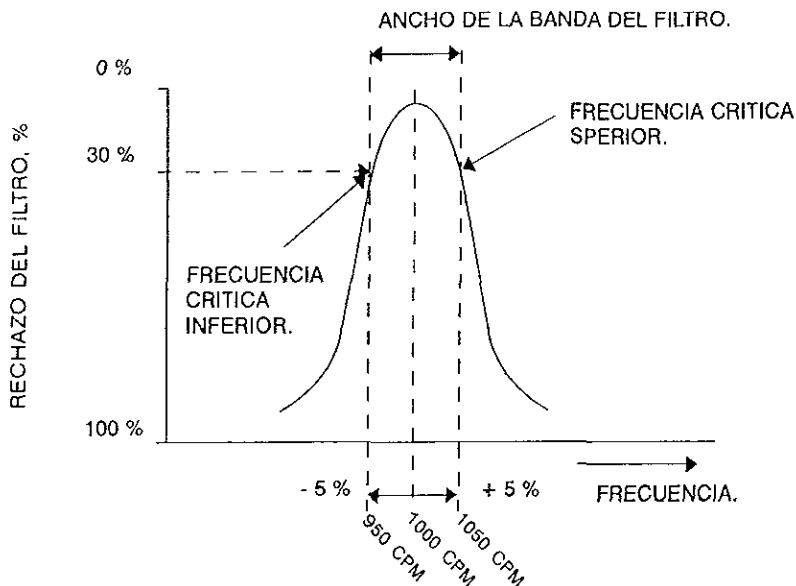
## *Filtro del analizador*

Debido al hecho de que una máquina puede estar sometida a más de una frecuencia de vibración, y puesto que se debe confiar en la medición de las frecuencias para determinar con exactitud algún problema específico de una máquina, se necesita alguna manera para impedir el paso a todas las frecuencias menos una, lo que nos permitirá apreciar cuál es la pieza ( o piezas ) de la máquina que tiene problemas y requiere corrección. Esta es la tarea del filtro en un analizador. Como concepto, el filtro es muy similar al sintonizador de un radio: se usa el sintonizador para rechazar las estaciones ( es decir, las frecuencias ) que no se quiere, mientras al mismo tiempo se recibe la estación deseada.

En la actualidad hay un gran cantidad de tipos de filtros diferentes. Los analizadores, por ejemplo, se suministran con filtros sintonizados manualmente, con filtros sintonizados de barrido automático, o con filtros FFT. Para utilizarlos de la manera adecuada es importante comprender algunas de las características básicas, que pertenecen a todos los tipos de filtro. Para comenzar, es importante comprender que no es que el filtro rechace todas las frecuencias de ruido o vibración con la excepción de aquellas para las cuales está sintonizado; el filtro en realidad está sintonizado para una angosta banda de frecuencias y acepta todas las frecuencias comprendidas en dicha banda mientras va rechazando cada vez más aquellas que se encuentran fuera de dicha banda.

La Figura 4-3 ilustra una curva típica de respuestas de un filtro. Nótese que el “ancho de banda” del filtro está definido por las “frecuencias críticas” superior e inferior. Las frecuencias críticas de un filtro son aquellas situadas por encima y por debajo de la frecuencia central de sintonización, donde la respuesta a una señal es aproximadamente menor de 30% con respecto a la respuesta máxima. En otras palabras, en la frecuencia crítica una señal se ve reducida del 30% con respecto a su verdadera amplitud. Más allá de las frecuencias críticas la señal se reduce cada vez más, de manera considerable.

FIGURA 4-3  
Curva típica de respuesta de un filtro



Los filtros pueden ser subdivididos aún más en filtro de “ancho de banda constante” y filtros de “ancho de banda de porcentaje constante”. En el primero, el ancho de banda entre las frecuencias críticas superiores e inferiores queda constante (por ejemplo, 50 cpm ó 500 cpm), haciendo caso omiso de la frecuencia en que esta sintonizado el filtro.

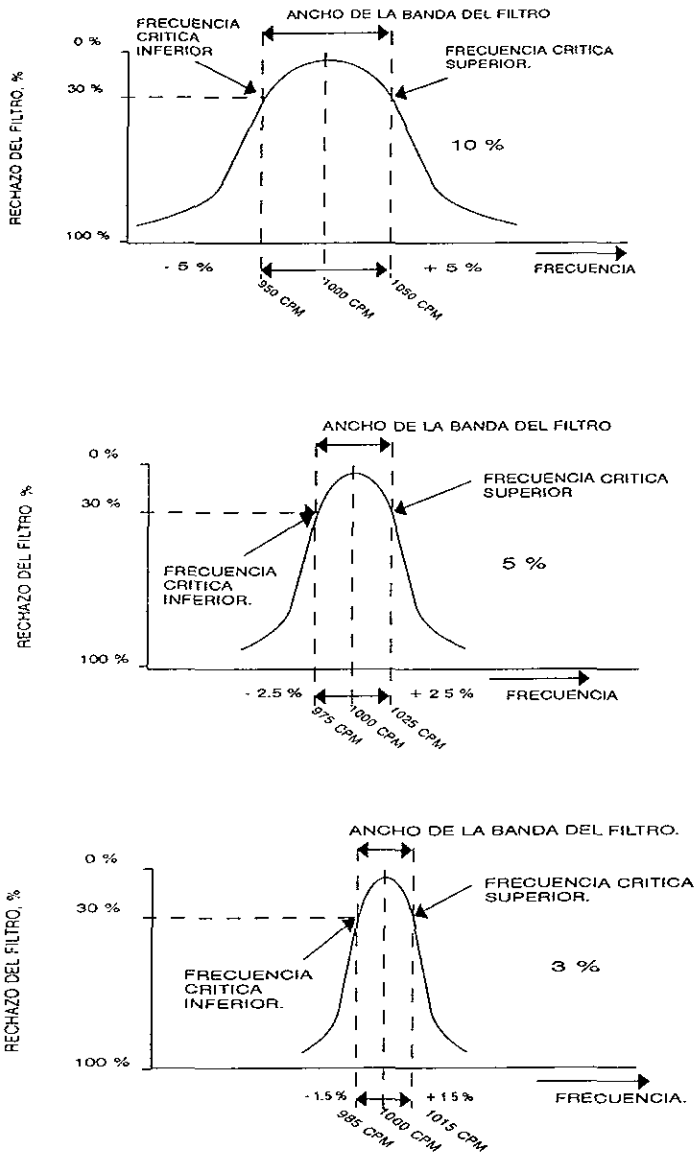
En cambio, el ancho de banda de un filtro de ancho de banda de porcentaje constante es expresado normalmente como porcentaje en la frecuencia central de sintonización y las frecuencias críticas superior e inferior. Por ejemplo, el ancho de banda del filtro ilustrado en la Figura 4-3 está 10% por debajo (-) de la frecuencia de sintonización. Por lo tanto, este tipo de filtro, sintonizado para una frecuencia de 1000 cpm, es decir un ancho de banda que se extendería de 950 cpm a 1050 cpm, es decir un ancho de banda de 100 cpm (el 5% de 1000 es igual a 50).

Si el mismo filtro estuviera sintonizado para una frecuencia de 10,000 cpm, el ancho de banda abarcaría de los 9500 a los 10,500 cpm, es decir el filtro tendría un ancho de banda de 1000 cpm. Como se puede apreciar, al ancho de banda efectivo de un filtro de ancho de banda de porcentaje constante depende de la frecuencia para la cual está sintonizado.

La compresión de las características de un filtro es importante en este respecto: supongamos que ajustamos la sintonía de un filtro 10% para una frecuencia de 1000 cpm, con una amplitud de 0.5 pulg./seg. Además supongamos que haya también presente una vibración de 1.0 pulg./seg. En una frecuencia de 950 cpm, donde el rechazo de nuestro filtro es de 30%. El resultado neto serán dos señales de vibración que entrarían en el filtro al mismo tiempo: 0.5 pulg./seg. En la frecuencia de 1000 cpm, y 0.7 pulg. /seg. En 950 cpm. Desde luego, la frecuencia de la vibración más fuerte (950 cpm) será la frecuencia indicada en el medidor de frecuencia, aunque el filtro este regulado para 1000 cpm. Una acción de este tipo por parte del filtro parecería no ser deseable; sin embargo, siempre y cuando se pueda detectar la fuente de la vibración más fuerte, podremos identificar con exactitud el defecto y solucionar el problema.

Muchos de los analizadores están equipados con filtros que proporcionan varios y diferentes anchos de banda; algunos designados como “anchos” y otros como “angostos”. El filtro de “banda ancha” típico tiene un ancho de banda de 10%, mientras que el filtro de “banda angosta” tiene un ancho de banda del 5%. Se selecciona y pone en funcionamiento el filtro deseado por intermedio de un conmutador de selección. El filtro de “banda ancha” es generalmente utilizado para una exploración veloz de las gamas de frecuencia, de manera de poder determinar en forma rápida las frecuencias de vibración presentes. En cambio, el filtro de “banda angosta” proporciona un mejor rechazo y una mayor selectividad, y se les usa cuando se quiere estudiar una frecuencia de vibración particular. La Figura 4-4 ilustra una comparación de los anchos de banda de los filtros para filtros con anchos de banda del 10 %, del 5 % y del 3 %.

FIGURA 4-4  
 Comparacion entre filtros con ancho  
 de banda de.  
 (A) 10%  
 (B) 5%  
 (C) 3%





## Sintonización manual y automática

Ha sido mencionado con anterioridad que los analizadores pueden proporcionar la sintonización manual y/o automática de los filtros. Para análisis con barrido manual, el filtro se sintoniza manualmente a lo ancho de la entera gama de frecuencias que interesan. Se notan así los picos de amplitud, que son registrados. La Figura 4-5 muestra un ejemplo de este tipo de datos registrados manualmente. Algunos analizadores están dotados de una salida para interconectar un graficador. En los ejes X-Y a medida que se sintoniza el filtro. En la Figura 4-6 se puede apreciar una muestra de la salida de un graficador X-Y, que ilustra los picos de vibración trazados en la función de la frecuencia.

La sintonización automática se usa para un barrido, o avance del filtro a través de la gama de frecuencias que interesa, mientras un graficador integrado genera un trazado de las vibraciones en términos de amplitud versus frecuencia.

Cuando para proveer informaciones relativas a las frecuencias se use procesamiento FFT, no hace falta la sintonización del filtro. En este caso todas las frecuencias individuales de una gama de frecuencias dada son calculadas por el procesamiento FFT, y vienen representadas simultáneamente en una LCD (pantallita de cristal líquido) o un osciloscopio.

### Selección de las funciones

La mayor parte de los analizadores está destinada a proporcionar una multitud de informaciones de diferentes tipos, tales como:

- Vibración total (no filtrada)
- Vibración filtrada (varios anchos de banda de filtro)
- Información de fase
- Condiciones de la o las baterías
- etc.

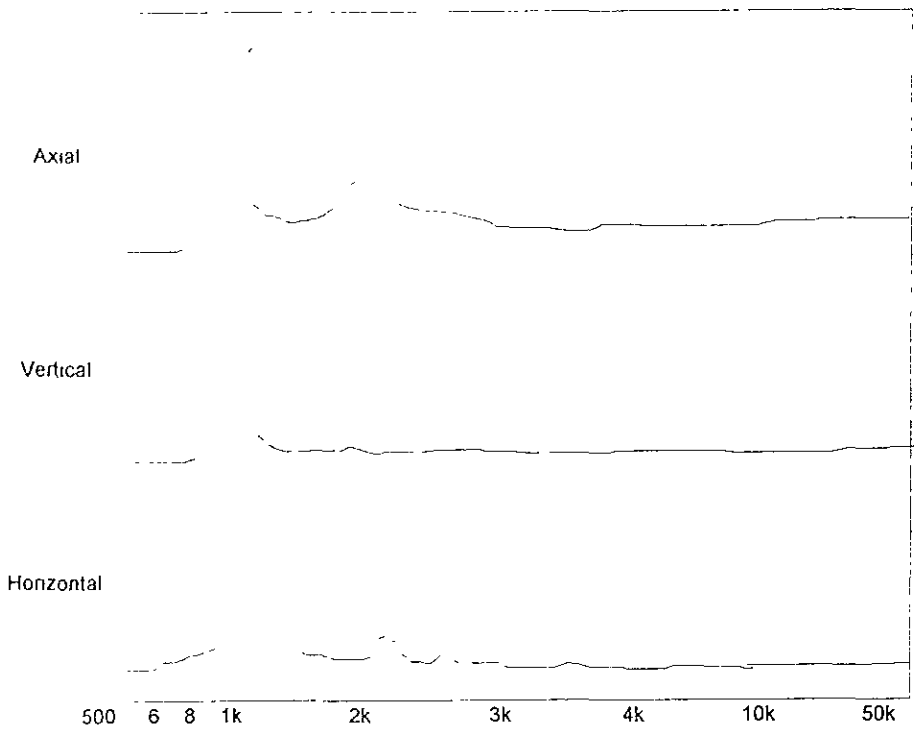
Por lo tanto se requiere la posibilidad de seleccionar entre las funciones. Dicha posibilidad puede ser ofrecida por un simple selector, como el que se ilustra en la Figura 4-1, o por una serie de interruptores o teclas

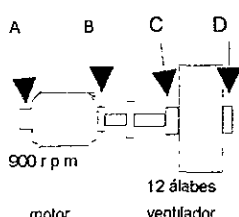
Figura 4-5  
 Datos registrados en forma manual.

I.R.D MECHANALYSIS, INC NOMBRE DE LA PLANTA <u>ACEROS S.A</u> NOMBRE DE LA MÁQUINA : <u>2 VENT. SUMIN.</u> FECHA <u>6/23/92</u> REVISADO POR <u>A F D</u> EQUIPO DE INSPECCIÓN : IRD MODEL 350 CON SENSOR DE VELOCIDAD MODELO 544		<p>MOTOR 1800 R.P.M</p> <p>VENTILADOR 6 ASPAS</p> <p>ANGULO TOMADO AL FINAL DE LA FLECHA</p>											
		BALEROS "C" y "D"						12 BOLAS POR BALEROS				AL FINAL DE LA FLECHA	
PICKUP		FILTRO FUERA						FILTRO DENTRO					
PUNTO	POS	RUIDO		DESPLAZ		VELOCIDAD		VEL	VEL	VEL	ANGULO DE FASE		
		dB(C)	CPM	MILS	CPM	IN/SEC	CPM	1800	3600	10800	1xRPM		
A	H			4.2	1800	0.54	1800	0.4	0.1	0.06	2:00		
	V			2.3	1800	0.27	1800	0.21	0.06	0.03	5:00		
	A			77.9	1800	0.12	1800	0.09	0.03	0.01	8:30		
B	H			4.5	1800	0.49	1800	0.43	0.1	0.04	2:30		
	V			1.9/2.1	1800	0.22	1800	0.21	0.09	0.02	5:30		
	A			10/13	1800	0.14	1800	0.11	0.04	0.01	8:30		
C	H			1.9	1800	0.48	*****	0.16	0.1	0.02	2:40		
	V			1.5	1800	0.36	*****	0.11	0.09	0.02	5:00		
	A			77.9	*****	17/22	*****	0.09	0.05	0.01	2:00		
D	H			77.10	1800	0.13	1800	0.1	0.04	0.02	2:30		
	V			0.8	1800	0.09/11	1800	0.07	0.03	0.01	5:00		
	A			3/4	*****	04/06	*****	0.04	0.02	*****	2:00		

Figura 4-6

Trazado X - Y obtenido manualmente de un graficador



Machine <b>Ventilador N° 4</b>	Amplitud sin filtro <b>0.43 IN/SEC Axial</b>	Esquema de la máquina A B C D  900 r.p.m. motor ventilador
Localización <b>Área "F"</b>	Rango de amplitud (Full Scale) _____ MILS PK-PK <b>0.3</b> IN/SEC _____ g PK _____ MICRONS PK-PK _____ MM/SEC PK	
Condiciones de Operación <b>900 r.p.m.</b>	Filter in X Sharp Broad	
Fecha de Inspección <b>7-Ago-95</b>	Tipo de lectura X Vel Accel N/C	
Datos de la hoja <b>59 - F</b>	Posición de la Medición: C H V A	

## Oscilador interno

Otro componente importante de muchos analizadores de capacidad completa es un oscilador interno. El oscilador permite regular una lámpara estroboscópica del analizador en la frecuencia establecida por la perilla de regulación de frecuencias del oscilador, que es independiente de todas las señales de vibración. Esta característica es particularmente útil: estudio en “cámara lenta” sintonización exacta del filtro del analizador y determinación de la velocidad (en r.p.m.) de una pieza rotativa.

## Lámpara estroboscópica accesoria

La mayoría de los analizadores de capacidad completa se suministran con una lámpara estroboscópica accesoria. Esta lámpara destellante, de alta intensidad se conecta al analizador. La periodicidad de los destellos puede ser regulada de 2 maneras diferentes. Una de estas maneras es la de colocar el selector de funciones del analizador en la posición OSCILADOR, regulando luego la perilla de regulación de frecuencias del oscilador. Esta configuración acciona la lámpara estroboscópica desde el oscilador interno del analizador. Se puede usar la perilla del oscilador para definir la periodicidad de los destellos en una amplia gama de valores. Las aplicaciones típicas de este tipo de configuración incluyen la asistencia en la sintonización del filtro del analizador sobre la velocidad de rotación (r.p.m.) de alguna pieza de una máquina, la realización de estudios en “cámara lenta” de piezas que estén vibrando y la determinación de la velocidad de rotación (en r.p.m.) de una pieza rotativa.

La segunda manera de regular la periodicidad de los destellos de la lámpara estroboscópica es la de hacer disparar los destellos por las vibraciones mismas. Si el conmutador de funciones del analizador está regulado sobre uno de los tipos de filtro, de banda ancha o de banda angosta, la señal de vibración proveniente del captador accionará la lámpara estroboscópica. El operador podrá determinar la periodicidad de los destellos tomando nota de la lectura en el medidor de frecuencias.

El disparo de la lámpara estroboscópica accionado por la vibración misma experimentada por la máquina permite la determinación de los ángulos de fase relativos de la vibración entre dos o más puntos de la máquina. La lámpara estroboscópica “inmoviliza” una marca de referencia en cualquier pieza que esté rotando a la frecuencia de vibración. Este tipo de operaciones

incluye la determinación de la respuesta direccional del movimiento de vibración, la determinación de dónde colocar los pesos de corrección para el balanceo y la verificación de las respuestas vibratorias a las condiciones de falta de alineamiento la observación de las características de fase para identificar la vibración y la realización de estudios modales

#### 4.4 DETERMINACION DE LOS DATOS REQUERIDOS

Antes de comenzar el registro real de los datos sobre las vibraciones será útil pasar el problema en reseña, para determinar qué datos se requieren para el análisis. Una cuidadosa planificación puede hacer ahorrar mucho tiempo en la toma de mediciones y permitirá obtener la información más útil de los datos arrojados por las pruebas. Los datos de las pruebas pueden ser obtenidos de varios modos:

- **Mediciones totales**, que proporcionan una manera rápida para constatar el estado general de una máquina.
- **Mediciones de amplitud vs. frecuencia**, que brinda un espectro de frecuencia, necesario para la adjudicación exacta de los problemas a una frecuencia específica o a una gama de frecuencias determinadas.
- **Mediciones de amplitud vs. tiempo**, las cuales pueden hacerse durante el funcionamiento de una máquina para detectar vibraciones que no serian aparentes en el análisis de amplitud vs. frecuencia. Las mediciones de amplitud vs. tiempo pueden hacerse para vibraciones transitorias muy rápida se usara un osciloscopio con el eje horizontal regulado en una escala de milisegundos. Para vibraciones que ocurran con mucha lentitud se utilizara un registrador con el eje horizontal regulado en una escala de segundos.
- **Mediciones de fase**, las mediciones de la fase relativa se demostrarán útiles en todas las operaciones de balanceo, en la evaluación de alineamiento, de aflojamiento entre elementos mecánicos y de problemas de cimentación, así como también para determinar las formas modales.
- **La energía de impulsos** deberá ser observada durante la evaluación de rodamientos de elementos rodantes y de las fallas en engranajes y dispositivos con trenes de engranajes.

## 4.5 TOMA DE MEDICIONES

El paso final en la adquisición de datos es la recopilación real de los datos. Desde luego, éste es un paso vital en el proceso de análisis y deberá ser llevado a cabo con considerable atención.

### Lo que se debe tomar en consideración

Entre los varios procedimientos y verificaciones que requieren que se preste atención a lo que se hace están:

- La planificación de las secuencias de medición para cerciorarse de que se van a recopilar los datos correctos y de que la acción de recopilación se hará con el menor expendio de tiempo posible
- La verificación de los instrumentos para cerciorarse de que funcionen correctamente
- La verificación del lugar de colocación de los transductores, para asegurar de que las vibraciones medidas sean un fiel representativo de las vibraciones a las cuales está sometida la máquina. Por ejemplo, verifíquese que los transductores estén montados de manera que “no bailen ni tiriten” y que estén asegurados firmemente (no de forma endeble) a la estructura de la máquina.
- Será conveniente hablar con los operadores de la máquina y con el personal de mantenimiento para averiguar los antecedentes de la máquina, especialmente con respecto a cualquier problema de funcionamiento.
- Un paseo al rededor de la máquina (mire, escuche, “sienta”, huela, observe) será muy útil para darse cuenta de muchas cosas que, además de las vibraciones, podrían estar relacionadas con el estado de la máquina.
- Préstese atención a las tendencias de vibración inesperadas. De haberlas, requerirán la revisión en obra de las mediciones obtenidas. Estén listos a tomar mediciones adicionales para investigar la causa de las señales de vibración inesperadas.

- Compruébense los datos para asegurarse de que sean validos. Si los datos recabados no parecen ser coherentes, será conveniente repetir y verificar de nuevo las mediciones, para determinar la razón.
- Tómese los datos adecuados
- Toda vez que sea posible, háganse comparaciones entre maquinas similares.

#### **Tipos comunes de medición**

Cuando se tomen mediciones, los procedimientos detallados dependerán de los instrumentos específicos que se estén usando y de los datos de medición específicos que se quieran recabar. Sin embargo, para los tipos de medición más comunes, los tipos de instrumentos a utilizarse y los procedimientos generales de utilización pueden ser resumidos como sigue:

**Mediciones totales de amplitud de vibración:** un medidor o un analizador de vibraciones podrán ser usados para este tipo de mediciones, que generalmente son registradas manualmente en forma de tablas, o con los datos almacenados automáticamente en memoria en el caso de los instrumentos automatizados que se acoplan a una computadora.

**Amplitud vs. frecuencia (mediciones del espectro):** Para tomar estas mediciones se necesitan analizadores de capacidad completa o de verificación avanzada. Los datos pueden ser *registrados manualmente*, en forma tabular, o mediante análisis con filtro de barrido semi o completamente automático y registro de los datos sobre papel en forma tabular y/o gráfica. También los analizadores de tipo FFT pueden suministrar copias sobre papel en forma tabular y/o gráfica, o pueden presentarse los datos en forma visual.

**Medición de amplitud vs. tiempo:** las mediciones vs. tiempo pueden realizarse usando un registro de corriente continua conectado a un analizador, o directamente con un analizador dotado de capacidades incorporadas. Regulando la velocidad del papel del registrador, la capacidad del instrumento puede ser ajustada para tratar vibraciones transitorias de corta duración o tendencias vibratorias a largo plazo que se modifican muy despacio.

**Mediciones de fase:** para obtener mediciones de fase se requiere un analizador con luz estroboscópica, o un captador remoto de señales de referencia. El uso de una lámpara estroboscópica hace necesaria la observación visual del eje en rotación, así como la capacidad de “disparar” la lámpara con las señales de la vibración para poder obtener la fase. El captador de fase remoto, que normalmente consta de un sensor electromagnético, un transductor de no contacto, o una fotocélula, debe ser instalado de manera que pueda “darse cuenta” de cualquier protuberancia, depresión o marca reflejante existentes en el eje.

Las mediciones efectuadas con la lámpara estroboscópica comprenden la observación de la posición angular de una marca de referencia que parecerá “inmovilizada” bajo la luz estroboscópica, mientras que el captador remoto proporcionará una lectura de fase (digital o analógica) mediante un medidor acoplado al analizador.

**Mediciones en “cámara lenta”:** necesitan de un analizador equipado con lámpara estroboscópica. El disparo de la luz estroboscópica con una frecuencia levemente diferente de la velocidad de rotación de la máquina (en r.p.m.) permitirá al operador la observación de un eventual comportamiento anormal en relación con el movimiento de los componentes de la máquina.

**Medición de la velocidad de rotación (r.p.m.) de una máquina (determinación de su velocidad):** se requiere un analizador dotado de lámpara estroboscópica. La inmovilización de una marca hecha sobre el eje, permitirá al operador efectuar el cálculo de las revoluciones por minuto. En forma alternativa, con un analizador equipado de captador remoto de fase, se puede obtener una lectura directa en r.p.m. de las indicaciones del medidor.

**Mediciones para la determinación de las vibraciones armónicas:** la medición e identificación de las vibraciones que se verifican a valores que son múltiplos integrales de la velocidad de rotación de la máquina [por ejemplo, 2 veces las r.p.m. de la máquina ( $2 \times \text{r.p.m.}$ ) o 3 veces ( $3 \times \text{r.p.m.}$ ), etc.] se obtiene utilizando un analizador equipado con lámpara estroboscópica. Si una marca de referencia en el eje parece quedar “inmovilizada” bajo la luz estroboscópica, la cual es “disparada” por la señal de vibración, eso indica una frecuencia armónica de las vibraciones. Cuando aparecen “inmovilizadas” múltiples marcas de referencia, éstas nos indican el orden de la frecuencia armónica ( $2x$ ,  $3x$ , etc.).



