



**Universidad de San Carlos de Guatemala**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Escuela de Ingeniería Mecánica**

**MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE UNA TRITURADORA DE PIEDRA**  
**MARCA CEDARAPIDS**

**BORIS ALFREDO SOTOMAYOR DELIO**

ASESORADO POR

**ING. GILBERTO ENRIQUE MORALES BAIZA**

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2004



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE UNA TRITURADORA DE PIEDRA  
MARCA CEDARAPIDS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA POR

**BORIS ALFREDO SOTOMAYOR DELIO**

ASESORADO POR ING. GILBERTO ENRIQUE MORALES BAIZA  
AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, OCTUBRE 2004



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

<b>DECANO</b>	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
<b>VOCAL I</b>	Ing. Muyphy Olympo Paiz Recinos
<b>VOCAL II</b>	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
<b>VOCAL III</b>	Ing. Julio David Galicia Celada
<b>VOCAL IV</b>	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
<b>VOCAL V</b>	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
<b>SECRETARIO</b>	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

<b>DECANO</b>	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. José Arturo Estrada Martínez
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Byron Giovanni Palacios Colindres
<b>EXAMINADOR</b>	Ing. Anacleto Medina Gómez
<b>SECRETARIO</b>	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



Guatemala 14 de Julio del 2004

Ing.  
José A. Estrada Martínez  
Director Escuela de Ingeniería Mecánica  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Director:

Por este medio me dirijo a usted, para informarle que he llevado a cabo la asesoría, del trabajo de graduación titulado “**MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE UNA TRITURADORA DE PIEDRA MARCA CEDARAPIDS**”, desarrollado por el estudiante universitario **BORIS ALFREDO SOTOMAYOR DELIO**, de la carrera de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

El trabajo se ha desarrollado de acuerdo con el programa y objetivos iniciales y considero que llena los requisitos académicos para ser aprobado como trabajo de Graduación.

También considero importante, resaltar la utilidad que el trabajo puede tener como material de apoyo a los estudiantes de máquinas trituradoras de piedra y mantenimiento mecánico en general. Así mismo, puede ser una solución para la industria que tiene relación con obra civil.

Sin otro particular, me suscribo de su persona.

Atentamente,

**Ing. Mec. Gilberto Enrique Morales Baiza**  
**Colegiado No. 5,190**  
**ASESOR.**





**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con lo establecido por la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**MANTENIMIENTO PREDICTIVO DE UNA TRITURADORA DE PIEDRA  
MARCA CEDARAPIDS**

Tema que me fue asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 17 de septiembre de 2001.

Boris Alfredo Sotomayor Delio



## **ACTO QUE DEDICO A**

<b>DIOS</b>	Todopoderoso, mi Señor.
<b>Mis padres</b>	Isaac Sotomayor y Julvia Delio de Sotomayor por darme su apoyo y enseñanzas.
<b>Mi esposa</b>	Emma Rebeca Coloma de Sotomayor, con amor.
<b>Mis hijos</b>	Steve, Kathleen, Emmita Sotomayor, todo mi cariño
<b>Mis hermanos</b>	Isaac, Lilian, Paty y Herber Sotomayor.
<b>Mis abuelas</b>	Mamá Toque y Mamá Tencha.
<b>Mis suegros</b>	Miguel y Emilia Coloma.
<b>Mis cuñados y sobrinos</b>	Miguel, Duka, Samy, Dora, Sheny, Jaimito, Fitus, Romeo, Lex, Lucky, Alma, Gris, Dana, a todos mis sobrinos.
<b>Mis hermanos en Cristo</b>	De Fundación Cristiana Para la Familia.



# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	V
<b>ÍNDICE DE SÍMBOLOS</b> .....	VII
<b>GLOSARIO</b> .....	VIII
<b>RESUMEN</b> .....	XIII
<b>OBJETIVOS</b> .....	XV
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	XVII
<b>1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE TRITURACIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1    Proceso de la trituración de piedra.....	1
1.1.1    Cantera.....	1
1.2    Ciclo de producción.....	4
1.2.1    Puntos clave en el ciclo de producción.....	8
<b>2. DESCRIPCIÓN DE UNA MÁQUINA TRITURADORA DE PIEDRA</b> .....	<b>9</b>
2.1    Partes principales de una trituradora.....	9
2.1.1    Mandíbula secundaria o cono.....	11
2.1.2    Base de una trituradora.....	15
2.1.3    Zaranda o clasificadora.....	15
2.1.4    Banda transportadora.....	17
2.1.5    Mandíbula primaria.....	18
2.1.6    Alimentador.....	19
<b>3. HERRAMIENTAS DE APOYO PARA UN BUEN MANTENIMIENTO PREDICTIVO</b> .....	<b>21</b>
3.1    Conceptos básicos sobre vibraciones.....	21

3.1.1	Movimiento armónico.....	22
3.1.2	Movimiento con amortiguamiento.....	24
3.1.3	Vibraciones en sistemas con un solo grado de libertad.....	26
3.1.3.1	Vibraciones libres con amortiguamiento viscoso.....	26
3.1.4	Amortiguamiento supercrítico.....	28
3.1.5	Amortiguamiento subcrítico.....	29
3.1.6	Vibraciones forzadas.....	29
3.1.6.1	Vibraciones forzadas sin amortiguamiento...	30
3.1.7	Medición de vibración.....	33
3.1.7.1	Amplitud de la vibración.....	33
3.1.7.2	Velocidad y aceleración pico.....	35
3.1.7.3	Frecuencia de vibración.....	36
3.1.7.3	Ángulo de fase.....	37
3.1.7.4	Forma de onda.....	38
3.1.7.5	Órbitas.....	41
3.1.8	Transductores para la medición de la vibración.....	42
3.1.8.1	Sensor de no contacto.....	42
3.2	Análisis de aceites.....	43
3.2.1	Pruebas físicas y químicas.....	43
3.2.1.1	Residuo de carbono.....	46
3.2.1.2	Resistencia a la oxidación.....	47
3.2.1.3	Resistencia a la corrosión.....	48
3.2.1.4	Detergencia.....	48
3.2.1.5	Dispersión.....	49
4.	<b>DESCRIPCIÓN DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL.....</b>	<b>51</b>
4.1	Mantenimiento correctivo.....	51
4.2	Mantenimiento preventivo.....	51

4.3	Mantenimiento predictivo.....	51
4.4	Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de mantenimiento.....	53
4.4.1	Ventajas del mantenimiento correctivo.....	53
4.4.2	Desventajas del mantenimiento correctivo.....	53
4.4.3	Ventajas del mantenimiento preventivo.....	53
4.4.4	Desventajas del mantenimiento preventivo.....	54
4.4.5	Ventajas del mantenimiento predictivo.....	54
4.4.6	Desventajas del mantenimiento predictivo.....	54
4.4.7	Características adicionales del mantenimiento predictivo..	55
4.5	Técnicas aplicadas en mantenimiento predictivo.....	55
4.6	Costos en un mantenimiento predictivo.....	56
<b>5.</b>	<b>PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO.....</b>	<b>59</b>
5.1	Guía para la elaboración de un programa de mantenimiento predictivo.....	60
5.1.1	Niveles de información requerida.....	60
5.1.1.1	Departamento de operación.....	60
5.1.1.2	Departamento de mantenimiento.....	61
5.1.1.3	Gerencia general.....	61
5.1.1.4	Departamento de maquinaria rotativa.....	61
5.1.2	Aplicación de la información en los diferentes tipos de maquinaria.....	62
5.1.3	Implementación de recursos humanos e instrumentación.....	63
5.1.4	Estructura de inspección.....	63
5.1.5	Inspecciones periódicas.....	65
5.1.6	Evaluación de planta.....	74
5.1.7	Análisis de la información y acción correctiva.....	77
5.1.8	Retroinformación y evaluación del proyecto.....	91

<b>6.</b>	<b>ENCUESTA DE OPINIÓN.....</b>	<b>93</b>
6.1	Encuesta No.1.....	93
6.2	Encuesta No.2.....	96
6.3	Encuesta No.3.....	99
6.4	Opinión de gerencia sobre la implementación del programa.....	102
6.5	Opinión de área técnica sobre la implementación del programa.....	102
6.6	Análisis y resultados de las encuestas.....	102
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>105</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>107</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>109</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>111</b>