**Medición de las formas de onda:** las mediciones de las formas de onda requieren el uso de un osciloscopio (convencional o de memoria), o un registrador de alta velocidad conectado a un analizador. Además algunos analizadores (generalmente del tipo FFT) incorporan la capacidad de medir y representar visualmente las formas de onda. Observando las pautas y la separación en el tiempo entre los picos, las formas de onda pueden proporcionar informaciones no fácilmente obtenibles con los demás tipos de medición.

## CAPITULO V

## *ANÁLISIS DE LA VIBRACIÓN - INTERPRETACIÓN DE DATOS*

### **5.1 INTERPRETACIÓN DE DATOS**

Una vez que se haya detectado la presencia de algún problema que ocasiona la vibración, encontrar cuál sea la pieza defectuosa puede ser un proceso sencillo, generalmente un proceso de eliminación. Este capítulo describe los procedimientos a seguir para adquirir los datos necesarios en términos de amplitud, frecuencia, fase, etc. de la vibración; además describe los procedimientos a seguir para ubicar el problema con precisión.

La exposición de este capítulo empieza con algunas notas generales sobre el análisis de la vibración, basadas en los registros de los datos recopilados para la máquina, al igual que trata del análisis de las categorías comunes de problemas.

Hay que tener presente que la interpretación de los datos involucrará examen e interpretación detallados de:

- mediciones de amplitud (totales)
- mediciones de amplitud vs. frecuencia
- mediciones de amplitud vs. tiempo
- mediciones de fase
- observaciones de las formas de onda

#### **Procedimiento general de análisis**

La amplitud más alta de la vibración se encuentra normalmente cerca de la pieza de la máquina en la cual se localiza el problema. Por lo tanto, si un estudio inicial de los datos revela que hay amplitudes predominantes que acontecen a una frecuencia particular, es muy probable que el problema esté radicado en la porción de la máquina en la cual se verificara la amplitud predominante a esa frecuencia.

La máquina ilustrada en la figura 5-1 tiene el potencial para desarrollar problemas de vibración a cuatro frecuencias diferentes - y aun más, si se consideran las frecuencias relacionadas con las armónicas y otras más. Es probable que, cuando comience a presentarse un problema debido a vibración, se notara una amplitud predominante, que ocurrirá a una o más frecuencias indicadas en dicha figura.

Figura 5.2  
Máquina típica, con varias fuentes de vibracion

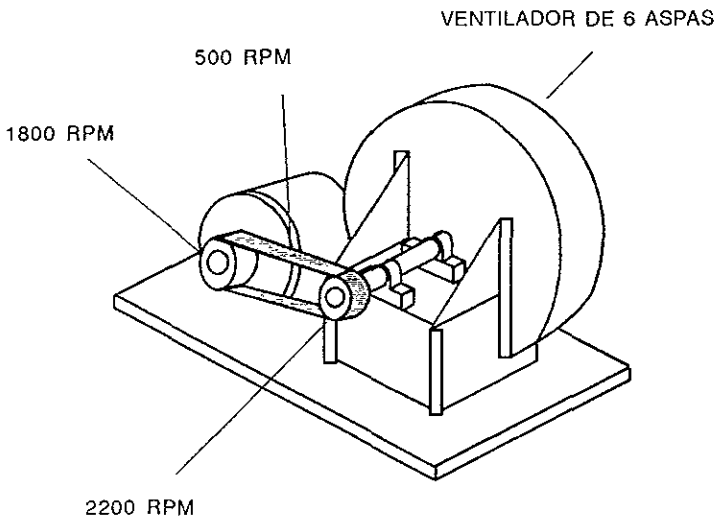


Figura 5-2  
 Hoja de datos típica, ejemplo de recopilación manual de los datos.

I.R.D. MECHANALYSIS, INC.												
NOMBRE DE LA PLANTA: ACEROS S.A.												
NOMBRE DE LA MÁQUINA: 2 VENT. SUMIN												
FECHA: 6/23/92 REVISADO POR: A.F.D.												
EQUIPO DE INSPECCIÓN: IRD MODEL 350		BALEROS "C" y "D" 12 BOLAS POR BALEROS										
PICKUP	POS	FILTRO FUERA					FILTRO DENTRO					ANGULO DE FASE 1xRPM
		RUIDO dB(C)	CPM	DESPLAZ. MILS CPM		VELOCIDAD IN/SEC CPM		VEL. 1800	VEL. 3600	VEL. 10800		
PUNTO												
A	H			4.2	1800	0.54	1800	0.4	0.1	0.06		2:00
	V			2.3	1800	0.27	1800	0.21	0.06	0.03		5:00
	A			.7/9	1800	0.12	1800	0.09	0.03	0.01		8:30
B	H			4.5	1800	0.49	1800	0.43	0.1	0.04		2:30
	V			1.9/2.1	1800	0.22	1800	0.21	0.09	0.02		6:30
	A			.10/.13	1800	0.14	1800	0.11	0.04	0.01		8:30
C	H			1.9	1800	0.48	*****	0.16	0.1	0.02		2:40
	V			1.5	1800	0.36	*****	0.11	0.09	0.02		5:00
	A			.7/9	*****	.17/.22	*****	0.09	0.05	0.01		2:00
D	H			.7/10	1800	0.13	1800	0.1	0.04	0.02		2:30
	V			0.8	1800	.09/.11	1800	0.07	0.03	0.01		5:00
	A			.3/4	*****	.04/.06	*****	0.04	0.02	*****		2:00

La figura 5-2 muestra una hoja de datos para una máquina diferente. Observando los valores numéricos se puede notar que la vibración es mas alta en A y B, que son los cojinetes del motor. La frecuencia es de 1800 r.p.m., o sea 1x las r.p.m. de la máquina. La indicación inicial es que las fuerzas ocasionadas por la vibración están localizadas en el extremo de accionamiento de la máquina (en el motor).

También se puede apreciar que la vibración de 1800 r.p.m. se verifica en los cojinetes C y D, de los cuales se encuentra en el lado “accionado” (que es el ventilador). La amplitud de vibración en esos cojinetes es menor que la amplitud en los cojinetes A y B. Aparentemente, la vibración que ocurre en los cojinetes A y B se propaga por el eje y llega a los cojinetes C y D. Este es un ejemplo de identificación de la ubicación del problema basada en el hecho que la amplitud de la vibración es mayor cerca del punto de origen del problema.

La razón principal para analizar y diagnosticar el estado de una máquina es determinar las medidas necesarias para corregir la condición de vibración - reducir el nivel de las fuerzas vibratorias no deseadas y no necesarias. De manera que, al estudiar los datos, el interés principal deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de la vibración, la determinación de las causas y la corrección del problema que ellas presentan. Eso asegurará que se estará tratando con el problema de vibración más importante. No es generalmente necesario dedicar tiempo a la identificación de las vibraciones no significativas ( de baja amplitud ), ya que éstas probablemente tienen muy poca influencia sobre el estado general de la máquina.

## **5.2 DIAGNOSTICO DE LA VIBRACIÓN DE MAQUINARIA**

Todas las vibraciones que se verifican en la maquinaria tienen una causa y un efecto. Ahora que se ha estudiado algunas de las descripciones de varias causas comunes, estamos en condiciones de comprender mayores detalles relativos a la interpretación de los efectos.

La tabla de “efectos y causas” ilustrada en la figura 5-3, es generalmente considerada fácil de usar. El estudio inicial de las características de frecuencia de varios problemas deberá hacer posible el uso eficiente de la columna denominada FRECUENCIA. A partir de ese punto, se puede obtener la correlación con las causas posibles.

Figura 5-3

Tabla de identificación de vibraciones (frecuencia de vibración)

Frecuencia, en términos de	Causas más probables	Otras causas posibles y Observaciones
1x r.p.m	Desbalance	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Chumaceras, engranes o poleas excentricos</li> <li>2) Falta de alineamiento o eje torcido - si hay elevada vibración axial</li> <li>3) Bandas en mal estado si las r.p.m. son las bandas</li> <li>4) Resonancia</li> <li>5) Fuerzas reciprocas</li> <li>6) Problemas eléctricos</li> </ol>
2x r.p.m	Afijamiento mecánico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Falta de alineamiento en presencia de altas vibraciones axiales</li> <li>2) fuerzas reciprocas</li> <li>3) Resonancia</li> <li>4) Bandas en mal estado si 2x r.p.m. de las bandas</li> </ol>
3x r.p.m	Falta de alineamiento	Usualmente una combinación de falta de alineamiento y excesivas holguras axiales (afijamiento mecánico)
Menos de 1x r.p.m	Torbellino de aceite (menos de 0.5x r.p.m)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) Bandas de accionamiento en mal estado</li> <li>2) Vibración circunvecina</li> <li>3) Resonancia subarmónica</li> <li>4) Vibración pulsante</li> </ol>
Frecuencia sincrónica (alimentación eléctrica de línea, C.A.)	Problemas eléctricos	Los problemas eléctricos comunes comprenden barras rotas en el rotor, rotores fuera de centro, desbalance entre fases en los sistemas de fases múltiples, entrehierro no uniforme
2x la frecuencia sincrónica	Pulsaciones de torque	Raro problema, a menos que la resonancia este en excitación
Varias veces la velocidad de rotación (frecuencia relacionada con las armónicas)	<i>Engranajes en mal estado</i> Fuerzas aerodinámicas Fuerzas hidráulicas Afijamiento mecánico Fuerzas reciprocas	<i>Dientes de engranaje x r.p.m. de engranaje en mal estado</i> Cantidad de aspas del ventilador x r.p.m. Cantidad de álabes en rotor impulsor x r.p.m. Puede acontecer a 2, 3, 4 y a veces mayores frecuencias armónicas en presencia de un elevado grado de afijamiento
Alta frecuencia (no relacionada con las armónicas)	Rodamientos antifricción en mal estado	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) La vibración de los cojinetes puede ser inestable - amplitud y frecuencia</li> <li>2) Cavitación, recirculación y turbulencia de flujo causan vibración al azar de alta frecuencia</li> <li>3) Lubricación incorrecta en el muñon de la chumacera (vibración excitada por la fricción)</li> <li>4) Rozamiento</li> </ol>

Figura 5-4  
Tabla de identificación de vibraciones ( amplitud, frecuencia, fase )

Causa	Amplitud	Frecuencia	Fase	Observaciones
Desbalance	Proporcional al Desbalance	1x r.p.m.	Única, marca de referencia estable repetible	Es la causa de vibración más común.
Falta de alineamiento de acoplamiento o rodamientos y eje torcido	Mayor en sentido axial; 50% o más de la vibración axial	1x r.p.m. es lo usual; a veces, 2 y 3x r.p.m.	Única, doble o triple	La mejor manera de encontrarlo es por la aparición de una alta vibración axial. Usar indicadores de cuadrante para diagnóstico positivo. Si es una máquina con rodamientos de chumacera y no hay falta de alineamiento entre acoplamientos, balanceará el rotor Las chumaceras responsables es con toda probabilidad la que está más cerca del punto con la mayor cantidad de vibración de alta frecuencia. Se recomienda mediciones de la energía de impulsos durante su análisis de las fallas de las chumaceras
Rodamientos en mal estado, tipo antifricción	Inestable; uso de las mediciones de velocidad, aceleración y energía de impulsos ( Spike energy )	Muy alta; ocasionalmente varias veces las r.p.m.	Erráticas - Marcas múltiples	Se ocurre en los engranes; la mayor vibración está en línea con el centro de los engranes; si se nota en el motor o en el generador, la vibración desaparece al cortar la corriente. Si ocurre en la bomba o en el soplador, tratar de balancear.
Engranajes en mal estado o ruidosos	Baja, uso de las mediciones de velocidad, aceleración y energía de impulsos ( Spike energy )	Muy alta, cantidad de dientes en el engranaje por r.p.m	Erráticas - Marcas múltiples	Se recomienda mediciones de velocidad, aceleración y energía de impulsos durante el análisis de los problemas en los engranajes laterales.
Alojamiento mecánico	A veces errática	2x r.p.m.	Dos; marcas de referencia levemente erráticas	Normalmente acompañado por Desbalance y/o falta de alineamiento
Bandas de accionamiento en mal estado	Errática o pulsante	1, 2, 3 y 4x r.p.m. de las bandas	Una o dos, según la frecuencia generalmente inestable	La luz estroboscópica es la mejor herramienta para "Inmovilizar" la banda que está fallando.
Problemas eléctricos	Desaparece cuando se desconoce la energía eléctrica.	1x r.p.m. o 1 ó 2x la frecuencia sincrónica	Única o marca doble rotativa	Si la amplitud de la vibración decae de inmediato al cortar la energía eléctrica, la causa es eléctrica. Los problemas mecánicos y eléctricos provocaran "Impulsos".
Fuerzas aerodinámicas o hidráulicas	Pueden ser grande en sentido axial	1x r.p.m. o cantidad de aspas del vent. o rotor impulsor por r.p.m.	Marcas múltiples	Rara como causa de problemas, con la excepción de los casos de resonancia.
Fuerzas reciprocas	Más alta en línea con el movimiento	1, 2 u órdenes más elevadas por r.p.m.	Marcas múltiples	Inherente en las máquinas de movimiento alternativo, puede ser reducida solamente mediante modificación del diseño o con aislamiento



La tabla de la figura 5-4 incluye una columna de FASE. Esos datos adicionales ofrecerán la posibilidad de encontrar una correlación aun mejor con las posibles causas de los defectos de la vibración.

Aunque este tipo de tablas tenga la capacidad de sugerir en líneas generales cuáles puedan ser las causas probables de los problemas de vibración, no es posible preparar tablas que incluyan todas las condiciones de funcionamiento posibles y todas las combinaciones de causa y efecto. Cada uno deberá desarrollar por si mismo la pericia y el discernimiento requeridos.

La experiencia nos indica que es absolutamente obligatorio desarrollar la capacidad de reconocimiento de las características de amplitud, frecuencia y fase correspondientes a las curvas de vibración enumeradas en las tablas. Para ese fin, hay que recopilar la información correcta sobre vibración de la máquina y someter dicha información a un cuidadoso estudio.

### 5.3 CAUSAS POSIBLES DE LA VIBRACIÓN

#### *Vibración debida a desbalance*

El desbalance de la maquinaria es una de las causas más comunes de la vibración. En muchos casos, los datos arrojados por un estado de desbalance indican:

1. La frecuencia de vibración se manifiesta a 1x las r.p.m. de la pieza desbalanceada.
2. La amplitud es proporcional a la cantidad de desbalance.
3. La amplitud de la vibración es normalmente mayor en el sentido de medición radial, horizontal o vertical (en las máquinas con ejes horizontales).
4. El análisis de fase indica lecturas de fase estables.
5. La fase se desplazará 90° si se desplaza el captador 90°.

Estos cinco signos de desbalance son una buena guía, pero deben de ser interpretados con cuidado y con sentido común. Por el ejemplo, el desbalance no es el único problema que puede causar vibración de 1x las r.p.m., la falta de alineamiento también puede ocasionar elevados niveles de vibración a 1x las r.p.m.

Otro punto que hay que considerar es que el desbalanceo de un rotor saliente a menudo tiene como resultado una gran amplitud de la vibración en sentido axial, al mismo tiempo que en sentido radial. Y también hay muchos tipos de maquinas que tienen inherentemente alta vibración axial. Las turbinas de vapor y gas, y algunos tipos de compresores rotativos pueden tener elevada vibración axial originada por las reacciones al empuje. De manera que no se debe eliminar el desbalance como causa probable de vibración solamente en base al hecho que la mayoría de las situaciones en las cuales hay desbalance tiene mucha más vibración en sentido radial. La mejor guía es siempre una dosis de sentido común.

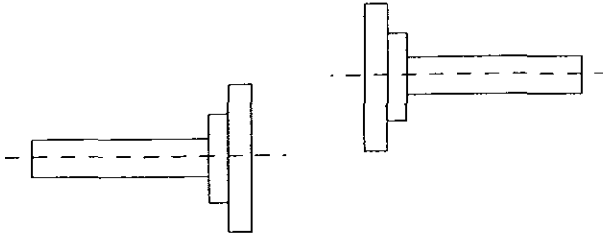
#### *Vibración debida a falta de alineamiento*

Los problemas ocasionados por falta de alineamiento son casi tan comunes como aquellos debidos a desbalance. A pesar de los rodamientos "autoalineables" y de los acoplamientos flexibles, es difícil alinear dos ejes y sus rodamientos de manera que no se originen fuerzas que puedan crear vibración. La figura 5-5 ilustra los tres tipos básicos de falta de alineamiento en el acoplamiento: angular, en paralelo y una combinación de ambos. Un eje torcido actúa de forma muy similar a la de un mal alineamiento angular, de manera que sus características de vibración correspondientes están también consideradas aquí.

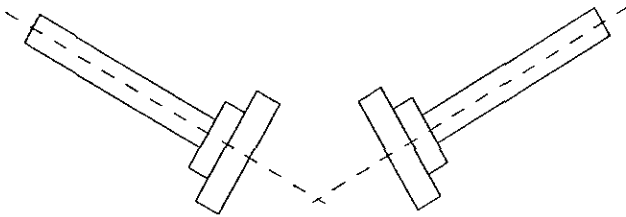
1. La frecuencia de vibración es de 1x r.p.m.; también 2x y 3x r.p.m. en los casos de una grave falta de alineamiento.
2. La amplitud de la vibración es proporcional a la falta de alineamiento.
3. La amplitud de la vibración puede ser alta también en sentido axial, además de radial.
4. El análisis de fase muestra lecturas de fase inestables.

Figura 5-5  
Tres tipos básicos de falta de alineamiento.

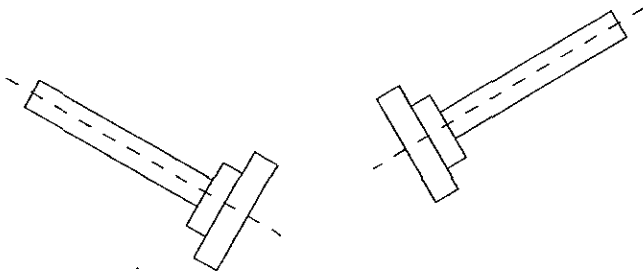
Falta de alineamiento en paralelo



Falta de alineamiento angular



Falta de alineamiento por una combinación de paralelo y angular



La falta de alineamiento, aun con acoplamientos flexibles, producen fuerzas tanto radiales como axiales que, a su vez producen vibraciones radiales y axiales. Cuando mayor la cantidad de vibración, peor se tornará el problema.

Por lo tanto los indicios más importantes de problemas debidos a falta de alineamiento y ejes torcidos es la presencia de una elevada vibración en ambos sentidos, radial y axial. En general, toda vez que la amplitud de la vibración axial sea mayor de la mitad de la lectura radial más alta, hay un buen motivo de sospechar que la existencia de un problema de alineamiento o de un eje torcido.

La falta de alineamiento entre un rodamiento y su eje relativo es un buen ejemplo. Cuando un rodamiento de elementos rodantes no está alineado con su eje, como sucede en el caso ilustrado en la figura 5-6, existe vibración axial aun cuando la pieza este balanceada. Esa vibración puede ser eliminada solamente corrigiendo la instalación del rodamiento.

La ilustración de la figura 5-7, muestra un rodamiento de chumacera que esta mal alineado. En este caso no se presenta vibración significativa, a menos que haya también una condición de desbalance. Un desbalance podría causar una vibración radial significativa, la cual, a su vez, puede forzar el mal alineamiento a crear vibración axial. La causa real de la vibración es el problema de desbalance; corrigiéndolo se reducirá la vibración, tanto axial como radial.

Otra condición de falta de alineamiento que produce alta vibración axial es el mal alineamiento entre poleas y piñones en los sistemas de bandas en "V" y de transmisión por cadena. La figura 5-8 ilustra varios ejemplos de falta de alineamiento entre banda y poleas. Tales condiciones tienen como resultado no solamente una vibración destructiva, sino que también aceleran el desgaste de poleas, piñones, cadenas y bandas de accionamiento.

Figura 5-6  
Rodamientos de elementos rodantes mal alineado en relación con el eje

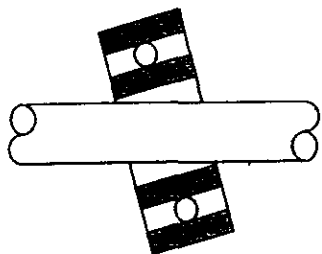


Figura 5-7  
Rodamientos de chumacera mal alineado en relación con el eje.

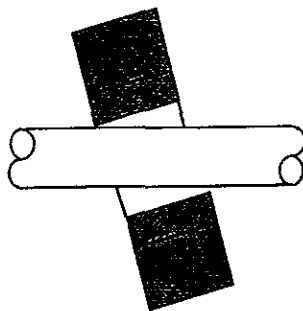
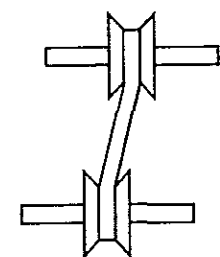
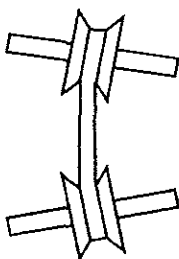


Figura 5-8  
Ejemplos de poleas mal alineadas.

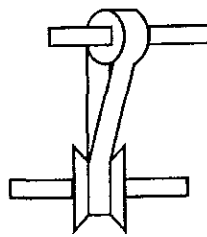
**POLEAS MAL ALINEADAS**



**EN PARALELO**



**EJES CONVERGENTES EN UN MISMO PLANO**



**EN UN ANGULO**



**OSCILACION DE UNA POLEA**



**EXCENTRICIDAD**

## *Vibración debida a excentricidad*

La excentricidad es otra de las causas comunes de vibración en la maquinaria rotativa. Excentricidad en este caso no significa “ovalización”, sino que la línea central del eje no es la misma que la línea central del rotor - el centro de rotación verdadero difiere de la línea central geométrica. La figura 5-9 ilustra cuatro tipos distintos de excentricidad.

La excentricidad es en realidad una fuente común de desbalances y se debe a un mayor peso de un lado del centro de rotación que el otro. Los síntomas de excentricidad son generalmente idénticos a los de desbalance. Hay casos especiales en los cuales se puede reducir la vibración ocasionada por la excentricidad mediante un balanceo de las piezas rotativas; por otra parte, en otros casos, el “balanceo” de un problema de excentricidad no hace más que empeorar los efectos de la vibración.

Por ejemplo, el diámetro interno de la pista interior del rodamiento Antifricción ilustrado en la figura 5-9B no es concéntrico con la línea central geométrica de la pista interior. El resultado es un desbalance aparente de la pieza montada sobre dicho rodamiento y se podría lograr usar un procedimiento de balanceo para compensar las fuerzas vibratorias creadas por la excentricidad. Un requisito especial es realizar el balanceo del rotor montado sobre sus propios rodamientos. Otro requisito es prestar mucha atención a que la posición de la pista interior del rodamiento no sea cambiada de posición con respecto al eje; de otra manera la vibración será todavía mayor.

Aunque la excentricidad es una fuente de desbalance que a menudo puede ser corregida con las técnicas corrientes de balanceo, puede también dar origen a fuerzas de reacción que no pueden ser corregidas con un simple balanceo. Por ejemplo, el engranaje excéntrico ilustrado en la figura 5-9D produce fuerzas de reacción debido a la acción similar a la de una leva ejercida por la rueda dentada con la cual engrana. La mayor vibración ocurre a lo largo de una línea que pasa por el centro de cada uno de los dos engranajes a una frecuencia igual a 1 vez la velocidad de rotación (en r.p.m.) del engranaje. Parecerá un caso de desbalanceo pero no lo es.

La excentricidad de una polea en “V” como la que se ilustra en la figura 5-9 A, tendrá como resultado fuerzas de reacción similares a las de un engranaje excéntrico. En este caso, la mayor vibración ocurre en la dirección de la tensión en la banda, a una frecuencia igual a 1x las r.p.m. de la polea excéntrica. Una vez más la vibración parecerá debida a desbalance, pero no puede ser corregida mediante balanceo.

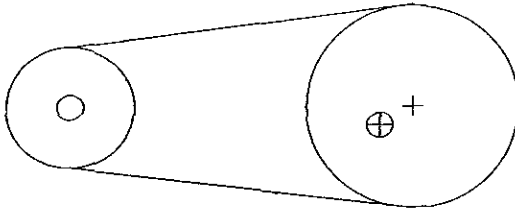
En el caso de un inducido de motor eléctrico que esté excéntrico como el que se ilustra en la figura 5-9C, el inducido en sí podrá estar balanceado en cuanto a la distribución del peso del rotor. A pesar de eso, la excentricidad varía de las interacciones magnéticas entre el inducido y los polos del motor, creando por lo tanto una vibración a 1x las r.p.m. entre inducido y el estator. Aumentando la fuerza del campo magnético a través de un aumento de la carga mecánica sobre el motor podrá tener como resultado un aumento de la vibración.

Una manera de diferenciar entre desbalanceo y excentricidad en este tipo de motor es medir la vibración con filtro fuera mientras el motor está funcionando bajo corriente. Luego se desconecta el motor, observando el cambio de la amplitud de vibración. Si la amplitud se reduce gradualmente mientras el motor sigue girando por inercia, es muy probable que el problema sea debido a desbalance; si en cambio la amplitud de vibración desaparece en el momento mismo en que el motor es desconectado, el problema es seguramente de naturaleza eléctrica y es muy posible que se deba a excentricidad del inducido.

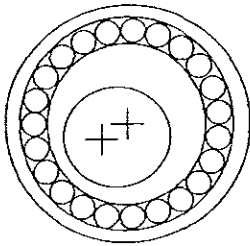
La excentricidad en rodetes o rotores de ventiladores, sopladores, bombas y compresores pueden también crear fuerzas vibratorias. En esos casos las fuerzas son el resultado de fuerzas aerodinámicas e hidráulicas desiguales que actúan contra el rotor. Tales fuerzas son mayores contra el lado “alto” del rotor, produciendo así una vibración muy similar a la provocada por un desbalance. No hay una prueba concreta para determinar la excentricidad en este tipo de máquinas, excepto tratar de desbalancearlas. Si el balanceo falla, se deberá inspeccionar el impulsor, para descubrir eventuales daños, desgastes, o excentricidad en la chumacera del eje.

Figura 5-9  
Ejemplos comunes de excentricidad.

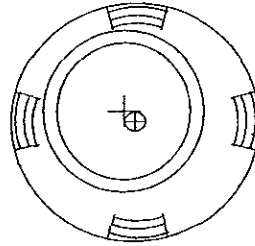
(A) polea excéntrica



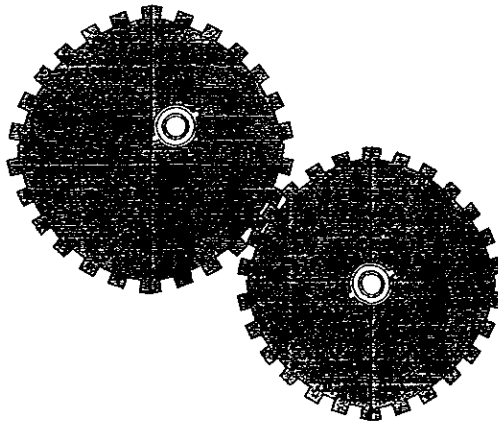
(B) rodamiento excéntrico



(C) inducido excéntrico de un motor



(C) inducido excéntrico de un motor





## *Vibración debida a aflojamiento mecánico*

El aflojamiento mecánico y la acción de golpeo (machacado) resultante producen vibración a una frecuencia que a menudo es  $2x$ , y también múltiples más elevados, de las r.p.m.. La vibración puede ser el resultado de pernos de montaje sueltos, de holgura excesiva en los rodamientos, o de fisuras en la estructura o en el pedestal de soporte.

La vibración característica de un aflojamiento mecánico es generada por alguna otra fuerza de excitación, como un desbalance o una falta de alineamiento. Sin embargo, el aflojamiento mecánico empeora la situación transformando cantidades relativamente pequeñas de desbalance o falta de alineamiento en amplitudes de vibración excesivamente altas. Corresponde por lo tanto decir que el aflojamiento mecánico permite que se den mayores vibraciones de las que ocurrirían de por sí, derivadas de otros problemas.

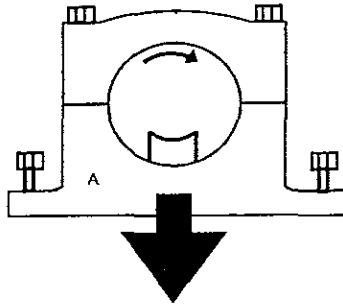
En teoría, entonces la vibración debida aflojamiento mecánico podría ser eliminada eliminando la causa primordial - las condiciones de desbalance o de falta de alineamiento, por ejemplo. Sin embargo en la practica, esto es virtualmente imposible porque el procedimiento requeriría unos niveles de precisión extraordinarios en el balanceo y alineamiento. Es mucho mejor identificar y corregir primeramente el problema de aflojamiento; luego si se requiere una mayor reducción de la vibración se podrá proceder con las operaciones de balanceo y alineamiento.

La Figura 5-10 ayudara a comprender como el aflojamiento mecánico puede producir vibración a una frecuencia de  $2x$  las r.p.m. El desbalance es en este caso la causa principal del problema. Cuando el punto pesado está en la posición de las 6 hrs., la fuerza de desbalance está dirigida hacia abajo, empujando con fuerza el rodamiento contra el pedestal cuando el punto pesado pasa a la posición de las 12 hrs.; la fuerza de desbalance resultante está dirigida hacia arriba, y el rodamiento queda "levantado" del pedestal. Cuando el punto pesado alcanza la posición de las 3 hrs., la fuerza del desbalance queda dirigida hacia el costado y el rodamiento cae sobre el pedestal.

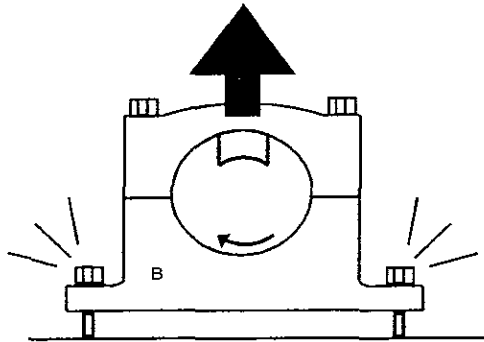
FIGURA 5-10

Vibracion ocasionada por alojamiento mecanico:

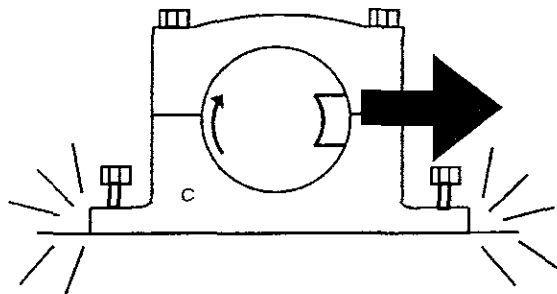
(A) Punto pesado localizado en las 6 hrs.



(B) Punto pesado localizado en las 12 hrs.



(C) Punto pesado en las 3 hrs.



Dicha acción produce dos fuerzas aplicadas por cada revolución del eje. Una fuerza es aplicada por la fuerza de "levantamiento" del punto de desbalance rotativo, y la otra por la fuerza de gravedad cuando el rodamiento cae sobre el pedestal. La frecuencia de la vibración es por lo tanto de  $2x$  las r.p.m. del eje..

Los datos de la Figura 5-11 nos ilustran las características típicas de la vibración originadas por el aflojamiento mecánico. Nótese que las más altas amplitudes de vibración ocurren a  $2x$  las r.p.m. del compresor.

Hay usualmente alguna holgura inherente en cualquier máquina, de manera que es normal encontrar un poco de vibración a  $2x$  las r.p.m. toda vez que se registren desbalance o falta de alineamiento. En general un aflojamiento mecánico excesivo es muy probable que sea la causa primaria de los problemas cuando la amplitud de la vibración a  $2x$  las r.p.m. es más de la mitad de la amplitud a la velocidad de rotación,  $1x$  las r.p.m..

#### *Vibración debida a las bandas de accionamiento*

Las bandas de accionamiento del tipo en "V" gozan de mucha popularidad para la transmisión del movimiento puesto que tiene una alta capacidad de absorción del golpes, choque y vibraciones. Y en muchas aplicaciones las banda en "V" ofrecen un funcionamiento relativamente silencioso si se les compara con las cadenas de transmisión o con las cajas de engranes. Pero las banda en "V" pueden ser la causa de vibraciones objetables, especialmente en las maquinas herramienta, en las cuales hay que mantener niveles muy bajos.

Los problemas de vibración asociados con las bandas en "V" son clasificados generalmente como:

1. Reacción de la banda a otras fuerzas, originadas por el equipo presente que causan alteraciones.
2. Vibraciones creadas por problemas de la banda en si.

Figura 5-11

Datos de análisis para un compresor que vibra debido a aflojamiento mecánico.

IRD MECHANALYSIS, INC. NOMBRE DE LA PLANTA <u>ACEROS S.A.</u> NOMBRE DE LA MÁQUINA <u>bomba principal</u> de líquido refrigerante FECHA <u>7/26/92</u> REVISADO POR <u>F.G.R.</u> EQUIPO DE INSPECCIÓN <u>IRD MODEL 350</u>										
		PICKUP	FILTRO FUERA						FILTRO DENTRO	
			RUIDO		DESPLAZ		VELOCIDAD		VEL	VEL
		PUNTO	POS	dB(C)	CPM	MILS	CPM	IN/SEC	CPM	3550
A	H			1.1	3550	0.21	3550	0.09	0.11	
	V			0.7	3550	0.14	3550	0.12	0.03	
	A			0.3	3550	0.06	3500	0.05	0.02	
B	H			0.9	3550	0.19	3550	0.17	0.06	
	V			0.6	3550	0.12	3550	0.12	0.03	
	A			0.28	3550	0.04	*****	0.03	0.01	
C	H			1.2	3550	0.25	3550	0.19	0.08	
	V			1.6	*****	0.43	7100	0.13	0.41	
	A			0.8	*****	0.16	3550	0.15	0.04	
D	H			1.5	3550	0.28	3550	0.23	0.05	
	V			1.8	*****	0.55	7100	0.17	0.46	
	A			0.9	*****	0.15	3550	0.09	0.07	

Las bandas en "V" son consideradas a menudo como fuente de vibración porque es tan fácil ver las bandas que saltan y se sacuden entre las poleas. Puesto que la vibración de las bandas es más visible que la vibración de otras piezas de la máquina y siendo que las bandas son normalmente la parte más fácil de cambiar en la máquina, el reemplazo de las bandas es a menudo una de las primeras tentativas de corrección de los problemas de vibración.

Sin embargo es muy posible que la banda este sencillamente reaccionando a otra fuerza de alteración presentes en la máquina. Desbalance excesivo, poleas excéntricas, falta de alineamiento y aflojamiento mecánico son ejemplos de problemas que pueden ocasionar la vibración altamente visible de las bandas. En tales casos la banda es solamente un indicador de que hay problemas de vibración y no representa la causa misma. Habrá que estar listos a proceder con un análisis más detallado de la vibración de la máquina antes de reemplazar las bandas de accionamiento.

La frecuencia de vibración de las bandas es el factor clave en la determinación de la naturaleza del problema. Si la banda esta sencillamente reaccionando a otra fuerza de alteración, tales como desbalance o excentricidad de las poleas, la frecuencia de vibración de la banda será muy probablemente igual a la frecuencia alterante. Esto significa que la pieza de la máquina que realmente está causando el problema aparecerá estacionaria bajo la luz estroboscópica del analizador.

Con transmisiones de bandas múltiples es importante que todas las bandas tengan la misma tensión de estiramiento. Si una o más de las bandas están flojas mientras las demás tienen la tensión correcta, las bandas flojas pueden estar sometidas a una vibración excesiva a un a causa de fuerzas de alteración muy reducidas. Esta situación ocasiona deslizamiento de las bandas y acelera el desgaste de bandas y poleas.

Es bastante fácil distinguir entre la vibración debida a defectos propios de las bandas en la que deriva de otras causas. Aquí también el factor clave es la frecuencia de vibración. En el caso de defectos de la banda la frecuencia de vibración será un múltiplo integral - 1,2,3 ó 4 - de las r.p.m. de la banda. El múltiplo verificado dependerá de la naturaleza del problema y la cantidad de poleas, sea de accionamiento como locas, presentes en el sistema las Figuras 5-12 y 5-13 ilustran las técnicas a utilizarse para llevar a cabo un análisis de las bandas.

Figura 5-12  
 Técnica para analizar mediciones en una maquina accionada por bandas.

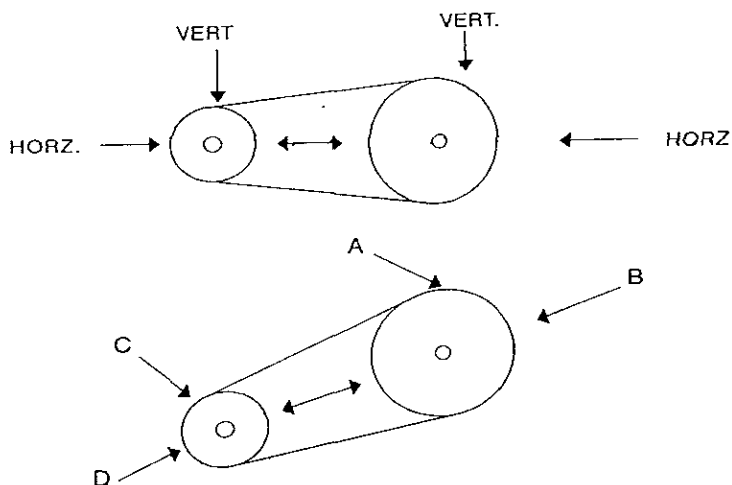
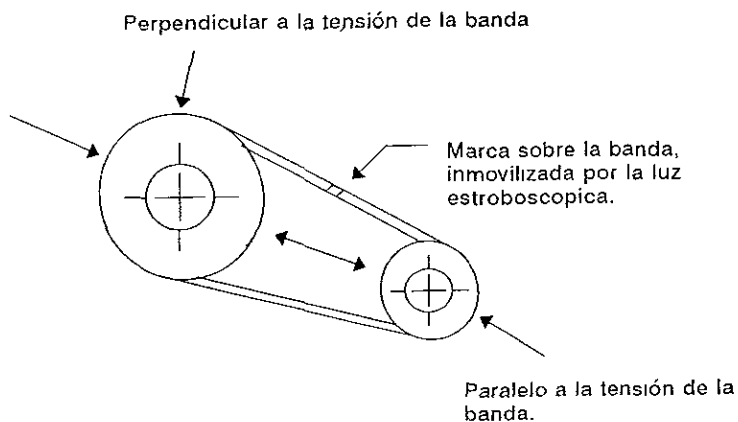


Figura 5-13  
 Técnica para utilización de una luz estroboscópica en la observación del comportamiento de una banda.



Filtro del analizador sintonizado con las RPM de la banda.

## **Bandas defectuosas**

Los defectos comunes de las bandas comprenden agrietamientos, endurecimiento en algunos puntos reblandecimiento en ciertas partes, protuberancias sobre las caras de las bandas y pedazos del material de la banda que se sueltan. También hay que tomar en consideración bandas torcidas que han tomado una forma bien definida durante el embalaje y los periodos de almacenamiento. Todo esto puede ocasionar grandes amplitudes de vibración en equipos de peso relativamente bajo, hasta que la banda logre una mayor flexibilidad. Una banda en "V" puede tener unas ligeras variaciones en su anchura, lo que hace que la banda escurra en las gargantas de las poleas en posiciones a veces más altas y a veces más bajas, creando vibración debida a las variaciones de la tensión de la banda.

## **Deslizamiento de las banda**

El deslizamiento de las bandas es causado generalmente por tensión incorrecta de las mismas, mal alineamiento de las poleas, falta de correspondencia entre bandas, carga excesiva o excesivos requerimiento de potencia. El deslizamiento de las bandas a veces produce altas frecuencias de vibración y ruido. La vibración causada por deslizamiento de la (o las) banda a menudo tiene por resultado lecturas de amplitud no uniformes. Esto es especialmente cierto en las instalaciones de bandas múltiples, en las cuales las bandas pueden deslizarse individualmente en varios grados, a veces aumentando el efecto de vibración, a veces contrarrestándolo en parte. En las instalaciones de banda múltiples se puede determinar por medio de una luz estroboscópica cuánto se deslizan las bandas.

## *Vibración debida a problemas de engranajes*

La vibración que resulta de problemas de engranaje es de fácil identificación porque normalmente ocurre a una frecuencia igual a la frecuencia de engrane de los engranajes - es decir, la cantidad de dientes del engranaje multiplicada por las r.p.m. del engranaje que falla. Problemas de los engranajes, tienen como resultado vibración a la frecuencia de engrane, comprenden el desgaste excesivo de los dientes, inexactitud de los dientes, fallas de lubricación y materias extrañas atrapadas entre los dientes.

En conjuntos completos de engranajes, en los cuales son posibles varias frecuencias de engrane, un vistazo a los dibujos de la caja de engranes permitirá averiguar las r.p.m. y la cantidad de dientes de los varios engranajes, con los cuales se podrá determinar la frecuencia de engrane de los varios engranajes y en consecuencia, se podrá identificar los que estén involucrados en el problema de vibración.

Sin embargo hay que tener presente que, en una máquina hay otras fuerzas de alteración que pueden causar vibraciones a la frecuencia de engrane de los conjuntos de engranajes. En esos casos los engranajes tan solo responden a las fuerzas generadas por otras causas, tales como un eje mal alineado o torcido. La excentricidad, el desbalanceo, o un eje torcido pueden causar vibraciones a frecuencias que son submúltiplos de la frecuencia de engrane de los engranajes.

No todos los problemas de engranajes generan frecuencias de vibración iguales a las frecuencias de engrane. Si un engranaje tiene un solo diente roto o deformado, por ejemplo, el resultado puede ser una frecuencia de vibración de 1x las r.p.m. La amplitud y frecuencia de vibración debida a los engranajes pueden también parecer erráticas a veces. Dicho tipo de vibración errática ocurre normalmente cuando un conjunto de engranajes está funcionando en condiciones de carga muy liviana. En tales condiciones la carga puede desplazarse repetidamente de un engranaje a otro de modo irregular. Los impactos que acontecen cuando la carga se desplaza inducen las frecuencias de resonancia naturales de engranajes y rodamientos, y todos los componentes asociados con la máquina. Esto puede ser diferenciado de la similar firma de problemas de rodamientos si se toma en consideración que los problemas de rodamientos son predominantes en el punto de falla de los mismos, mientras que los problemas de engranajes puede ser detectado en dos o más puntos de la máquina

Los engranajes son pequeños elementos de una máquina, pero en si son completos y por lo tanto están sujetos a algunos problemas ya descritos para las piezas más grandes de una máquina. Un engranaje puede estar montado excéntricamente o estar desbalanceado sobre su eje, por ejemplo, produciendo así vibraciones de 1x las r.p.m. del engranaje mismo.



A causa de su característica alta frecuencia, la vibración de los engranajes es también una fuente común de ruidos objetables. Por esta razón, la corrección de fallas en los engranajes y demás problemas para reducir la vibración excesiva de los engranajes tiene normalmente como resultado una reducción sustancial del nivel del ruido.

#### *Vibración debida a fallas eléctricas*

La vibración de la maquinaria eléctrica, como motogeneradores y alternadores, pueden ser de origen mecánico o eléctrico. Los problemas mecánicos, incluyen desbalance, falta de alineamiento y aflojamiento mecánico. La vibración ocasionada por problemas eléctricos es normalmente el resultado de fuerzas magnéticas desiguales que actúan sobre el rotor o sobre el estator. Dichas fuerzas desiguales pueden ser debidas a cualquiera de las causas enumeradas a continuación o a una combinación de ellas.

- Rotor que no es redondo.
- Chumacera del inducido que son excéntricas.
- Falta de alineamiento entre rotor y estator; entrehierro no uniforme.
- Perforación elíptica del estator.
- Devanados abiertos o en corto circuito.
- Hierro del rotor en corto circuito.

En líneas generales, la frecuencia de vibración resultante de los problemas de índole eléctrica será 1x las r.p.m. y por lo tanto se parecerá al desbalanceo. Una manera sencilla de hacer la prueba eventual de vibración eléctrica es observar el cambio de amplitud de la vibración total (filtro fuera) en el instante en el que se desconecte la corriente de esa unidad. Si la vibración desaparece en el mismo instante en que se desconecta la corriente, el problema con toda probabilidad será eléctrico. Cuando éste sea el caso, los procedimientos convencionales de prueba eléctrica podrán definir con exactitud la causa precisa. Por otra parte, si la amplitud de la vibración decrece sólo gradualmente después de haber cortado la corriente, el problema será probablemente de naturaleza mecánica.

Las vibraciones ocasionadas por los problemas eléctricos responden generalmente a la cantidad de carga colocada en el motor. A medida que se modifica la carga, la amplitud y/o las lecturas de fase pueden indicar cambios significativos.

Esto explica por qué los motores eléctricos que han sido probados y balanceados en condiciones sin carga muestran cambios drásticos de los niveles de vibración cuando vuelven a ser puestos en servicio.

Los problemas eléctricos en el caso de motores de inducción pueden hacer que un medidor de vibración indique lecturas de amplitud oscilantes o pulsantes. Este tipo de vibración está relacionado con una característica intrínseca de los motores de inducción llamada *frecuencia de deslizamiento*. La frecuencia de deslizamiento es tan sólo la diferencia entre las r.p.m. del rotor y la frecuencia eléctrica, o sincrónica, del campo magnético rotativo. La frecuencia sincrónica es siempre igual a la frecuencia de la corriente eléctrica de la línea de alimentación, o un submúltiplo de la frecuencia de línea que está alimentando al motor.

Los motores eléctricos tienen también vibraciones intrínsecas debidas a pulsaciones del momento de torsión (torque). Este tipo de pulsaciones es generado cuando el campo magnético del motor energiza los polos del estator. La frecuencia de vibración en este caso es el doble de la frecuencia de línea de alimentación eléctrica. Si la frecuencia de línea es de 60 Hz, o sea 3600 cpm, la frecuencia de las pulsaciones de torque será de 120 Hz, es decir 7200 cpm.

Las pulsaciones de torque raramente causan problemas, con la excepción de los casos en que se pueda aceptar solamente un bajo nivel de vibración, o cuando dicha pulsación induce vibraciones de resonancia en otras partes de la estructura de la máquina.

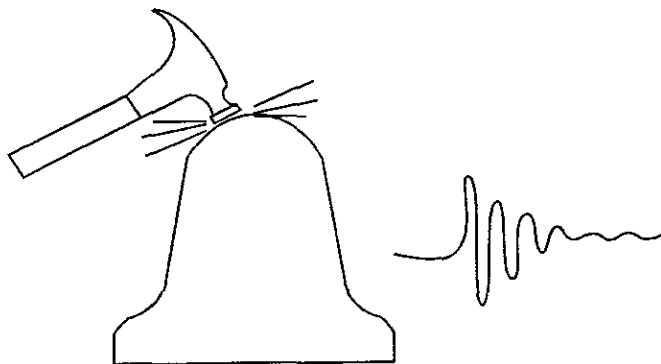
#### *Vibración debida a resonancia*

Todo objeto rígido, incluyendo todas las piezas de una máquina, tienen una frecuencia natural, de resonancia. Cuando se golpea una campana, la misma vibrará a su frecuencia natural hasta que las características internas de amortiguación reduzcan la amplitud de vibración llevándola a cero. La Figura 5-14 ilustra este principio.

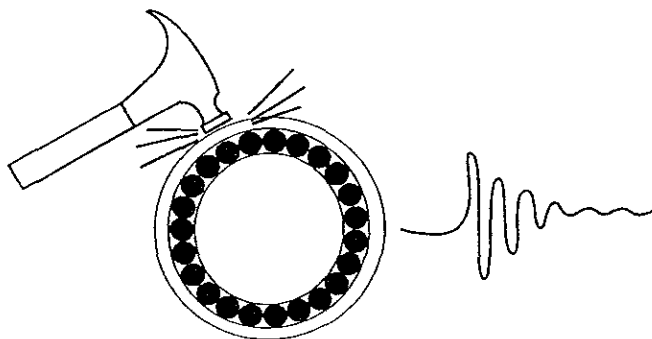
Figura 5-14

Frecuencia de resonancia y características de amortiguación del sonido de:

(A) Frecuencia de resonancia de una campana



(B) Frecuencia de resonancia de la pista de deslizamiento de un rodamiento de bolas.



Además de las características de vibración libre, hay vibraciones “forzadas”, donde la frecuencia depende de la frecuencia de la fuerza inductora. Por ejemplo, la vibración “forzada” de un motor podrá obedecer a la fuerza inductora de un desbalance del rotor. En tales casos la frecuencia de la vibración forzada es igual a la velocidad de rotación del motor.

Hay un par de maneras para determinar si una pieza está vibrando en su frecuencia natural o si está respondiendo a una vibración inducida. Una de estas maneras es ejecutar una sencilla prueba “de golpeo”, la cual consiste en apagar la máquina y golpear la estructura con una fuerza suficiente para crear vibración. Los golpes efectuados harán que la estructura vibre a su frecuencia de resonancia natural. Y si se está controlando la frecuencia con el filtro del analizador FUERA, La frecuencia de vibración aparecerá en el medidor de frecuencias.

Si la vibración ocasionada por los golpes se reduce a cero demasiado rápidamente y no permite obtener una lectura confiable en el medidor, será suficiente golpear la máquina varias veces, en forma continuada y con rapidez suficiente para permitir una lectura. Existirá en la máquina una condición de resonancia cuando la frecuencia “de golpeo” corresponda a la vibración que ocurre en la máquina durante el funcionamiento.

Hay varios modos de proceder para corregir un estado de vibración por resonancia. Uno de estos es cambiar la frecuencia de la fuerza inductora, de manera que no coincida más con la frecuencia natural de la máquina, o de la estructura. Suponiendo que la fuerza inductora sea una máquina cercana, se puede reducir el efecto de resonancia cambiando la velocidad de rotación de la máquina vecina.

Si no fuera posible o práctico cambiar la velocidad de rotación de la máquina que ocasiona la fuerza inductora se puede cambiar la frecuencia de resonancia modificando la rigidez o la masa de la máquina. Por lo tanto, la frecuencia natural puede ser cambiada aumentando o disminuyendo la rigidez o la masa del conjunto.