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Proceso del material en una trituradora .....	5
2.	Vista general del proceso de producción.....	6
3.	Diagrama de flujo de una planta trituradora.....	7
4.	Trituradora secundaria.....	10
5.	Mandíbula secundaria o cono, vista general.....	11
6.	Mandíbula secundaria o cono, vista interna.....	12
7.	Vista de un cobertor de magnesio.....	13
8.	Zaranda.....	16
9.	Banda transportadora.....	17
10.	Mandíbula primaria.....	18
11.	Alimentador primario.....	19
12.	Movimiento armónico.....	23
13.	Movimiento con amortiguamiento.....	24
14.	Magnitud de desplazamiento.....	34
15.	Frecuencia de vibración.....	36
16.	Espectro de vibración.....	40
17.	Quemador de prueba de aceite.....	47
18.	Costos de mantenimiento.....	57
19.	Diagrama para inspecciones periódicas.....	68
20.	Diagrama de flujo de configuración.....	69
21.	Diagrama de flujo de la inspección .....	70
22.	Diagrama de flujo del análisis de la información.....	71
23.	Diagrama de flujo de la acción correctiva para un mantenimiento.....	72
24.	Analizador de vibraciones SKF.....	76
25.	Espectro de vibración de un cojinete.....	78

26. Gráfica de tendencia de valor global en función del tiempo.....	79
27. Gráfica de espectros en cascada de un cojinete.....	79
28. Contaminantes de hierro, sílice, cobre y aluminio en aceites lubricantes.....	83

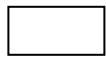
## **TABLAS**

I. Partes internas de un cono.....	14
II. Estructura de inspecciones periódicas.....	64

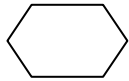
## LISTA DE SÍMBOLOS



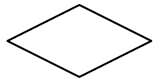
Transporte, ir a.



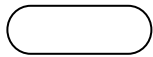
Proceso.



Preparación.



Decisión.



Iniciador y terminador.



Documento.

**r.p.m.**

Revoluciones por minuto.

**CPM**

Ciclos por minuto.

**CPS**

Ciclos por segundo.

**HZ**

Hertz (CPM o CPS).

<b>Mils</b>	Micrones.
<b>G</b>	Gravedad, 9.8 metros / segundo cuadrado.
<b>R.M.S.</b>	Root mean square (amplitud).
<b>PA</b>	Pascal.
<b>PSI</b>	Libras por pulgada cuadrada.
<b>SI</b>	Sistema Internacional.
<b>HP</b>	Potencia de aire estático.
<b>m/s</b>	Metros por segundo.
<b>IPS</b>	Pulgadas por segundo.
<b>mm/Seg</b>	Milímetros por segundo.
°	Grados sexagesimal.
'	Minutos.
“	Segundos.

## GLOSARIO

<b>Aceite</b>	Producto de origen mineral, animal o vegetal, fluido a temperatura ordinaria, y constituido generalmente por hidrocarburos pesados o bien por una mezcla de glicerina.
<b>Aditivo</b>	Los aditivos fortalecen o modifican determinadas características del aceite base para permitir que alcance ciertos requerimientos que están más allá de sus propiedades básicas.
<b>Amplitud</b>	Distancia recorrida por una onda de vibración, que delimita el desplazamiento en la parte positiva o negativa del cero de referencia hacia la cresta de la onda.
<b>Antiespumante</b>	Aditivo cuya función es evitar la formación de espuma.
<b>Alimentador</b>	Parte de una trituradora de piedra cuya función es transportar la piedra a base de vibraciones de un lugar a otro, por lo regular hacia las bandas transportadoras.
<b>A.P.A.</b>	Análisis periódico de aceite usado, consistente en una serie de pruebas destinadas a identificar y medir la contaminación y degradación de una muestra de aceite.
<b>Armónico</b>	Movimiento constante, o variación constante, en función del desplazamiento y el tiempo.