Desde luego, la resonancia puede ser evitada eliminando directamente la fuerza inductora. Balanceando a niveles menores de lo normal, por ejemplo, reducirá a veces, los efectos de vibración de resonancia. Sin embargo, en muchos casos no es fácil eliminar la fuerza inductora mediante un balanceo, y

el alineamiento puede resultar difícil. La mejor solución para un problema de resonancia es separar la frecuencia natural de las frecuencias inductoras.

### *Vibración debida a fuerzas aerodinámicas e hidráulicas*

Las maquinas que manejan fluidos, tales como aire, agua, aceite y gases, a menudo producirán vibración y ruido generados por la reacción de los álabes o aspas del impulsor al golpear los fluidos. Este tipo de vibración es bastante común en bombas, ventiladores y sopladores, y se les identifica con facilidad por el hecho que la frecuencia de vibración es igual a la cantidad de álabes o aspas del impulsor multiplicada por las r.p.m. de la máquina.

Dicha vibración es debida a inherentes fuerzas hidráulicas y es raramente causa de preocupación a menos que llegue a inducir vibración de resonancia en la máquina o en las tuberías y ductos asociados. En presencia de este tipo de vibración se deberá determinar cual es la pieza de la máquina que causa el problema, llevando a cabo las pruebas de resonancia descritas anteriormente.

Si la vibración aerodinámica o hidráulica fuera excesiva y no se lograra hallar un estado de resonancia, el problema podría residir en un diseño incorrecto de la máquina, de las tuberías o de los ductos. El origen de los problemas podría ser cavitación, recirculación o turbulencia del flujo.

El fenómeno de cavitación normalmente ocurre cuando una bomba funciona con excesiva capacidad o con baja presión de succión. Puesto que la bomba en esas condiciones queda "insaciada", el fluido que entra en la bomba se "hace girones" para rellenar el vacío. Eso crea unas zonas de vacío, o cavidades, que son altamente inestables y pueden derrumbarse, o "implotar", muy rápidamente. Debido a su naturaleza de impacto, tales implosiones pueden ocurrir a intervalos altamente irregulares (al azar) y en cualquier ubicación de la bomba o de las tuberías conectadas a la misma, la vibración y el ruido resultantes son también irregulares en amplitud y frecuencia.

La recirculación puede ocurrir cuando una bomba funciona con baja capacidad o con alta presión de succión. En una tentativa de desplazar con la bomba una cantidad excesiva de fluido, una porción de dicho fluido retorna de la descarga al impulsor. Este flujo inverso y el consiguiente mezclarse de fluidos que se mueven en direcciones opuestas, causan ruido y vibración.

La recirculación a veces acontece en el interior de una bomba de expansión múltiple debido a un claro excesivo entre rotor y carcasa. Esta forma de recirculación puede ocasionar una frecuencia más bien constante, que parecerá no tener relación con la velocidad de funcionamiento.

De todas formas, la vibración ocasionada por la recirculación muestra fluctuaciones al azar, tanto en amplitud como en frecuencia, similares a las causadas por la cavitación.

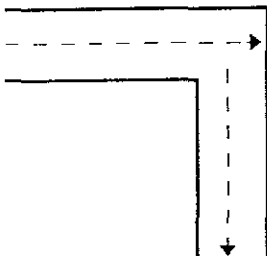
La turbulencia del flujo puede ser el resultado de resistencia al escurrimiento normal de líquidos o gases. Dicha resistencia puede ser causada por obstrucciones, por codos agudos, o sencillamente por la fricción superficial entre el fluido y los ductos o tuberías.

La Figura 5-15 ilustra una causa y una corrección de turbulencia de flujo.

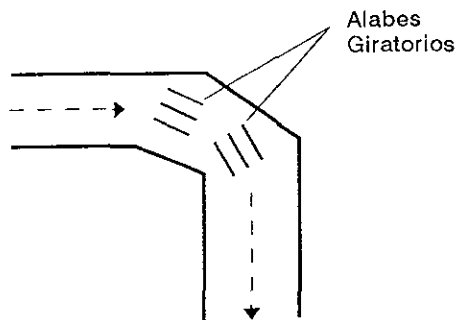
En el diseño original el codo de 90° a la derecha era responsable de la turbulencia y vibración excesiva en el ducto. La modificación del ducto, con una instalación de dos acciones con codos de 45° y de álabes giratorios redujo significativamente tanto la turbulencia como la vibración en el ducto.

Figura 5-15  
Corrección de turbulencia en una sección de un ducto de trabajo.

DISEÑO ORIGINAL



DISEÑO MODIFICADO



La turbulencia puede ser causada también por el mezclarse de fluidos de alta velocidad con fluidos de baja velocidad. Un ejemplo sería un motor de reacción, en el cual los gases de escape de alta velocidad se mezclan con el aire externo relativamente estacionario.

Aunque el nivel de ruido generado por turbulencias en el flujo es generalmente muy elevado, se notarán cantidades relativamente pequeñas de vibración en la máquina en sí. La razón es que el estado de turbulencia existe fuera de la máquina.

El ruido y la vibración asociados con cavitación, recirculación y turbulencia del flujo tienen características de vibración que son similares. Es un tipo de vibración de naturaleza irregular, al azar. A diferencia del estado de vibración uniforme y constante provocado por desbalances y faltas de alineamiento, la vibración originada por fuentes al azar muestran características de amplitud y frecuencias inestables.

#### *Vibración debida a fuerzas reciprocas*

Las máquinas como los compresores alternativos, las bombas de pistón y los motores de gasolina o diesel producen normalmente vibración ocasionada por las fuerzas reciprocas intrínsecas de su diseño. Esta vibración inherente es el resultado de la inercia de las piezas en movimiento alternativo y de las variaciones del momento de torsión debidas al variar de las presiones sobre los pistones.

El análisis de la vibración de las máquinas de movimiento alternativo pueden ser relativamente complejo a causa de la variedad de frecuencias involucradas. Las frecuencias que se encuentran normalmente son de  $1x$  y  $2x$  las r.p.m.; sin embargo, se encuentran comúnmente también vibraciones de orden más elevado de acuerdo con la cantidad de pistones y la relación del uno con el otro.

Por ejemplo, un motor de combustión interna de cuatro tiempos, 6 cilindros tendrá tres impulsos de energía por cada giro ( revolución) del cigüeñal. Como es lógico, el resultado es una vibración de  $3x$  por r.p.m.; y un motor de 8 cilindros, siempre de cuatro tiempos, con cuatro impulsos de energía por cada giro, tendrá vibración de  $4x$  por r.p.m.

En general las frecuencias de orden más alto que se hallan en las maquinas de movimiento alternativo son intrínsecas de la máquina y raramente son causa de preocupación a menos que las mismas induzcan en la máquina o en la estructura un estado de resonancia.

Los problemas de vibración excesiva asociados con las maquinas de movimiento alternativo pueden ser debidos a problemas mecánicos o funcionales. Los problemas mecánicos comprenden desbalance, falta de alineamiento, ejes torcidos, aflojamiento mecánico, cojinetes defectuosos, etc. Los problemas funcionales incluyen aceite lubricante proveniente del cárter que se escapa a través de anillos de pistón desgastados o dañados, válvulas pegadas o que tienen perdidas y problemas de inyección o de encendido. En muchos casos las características de la vibración que resulta de los problemas funcionales y mecánicos serán casi las mismas. Es por lo tanto difícil a veces, identificar el problema con seguridad y exactitud sin tener que proceder a una ulterior evaluación de los datos de análisis.

Hay varias maneras de distinguir entre problemas mecánicos y funcionales en las maquinas alternativas. Por ejemplo, un problema funcional tal como un encendido defectuoso estará acompañado por lo general por una reducción significativa de la eficiencia de la máquina además de vibración excesiva. Por otra parte, un problema mecánico tal como un desbalance podrá acarrear ningún o muy poco cambio en la eficiencia general.

Los problemas funcionales tienden además a crear fuerzas recíprocas desiguales. Es de esperar un aumento mucho mayor de la vibración en sentido paralelo al movimiento de vaivén, y solamente un pequeño aumento en sentido perpendicular a dicho movimiento. En contraste, los problemas mecánicos como desbalance o falta de alineamiento normalmente muestran un aumento sustancial en dos o más direcciones.



### *Vibración debida a rozamiento*

El rozamiento entre piezas estacionarias y rotativas de una máquina pueden generar vibración a frecuencias de 1x r.p.m., 2x r.p.m. y más. Si el rozamiento es continuo es poco probable que se note una característica particular de la vibración. Sin embargo la fricción continua debida al rozamiento puede inducir resonancia de alta frecuencia entre otras piezas de las maquinas; y con toda la probabilidad las lecturas de amplitud y de fase serán muy inestables.

Se ha encontrado que el rozamiento en los sellos de una turbina de vapor o de otra máquina similar de grandes dimensiones causa cambios en amplitud y fase de vibración entre un arranque y el otro, aun cuando no haya habido ningún cambio aportado al sistema. Un análisis de vibración a 3600 r.p.m., por ejemplo, indico un nivel estable de amplitud y fase de vibración; después de reducir la velocidad de la máquina a 1800 r.p.m. por un corto periodo, un segundo análisis de vibración a 3600 r.p.m. indico un nivel completamente diferente de amplitud y fase de vibración. Lo anterior sugiere que el punto de rozamiento de la máquina se ha desplazado entre un cambio de velocidad y el otro. Desde luego dicha condición debe ser corregida antes de tratar de balancear la máquina.

El rozamiento, cuando existe, es usualmente el resultado de un eje torcido, de piezas rotas o dañadas, o de deformaciones dentro del sistema. Estos defectos podrán ser determinados mediante los procedimientos de análisis descritos precedentemente.

### *Vibración de pulsaciones*

Además de los problemas eléctricos y mecánicos comunes presentados hasta ahora hay otra forma de vibración que se presenta como "latidos", o pulsaciones, bien perceptibles que ocurre a intervalos regulares. Esta vibración "pulsante" puede ser el resultado de una sola fuerza inductora que cambia continuamente la amplitud y frecuencia, pero, es más a menudo debida a la interacción de dos o más fuentes estables de frecuencia desigual.

Un ejemplo de este tipo de vibración es el ruido y la vibración pulsantes que a menudo se hayan asociados con los motores de inducción. En este caso hay una fuerza que ocurre a la frecuencia eléctrica y otra que acontece a la frecuencia de rotación, levemente más baja.

La vibración pulsante puede ocurrir también si hay dos o más máquinas que funcionen en la misma zona pero a velocidades levemente diferentes. Consideramos dos máquinas montadas la una al lado de la otra en la misma estatura. Si una de dichas máquinas está girando a 3600 r.p.m. y la otra a 3500 r.p.m.; hay que esperar una vibración pulsante 100 cpm - la diferencia entre las frecuencias respectivas de los dos motores.

En general, la frecuencia pulsante es igual al diferencia entre las frecuencias de dos fuerzas inductoras de vibraciones. En algunos casos es posible captar una frecuencia igual a la suma de las dos. La frecuencia pulsante más alta en líneas generales se nota menos que la más baja - a menos que la frecuencia más alta induzca un estado de resonancia en la máquina o en la estructura.

#### *Detección de defectos en rodamientos de elementos rodantes*

Entre las máquinas dotadas de movimiento rotativo, una gran cantidad utiliza rodamientos de elementos rodantes y muchas de ellas están diseñadas para funcionar a alta velocidad y con elevado rendimiento. La mayor parte de las veces se desempeñan durante largos periodos de tiempo y en condiciones ambientales generalmente adversas; y cuando los rodamientos en estas máquinas fallan, el tiempo muerto puede resultar muy costoso.

En la industria moderna, el control, el análisis y la corrección de los problemas de rodamientos son operaciones críticas. Sin la ayuda de un buen programa de mantenimiento predictivo (PMP) los problemas de vibración asociados con el uso de rodamientos antifricción en máquinas críticas pueden ser difíciles de comprender y analizar.

### *Vibración debida a rodamientos de elementos rodantes defectuosos*

Defectos en las pistas, en las bolas o en los rodillo de rodamientos de elementos rodantes ocasionan vibración de alta frecuencia; y lo que es más la frecuencia no es necesariamente un múltiplo integral de la velocidad de rotación del eje. Por ejemplo, la tendencia que tienen las bolas o los rodillo de los rodamientos de pegarse o deslizarse en ciertas situaciones puede general frecuencias de vibración relacionadas más directamente con la acción de rozamiento y con los impactos que con la velocidad del eje.

La amplitud de la vibración dependerá de la gravedad de la falta del rodamiento. Además, los impactos momentáneos pueden excitar frecuencias de vibración naturales - vibración similar a la que produce un diapason. Todas las máquinas tienen frecuencias naturales de vibración, asociadas con sus componentes estructurales, y dichas frecuencia pueden ser excitadas por impactos mecánicos, que es lo que sucede cuando los elementos rodantes de un rodamiento golpean los defectos existentes en la pista de deslizamiento.

Esa vibración de frecuencia natural ocurre típicamente cuando llega a su pico, en la gama entre 10,000 y 100,00 cpm.

Además, los defectos de los componentes de los rodamiento pueden generar picos de vibración a frecuencias relacionadas con la geometría del rodamiento.

Así mismo, la vibración generada por el rodamiento normalmente no es transmitida a otros puntos de la máquina. Por lo tanto, el rodamiento defectuoso es generalmente el que se encuentra más cerca del punto donde ocurre el mayor nivel de vibración de este tipo.

### *Síntomas en los rodamiento - Otras causas*

Una severa falta de alineamiento en máquinas dotadas de rodamientos de elementos rodantes puede a veces crear en los rodamientos vibración de elevada frecuencia de la cual dichos rodamientos no son responsables. Por ejemplo, una alta frecuencia de vibración fue detectada en el rodamiento de fondo de un motor (funcionando a 900 r.p.m.) de accionamiento de una bomba vertical. En este caso se noto que la frecuencia de vibración era constante en 12,600 cpm, es decir 14 veces las r.p.m. del motor. Además, la amplitud de

vibración máxima era en sentido axial. La presencia de vibración de alta frecuencia sugiere problemas en el rodamiento, y la alta amplitud de dicha vibración indica la necesidad de una corrección inmediata. Por lo tanto, se procedió a sacar el motor y al reemplazo del rodamiento.

Sin embargo, después de haber instalado de nuevo el motor, una verificación de la vibración reveló que no había cambiado nada - todavía existían una notable vibración en sentido axial a 14x las r.p.m. del motor. Una investigación más detallada demostró que la brida de montaje del motor se torcía cuando se apretaban los pernos de montaje que aseguraban el motor a la bomba. La inserción correcta de calzas para evitar la deformación de la brida del motor sirvió para corregir la falta de alineamiento y se eliminó así la vibración de alta frecuencia.

Se ruega notar que el hecho de que el rodamiento contenía 14 bolas fue la razón de que la frecuencia de vibración hubiese sido de 14x las r.p.m. del motor.

#### *Fallas comunes en los rodamientos y sus causas*

Los rodamientos de elementos rodantes se colocan entre los mecanismos hechos con la mayor precisión posible. Los rodamientos no fallan prematuramente a menos que alguna otra fuerza actúe sobre ellos y tales fuerzas son generalmente las mismas que ocasionan vibración. De manera que, cuando un análisis de vibraciones indica síntomas de problemas en los rodamientos, no debe ser eliminada la posibilidad de que la causa principal del problema sea algo diferente. Después de cambiar un rodamiento hágase siempre un examen cuidadoso para detectar la presencia eventual de otros problemas, tales como desbalance y falta de alineamiento - especialmente cuando las fallas prematuras de los rodamientos hayan sido frecuentes.

Los rodamientos de elementos rodantes son fabricados siguiendo normas muy estrictas de control de calidad. Resultado de esto es que son uno de los dispositivos de mayor precisión que se encuentran disponibles. En condiciones de funcionamiento ideales, los rodamientos pueden durar por muchos y muchos años de funcionamiento continuo. Pero, las condiciones de funcionamiento raramente son ideales, de manera que la mayor parte de los rodamientos nunca logran su potencial completo en lo que respecta su vida útil.

La vida útil de un rodamiento de elementos rodantes depende de las condiciones en que fue fabricado, el cuidado prestado durante el almacenamiento y el manejo, las practicas utilizadas para la instalación, las condiciones de carga y el ambiente operativo en general. La Figura 5-16 se presenta la siguiente tabla con algunos tipos específicos de problemas de rodamientos y sus causas.

**Fatiga superficial :** La fatiga superficial está asociada con problemas concernientes al aceite de lubricación, tales como lubricación inadecuada, baja viscosidad e interrupciones de la película de aceite. Al comienzo la superficie del rodamiento parece como si estuviera escarchada, pero luego comienza a descascararse y a fisurarse (aunque el descascaramiento no es tan grave como en el caso de desconchado). A medida que la fatiga superficial progresa lentamente, el funcionamiento del rodamiento puede tornarse tosco, ruidoso y el rodamiento puede recalentarse demasiado. Esfuerzos continuados o aspersion superficial dan como resultado la fatiga superficial inevitable. Este tipo de problema puede ser evitado, o por lo menos, postergado al máximo, manteniendo el rodamiento siempre limpio y bien lubricado.

**Desconchado :** Este es un defecto similar a la fatiga superficial; pero a diferencia de ésta, el desconchado puede simplemente indicar que el rodamiento ha llegado a la terminación de su vida útil en cuanto a fatiga. Estos síntomas ocurren cuando las fisuras, que comienzan como inclusiones no metálicas en el acero del rodamiento, se propagan hasta llegar a la superficie.

Un desconchado prematuro es a menudo el resultado de un ajuste precario del eje, de una deformación del alojamiento y de una instalación incorrecta - condiciones que causan esfuerzos cíclicos anormalmente elevados.

**Abrasión :** El fenómeno de abrasión quita metal y destruye las superficies de asentamiento originales de los elementos rodantes. De acuerdo con la naturaleza de las fuerzas abrasivas, la superficie toma un aspecto de color gris metálico opaco, o de una superficie lustrada a espejo. El rodamiento a final está sujeto a falla catastrófica ocasionada por el cambio en su geometría.

Figura 5-16

Tabla de algunos tipos específicos de problemas en rodamientos y sus causas.

CAUSA	EFEECTO
Carga excesiva	Fracturas Sobrecalentamiento Flujo de metal en frío
Carga desbalanceada	Daños en las pistas de deslizamiento
Falta de alineamiento	Mellas escopleadas en las pistas de deslizamiento Fracturas Falla de las jaulas de retención
Asientos del eje y perforaciones del alojamiento defectuosos	Desconchaduras
Montaje defectuoso	Desconchadura Daños durante el ensamble
Ajuste incorrecto	Desconchaduras Abrasión (rozamientos) Destrucción molecular interfacial Daños durante el ensamble Falla de alineamiento
Lubricación no adecuada o incorrecta	Fatiga superficial Frote Estricción Abolladuras debidas a materias extrañas Sobrecalentamiento
Sellado escaso o mediocre	Abrasión Corrosión atmosférica Estricción Abolladuras debidas a materias extrañas
Vibración circunvecina, cargas de impacto, instalación mediocre, transporte rudo	Deformaciones reales bajo carga Falsas deformaciones bajo carga
Corriente eléctrica	Daños eléctricos

Suciedad abrasiva muy fina es la causa común de una falla por abrasión y dicha suciedad puede entrar en el rodamiento durante la instalación, a través de sellados imperfectos, o con lubricante contaminado. Por lo tanto es buena practica, durante la instalación , limpiar bien con un trapo limpio todos los aditamentos antes de aplicar grasa sobre los mismos, y mantener limpios tanto el área de trabajo como las manos. Sellos buenos y lavables, además de lubricantes limpios, colaboran a impedir la contaminación después de la instalación de los rodamientos.

**Corrosión atmosférica :** La corrosión es causada por humedad que se asienta en el rodamiento. El aire puede acarrear humedad y al enfriarse el aire, dicha humedad puede precipitar y depositarse sobre las superficies internas del rodamiento. De todas formas, la humedad tiene a atacar el acero en los puntos en los cuales los elementos rodantes tocan la pista de deslizamiento y presionan el lubricante, sacándolo de las áreas de contacto.

La corrosión atmosférica puede ser impedida usando sellos buenos de empaque o de grasa y lubricando frecuentemente el rodamiento. En algunos casos podrá ser necesaria la instalación de sellos especiales para excluir rociaduras. Los rodamientos deberán ser llenados con grasa durante los periodos de parada prolongada de las máquinas.

**Destrucción molecular interfacial :** El aspecto de la destrucción molecular interfacial es muy similar al de la herrumbre. Este defecto ocurre en las perforaciones, sobre los ejes y sobre otras superficies de contacto. Es ocasionada por movimientos muy pequeños (hasta microscópicos) bajo carga. Las partículas resultantes del desgaste son negras si el aire ha sido excluido, o rojas si no lo fue. La destrucción molecular interfacial puede hacer que la pista de deslizamiento interna se suelte sobre el eje; o al contrario pueda "congelar" dicha pista de manera tal que ya no pueda ser removida.

La destrucción molecular interfacial puede también ocasionar la rotura de la pista de deslizamiento. Este defecto puede ser impedido observando las tolerancias indicadas por el fabricante, para asegurar que todas las piezas estén ajustadas tan estrechamente como sea posible.

**Deformaciones reales bajo carga :** Una deformación real bajo carga consta de abolladuras en las pistas de deslizamiento. Se trata de deformaciones plásticas de las marcas de amolado del metal y las marcas siguen siendo visibles en las abolladuras. Este problema puede ser el resultado de elevadas cargas estáticas o de impacto, de prácticas de montaje incorrectas y de choques mecánicos, del tipo ocasionado por una caída al suelo de la máquina.

Se puede evitar las deformaciones reales bajo carga, cuando se procede a la instalación, aplicando fuerza solamente a las piezas que deben ser ajustadas bajo presión. Si las cargas de impacto no pueden ser evitadas ni “amortiguadas” se deberán usar rodamientos con una clasificación superior en cuando a resistencia estática.

**Falsas deformaciones bajo carga :** Similarmente a las deformaciones reales bajo carga, las falsas deformaciones se caracterizan por abolladuras en las pistas de deslizamiento. Sin embargo, en este caso, las abolladuras están causadas por remoción de material; de manera que una inspección ocular de cerca no revela la presencia de marcas de amoldado en las depresiones.

Las falsas deformaciones bajo carga son ocasionadas por un severa vibración que ocurre mientras la máquina no está funcionando a veces esto sucede durante el transporte, pero no hay que descuidar la posibilidad de que halla vibración ocasionada por maquinaria cercana.

Este tipo de problema puede ser evitado trabando adecuadamente los ejes durante el embarque, y aislando la máquina de vibración de otras máquinas, tal vez utilizando bases (cimentaciones) separadas.

**Daños eléctricos :** Las picaduras debidas a la corriente eléctrica a menudo se desarrolla en una conformación regular en las pistas de deslizamiento y en las superficies de los elementos rodantes, como resultado del paso de corrientes eléctricas a través del rodamiento. Las corrientes eléctricas pueden también ocasionar picaduras en conformación irregular.

La causa más común de los daños eléctricos en los rodamiento es la electricidad estática generada por las bandas transportadoras, y la corriente provocada por una colocación descuidada de equipos de soldar. Por lo tanto, las bandas transportadoras deberán estar equipadas con tiras de puesta a tierra,



y los equipos de soldar deberán tener una conexión de puesta a tierra entre la soldadura y el rodamiento más cercano.

**Frotación :** La frotación es el resultado de la remoción de metal desde una superficie de soporte, con subsiguiente depósito de dicho metal sobre otras superficie. La frotación, es causada por deslizamientos que ocurren bajo cargas pesadas y con lubricación insuficiente. Los extremos de los rodillo cilíndricos a veces muestran signos de frotación, y eso es una indicación de que el rodamiento de rodillo está recibiendo fuerzas de empuje de un tipo o nivel que dicho rodamiento no está diseñado para recibir. La frotación puede ser causada también por un manejo descuidado y por la mala lubricación.

**Estriación :** La estriación es un desgaste abrasivo que toma forma de profundos rasguños en los elementos rodantes y en las pistas de deslizamiento. Las características marcas de rasguño crean puntos de tensión que al final causaran también fatiga superficial.

Las estriación es ocasionada por partículas de dimensiones relativamente grandes que quedan atrapadas en el rodamiento y son arrastradas por las pistas de deslizamiento de los elementos rodantes. Al igual que los demás problemas causados, por la contaminación, la estriación puede ser evitada usando sellos buenos y lubricación frecuente con aceite o grasa limpios.

**Abolladuras debidas a materias extrañas :** Esto es similar a las deformaciones reales bajo carga en cuanto las abolladuras están causadas por escurrimientos plásticos más bien que por desgaste. Las abolladuras debidas a materias extrañas ocurren mientras el rodamiento está funcionando; algunas materias extrañas son realmente “arrolladas” en las pistas de deslizamiento por las bolas o rodillos del rodamiento, dejando a su paso abolladuras al azar que actúan como punto de atracción de las tensiones y transtornan la película de lubricante. Esto pronto conduce a fatiga superficial.

Las abolladuras debidas a materia extrañas pueden ser reducidas usando mejores sellos y lubricando los rodamientos con mayor frecuencia, de manera de “lavar” y eliminar las eventuales materias extrañas.

**Sobrecalentamiento** : Un rodamiento sometido a excesivo calor durante el funcionamiento - un cambio en la geometría del rodamiento causado por una combinación de calor y carga. Este está normalmente ocasionado con una fallas completa o catastrófica del rodamiento; el calor a menudo se origina internamente por falta de lubricación, por fricción de una pista de deslizamiento que gira raspando sobre el eje o en el alojamiento, o por velocidad excesiva. En otros casos, el calor entra en el rodamiento proveniente de una fuente externa, como podría ser un horno para tratamientos térmicos.

**Falta de alineamiento** : La causa principal de los daños al rodamiento es la falta de alineamiento; la evidente destrucción molecular interfacial y las desconchaduras visibles son el resultado. La falta de alineamiento de un eje, de un acoplamiento, o del rodamiento en sí pueden conllevar elevadas cargas axiales, que ocasionan fallas por fatiga y astilladuras abundantes.

**Desbalance de la carga** : El desbalance puede representar la mayor parte de la carga sobre un rodamiento; y cuando dicho desbalance es excesivo, se pueden encontrar fallas de rodamientos. A veces se hallara que el daño está localizado en un solo punto de la pista de deslizamiento interna.

Hay que tomar en cuenta medidas para asegurar que el desbalance sea mantenido al mínimo, balanceando cuidadosamente las piezas, particularmente en los casos en los cuales las piezas deben funcionar a altas velocidades.

**Fracturas** : Las fracturas de los rodamientos es a menudo una consecuencia de sobrecargas excesivamente altas. En un rodamiento expuesto a daños típicos debidos a fracturas por sobre carga excesiva, se puede apreciar que el área de fatiga de la pista deslizante interna cubre todo ancho de la ranura. Además que la jaula se rompe en pedazos a causa de la fracturación a través de los avéolos portabolas.

**Fallas de las jaulas de retención** : Las fallas de las jaulas de retención, a menudo conducen a la fracturación o falla de los anillos, lo que a su vez causas una falla catastrófica del rodamiento, obscureciendo el hecho de que la causa original de la falla fue la jaula de retención.

La causa más común de falla de las jaulas de retención es la encorvadura de los elementos de dicha jaula, que ocurre cuando las bolas se mueven en zigzag debido a una falta de alineamiento. Daños a las jaulas de retención pueden ser ocasionados también por un manejo incorrecto, contaminación o lubricación escasa del rodamiento.

#### *Detección de fallas en rodamientos*

Los rodamientos de elementos rodantes que tienen fallas o defectos en las pistas de deslizamiento, en los elementos rodantes, o en la jaula de retención, generan fuerzas que son transmitidas al alojamiento del rodamiento y a la estructura circundante dichas fuerzas pueden ser periódicas no periódicas o de naturaleza fortuita (al azar), y a menudo se presentan a las frecuencias de vibración más elevadas.

Un rodamiento defectuoso puede producir varias frecuencias diferentes de vibración, algunas relacionadas con la geometría del rodamiento y otras que son puramente ocasionales (al azar).

El diagrama de la energía de impulsos, en “g” (g - SE) versus tiempos, sugiere que la vibración de alta frecuencia del rodamiento es más bien inestable o de naturaleza fortuita. Obteniendo estos diagramas con un analizador se podrá notar que las mediciones de amplitud y frecuencia fluctuaran, o sea se “crisparán”. La razón de que halla frecuencias elevadas así como fluctuaciones ocasionales de amplitud y frecuencia, pueden ser explicadas si se examina la naturaleza de las fuerzas inductoras generadas por los defectos de los rodamiento.

Un rodamiento defectuoso puede generar cuatro tipos de frecuencia: de rotación, componentes naturales, de suma - y - resta, y fortuitas.

#### *Frecuencias de rotación*

Las frecuencias de rotación generada por un rodamiento defectuoso no ocurren en múltiplos integrales de las r.p.m. del eje. Este tipo comprende cuatro consecuencias principales : (1) jaula de retención; (2) r.p.m. de las bolas de los anillos; (3) frecuencia de paso de las bolas en la pista externa; y (4) frecuencia de paso de las bolas en la pista interna.

Las frecuencias de rotación puede ser calculadas de acuerdo a las tensiones de los componentes del rodamiento, incluyendo los diámetros de las bolas y de las pistas de deslizamiento. Si se conocen tales dimensiones se puede calcular las frecuencias de rotación, tal como se sugiere en la Figura 5-17.

Las frecuencias de rotación calculadas no siempre concuerdan con exactitud con las frecuencias medidas, debido a desplazamiento de las bolas durante su recorrido y a discrepancia entre el recorrido real de las bolas y los diámetros de las pistas de deslizamiento utilizados para el cálculo.

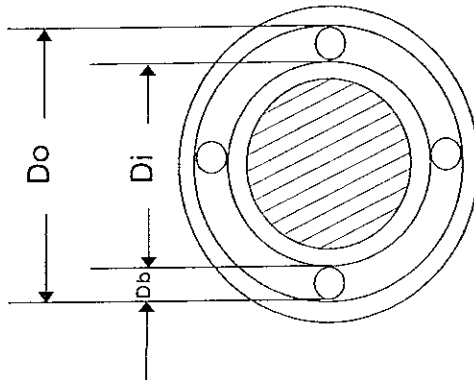
No se conocen las dimensiones exactas de los rodamientos, se puede por menos estimar la frecuencia de paso de las bolas en la pista de desplazamiento interna y externa. Como regla general, la frecuencia de paso de las bolas por la pista de desplazamiento interna en un rodamiento es aproximadamente el 60% de la cantidad de elementos rodantes, multiplicados por las r.p.m. del eje.

Sosteniendo que un rodamiento tenga 12 bolas y sea usado en una máquina la velocidad de rotación sea 3600 r.p.m., la regla general indica que el 60 % de los elementos rodantes pasa en un punto determinado de la pista de desplazamiento interno por cada revolución del eje. En este ejemplo, el 60% de 12 bolas es 7.2; 7.2 bolas pasan sobre un punto determinado de la pista de desplazamiento interna cada vez que el eje cumpla una revolución completa. A 3600 r.p.m., esto quiere decir que la frecuencia del paso de las bolas sobre la pista de desplazamiento interno es de  $7.2 \times 3600 = 25,920$  cpm.

En respecto a la pista de desplazamiento externa, aproximadamente el 40% de las bolas pasan por un punto determinado por cada revolución en la frecuencia estimada del paso de las bolas sobre la pista de desplazamiento externo, es por lo tanto que el 40% de la cantidad de elementos rodantes multiplicado por las r.p.m. del eje.

Aunque volviendo al ejemplo anterior, un rodamiento con 12 bolas que accione a 3600 r.p.m. generará una frecuencia de rotación aproximadamente el 40% de 12 es multiplicado por 3600, o sea aproximadamente 17,280 cpm.

Figura 5-17  
Cálculo de las frecuencias de rotación de un rodamiento defectuoso.



Defecto de la jaula o de una bola  

$$F \text{ (jaula)} = \frac{D_i \times \text{rpm}}{D_i + D_o}$$

Defecto de una bola  

$$F \text{ (bola)} = \frac{D_o \times D_i \times \text{rpm}}{D_b \times (D_i + D_o)}$$

Defecto de la pista de deslizamiento interna  

$$F \text{ (int.)} = \frac{D_o \times M \times \text{rpm}}{D_i + D_o}$$

Defecto de la pista de deslizamiento externa  

$$F \text{ (ext.)} = \frac{D_i \times M \times \text{rpm}}{D_i + D_o}$$

Donde:  $D_i$  = diámetro de la pista de deslizamiento interna

$D_o$  = diámetro de la pista de deslizamiento externa

$D_b$  = diámetro de la bola

$M$  = cantidad de bolas en el rodamiento

rpm = velocidad de rotación del eje

$F$  = frecuencia del defecto en cpm

NOTA . Eje en rotación, pista de deslizamiento externa fija

Hay que tener bien presente que estos cálculos representan cifras indicativas muy aproximadas; la frecuencia real de paso de las bolas pueden ser muy diferentes, según la configuración del rodamiento.

De todas maneras, conocer las r.p.m. de las bolas y la frecuencia de paso de las mismas es a menudo útil en el análisis de la vibración ocasionada por los rodamientos con elementos rodantes, y puede proporcionar indicios ocasionales sobre la causa de una falla. Por ejemplo, si un rodamiento ( con pista de desplazamiento interno rodante) ha desarrollado un defecto debido a un desbalance excesivo, la pista de desplazamiento interna mostrara típicamente las primeras señales de deterioro y la frecuencia de paso de las bolas en la pista de desplazamiento interna será la primera en hacer una significativa aparición en el análisis de vibración correspondiente. El motivo se debe a que las fuerzas de desbalance tienden a ejercer esfuerzos angulares constantes sobre la pista de desplazamiento interno, creando de está manera una falla en un solo punto. La pista de desplazamiento externa, en cambio, se deteriora sobre toda la circunferencia.

En cambio, un rodamiento que queda dañado por fuerzas circunvecinas o por mal alineamiento es más probable que se muestren las primeras señas de deterioro en la pista de deslizamiento externa. Esto significa que la frecuencia del paso de las bolas en la pista de deslizamiento externa será la primera en mostrar un aumento de la amplitud a medida que el problema aumenta de intensidad.

Cuando los elementos rodantes son los primeros en comenzar a fallar, el análisis de los datos comenzara a revelar la frecuencia de las r.p.m. de los elementos rodantes está aumentando de amplitud. Este tipo de problemas de los rodamientos se debe en líneas generales a mala lubricación, sobre calentamiento o corriente eléctrica.

En algunos casos la frecuencia de rotación que interesa puede ser detectadas mediante los análisis rutinarios de las frecuencias de vibración. Sin embargo, considerando que la vibración de los rodamientos está normalmente compuesta por muchas frecuencias diferentes, y debido a la posibilidad de que halla más de un defecto, quizás se tenga que hacer un promedio del espectro, para poner de relieve las frecuencias de rotación y suprimir las demás.

## Frecuencias naturales de componentes

Además de las frecuencias de rotación que acabamos de describir el impacto momentáneo entre elementos rodantes y pista de deslizamientos puede inducir las frecuencias naturales de la estructura de la máquina y de varios de los componentes de los rodamientos. Cuando ocurre el impacto cada pieza genera su propia frecuencia particular - es decir, su frecuencia natural. En un rodamiento, una falla produce impactos intermitentes entre las varias piezas del mismo, generando por lo tanto, la vibración de las piezas a la frecuencia natural de cada una.

Al igual que las frecuencias de rotación, las frecuencias naturales ocasionadas por los impactos de un rodamiento defectuoso son bastante elevadas en relación con las de r.p.m. de la máquina. Además, no es probable que dichas frecuencias naturales sean múltiplos integrales de la velocidad de rotación del eje.

A diferencia de las frecuencias de rotación, las frecuencias naturales de vibración prácticamente casi siempre involucran a una cierta cantidad de piezas diferentes del rodamiento, induciendo por tanto varias frecuencias de vibración a diferente amplitud. Además, las amplitudes a menudo fluctúan al azar.

### Frecuencia de suma -y- resta.

Un solo defecto ya sea en la pista de deslizamiento interna, o externa, genera una frecuencia de paso de bolas. A medida que el problema se empeora, sin embargo, el defecto aumenta de tamaño y contribuye al desarrollo de otros defectos. Por lo que se vera un aumento en la cantidad de las frecuencias y el ancho del patrón espectral. Tales frecuencias componentes pueden ser moduladas por las fuerzas de desbalance a la velocidad de funcionamiento del eje, o por las fuerzas y terminan por generar aun más frecuencias de suma -y- resta.

Por ejemplo, una máquina que está funcionando a 3600 r.p.m., con la frecuencia de paso de bolas, calculada, debida a un defecto en la pista interna, de 25,292 cpm. La máquina tendrá vibración en ambas frecuencias. Pero esto no es todo se encontrara también la suma de las dos (  $3600 + 25,292 = 28,892$  cpm ) y la diferencia entre las dos (  $25,292 - 3600 = 21,692$  cpm ).

Este efecto de modulación continuara hasta que el espectro de las frecuencias se torne en una serie de componentes de frecuencia, produciendo patrones espectrales de bandas bastante anchas.

#### **Vibración fortuita de alta frecuencia.**

Cuando el deterioro de los rodamientos toma forma de fatiga de la superficie, abrasión, o problemas de está índole, la vibración generada es típicamente una vibración al azar de frecuencia elevada, sin ninguna frecuencia de pico particular ni periodicidad para distinguirla, como en cambio se acontece en presencia de picaduras discretas o defectos de las mismas especie. Dicha vibración fortuita es aquella cuyo valores instantáneos no son predecibles.

Un estudio de las características de amplitud y frecuencia de una vibración generada al azar es frecuentemente útil para llegar a una comprensión de la severidad y de la causa de la vibración.

Aunque la variación de tiempo de una vibración fortuita no puede ser prevista, su amplitud puede ser medida y evaluada. Mientras mayor sea la amplitud, más grave será el defecto. Este hecho se usa en la evaluación de las mediciones de la energía de impulsos ( Spike Energy ).

#### **Vibración debida a rodamientos de chumacera defectuosos.**

Elevados niveles de vibración, ocasionados por rodamientos de chumacera defectuosos, son generalmente el resultado de una holgura excesiva (causada por desgaste debido a una acción de barrido o por erosión química), o por problemas de lubricación. Los párrafos que siguen presentan un resumen de tales problemas y de algunas variaciones sobre el mismo tema.

#### **Holgura excesiva de los rodamientos**

Un rodamiento de chumacera con holgura excesiva hace que un defecto relativamente menor importancia, tal como un leve desbalance, o una pequeña falta de alineamiento, u otra fuente de fuerzas vibratorias, se transformen como resultado en aflojamientos mecánicos o en golpes repetidos (machacado). En tales casos el rodamiento en si no es lo que crea la vibración; pero, la amplitud de la misma seria mucho menor si la holgura de los rodamientos fuera correcta.

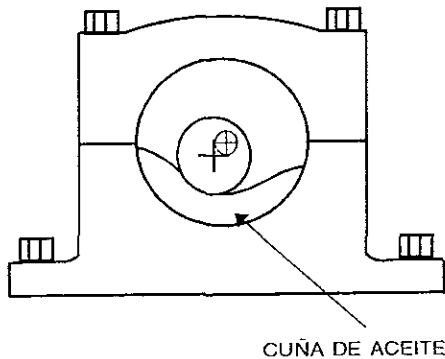


A menudo se puede detectar un rodamiento de chumacera desgastado por “barrido” efectuando una comparación de las amplitudes de vibración horizontal y vertical. Las máquinas que están montadas firmemente sobre una estructura o cimentación rígidas revelaran en condiciones normales, una amplitud de vibración ligeramente más alta en sentido horizontal. Un rodamiento de chumacera desgastado dejara también el paso, a menudo una amplitud de vibración anormalmente elevada en sentido vertical. Cuando haya razones fundadas para sospechar que la falla resida en un rodamiento de chumacera, se deberán usar los procedimientos de inspección convencionales para controlar la holgura de los rodamientos.

### Torbellino de aceite

El torbellino de aceite es otra de las causas de los problemas relacionados con los rodamientos de chumacera. Este tipo de vibración ocurre solamente en máquinas equipadas con rodamientos de chumacera lubricados a presión y que funcionan a velocidades relativamente altas - normalmente por encima de la segunda velocidad crítica del rotor.

Figura 5-18  
La mecánica del torbellino de aceite.



La Figura 5-18 ilustra la mecánica del torbellino de aceite. En condiciones de funcionamiento normales el eje de la máquina se levanta un poquito contra el estado del rodamiento. De cuanto se levante dependerá de la velocidad de rotación del eje, del peso del rotor, y de la presión del lubricante. El eje, que funciona en una posición excéntrica con respecto al centro del rodamiento, arrastra a el aceite formando una “cuña”, creando de esta manera una película de aceite a presión como soporte de la carga.

Si la excentricidad recién mencionada es momentáneamente aumentada, saliéndose por lo tanto de su posición de equilibrio, tal vez debido a un aumento repentino de la velocidad o de las cargas externas sobre el eje, o a causas de otras situaciones transitorias, una cierta cantidad adicional de aceite es bombeada en el espacio dejado libre por el eje. El resultado es un aumento de la presión de la película de aceite que soporta la carga. La fuerza adicional creada por la película de aceite puede empujar el eje en un torbellino alrededor del rodamiento. Si el amortiguamiento interno del sistema es suficientemente elevado, el eje vuelve a su posición normal en el rodamiento; de otra forma el eje continuara siguiendo un recorrido de torbellino.

La vibración debida a torbellinos de aceite a menudo es muy pronunciada, pero se reconoce fácilmente por su frecuencia fuera de lo común. Dicha frecuencia es apenas menor de la mitad de la velocidad de rotación (en r.p.m.) del eje - generalmente en el orden del 46 al 48% de las r.p.m. del eje. Por ejemplo, una máquina con una velocidad de rotación de 3600 r.p.m. podrá tener una frecuencia, debida a torbellinos de aceite, de 1700 cpm.

El problema de los torbellinos de aceite normalmente se atribuye a diseño incorrecto de rodamiento - a veces un diseño excesivamente “abundante” para la carga real que actúa sobre el eje. Sin embargo, entre las otras causas posibles puede haber un desgaste excesivo del rodamiento, un aumento de la presión del lubricante, o un cambio de la viscosidad del aceite.

Se pueden hacer correcciones temporales modificando la temperatura del aceite (viscosidad), introduciendo un leve desbalance o una falta de alineamiento de manera de aumentar la carga sobre el eje, o rascando y/o ranurando los costados del rodamiento, para desbaratar la “cuña” del lubricante. Desde luego, una solución más duradera es remplazar el rodamiento con uno que haya sido diseñado correctamente de acuerdo a las condiciones operativas de la máquina, o con un que este diseñado para reducir la posibilidad

de formación de torbellinos de aceite. Los rodamientos con ranuras axiales usan las ranuras para aumentar la resistencia a la formación de torbellinos de aceite en tres puntos espaciados uniformemente. Este tipo de configuración está normalmente limitado a las aplicaciones más pequeñas tales como turbinas de gas livianas y tubocargadores.

Una máquina que es normalmente estable puede desarrollar índices de vibración ocasionada por torbellino de aceite; y a veces, esta situación se presenta intermitentemente. Tal condición no tiene nada que ver con el estado de rodamientos de chumacera, sino que es de vida más bien a fuerzas vibratorias externas que de casualidad tiene la misma frecuencia de vibración del torbellino de aceite del rodamiento.

Hay dos causas comunes de vibración que pueden inducir un torbellino de aceite en un rodamiento de chumacera: vibración proveniente de maquinaria ubicada en las cercanías y vibración ocasionada por otros elementos de la máquina misma. En ambos casos la condición de torbellino de aceite es inducida por una fuente externa que vibra en la misma frecuencia del torbellino de aceite del rodamiento.

La vibración proveniente de las otras máquinas puede ser transmitida al rodamiento de chumacera a través de estructuras rígidas, tales como tuberías y cimentaciones. A este fenómeno se le conoce como torbellino inducido por el exterior.

De manera similar, las cimentaciones o tuberías pueden transmitir al rodamiento de chumacera vibración en resonancia (a menudo a causa de pulsaciones o turbulencias de algún flujo). Y si dicha vibración de resonancia llega a tener la misma frecuencia que el torbellino de aceite del rodamiento. A este se le llama torbellino de resonante.

Tal vez que se detecta la vibración característica del torbellino de aceite se deberá realizar una completa investigación de las vibraciones en toda la instalación, incluyendo las fuentes de vibración circunvecina, las estructuras de cimentación y la tuberías relacionadas. Se podrá así quizás descubrir una causa externa de los problemas de torbellinos de aceite.

### *Lubricación inadecuada*

Una inadecuada lubricación incluyendo la falta de lubricación y el uso de lubricantes incorrectos. Pueden ocasionar problemas de vibración de un rodamiento de chumacera. En semejantes casos la lubricación inadecuada causa excesiva fricción entre el rodamiento estacionario y el eje rotante, y dicha fricción induce vibración en el rodamiento y en las demás piezas relacionadas. Este tipo de vibración se llama “dry whip”, o se latigazo seco, y es muy parecido al pasar de un dedo mojado sobre un cristal seco.

La frecuencia de vibración debida al latigazo seco generalmente es muy alta y produce el sonido chillón característico de los rodamientos que están funcionando en seco. No es muy probable que dicha frecuencia sea algún múltiplo integral de las r.p.m. del eje, de manera que no es de esperarse ningún patrón significativo bajo la luz estroboscópica. En este respecto, la vibración ocasionada por el latigazo seco es similar a la vibración creada por un rodamiento antifricción en mal estado.

Toda vez que se sospeche que un latigazo seco sea la causa de la vibración se deberá inspeccionar el lubricante, el sistema de lubricación y la holgura del rodamiento. Con respecto a la inspección, ha sido encontrado que el latigazo seco puede ser ocasionado no solo por rodamientos de chumacera con holguras insuficientes, sino también por rodamientos con holguras excesivas.

## CAPITULO VI

# EQUIPOS DE APOYO PARA EL SISTEMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

## 6.1 SISTEMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO (SOFTWARE).

Para reforzar lo que se ha visto en los capítulos anteriores, se necesitara de una herramienta que conjunte todo lo anterior, es decir un sistema en el cual se realice un Análisis más detallado y sofisticado, por lo cual se recurre a los sistemas de computación por medio de un software de Mantenimiento Predictivo, los cuales son un sistema de acceso fácil y simple para la introducción de datos, para la obtención de reportes del control de mantenimiento mediante el contacto directo entre una computadora y un colector de datos.

Con estos tipos de software se realiza una rápida recolección y análisis de datos de los equipos rotatorios con problemas de vibración , ya que con ellos podremos obtener la siguiente información:

**Parámetros espectrales** .- Cuando se ha detectado que una máquina tiene un problema es necesario tomar una gráfica de **AMPLITUD VS FRECUENCIA** de esta vibración, para determinar cuales son las frecuencias que están provocando esa alta vibración, esta gráfica es la que llamamos Análisis Espectral o FFT. (FAST FOURIER TRANSFORME = RÁPIDA TRANSFORMADA DE FOURIER).

Teniendo esta gráfica, se puede seccionarla en pequeños rangos de frecuencias, con sus respectivas alarmas a esto es lo que llamamos “BANDAS”

**BANDAS** .- Ahora bien ¿para que realmente nos sirven la bandas?, las bandas fueron pensadas para ayudarnos a visualizar los problemas que podemos encontrar en una máquina sin que realmente veamos el ESPECTRO, ya que el instrumento nos dara lecturas totales de estos pequeños rangos de frecuencia y nos dará un reporte de lecturas totales de esos rangos lo que podemos tener idea que es lo que está sucediendo en la máquina sin que realmente veamos la gráfica de FFT.

**OVER ALL EXEPTION.**- Este reporte nos mostrara los puntos que se encuentran arriba de alarma.

**LAST MESUREMENTES.-** Este reporte nos mostrara las lecturas totales que fueron tomadas en la ultima toma de datos y que fueron descargadas recientemente.

**SPECTRAL EXEPTION.-** En este reporte podemos ver las lecturas totales pero que están arriba de alarma solamente, de tal manera que podemos identificar más fácilmente estos puntos.

**OVER ALL TRED REPORT.-** Aquí se nos muestran los diferentes valores de la lectura total en las diferentes fechas en las que fueron tomadas.

**LAST NOTE CODE.-** Nos muestra los diferentes codigos de inspección para los diferentes puntos que fueron tomados en el campo.