<b>Bandas</b>	Nombre asignado a las máquinas que son utilizadas para la transportación de material dentro de una trituradora.
<b>Cantera</b>	Sitio de donde se extrae la materia prima para la producción de pedrín cal u otros productos, también se le llama mina a cielo abierto. ( puede ser un río en el caso de la piedra).
<b>Ciclo</b>	Sistema que parte de un estado inicial dado y que pasa por varios cambios o procesos volviendo a su estado inicial.
<b>Ceniza</b>	El contenido de ceniza de un aceite es el residuo no combustible de un aceite lubricante. Los aditivos detergentes en un aceite lubricante contienen derivados del metal, como el bario, calcio y magnesio, los cuales son fuentes comunes de ceniza.
<b>Cono</b>	Parte de una trituradora de piedra, que es la encargada de triturar la piedra en una segunda fase, a base de un movimiento oscilatorio de arriba hacia abajo.
<b>Corriente alterna</b>	Corriente eléctrica que circula alternativamente en uno y otro sentido, y cuya intensidad es una función periódica del tiempo, de valor medio nulo.
<b>Frecuencia</b>	Movimiento oscilatorio de una pieza en particular.
<b>Mandíbula</b>	Parte de una trituradora encargada de triturar la piedra en la fase primaria, la cual la realiza con un movimiento de desplazamiento horizontal entre dos piezas.

<b>Mantenimiento</b>	Técnica usada para alargar la vida útil de los equipos electromecánicos.
<b>Piedrín</b>	Nombre asignado a la piedra pequeña que ya ha sido procesada por medios manuales o mecánicos.
<b>Predictivo</b>	Nombre denominado a un tipo de mantenimiento industrial que nos ayuda a predecir fallas futuras por medio de técnicas desarrolladas últimamente.
<b>Presión</b>	Cociente entre la fuerza ejercida por un fluido sobre una superficie entre el valor de dicha área expresada en metros cuadrados.
<b>S.A.E.</b>	Society of Automotive Engineers, por sus siglas en ingles, que significa Sociedad de Ingenieros Automotrices, la cual da la clasificación de los aceites para motores según su viscosidad.
<b>Vibración</b>	Es la variación de la configuración de un sistema con respecto al tiempo, alrededor de una posición de equilibrio estable.
<b>Viscosidad</b>	Resistencia interna de las moléculas de un fluido a su derrame uniforme y sin turbulencia.
<b>Zaranda</b>	Parte en una trituradora de piedra, la cual es la encargada de vibrar, realizando un tamizado o clasificado de materiales.

## RESUMEN

Las trituradoras de piedra son máquinas que se utilizan para la fabricación del pedrín comercial, utilizado en la industria de la construcción.

El propósito de la fabricación radica en los materiales necesarios en las fundiciones de concreto, para lo cual son tres los tamaños comerciales,  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{4}$ ", 1", en conjunto con el cemento y la arena. Estos materiales son básicos en la rama de la ingeniería civil y la construcción.

La clasificación adecuada de los tamaños es la segunda función después de la molienda, por ello, a las trituradoras de piedra también se les llama molinos de piedra. La trituración se realiza por medio de dos mordazas, a una se le llama mordaza primaria y a la otra mordaza secundaria. Esto depende de la robustez de las máquinas, que va de la mano con el tamaño de la piedra.

La clasificación es muy importante, puesto que la trituradora separa los distintos tipos de tamaño, a través de una zaranda o clasificadora, la cual basa su funcionamiento en la vibración, depositándolos en distintas regiones en forma de conos.

La transportación del material de un lugar a otro en la trituradora se realiza por medio de bandas transportadoras, al igual que el transporte hacia los depósitos finales de almacenamiento.



La necesidad de un buen mantenimiento en una máquina trituradora de piedra, se debe a que no es posible tener pérdidas de tiempo prolongadas. En el momento de estar desarrollando un tramo carretero, por ejemplo, en donde cada día de trabajo perdido representa una gran cantidad de dinero, es necesario implementar algo más que un mantenimiento correctivo o un mantenimiento preventivo, necesitamos un monitoreo de condición de nuestros equipos.