**POINT DIRECTORY.-** Nos muestra la programacion de nuestros puntos en las diferentes máquinas en una determinada área.

**ROUTE SCHEDULE.-** Nos muestra las máquinas programadas en las diferentes rutas.

**PEAK SPECTRUM VALUE.-** Nos muestra los valores picos dentro de un espectro determinado.

**OVER ALL DATA CATALOG.-** Nos muestra los puntos a los cuales se va a tomar lecturas totales.

**SPECTRUM SETUP.-** Nos mostrara los puntos que tiene la lectura total y los que tienen espectro.

Un ejemplo del tipo de graficas que podemos obtener, se puede observar acontinuacion:

IRD Mechanalysis Data Analysis System

26-Jun-98

Page 1

Load into an IRD Collector

Machine	Pos	Dir	Units	Alarm
Motor Demo 1	1	H	IN/S	0.314
Motor Demo 1	1	H	g	1.5
Motor Demo 1	1	H	g/SE	1
Motor Demo 1	2	H	IN/S	0.314
Motor Demo 1	2	H	g	1.5
Motor Demo 1	2	H	g/SE	1
Motor Demo 1	3	H	IN/S	0.314
Motor Demo 1	3	H	g	1.5
Motor Demo 1	3	H	g/SE	1
Motor Demo 1	4	H	IN/S	0.314
Motor Demo 1	4	H	g	1.5
Motor Demo 1	4	H	g/SE	1

12 Lines this report

IRD Mechanalysis data Analysis System

26-Jun-98

Unload from an IRD Data Collector

Machine	Pos	Dir	Ampl	Units	Alarm	Inspection Remarks
Motor Demo 1	1	H	[0.606]	IN/S	0.314	Machine Normal
Motor Demo 1	1	H	0.508	g	1.5	Machine Normal
Motor Demo 1	1	H	0.01	g/SE	1	Machine Normal
Motor Demo 1	2	H	[1.13]	IN/S	0.314	Machine Normal
Motor Demo 1	2	H	1.24	g	1.5	Machine Normal
Motor Demo 1	2	H	0.292	g/SE	1	Machine Normal
Motor Demo 1	3	H	[0.318]	IN/S	0.314	Machine Normal
Motor Demo 1	3	H	0.786	g	1.5	Machine Normal
Motor Demo 1	3	H	0.058	g/SE	1	Machine Normal
Motor Demo 1	4	H	0.193	IN/S	0.314	Machine Normal
Motor Demo 1	4	H	0.698	g	1.5	Machine Normal
Motor Demo 1	4	H	0.044	g/SE	1	Machine Normal

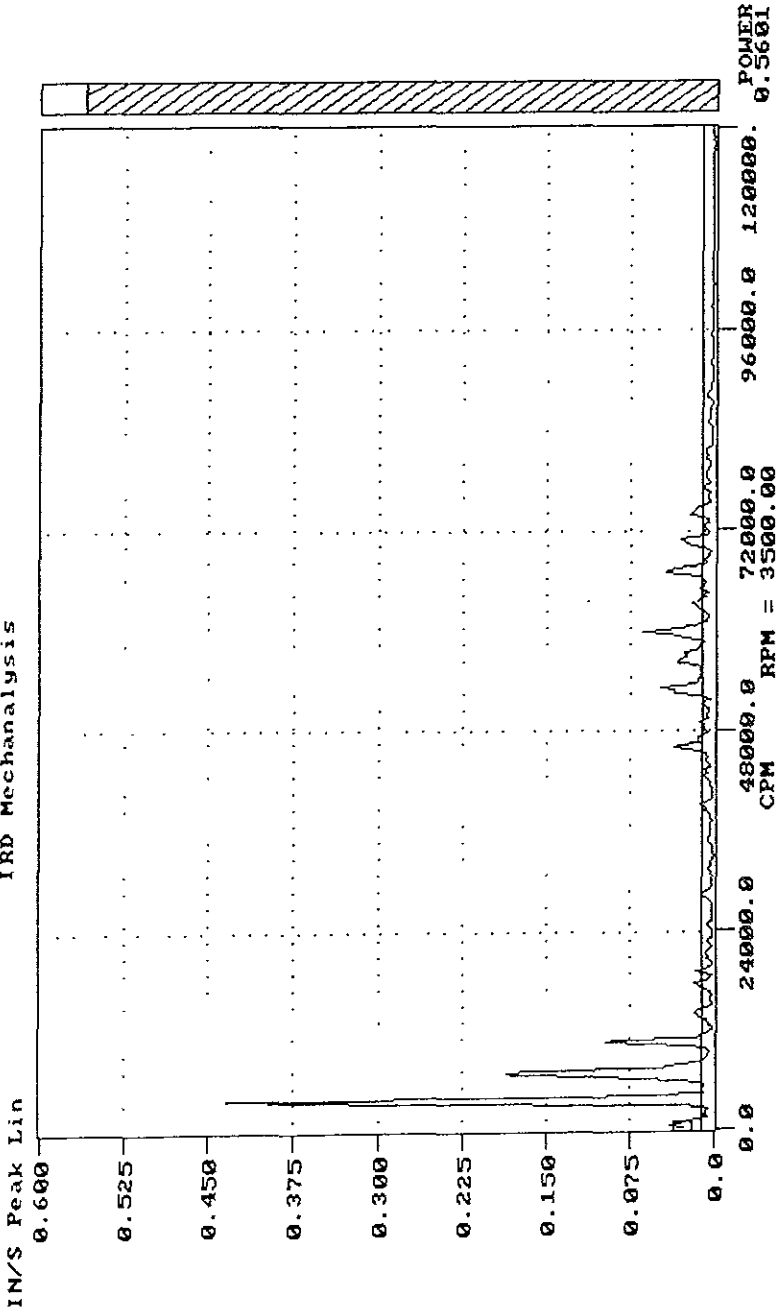
12 Lines this report

Hit any key to continue



MODULO C  
20/02/98 8:24:00 AM  
IRD Mechanalysis

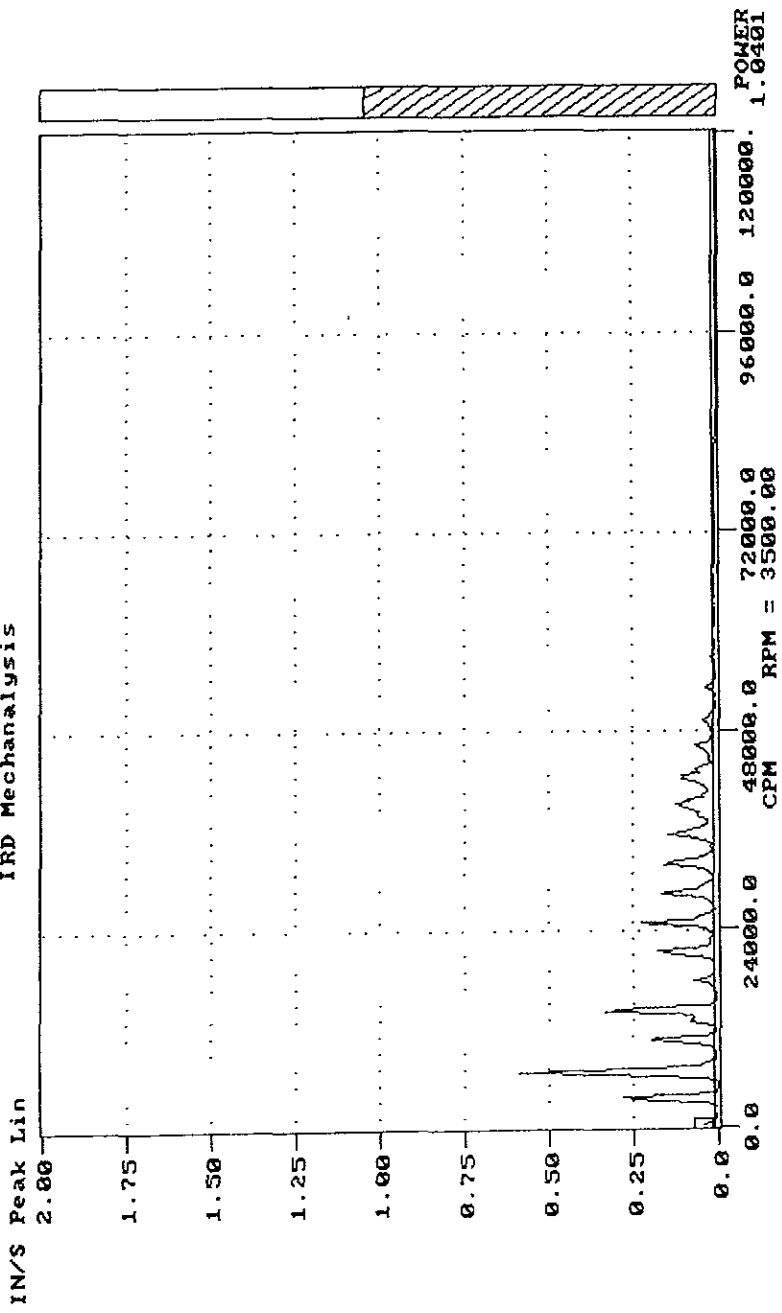
X value: 300.00  
Y value: 0.026977



Description: VENT. 3A 3500 RPM  
MACHINE: V. CICLON B 10 TRAIN: ELASTICO # 10 3 Axial  
POINT ID: VENTILADOR Point: 00668

MODULO C  
20/02/98 8:24:00 AM  
IRD Mechanicalsis

X value: 300.00  
Y value: 0.043855



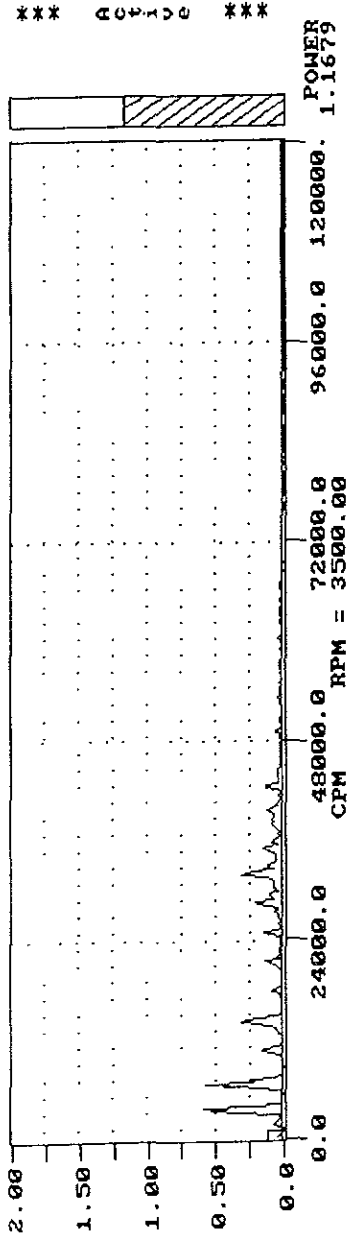
Description: VENT. 3H 3500 RPM  
MACHINE: V. CICLON B 10 TRAIN: ELASTICO # 10 3 Horizontal  
POINT ID: VENTILADOR Point: 00669

Locked

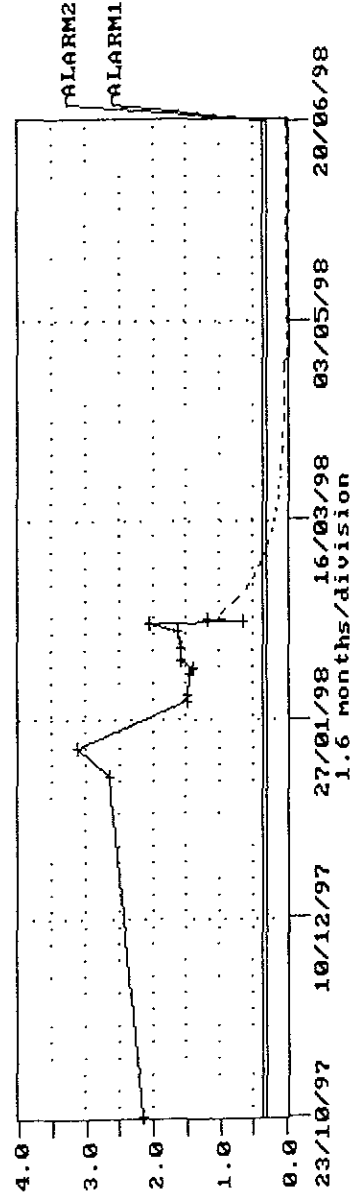
20/02/98 MODULO C  
8:25:00 AM  
IRD Mechanalysis

X value: 300.00  
Y value: 0.046056

IN/S Peak Lin



IN/S Peak Lin



Description: VENT. 4H 3500 RPM  
 MACHINE: V. CICLON B 10 TRAIN: ELASTICO # 10 4 Horizontal  
 POINT ID: VENTILADOR Point: 00672

## 6.2 TERMOGRAFIA INFRARROJA

Otro equipo de apoyo para el sistema de Mantenimiento Predictivo es la termografía infrarroja que juega un rol cada vez más importante en las tareas de mantenimiento. Esta técnica de producir imágenes (denominadas termogramas) a partir de la radiación térmica invisible que emiten los objetos, sirve al ingeniero de mantenimiento en dos aspectos.

Es un medio que permite identificar, sin contacto alguno, componentes eléctricos y mecánicos más calientes de lo que deberían estar (a menudo una indicación de áreas de falla inminente) e indica también pérdidas excesivas de calor que usualmente son síntomas de aislación defectuosa o inadecuada.

El uso de la termografía infrarroja permite la reducción de los tiempos de parada al minimizar la probabilidad de detecciones imprevistas o no programadas, y gracias al aporte que brinda en cuanto a la planificación de las reparaciones programadas y del mantenimiento. Los beneficios de la reducción de costos a partir del uso de esta tecnología incluyen ahorros de energía, protección de equipos costosos, reacción de las primas de seguros, velocidad de inspección y diagnóstico, chequeos post-reparación, etc.

La termografía infrarroja permite incrementar el tiempo de producción maximizando la disponibilidad de equipos, confirmando la confiabilidad de los nuevos equipos y señalando los puntos de fallas. La termografía infrarroja incrementa la seguridad al detectar diseños o materiales defectuosos y también mediante el monitoreo de procesos de alto riesgo.

Es importante que para obtener un resultado efectivo en la inspección de la termografía infrarroja, no se necesita un camarógrafo experto. Lo que sí reviste importancia es que el usuario está familiarizando con los procesos y principios de operación del equipo a inspeccionar. ¿Cuáles son las tareas de mantenimiento preventivo y predictivo en las cuales la termografía infrarroja tiene tanto éxito? Como se verá a continuación, se le ha dividido en 5 áreas.

- Eléctrica
- Mecánica
- Refractario/aislación
- Sistema de vapor
- Construcción y techados

## ELECTRICA

Una inspección de la termografía infrarroja de equipo eléctrico identificara problemas causados por las relaciones corriente/resistencia. Generalmente, un punto caliente en un circuito eléctrico se origina por una conexión floja, corroída, oxidada o bien por falla del componente en si. Los candidatos para una inspección eléctrica de la termografía infrarroja son las líneas de transmisión aéreas, subestaciones, transformadores, bancos de tiristores, dispositivos de operación de circuitos, llaves, fusibles, interruptores, equipos de control, motores y centros de control de motores. Calor generado en el punto de aumento de resistencia es evacuado por el conductor adyacente y el aire. Cuando esto ocurre, el termograma mostrara una área caliente en la conexión y una disminución gradual de la temperatura a medida que aumenta la distancia desde la conexión. Pero no todos los sobrecalentamientos eléctricos son causados por un aumento de resistencia. En un sistema trifasico, por ejemplo, un pequeño cambio en el flujo de corriente puede resultar en una diferencia considerable en la cantidad de calor generado. En este caso, el sobrecalentamiento aparecerá al inspector como una temperatura constante a lo largo de todo el conector en este caso la tecnología de la termografía infrarroja puede ser usada para mantenimiento predictivo donde la resistencia es regularmente constante, como en el caso de las conexiones eléctricas fijas.

## MECÁNICA

Las aplicaciones mecánicas usualmente involucran equipo rotante. El exceso de calor puede ser generado por la fricción causada por cojinetes defectuosos, lubricación inadecuada, desalineación, maltrato y desgaste natural.

El equipamiento que puede ser chequeado mediante la termografía infrarroja incluye engranes, ejes, acoplamientos, correas de transmisión, poleas sistema de transmisión por cadena, transportadores, compresores de aire, bombas de vacío y conexiones a engranajes.

El gran valor de la termografía infrarroja en las inspecciones mecánicas es el ahorro de tiempo a partir de la indicación clara del área del problema más que la indicación de la causa del calentamiento en si. Otros métodos de inspección, como el análisis por vibración o por pulsos de choque, pueden ser usados posteriormente para encontrar la causa del problema.

Para ciertos componentes electromecánicos la termografía es la única técnica de inspección que se necesita para determinar si son necesarios el mantenimiento o las reparaciones. Por ejemplo un termograma indica puntos calientes en las escobillas de alimentación de un motor. Esto es una indicación de falta de contacto debido a desgaste desigual, y muestra la necesidad de rectificar el colector.

#### **MATERIALES REFRACTARIOS/AISLANTES.**

Este tipo de inspección en refractarios y aislaciones se basa en que si existe una temperatura uniforme dentro de un recipiente, entonces la temperatura superficial externa es una función directa de la conducción de calor a través de la aislacion y de pared externa. Tanto la humedad que pudiera ver en la aislacion como así también un desgaste desigual en el refractario, son fácilmente identificados y localizados en los termogramas como un punto caliente debido a la conductancia calórica no uniforme desde el interior del recipiente hacia su superficie exterior.

Una inspección de refractario/aislación puede incluir hornos continuos, hornos para tratamientos térmicos, secadores, estufas, calderas, cucharas de colada, tanques de almacenamiento a temperatura y tuberías aisladas.

Sin embargo, muchas muestras térmicas irregulares y puntos calientes, no necesariamente son productos de condiciones de falla o avería, como es el caso de los puentes térmicos ante la presencia de variaciones estructurales (agujeros pasahombres, bocas de inspección, etc.). En general estas condiciones son fácilmente identificables si el inspector está familiarizado con la construcción del sistema.

La termografía infrarroja también puede utilizarse para determinar la eficiencia de los equipos de calentamiento midiendo la energía ingresante y saliente de los mismos. Estas mediciones se utilizan para optimizar el balance calórico, el cual estará afectado por las veces que el equipo es abierto y cerrado para la carga y descarga, la presencia de puertas abiertas cuando el aire externo es tirado a través de la cámara del recipiente y la relación aire/combustible.

Prescindiendo del propósito de la inspección refractario/aislación, el procedimiento es siempre el mismo. Normalmente, se obtiene un mapa térmico de la superficie inspeccionada a partir de un mosaico de termogramas de áreas adyacentes. El termograma de la tapa es un mosaico de un descargador, creado a partir del uso de la función de corte y ensamble de un software especial.

Otra razón práctica para realizar una inspección precoz es que la responsabilidad financiera de cualquier reparación o modificación que se requieran, usualmente recae en el proveedor del equipo durante el periodo de puesta en servicio. Este fue el caso de una industria química durante una inspección de tuberías nuevas de transporte de producto aisladas. Con la termografía infrarroja se descubrieron conexiones falladas, las cuales fueron corregidas sin costo alguno para la empresa. De no haber sido detectado, el problema no se hubiese manifestado hasta pasado un año o más, y las costosas reparaciones deberían haber sido afrontadas por la empresa.

Las inspecciones de la termografía infrarroja regulares, especialmente antes de una parada programada permiten optimizar la contratación de personal, racionalizar tiempo y materiales, y reducir significativamente el tiempo de parada.

## **SISTEMA DE VAPOR**

Una inspección de la termografía infrarroja puede ser altamente efectiva en la localización de pérdidas en líneas de vapor, defectos de aislación en líneas de distribución de vapor y trampas de vapor defectuosas. La termografía también permite grandes ahorros de tiempo y dinero al localizar pérdidas en líneas de vapor subterráneas.

Las líneas de vapor aéreas son fácilmente inspeccionadas mientras el operador camina por debajo de ellas siguiendo la trayectoria del sistema. Las líneas subterráneas son también viables de inspeccionar mediante la termografía, aunque bajo ciertas condiciones. A medida que aumenta la densidad del material que se encuentra sobre las líneas enterradas, aumenta la transferencia de calor y pequeñas diferencias de temperatura indicaran la trayectoria de la línea o bien posibles problemas. Los inspectores deberán estar alertados sobre estos.

Cuando un punto caliente es detectado visualmente, se efectúa una marca sobre la línea o bien sobre el terreno. Una trampa de vapor defectuosa es identificada observando la caída de temperatura entre su entrada y su salida. Si pasara vapor vivo a través del diafragma de la trampa está estaría funcionando incorrectamente. Debe notarse que las trampas varían en sus características constructivas (algunas por ejemplo, descargan condensado a intervalos periódicos lo que significa que la inspección durante estos periodos podrían plantear algunas dificultades). Este es otro ejemplo de por que el inspector debe de estar familiarizado con el tipo de equipo que está inspeccionando.

## CONSTRUCCIÓN Y TECHADO

La termografía infrarroja puede utilizarse para reducir las pérdidas de energía en edificios ocasionada por un pobre diseño o bien por formación de humedad debido a aislaciones defectuosas o inadecuadas. Su capacidad para señalar con exactitud la fuente de defectos que son origen de pérdidas sustanciales de energía, puede jugar un rol importante al incrementar la eficiencia energética.

La utilización de la termografía infrarroja para identificar fallas de edificios y techos la reparación de las mismas antes de que los daños sean mayores, también servirá para proteger la inversión en equipos y material contenidos dentro de edificio (una necesidad económica). Las condensaciones producidas dentro de la pared aislante defectuosa, conducirán a un deterioro progresivo de enormes costos de reparación. Si los daños llegan hacer suficientemente serios, podrían incluso ser imposible corregirlos.

La humedad encerrada en un techo modular de un edificio es la principal fuente de perdida de energía y deterioro de la aislacion. La capacidad de la termografía infrarroja para ubicar con exactitud los defectos, produce sustancialmente los costos de reparación de un techo defectuoso o con perdidas. Es mucho menos costoso reparar o remplazar una sección de un techo, que tener que reconstruirlo completamente.

Al igual que en las inspecciones de la termografía infrarroja de edificios, las inspecciones de techos deben ser realizadas por personal conocedor del diseño y construcción del edificio y bajo condiciones apropiadas. Una inspección de techo, preferentemente realizada al caer la obscuridad luego de un día soleado, permitirá apreciar las variaciones de densidad y espesor del



balasto y las capas de fieltro. Estas variaciones pueden generar diferencias térmicas que no estarían indicando verdaderamente la presencia de humedad en el techo.

Los techos son zonas de trabajo peligrosas, por lo cual es recomendable realizar las inspecciones y cualquier otra tarea en general, acompañada por otra persona, especialmente durante la noche.

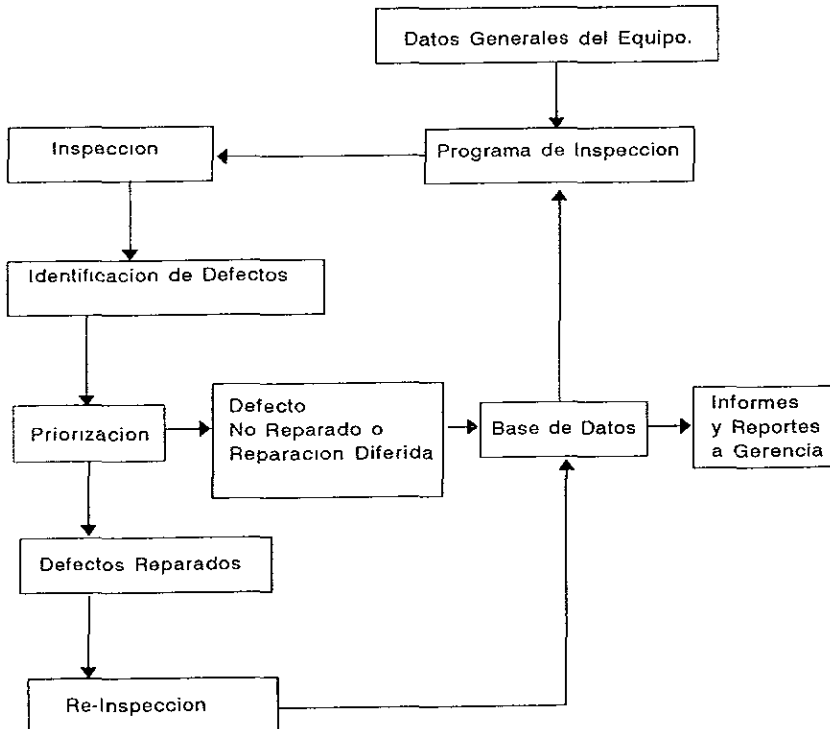
#### **ESTABLECIMIENTO DEL MONITOREO BASADO EN LA CONDICIÓN.**

El establecimiento de un programa de mantenimiento preventivo - predictivo efectivo utilizando la termografía infrarroja para el monitoreo de condición, permite mejorar la productividad del equipamiento de planta aumentando su disponibilidad de dos maneras: evitando paradas fuera de programas y disminuyendo el tiempo necesario para efectuar las reparaciones. El siguiente esquema de la figura bosqueja un ciclo de monitoreo basado en la condición adaptada a la mayoría de las situaciones industriales. Es fundamental para el ciclo tener en claro cuales serán los equipos a controlar o monitorizar, de acuerdo a su importancia estratégica, disponibilidad de equipos de reemplazos, antigüedad del equipo, normas de seguridad y su ubicación en la planta. Con esta información, se puede establecer un programa de inspección. Una vez que la inspección es llevada a cabo y después de haberse identificado un número de defectos, los mismos deben ser clasificados y priorizados a partir de los resultados del diagnóstico obtenido, el cual tiene en cuenta diversos factores como los parámetros de control preestablecidos. Por ejemplo, cada defecto debe tener asignado un nivel de prioridad que indique si se requiere acción inmediata, si se requiere acción pero no en forma urgente, o si el defecto debe ser mantenido bajo control solamente. Basándose en la disponibilidad de material de reemplazo y repuestos, el mantenimiento programado previamente, y el efecto que una parada no programada tendría sobre el equipo y otros equipos de la planta, puede entonces determinarse que la reparación de algunos defectos es factible de ser diferida para más adelante. Esta decisión, como así también los detalles sobre todo los defectos identificados, son introducidos en una base de datos. Una vez que el programa de reparaciones es completado, las ordenes de trabajo mostrarán que algunos defectos no pudieron ser reparados, ya sea por inaccesibilidad del equipo a reparar u otros factores. Una vez más, esta información es introducida en la base de datos; las reparaciones que han sido complementadas son luego reinspeccionadas. Esta reinspección probablemente mostrará que algunos

defectos todavía requieren acción, ya sea por ajuste o por instalación incorrectos, o bien debido a un pobre diseño de los componentes o defectos de fabricación. Nuevamente está información se envía a la base de datos y el ciclo está lista para ser repetido.

En adición a la preparación del nuevo ciclo de inspección, la información en la base de datos proporciona estadísticas sobre las horas de reparación; tipo de reparación y componentes reemplazados; entrada para el control de stock de repuestos; y datos que pueden ser usados para el calculo del ciclo de vida de los equipos y componentes. También pueden determinarse la eficiencia de las reparaciones basándose en el número de defectos corregidos en cada clasificación. El programa monitorizado resultara en una reducción de número de defectos, especialmente los más serios. Finalmente, los datos generados también proveen realimentación para poder efectuar una evaluación instantánea y continua del funcionamiento del equipo de mantenimiento.

Sistema de Monitorizado Basado en la Condicion



### 6.3 LÁMPARA ESTROBOSCÓPICA

La capacidad de determinar el movimiento relativo entre las varias piezas de una máquina es una valiosa herramienta para diagnosticar los problemas de vibración.