Al monitoreo de condición, en el cual sabemos las condiciones internas de trabajo de la maquinaria en un momento dado, se le llama mantenimiento predictivo, el mismo nos permite adelantarnos a las fallas y realizar las reparaciones cuando nos convenga.

Para desarrollar un mantenimiento predictivo, necesitamos conocer de análisis de vibraciones, análisis de aceites lubricantes, análisis de ruidos. Este último se basa más en la experiencia, pues el equipo utilizado no tiene un costo muy elevado. Sin embargo, para desarrollar un mantenimiento de este tipo necesitamos desarrollar toda una estructura, en la cual exista una inversión tanto de capital en la compra de equipo de análisis de vibraciones y en el gasto de los análisis de laboratorio de las muestras de lubricante, como en inversión de tiempo y contratación o readecuación de personal.

No dudamos que este trabajo de graduación brindará más que una guía, una visión amplia de la necesidad de la implementación de un programa de mantenimiento predictivo en la industria en general y/o máquina trituradora.

# OBJETIVOS

## General

Hacer el estudio para la creación de un programa de mantenimiento predictivo, para que sea aplicado en una máquina trituradora o en cualquier industria en el monitoreo de condición de maquinaria rotativa.

## Específicos

1. Conocer los fundamentos, las variables del sistema y operación de una máquina trituradora de piedra.
2. Analizar las diferentes técnicas para lograr establecer un monitoreo de condición en maquinaria rotativa.
3. Analizar la situación actual de una trituradora de piedra a través de encuestas de opinión.
4. Conocer los requerimientos de estructura en general para lograr establecer rutas de inspección y monitoreo.
5. Implementar un método de evaluación constante a través de las distintas técnicas del mantenimiento predictivo, para saber la condición interna de la trituradora.

6. Establecer los costos y tomar una idea de los beneficios alcanzados en el momento de establecer un programa de mantenimiento predictivo.
7. Motivar al personal de planta y mantenimiento para implementar el programa de mantenimiento predictivo en la mayoría de trituradoras.

## INTRODUCCIÓN

El nivel de tecnología aumenta año con año en la industria guatemalteca, y así se incrementa la complejidad de la gestión y se hace necesario optimizar los programas de mantenimiento. Aumentar la productividad y eficiencia de la maquinaria y equipo en condiciones normales de operación, implica contar con un mejor control de operación y, básicamente, con un programa eficiente de mantenimiento predictivo. Lo anterior demuestra la importancia que tiene la optimización de los programas de mantenimiento industrial.

Es importante mencionar que al hablar de optimización, se refiere a lograr mayor eficiencia en las funciones de administración del programa de mantenimiento, es decir, en planificar, organizar, controlar, dirigir y evaluar los procedimientos del mismo.

El presente trabajo visualiza el estudio y análisis de las actividades de mantenimiento predictivo de una trituradora de piedra de río marca Cedarapids; se pretende desarrollar y mostrar métodos aplicando conceptos y procedimientos correspondientes a la ingeniería mecánica.

En este estudio se analiza la operación y partes principales de la máquina, su ciclo de producción, en que partes de la máquina existe lubricación normal y forzada, cómo podemos desarrollar un análisis de aceite, las ventajas de desarrollar un mantenimiento predictivo, se desarrollará un estudio en base a encuestas y de tal manera se propondrá un programa de mantenimiento predictivo. Tiene como fin establecer a manera de predicción las fallas futuras, lo cual nos ayudará a evitar pérdidas cuantiosas de dinero, tiempo y esfuerzo. Realizaremos una prueba piloto en base a una encuesta de opinión, se hará de

esta manera puesto que no se cuenta con el suficiente recurso físico, tiempo, monetario, y de disposición de algunas empresas para poder realizar la prueba de otra manera.









# **1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCESO DE TRITURACIÓN**

## **1.1 Proceso de la trituración de piedra**

La materia prima para la producción de pedrín la podemos obtener de varios lugares distintos, por ejemplo de una cantera o de un río. Cuando se obtiene de un río, por lo regular se utiliza un modelo portátil de trituradora; el proceso general es el siguiente: transportación de la piedra hacia la trituradora; primera molienda (sección primaria, piedras de mayor tamaño); transportación a través de bandas transportadoras; clasificación por medio de zarandas (tamices); segunda molienda a través del cono (sección de trituración, piedras de menor tamaño); recirculaciones y clasificación de segunda fase, y producto terminado o almacenamiento por medidas.