En presencia de piezas que vibran rápidamente, el ojo humano tiene dificultades al tratar de seguir los detalles del movimiento. Normalmente, por este motivo, una pieza que vibra parecerá borrosa o indistinta. Sin embargo, estudios en “cámara lenta”, hechos con una luz estroboscópica, proporciona un medio para la observación directa de condiciones de vibración dinámicas.

Usando una luz estroboscópica, se regula la frecuencia de destello cerca de la frecuencia de movimiento de las piezas vibrantes. De esta forma, las piezas parecerán moverse lentamente. Si un eje estuviera girando a 1800 r.p.m., por ejemplo, y se regula el oscilador interno a 1780 cpm, el eje bajo la luz estroboscópica, parecerá girar a 20 r.p.m. Si se regula el oscilador a una frecuencia del destello de 1820 cpm el eje parecerá siempre estar girando a 20 r.p.m., pero en sentido contrario.

Reduciendo la velocidad de movimiento podrá observarse el movimiento relativo de varias piezas, permitiendo así apreciar otras condiciones que podrían ser en detrimento para el funcionamiento de la máquina. En un caso, por ejemplo, después de la puesta en marcha de una unidad compuesta de motor y ventilador, con accionamiento directo, se detectó un alto nivel de vibraciones. La observación del acoplamiento en cámara lenta reveló que dicho acoplamiento giraba lentamente hacia adelante y hacia atrás sobre el eje. Una inspección visual después de haber apagado el motor reveló que al instalar el acoplamiento había sido utilizada una cuña de medida inferior a la necesaria. El reemplazo de la cuña con otra de medida correcta eliminó el movimiento del acoplamiento y por lo tanto también eliminó el alto nivel de vibraciones.

## 6.4 ESTETOSCOPIO ELECTRÓNICO

Los ruidos son otro indicio de falla en los equipos, debido a que un equipo en optimas condiciones sus niveles de ruidos son muy bajos en comparación con un equipo con condiciones de falla; para detectar de donde proviene las fuentes de los ruido se utiliza desde, un simple desarmador, un estetoscopio sencillo (una varilla con dos mangueras en las extremos ), hasta los estetoscopios electrónicos más modernos.

Los estetoscopios electrónicos tienen la ventaja de que los ruidos que se captados en el, son separados con un sintonizador el cual en aumento o disminución del ruido puede captar el origen del ruido principal, separándolo de las vibraciones de la máquina ya que el ruido es captado por un sensor y transmitido a un transductor. El transductor convierte las vibraciones en señales eléctricas que son procesadas y amplificadas por la electrónica del instrumento; lo que no se puede hacer con un desarmador o con un estetoscopio sencillo.

El estetoscopio electrónico se compone de un sistema muy sencillo: dos salidas para la señales amplificadas. Una para la conexión de los auriculares, la otra para su conexión aun magnetófono.

La forma de utilización es de la siguiente manera: Se insertar el sensor apropiado en el casquillo roscado del instrumento y se conectan los auriculares. Se presionara suavemente la punta del sensor contra el cuerpo de la máquina que se desee observar. En seguida se conectara el instrumento por medio del control de volumen y se continuara girándolo gradualmente hasta obtener un nivel de sonido satisfactorio. Se puede juzgar la condición de la máquina por la propia experiencia u opinión personal o comparándola con una señal de referencia que debe ser grabada cuando la máquina ha estado funcionando correctamente.

El estetoscopio puede ser usado para localizar el origen de un sonido específico. Comenzando a presionar el sensor contra el cuerpo de la máquina y ajustando el volumen a un nivel en el que el sonido empiece a ser audible. Moviendo el sensor a una nueva posición, será fácil establecer si el sensor se encuentra más cerca o más lejos del origen del sonido.

## 6 5 Osciloscopios

Los analizadores de capacidad completa están diseñados con la capacidad de aceptar un osciloscopio. Un receptáculo adecuado proporciona una señal de corriente alterna que es una reproducción exacta de las vibraciones mecánicas. Las unidades de verificación avanzadas carecen de este dispositivo. Conectando un osciloscopio a dicho receptáculo, se puede observar la forma de onda de la vibraciones virtualmente en cualquier osciloscopio para usos generales puede ser utilizado a este fin.

Muchos de los problemas relacionados con la maquinaria pueden ser identificados por las formas de onda características de las vibraciones que produce.

Otra aplicación del osciloscopio es la medición de las vibraciones transitorias o por impacto. Una amortiguación de los circuitos internos del analizador hace difícil una respuesta por parte del instrumento a señales de vibraciones de corta duración. Los osciloscopios no tienen esa amortiguación incorporada, y puede por lo tanto responden en seguida a amplitudes similares a impulsos de breve duración.

El osciloscopio es también una valiosa ayuda para la evaluación de los datos recabados de los captadores del tipo sin contacto. Unas estrías sobre un eje a veces pueden ocasionar lecturas engañosas de amplitud y frecuencia de vibración por parte de un sensor de no contacto. Si se conecta un osciloscopio al instrumento, se ven en seguida las señales similares a impulsos que son características de las estrías.

## 6.6 Registradores de alta velocidad

Las registradoras de alta velocidad por lo regular son usadas cuando por circunstancias de diseño o cuando no hay forma de tomar datos de vibraciones directamente, por lo cual se tiene que tomar con equipos permanentes para poder llevar un registro del equipo y aun más cuando este equipo es demasiado crítico para el proceso. Un registrador de gráficos, de alta velocidad, o un oscilógrafo registrador pueden ser conectados en el receptáculo del osciloscopio, permitiendo obtener registros permanentes de las formas de onda de las vibraciones. Los registros de este tipo son usualmente hechos para poder estudiar las vibraciones que experimenta variaciones muy rápidas toda vez que se arranca o se detiene una máquina.

## 6.7 Grabadoras de cinta

Las grabadoras de cinta al igual que los registradores, solo son usados en los equipos que son monitoreados permanentemente. Las señales de vibración provenientes del receptáculo de toma del osciloscopio pueden ser registradas también en una grabadora de cinta magnética. De esta forma se puede recopilar datos para ser usados en análisis detallados a ser hechos posteriormente. Muchos usuarios utilizan este método para recabar datos de análisis de máquinas ubicadas en localidades remotas. Las cintas son enviadas a una instalación central, donde se les pasan a través de equipos de análisis que hace la conversión de cinta a registro sobre papel. Posteriormente, analistas entrenados estudian y evalúan los datos para identificar cualquier eventual problema de índole mecánica.

## CAPITULO VII

## CAPITULO VII

### ORGANIZACIÓN DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

La vibración y el ruido se han aceptado por muchos años como índices eficaces del estado de una maquinaria. Miles de compañías sobresalientes a través de la industria tienen programas vigentes en cuanto a la medición del ruido y de la vibración, el análisis y el control de la producción importante y de maquinaria en funcionamiento, con el fin de evitar paros inesperados y averías costosas.

En este capítulo se trata de dar en un resumen los procedimientos que se recomiendan para elaborar e implementar un programa eficaz de mantenimiento predictivo, a base del descubrimiento y análisis de los problemas en formación de la maquinaria por medio de la vibración.

#### 7.1 EL PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

El programa de mantenimiento predictivo es un proyecto coordinado que tiene como fin lograr un servicio largo e interrumpido del equipo esencial de la planta, evitar paros costosos y mantener el funcionamiento productivo y eficaz de la planta.

El programa de mantenimiento predictivo se basa en los siguientes hechos:

- Todas las máquinas vibran y hacen ruido cuando tienen desperfectos mecánicos, ya sean pequeños o grandes.
- La vibración excesiva o un aumento importante en el nivel normal de vibración o ruido de una máquina es una señal que los problemas se han convertido en desperfectos mecánicos.
- Diferentes problemas causan vibración y ruido de manera diferente.
- Las revisiones regulares de vibración y ruido señalan el advenimiento o la presencia de fallas.
- El análisis de vibración identifica a la pieza defectuosa y a la causa del defecto.



Se necesita un programa coordinado para obtener medidas periódicas de vibración y ruido en las máquinas importantes, si se quieren aplicar estos hechos eficazmente. Así se alcanza la primera meta - detectar el problema en sus primeras etapas. Una vez que el problema se ha determinado de esta manera, el análisis de la vibración y el ruido se usa para que se puedan dictar y programar las correcciones.

Se requieren dos habilidades importantes para llevar a cabo un programa de mantenimiento predictivo. La primera es el conocimiento del funcionamiento de las máquinas, sobre los problemas comunes de las mismas y sobre su reparación. La segunda es poder determinar e identificar los problemas mecánicos con exactitud y en sus primeras etapas. La clave de esta habilidad es el análisis y la medición de la vibración y el ruido.

Un programa de Mantenimiento Predictivo (PMP) eficaz es un programa integral de:

- Detección.
- Análisis.
- Corrección.

Se trata de una secuencia lógica de pasos. El programa le ayuda primero a detectar el inicio de un problema. Luego le proporciona los medios para analizar el problema con el fin de determinar su causa. Y, por último, le da la posibilidad de corregir el problema con efectividad y eficiencia en un momento oportuno.

## **Detección**

El primer paso del programa consiste en la **DETECCIÓN** del problema. Esto significa prestar suma atención al nivel de vibración de una máquina y tomar nota de cualquier incremento - pues éste es el indicio de un problema mecánico en ciernes. Todas las máquinas incluidas en el programa de mantenimiento predictivo deberán ser sometidas a pruebas o verificación de esta manera, de acuerdo con un cronograma específico. Algunos tipos de máquinas podrán ser destinadas a la verificación una vez cada dos meses, algunas a intervalos de varias semanas, otras todos los días y en el caso de máquinas particularmente críticas, la verificación podrá efectuarse en forma continua.

## Análisis

En el contexto del programa integral para control de las condiciones de las máquinas, la medición de vibraciones mediante vibrometro, colector de datos o monitor es únicamente la parte que corresponde a la detección. Una vez detectado el problema, el paso siguiente consiste en determinar la naturaleza del mismo. Es ésta la finalidad del **ANÁLISIS** - es decir, localizar con precisión un problema específico identificado los síntomas particulares de la vibración de la máquina, es decir, su "firma" típica de vibración.

El análisis de las vibraciones de las máquinas requiere un instrumento especial, como el analizador - balanceador. Este instrumento, sin embargo, cuenta con todas las características para medir la vibración en sus detalles más minuciosos. El problema puede ser identificado comparando dichas lecturas detalladas con otra información acerca de la máquina, por ejemplo: la velocidad de funcionamiento, tipos de rodamientos y acoplamientos, e historial de las vibraciones registradas en el pasado.

Una vez que se haya analizado la causa de un problema de vibración, el prepararse para tomar las medidas correctivas necesarias es una cuestión clara y simple.

## Corrección

Cuando se hayan seguido los pasos básicos de un Programa de Mantenimiento Predictivo (PMP) para detectar y analizar un problema en su fase inicial, podrá organizar la **CORRECCIÓN** para el periodo que mejor convenga al cronograma de operaciones de la compañía. Averías de la maquinaria. Tales como rodamientos desgastados, engranajes defectuosos, holgura de piezas o falta de alineamiento, pueden ser corregidas mediante procedimientos bien conocidos por el personal de mantenimiento en todo el sector. Sin embargo, la corrección de problemas como el desbalance y la resonancia exige habilidades y conocimientos especializado.

## 7.2 IMPORTANCIA DE LAS MÁQUINAS DENTRO DE UNA PLANTA.

**Máquinas críticas.-** Se considera Máquina Crítica todas aquellas máquinas que en el momento de parar, para toda la producción.

**Máquinas de proceso.-** Son aquellas máquinas que al parar, para partes del proceso.

**Máquinas secundarias.-** Son aquellas que podemos parar sin que esto afecte la producción o proceso.

De acuerdo a lo anterior y dependiendo de la importancia es recomendable que la inspección de rutina se efectue de acuerdo a la siguiente tabla, pero no necesariamente se tiene que llevar así.

**Máquinas críticas.-** Inspección diaria, dos veces por semana o por lo menos una vez por semana.

**Máquinas de proceso.-** Inspección una vez por semana o cada quince días.

**Máquinas secundarias.-** Una vez por quincena, cada tres semanas o una vez por mes.

Ahora bien se puede considera que si una máquina tiene un comportamiento uniforme es decir una tendencia plana o con una pendiente muy baja es posible extender los periodos de inspección al caso contrario si observamos una máquina con una tendencia exponencial en estos casos es recomendable acortar los periodos de chequeo.

Teniendo en mente estos conceptos pasaremos a ver como agrupar las máquinas en una ruta para su rutina periódica.

Se le denomina RUTA a todas aquellas máquinas que pueden ser agrupadas para ser chequeadas en un día específico.

Para poder agrupar las máquinas es necesario que se consideren los siguientes factores:

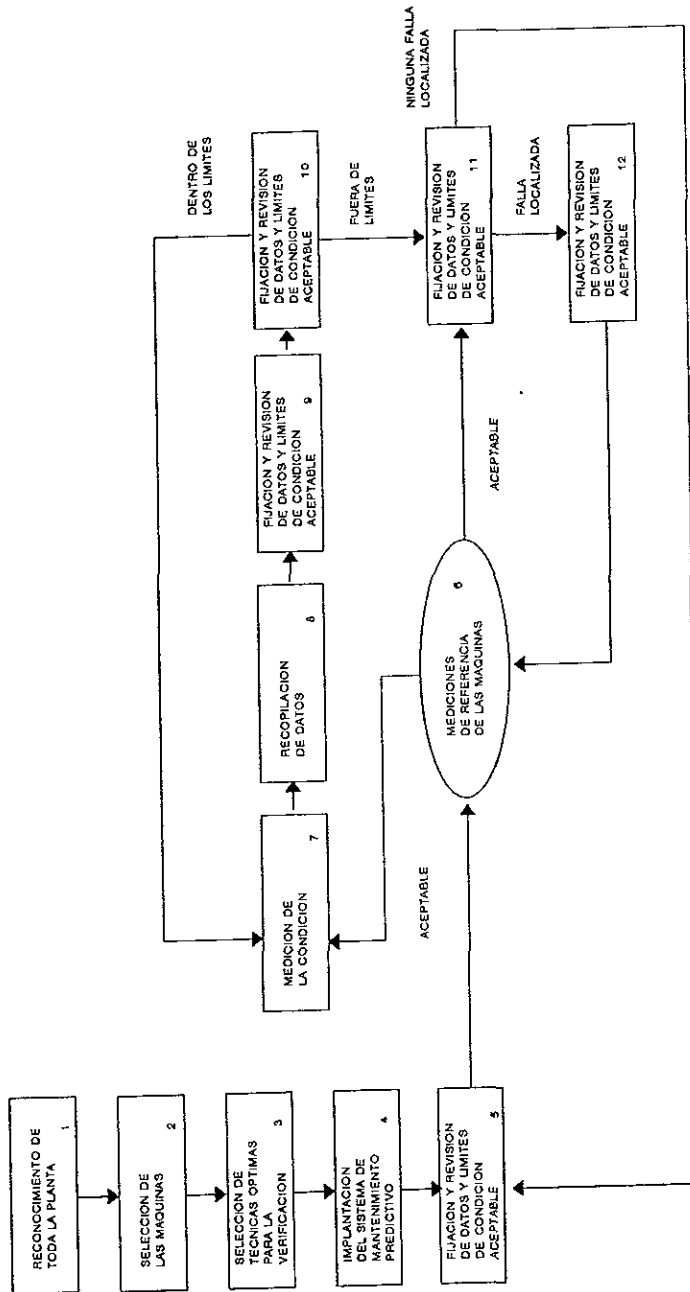
- a) En que punto se va a iniciar la ruta y cual es la máquina más cercana (rutas críticas).
- b) Cual es la máquina que le sigue en cercanía y así sucesivamente.
- c) Considere el tiempo que se lleva de un punto a otro.
- d) Considere la capacidad del personal para poder llevar a cabo la colección de datos en un tiempo normal de una jornada de trabajo.
- e) No pretender hacer toda la colección en un solo día, hay que repartirla a lo largo de la semana, para un mejor control y que la colección de datos no se haga extremadamente pesada tenga en mente que después de tomar los datos es necesario descargar estos a la computadora y muy probablemente se desee ver cuales son las máquinas que se encuentran en una condición de alarma, para determinar cual es el siguiente paso a seguir.

### **7.3 COMO ORGANIZAR UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

El mantenimiento predictivo es un método sistemático de verificación y observación de las tendencias del equipo rotativo en forma programada y regular con el fin de determinar el estado de las máquinas sujetas a deterioro. La identificación de tendencias y el diagnostico mediante la detección con la máquina en línea proporcionan un aviso temprano, eliminando prácticamente la necesidad de un desarmado e inspección periódicos y la posibilidad de una falla inesperada que obligue a la paralización del equipo.

Hay doce pasos esenciales involucrados en la organización de un Programa de mantenimiento Predictivo. El diagrama de flujo representado en la Figura 7-1 ilustra la secuencia de dichos pasos.

Figura 7-1  
Diagrama de flujo del Programa de Mantenimiento Predictivo



## 1. Reconocimiento de la planta

El primer paso consiste en determinar la factibilidad de establecer un PMP. Bajo un punto de vista ideal, éste debería estar basado en un análisis de la condición de la maquinaria existente en la planta en términos de disponibilidad, confiabilidad, tiempos muertos, etc. Estas informaciones raramente están disponibles; sin embargo, la factibilidad de un mantenimiento en base a la condición es juzgada de acuerdo a la cantidad y al tipo de máquinas, además de la vasta experiencia con que cuenta los consultores del PMP.

## 2. Selección de las máquinas

El objetivo de este paso es abarcar una cantidad manejable de máquinas, tomando en cuenta los requisitos de personal, los cronogramas de producción, el costo de los tiempos muertos, etc.

## 3. Selección de técnicas óptimas para la verificación de la condición

Esta etapa se ocupa del QUE, COMO, CUANDO y DONDE efectuar la verificación de la condición.

**¿QUE medir?** En realidad existe un parámetro que es indicativo de la condición de la máquina y del avance de una falla.

**¿COMO medir?** Existen a disposición instrumentos y técnicas capaces de comprobar el parámetro.

**¿CUANDO medir?** La técnica de verificación debe poder proporcionar un periodo útil para la detección de la falla - es decir, el tiempo de aviso anticipado entre la confirmación de un problema y una eventual falla catastrófica de la máquina. Este hecho determinará la frecuencia de la verificación.

**¿DONDE medir?** El punto de la medición es de suma importancia para obtener una detección temprana de los defectos de la máquina.

#### 4. Implantación del sistema de mantenimiento predictivo

Una vez establecidas las técnicas óptimas para la verificación de cada unidad de la planta, las mismas son integradas en un programa racional que comprende:

- La definición de cronogramas de inspección como se muestra en la Figura 7-2.

Figura 7-2

Hoja de programación para un programa de Mantenimiento Predictivo, para detallar las máquinas individuales a incluir en el programa.

#### HOJA DE PROGRAMACION

Planta: Transmisiones Monterrey

Máquina	Localización	Rango de Velocidad	Nº de hoja guía PMP	Tolerancia de la Vibración.	Frecuencia Inspección
# 1 Bomba Tq. Elevado	Nivel "B"	3600	471		
# 2 Bomba Tq. Elevado	Nivel "B"	3600	471		
# 3 Bomba Tq. Elevado	Nivel "B"	3600	471		
# 4 Bomba Tq. Elevado	Nivel "B"	3600	471		
# 5 Bomba Tq. Elevado	Nivel "B"	3600	471		
# 1 Ventilador Centrifugo	Nivel 7	1200	462		
# 2 Ventilador Centrifugo	Nivel 7	1200	462		
# 3 Ventilador Centrifugo	Nivel 7	1200	462		
# 4 Ventilador Centrifugo	Nivel 7	1200	462		
# 5 Ventilador Centrifugo	Nivel 7	1200	462		
# 1 Ventilador Corte Long.	Nivel 1	1100	461		
# 2 Ventilador Corte Long.	Nivel 1	1100	461		
# 3 Ventilador Corte Long.	Nivel 1	1100	461		
# 4 Ventilador Corte Long.	Nivel 1	1100	461		
# 5 Ventilador Corte Long.	Nivel 1	1100	461		
# 1 Turbo Generador	Nivel 2	3600	470		
# 2 Turbo Generador	Nivel 2	3600	470		
# 3 Turbo Generador	Nivel 2	3600	470		
# 4 Turbo Generador	Nivel 2	3600	470		
# 5 Turbo Generador	Nivel 2	3600	470		
Compresor Centrifugo	Nivel 2	5300	503		
# 1 Bomba Sum. Agua	Caseta Bbas.	1800	530		
# 2 Bomba Sum. Agua	Caseta Bbas.	1800	530		
# 3 Bomba Sum. Agua	Caseta Bbas.	1800	530		
# 4 Bomba Sum. Agua	Caseta Bbas.	1800	530		
# 5 Bomba Sum. Agua	Caseta Bbas.	1800	530		

Dentro de este paso se encuentran las siguientes pausas que se deben seguir para implantar un Programa de Mantenimiento Predictivo. Estos pasos son sencillos si se toman uno por uno. Hay que tener presente que la meta es de encontrar e identificar el problema en su primer etapa de formación antes de que ocurra avería en la maquinaria.

- **Se enumeran las máquinas esenciales que se incluirán en el programa**

La lista de las máquinas incluidas en el programa debe incluir aquellas máquinas esenciales para la producción o complementarias a la producción. El proceso que se recomienda para catalogar las zonas de medición de la vibración y el ruido es el siguiente: Primero se traza un plano de piso detallado de la planta, en donde se indica la posición de la maquinaria, las estaciones de los trabajadores y otras zonas de trabajo. Luego se divide el plano de piso en zonas practicas como se indica en la Figura 7-3 y 7-4. Está división se puede hacer a base de divisiones naturales dentro de la planta como por ejemplo, marcando cada área o cuarto como una zona, o trazando zonas imaginarias separadas por pasillos, transportadores, armarios de almacenamiento u otros separadores naturales. El plano de la planta se divide en zonas para simplificar la toma de medidas y la documentación del registro.

- **Se seleccionan los puntos de inspección regular de vibración.**

Un programa eficaz de mantenimiento predictivo establece revisiones regulares de vibración y ruido, para descubrir los problemas en sus primeras etapas, antes que ocurran los desperfectos. El problema consiste en una divergencia de lo que se considera normal. Por lo tanto, la meta es de elegir los puntos de inspección que representan el estado normal de la máquina. Los puntos que se eligen deben ser los que probablemente indicaran un aumento cuando se presente el problema.

Los puntos apropiados de inspección regular, generalmente se pueden determinar si se evalúa el registro de medidas regulares en una hoja de información. Este generalmente tendrá un punto de medición en cada componente (Motor, bomba, Caja de cambios, etc.) del sistema. Cada punto de inspección regular se debe indicar claramente para asegurar que todos los registros posteriores se realicen precisamente en el mismo lugar.



Figura 7-3  
Plano de Planta indicando los módulos existentes en ella.

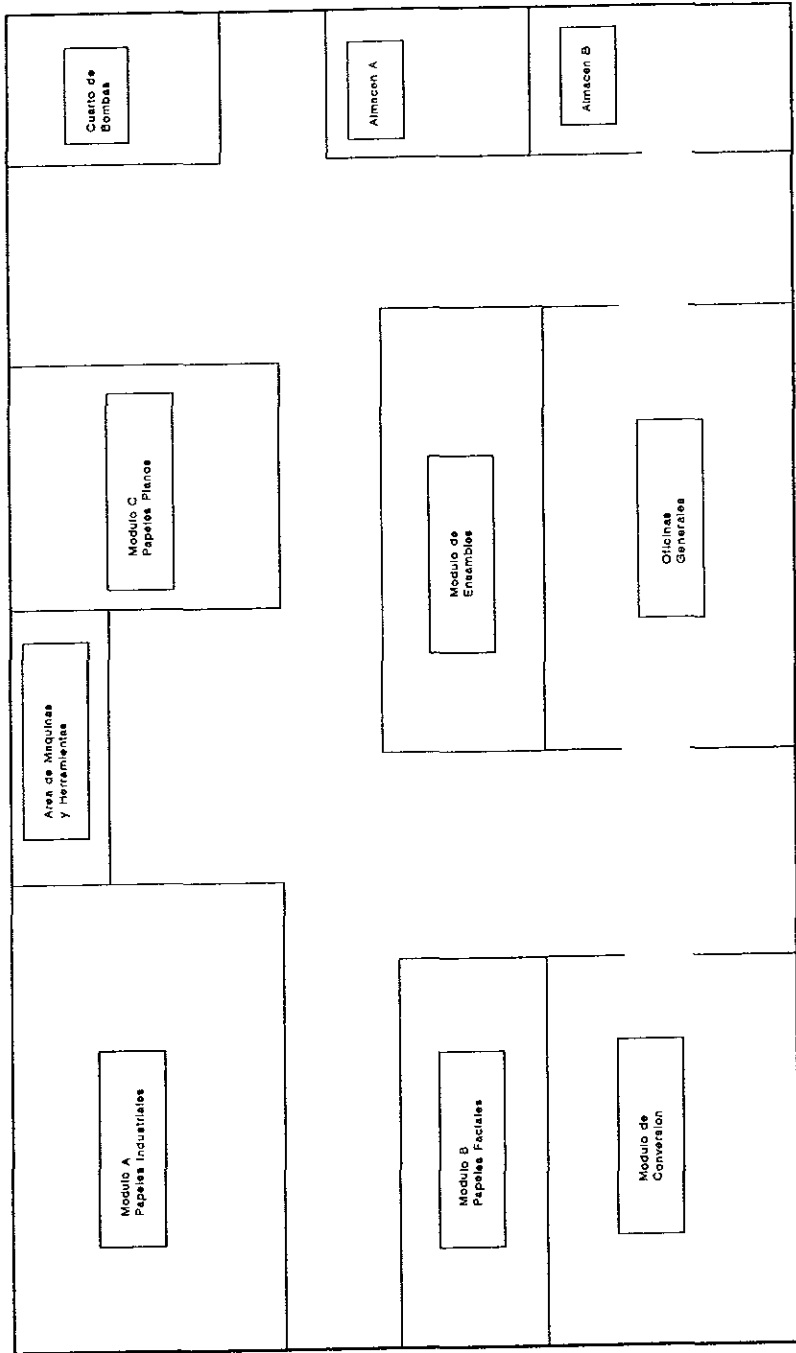
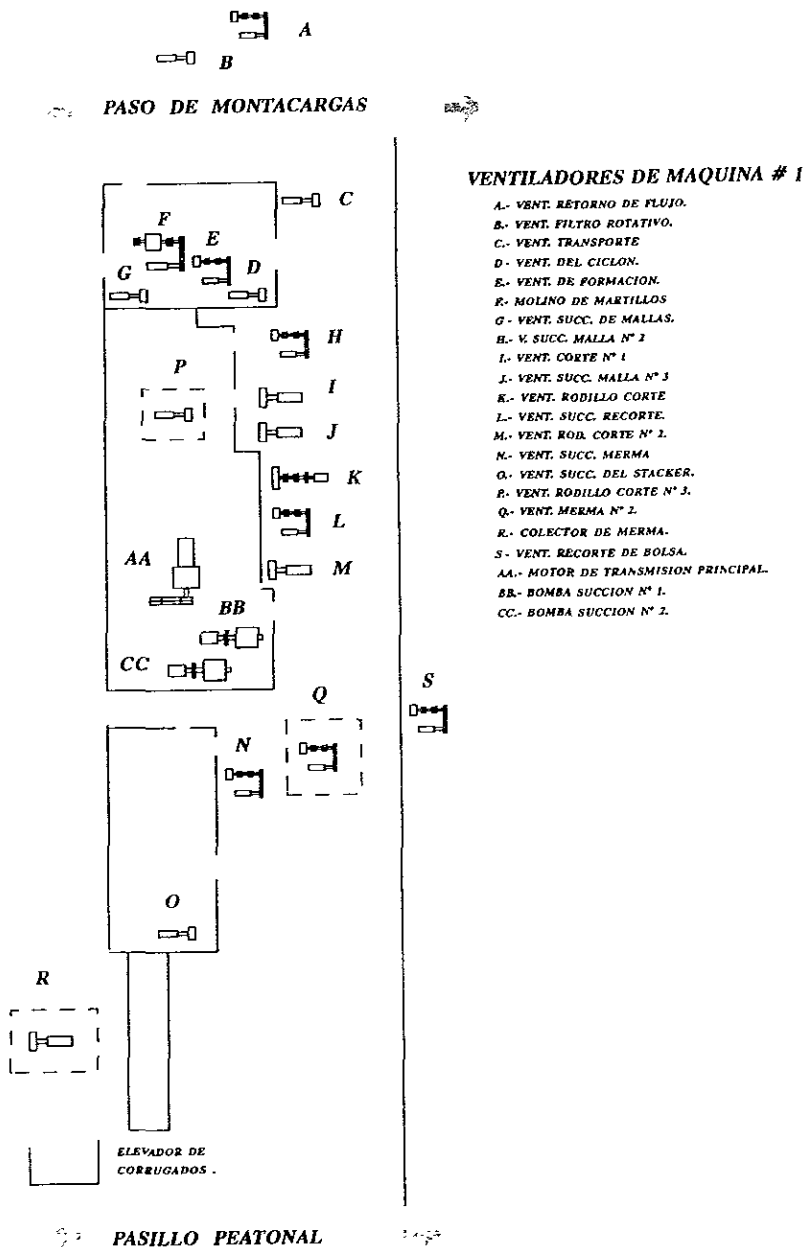


FIGURA 7-4

Desglose de los equipos que componen una maquina



Una mancha de pintura u otra seña de identificación en la máquina son las marcas que se pueden realizar para diferenciar el punto de inspección donde debe asistir el personal a cargo de la toma de las revisiones regulares. Este tipo de puntos generalmente son tomados en los puntos de apoyo de la máquina (las chumaceras o alojamientos de los rodamientos) que son los que nos identifican la presencia de frecuencias de vibración muy altas o muy bajas.

- **Se elige el intervalo para efectuar revisiones regulares de vibración.**

Las inspecciones regulares de vibración y ruido tiene como fin el descubrimiento del problema en sus primeras etapas. El intervalo entre inspecciones debe ser suficientemente corto para que permita garantizar razonablemente que la formación grave del problema no se pase por alto. Por otro lado no es económico programar inspecciones regulares con mucha frecuencia.

Se debe determinar un termino medio razonable. Al momento de realizar las inspecciones se debe de tomar en cuenta el personal disponible, el numero de máquinas, los puntos de inspección y el intervalo entre inspecciones. El tipo de trabajo que realiza una máquina hace un papel muy importante al elegir el intervalo entre las inspecciones regulares de vibración. Por ejemplo, Una afiladora de precisión que produce acabados superfinos puede que requiera una inspección de vibración después de cada labrado de la rueda para evitar resquebrajaduras indeseables.

Máquinas de alta velocidad tales como compresores centrífugos y las turbinas de gas y vapor a menudo requieren revisiones diarias, tomando en cuenta su tamaño, caballaje, velocidad y por supuesto la importancia del aparato para el funcionamiento de la empresa. De cualquier forma el registro previo al mantenimiento de la máquina es el mejor indicador que se usa para elegir el intervalo entre las revisiones regulares. Si las fallas han sido frecuentes, se deben de hacer revisiones frecuentes en las primeras etapas del programa y el intervalo se deberá aumentar o reducir para cada máquina según la información que se haya acumulado.

- **Se realiza un sistema sencillo de recolección de datos.**

El sistema que se usa para transmitir los datos importantes al ejecutivo debe ser eficaz sin ser excesivo. Por lo tanto, el papeleo se debe reducir lo más que se pueda.

El formulario Historial de la vibración que se muestra en la Figura 7-5, es llenado para cada máquina de la compañía y es muy valioso por la información que contiene. El formulario identifica a la máquina, su velocidad rotativa y contiene el resultado de las medidas iniciales de vibración. Estos datos son usados para determinar los niveles normales de vibración, los puntos de inspección regular y contiene la información que se necesita para efectuar comparaciones de análisis futuros de la máquina. Este historial de vibración debidamente llenado es parte fija del sistema de registro y cubre los siguientes cuatro aspectos:

- Recopilación de datos.
- Registro de datos.
- Análisis de datos.
- Redacción y presentación de informes.

- **Se requiere un programa de entrenamiento para el personal.**

El ultimo paso en este punto es el capacitar al personal que se encargue del programa. Los que son elegidos para realizar las revisiones de vibración, deben de conocer la disposición de la planta entera así como la localización de cada máquina. También deben de estar en condiciones para identificar cualquier condición anormal que surja.

Los mecánicos que trabajan en el mantenimiento y los operarios de la maquinaria que sean destacados para realizar las revisiones periódicas deben de conocer el programa, como funciona y los objetivos que persigue el Departamento de Mantenimiento. Además, a los que se seleccionen se les tiene que enseñar, a tomar las medidas de vibración, donde colocar el sensor, donde colocar los datos y desde luego, que hacer con los datos después de compilados.

Figura 7-5  
Formulario Historial de vibraciones.

I R D. MECHANALYSIS, INC. NOMBRE DE LA PLANTA: <u>ACEROS S.A.</u> NOMBRE DE LA MÁQUINA: <u>bomba principal</u> de liquido refrigerante FECHA: <u>10/25/93</u> REVISADO POR: <u>F.G.R.</u> EQUIPO DE INSPECCIÓN: <u>IRD MODEL 350</u>														
PICKUP		FILTRO FUERA						FILTRO DENTRO						
PUNTO	POS	RUIDO		DESPLAZ		VELOCIDAD		DISP	VEL.	VEL.	VEL.	VEL.	VEL.	
		dB(C)	CPM	MILS	CPM	IN/SEC	CPM	450	900	1725	3450	27 K	71 K	
A	H			1.1	3550	0.21	3550	0.8	0.01	11	0.02	-	-	
	V			0.7	3550	0.14	3550	-	0.03	0.09/11	0.015	-	-	
	A			0.3	3550	0.06	3500	0.03	0.02	0.04/10	0.01	-	0.01	
B	H			0.9	3550	0.19	3550	0.01	0.06	0.12/15	0.03	-	-	
	V			0.6	3550	0.12	3550	-	0.03	0.06/09	0.025	-	0.01	
	A			0.28	3550	0.04	*****	0.03	0.01	0.02	0.01	-	0.015	
C	H			1.2	3550	0.25	3550	0.03	0.08	0.015	0.01	0.52	0.03	
	V			1.6	*****	0.43	7100	0.02	0.41	0.01	0.01	0.47	0.02	
	A			0.8	*****	0.16	3550	0.02	0.04	-	-	0.4	0.02	
D	H			1.5	3550	0.28	3550	0.04	0.05	0.02	-	0.01	0.025	
	V			1.8	*****	0.55	7100	0.06	0.46	0.01	-	0.02	0.02	
	A			0.9	*****	0.15	3550	0.02	0.07	0.01	-	0.01	0.01	

Entre el personal seleccionado para realizar el análisis de vibración, se cuenta a menudo los ingenieros, el personal de mantenimiento y los supervisores. Los asignados a esta misión deben, antes que nada, tener conocimientos muy buenos de la maquinaria rotativa, conocer la índole de *dificultad que afectan* a las máquinas así como el modo de corregirlas. El análisis requiere que uno sea metódico, paciente y este deseoso de cumplir con el cometido a cabalidad.

Además de la capacitación del personal asociado directamente con el *programa de mantenimiento Predictivo*, se aconseja que se ventilen asuntos tales como métodos, procedimientos y sobre todo objetivos con los jefes de departamento y los supervisores, para obtener su comprensión y colaboración, lo que es indispensable en un Programa para que tenga éxito.

##### **5. Fijación y revisión de datos y límites de condición aceptable.**

La finalidad de este paso es establecer los niveles “normales” de los parámetros para la verificación de la condición, que presenten una condición aceptable de la máquina. Esto, en realidad puede establecerse únicamente en base a la *experiencia* y a los datos históricos. Sin embargo en las etapas iniciales cuando no se dispone de dichos datos, podrán utilizarse como guía las recomendaciones del fabricante y las tablas de índices generales de severidad correspondientes.

En base a dichos niveles “normales”, se establecerán límites de acción que representen un deterioro significativo de la condición y proporcionen una advertencia razonable de falla inminente.

Es esencial que los límites fijados sean revisados según lo dicten la *experiencia* y los *datos históricos*. Aunque la experiencia y los factores tales como seguridad, costo de mano de obra, costo de paro y la importancia del funcionamiento de una máquina se deben de considerar en términos de las ganancias de una empresa, se debe de establecer un límite de vibración que ofrezca un aviso seguro del advenimiento de problemas. Con este fin los valores que se dan en los *gráficos de severidad* que se presentan en el capítulo II, pueden servir de guía para poner en marcha el programa.

Ya que la condición mecánica de una máquina no se sabe al comienzo, se debe medir la vibración de la máquina y comparar los registros observados con los niveles aceptables preestablecidos de vibración de la maquinaria. Estas medidas iniciales de vibración se pueden tomar con un medidor portátil sujetado a mano o con el analizador de vibraciones. Para empezar, se toman las medidas de velocidad no filtradas o “generales” en las direcciones horizontales, verticales y axial de cada punto de apoyo de la máquina. Si la máquina no tiene problemas, se encontrara el nivel bajo de vibración en todos los puntos de medición.

Si las lecturas generales de las medidas son bajas, lo que indica que la máquina está en buen estado de funcionamiento. Si las medidas generales de vibración son excesivas o altas, lo que indica que existe problema mecánico, se debe realizar un análisis completo de vibración. Dicho análisis debe incluir.

- A. Señales identificadoras de vibración en la máquina tomadas en las direcciones horizontal, vertical y axial de cada punto de apoyo de la máquina.
- B. Para identificar el problema inequívocamente, se compara la información obtenida con las características de las diferentes causas de vibración junto con lo que se sabe de la máquina su velocidad o velocidades, lo que hace, etc.

Una vez que se identifica el problema mediante el análisis de vibración, se debe programar la corrección a una hora conveniente.

Después que se realizan las correcciones, se debe ratificar que la máquina se encuentra en condiciones aceptables mediante la toma de medidas generales de velocidad no filtradas en las direcciones horizontal, vertical y axial de cada punto de apoyo. Si las medidas son bajas, estas se pueden registrar en la Hoja de Información, y la máquina ya está lista para que se le efectúen inspecciones de rutina regulares.

Los análisis de ruido que se efectúan antes y después de corregir los problemas mecánicos sirven para verificar la correlación directa que existe entre las características de vibración y ruido de la máquina y el funcionamiento mecánico.

Cuando las medidas de vibración indican que la máquina está en buen estado de funcionamiento, de las medidas del nivel del ruido que se toman al mismo tiempo se pueden considerar también como medidas normales e intrínsecas de la máquina

## **6. Mediciones de referencia de las máquinas**

Puesto que en un comienzo la condición mecánica de la máquina no es evidente, es necesario establecerla mediante la aplicación de las técnicas de verificación seleccionadas y la comparación entre las mediciones observadas y los límites aceptables preestablecidos.

Cuando la condición mecánica de la máquina resulta aceptable, ésta pasa a formar parte del programa de verificación rutinaria. Las mediciones de referencia sirven de “huella digital” para la comparación en caso de que se detecte una falla durante la vida útil de la máquina.

La eventualidad de la máquina se demostrara inaceptable a la luz de los límites establecidos sugeriría la existencia de una condición de defecto o la inexactitud de los límites. En consecuencia, será necesario efectuar un ulterior análisis de la condición de la máquina para localizar y corregir el defecto o, de no hallar ninguno, revisar y modificar los límites establecidos.

## **7 - 10 Medición periódica de la condición**

(Recopilación, registro, análisis de las tendencias) - Estos pasos representan el programa de verificación rutinario establecido en los pasos 3 y 4. El objeto de este programa es detectar un deterioro significativo del estado de la máquina mediante el análisis de tendencias de los datos medidos, después de lo cual la máquina será sometida a un ulterior análisis de la condición.

## **11. Análisis de la condición**

Se trata de un análisis profundizado de la condición de la máquina, que a menudo conlleva la aplicación contemporánea de varias técnicas. La finalidad de este paso consiste en confirmar si realmente existe un defecto y llevar a cabo un diagnóstico y pronóstico de la falla por ejemplo: tipo de falla, ubicación, gravedad, medidas correctivas requeridas.



## 12. Corrección de las fallas

Una vez diagnosticada la falla, será responsabilidad del departamento de mantenimiento organizar las medidas correctivas. En esta etapa es de suma importancia establecer la causa de la condición de falla y corregirla. Los detalles de falla identificada deberán ser revertidos al PMP con el fin de confirmar el diagnóstico y/o perfeccionar las capacidades de diagnóstico del programa.

El Programa de Mantenimiento Predictivo puede ser simple o complejo. Un sistema simple puede comenzar con un medidor de vibraciones portátil. Efectuando registros manuales de los niveles de vibración a intervalos regulares pueden detectarse tendencias indeseables.

Los Programas de Mantenimiento Predictivo pueden ser ampliados incorporando instrumentos adicionales o integrando el programa a un sistema más sofisticado que incluya colectores de datos automatizados, computadoras y software (programas lógicos). En el caso de máquinas críticas tal vez se requieran sistemas de supervisión automática y monitoreo las 24 horas del día.

## CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

Hoy en día, en donde la calidad y la productividad juegan un papel preponderante, en la intensa competencia que se presenta en los mercados actuales; es indispensable que las empresas busquen optimizar sus operaciones al máximo, incrementando la productividad mediante la mejor administración de sus recursos materiales y humanos con los que cuenta y al mismo tiempo reduciendo los costos de la operación tanto directos como indirectos. En la actualidad una empresa que no persiga estas metas está condenada al fracaso, frente a otras empresas que estén mejores organizadas, ya que sus productos o servicios no serán de una calidad aceptable y a la vez no tendrán un precio atractivo, ni de operación ni de consumo por parte de los clientes; y es en el renglón de los costos de operación en donde la reducción de estos nos permite elevar los márgenes de utilidades.

La organización y el eficiente funcionamiento de un adecuado programa de mantenimiento de una planta nos lleva a una influencia muy significativa sobre los costos y la productividad de una empresa; ya que un mantenimiento deficiente o excesivo nos afecta en los costos de operación de una planta. El mantenimiento deficiente conduce a diferentes fallas en los equipos, lo cual afecta en la planeación de las actividades productivas, causa retrasos en la producción al no cumplir puntualmente la entrega de un producto o servicio, no permite alcanzar las metas fijadas en la productividad de una máquina, además que causa una depreciación prematura de la maquinaria y con lo cual se reduce su vida útil. El mantenimiento excesivo es lo contrario ya que con el se contribuye a la elevación de los costos, ya que incrementa los tiempos muertos de la maquinaria (periodos en los cuales un equipo no produce), se necesita numeroso personal para realizar las tareas de mantenimiento y además que se incrementan las compras de refacciones por encima de los niveles planeados.

Una de las claves para el éxito de una compañía depende con frecuencia del funcionamiento interrumpido, seguro y productivo de las máquinas rotativas. Un programa de mantenimiento eficaz es fundamental para lograr dicho éxito. El nivel de calidad del programa de mantenimiento instituido en una compañía determina la vida útil de las máquinas, la seguridad que ofrecen para el personal que las atiende y la productividad de las mismas. Un programa de mantenimiento Predictivo ofrece las siguientes ventajas:

- El mantenimiento Predictivo se basa en el registro y análisis de las vibraciones mecánica, lo cual permite asegurar una operación fluida de la instalación, ya que evita al mínimo los paros imprevistos debido a fallas en los equipos. Como las anomalías en el funcionamiento de los equipos rotatorios, por lo cual los trabajos necesarios pueden programarse con suficiente tiempo para causar el menor tiempo perdido en la operación de la máquina; además que la detección de los problemas se realiza sin que deje de operar los equipos de una máquina y esto es lo que nos lleva a la realización de los trabajos de mantenimiento estrictamente necesarios, con lo cual se reducen los tiempos perdidos y a su vez se incrementa la disponibilidad del equipo.
- El mantenimiento predictivo permite aislar las causas probables del desperfecto antes de que se pare o se inspeccione el equipo, mediante el análisis adecuado de las características de las vibraciones. De esta manera solamente se solicitarán con anticipación las refacciones necesarias para la tarea de mantenimiento y al mismo tiempo se reduce al mínimo el tiempo que la máquina queda fuera de operación. Esto ayuda a que el inventario de refacciones se reduzca y solamente se tengan que comprar y sustituir las refacciones necesarias, de manera que la productividad de cada equipo aumenta y su costo de operación reduce; y esto es una ventaja financiera para cualquier compañía.
- Prolonga la vida útil de la maquinaria, ya que las costosas máquinas de producción y equipos de apoyo de la planta pueden ser sometidos a un nivel de mantenimiento que satisfaga o incluso que supere las expectativas de su vida útil. Es decir los equipos se deprecian menos, además que siempre se mantienen en condiciones óptimas de funcionamiento lo que incrementa su eficiencia; por lo cual una compañía podrá reducir la inversión de capital a largo plazo para la adquisición de máquinas nuevas y mantener el mismo nivel y calidad de producción.
- Reduce los tiempos muertos no programados, debido a las interrupciones por fallas imprevistas que ocasionan graves trastornos en los cronogramas de producción y aumentan terriblemente los costos de la misma. Un óptimo programa de mantenimiento Predictivo permite detectar un problema antes de que se torne crítico, pudiendo programar una parada para mantenimiento en un momento más oportuno para los cronogramas operativos y de producción de la compañía, además que el número de trabajos de

mantenimiento se reduce al igual que disminuye el número de personas encargadas de las tareas de mantenimiento.

- Elimina las reparaciones generales, ya que las inspecciones anuales y las reparaciones generales de rutina significan tiempo y dinero. Con el fin de prevenir una interrupción por fallas imprevistas, con frecuencia se quitan máquinas de línea y se les desarma cuando en realidad no hay nada descompuesto; por lo que un programa de mantenimiento Predictivo determinara cuando una máquina puede funcionar en forma continua, hasta que se detecte un problema en las etapas iniciales. Esto a menudo significa que un equipo puede funcionar por periodos de tiempo mucho más largo de lo que podría obtenerse con un programa de mantenimiento Preventivo.
- Se elimina la necesidad de equipos de reserva inactivos, los cuales no son prudentes para las plantas nuevas o en expansión. La maquinaria de reserva o redundante, tiene la finalidad de soportar el volumen de las operaciones en la eventualidad de una falla inesperada. Un optimo programa de mantenimiento Predictivo puede impedir el acontecimiento inesperado de alguna falla en los equipos, permitiéndole programar una parada para mantenimiento en un momento más oportuno, lo cual lleva un efecto mínimo en las operaciones normales.
- Permite operaciones más eficientes, ya que una vibración indeseable y el ruido relacionado con la misma menoscaban el ambiente de trabajo, causando fatiga innecesaria del personal, incrementando el potencial de accidentes y en general disminuyendo la productividad de los trabajadores. El mantenimiento Predictivo contribuye a que las máquinas sigan funcionando dentro de los niveles mínimos de ruido inherente; detectando oportunamente las fuentes de ruido y vibración, además que toma las medidas necesarias para el control de las mismas.
- Incrementa la seguridad de la maquinaria puesto que algunos tipos de defectos de la maquinaria constituyen graves peligros para la seguridad. El riesgo del personal que trabaja en las cercanías de la máquina aumenta al alcanzar el defecto un punto critico y en algunos casos, los indicios obvios de problemas se revelan sólo en unos instantes antes de que ocurra una falla catastrófica y peligrosa; por lo que un buen programa de mantenimiento Predictivo identificara los síntomas de una falla mucho antes de que la

situación se torne incontrolable y puede llevar a un accidente de consecuencias graves.

- Mejora la calidad de la producción, ya que el funcionamiento silencioso y suave de las máquinas es un factor de importancia vital en la producción de artículos de calidad y en la confiabilidad de los servicios. Al mantenerse un nivel bajo de las vibraciones y ruidos de las máquinas; el programa de mantenimiento Predictivo asegura un elevado nivel de calidad del producto, reduciendo al mínimo el porcentaje de piezas rechazadas.

## BIBLIOGRAFÍA :

- I.R.D- Mechanalysis, Inc.  
Manual de Introducción a las Vibraciones.  
e d . Tecnología de Vibraciones y Ultrasonidos.  
México D.F. 1978
- I.R.D- Mechanalysis, Inc.  
Manual de Vibraciones 1.  
e d . Tecnología de Vibraciones y Ultrasonidos.  
México D.F. 1978
- I.R.D- Mechanalysis, Inc.  
Data Collector I.R.D. 890 / 818 / 817  
e d . Entek Scientific, Corporation.  
Columbus, Ohio U.S.A. 1989
- I.R.D- Mechanalysis, Inc.  
Predictive Maintenance Software.  
e d . Entek Scientific, Corporation.  
Columbus, Ohio U.S.A. 1989
- I.R.D- Mechanalysis, Inc.  
Manual de Introducción al Software PMPOWER.  
e d . Tecnología de Vibraciones y Ultrasonidos.  
México D.F. 1994
- Carlos Martínez.  
Introducción al Análisis de Vibraciones.  
e d . Instituto Mexicano del Petróleo.  
Subdirección de Desarrollo Profesional.
- Slawomir Jan Bucki Cichon.  
Estudio de las Vibraciones en Turbomaquinaria con Miras al Mantenimiento Predictivo.  
e d . Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan. ( Tesis )  
México D.F. 1988

- Seiichi Nakajima  
Programa de Desarrollo, Implementación del Mantenimiento Productivo  
Total ( T.P.M. )  
e d . Productivity Press  
Cambridge, Massachusetts U.S.A.      1989
  
- J. P. Den Harlog  
Mecánica de las Vibraciones.  
e d . Continental  
México      1974
  
- Avallone, Eugene A. Baumeister  
Marks, Manual del Ingeniero Mecánico Vol. 1  
e d . McGraw - Hill  
México      1984
  
- Morrow, Lester Coridón  
Manual de Mantenimiento Industrial Tomo III  
e d . Continental  
México      1984
  
- Robert C. Rosales  
Manual de Mantenimiento Industrial Tomo IV  
e d . McGraw - Hill  
México      1987
  
- Javier Rodríguez Alcocer  
Calculo e Implementación del Sistema de Mantenimiento Preventivo  
y Rutinas ( Electricidad y Plomería ) de un Edificio de Oficinas  
Administrativas.  
e d . Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan ( Tesis )  
México D.F.      1985
  
- José Luis Manzo Dinorin  
El Ingeniero Mecánico Electricista dentro del Mantenimiento Industrial  
e d . Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan. ( Tesis )  
México D.F.      1985



- Alejandro Avalez Palacios  
Optimización en el Mantenimiento Industrial.  
e d . Facultad de Estudio Superiores Cuautitlan ( Tesis )  
México D.F. 1995