### **1.1.1 Cantera**

Es una excavación abierta de la que se extrae cualquier tipo de piedra para la construcción, para usos químicos o de ingeniería, y las operaciones requeridas para obtener de la cantera roca para su posterior utilización. Las dos ramas principales de esta industria se llaman cantería de piedras en sillares o de piedras trituradas. En la primera, se extraen bloques de piedra, por ejemplo mármol o pizarra, con diferentes formas y tamaños para distintas aplicaciones.

En la industria de la piedra triturada, se muele granito, caliza, arenisca o roca basáltica para la fabricación de agregados de hormigón o en sustratos de carreteras. También se extrae caliza para fabricar cal y arcilla de China para hacer cerámica.

La cantería se lleva a cabo con distintos métodos y equipos, como instrumentos manuales, explosivos o sierras mecánicas, y con técnicas de acanaladura o de cuña, según el propósito para el que se quiera la piedra. La arcilla de China se extrae mediante potentes chorros de agua.

Los instrumentos de mano pueden utilizarse en la cantería de piedra que esté en lechos de fácil acceso. Los principales instrumentos son el taladro, el martillo y la cuña. Se hace una fila de agujeros de varios centímetros con el taladro y el martillo a través de la capa o estrato, en perpendicular al plano de estratificación y a lo largo de la línea en la cual se quiere romper la piedra.

En cada hueco se encajan tres cuñas, diseñadas para que una pueda penetrar entre las otras dos; el método se conoce como del tapón y las lengüetas. Dando a cada tapón un golpe seco con un martillo y repitiendo la operación varias veces, la fuerza combinada de separación de los tapones y de las lengüetas llega a ser lo bastante grande como para romper la roca.

Es más común el empleo de explosivos para separar grandes bloques de piedra, que luego se dividirán en trozos más pequeños por medio de cuñas o con el método del tapón y las lengüetas, o se molerán con bolas de acero que pesan varias toneladas. En este tipo de cantería, los agujeros taladrados se hacen a la profundidad requerida para romper la roca y se llenan en parte de algún explosivo, detonado con las técnicas usuales de voladura.

Para obtener piedra molida fina para hormigón, se utilizan molederas primarias, con dientes o giratorias, y secundarias para reducir el tamaño de las roca.

La técnica de acanaladuras consiste en cortar canales largos y estrechos en la roca para liberar los lados de un bloque grande. Las máquinas necesarias, antes de vapor, han sido mejoradas con motores eléctricos o de petróleo. Hoy son autopropulsadas y desplazan un filo cortante hacia delante y hacia atrás a lo largo de la línea sobre la que se hace el canal.

Dicho canal se hace con profundidad suficiente para insertar cuñas con las que se rajará la piedra, de manera que la fractura estará guiada por la ranura. Este proceso se usa mucho en la cantería de mármol, de arenisca, de caliza y de otras rocas blandas, pero sirve para granito y otras rocas duras.

Otro método de corte se basa en la combinación de una sierra eléctrica, un abrasivo y agua que se hace de lubricante y refrigerante. La sierra corta un canal estrecho, llamado corte primario o inicial, que luego, o bien se ensancha con una cuña, o bien se vuela. Esta técnica se usa en cantería de pizarra, granito y caliza.

Un quemador automático de canales ha llegado hace poco al mercado de la cantería en sellares. Se parece a un quemador de mano mantenido en vertical por un marco, con un motor eléctrico que mueve despacio todo el sistema sobre un carril. Hace un corte más regular, no requiere la presencia de un operador y desperdicia menos roca. La máquina se controla con un ordenador o computadora.

Cuando se utiliza la piedra de río como materia prima, no todos los métodos explicados anteriormente son necesarios, puesto que la piedra está en condiciones y tamaños relativamente pequeños, solamente es necesaria su transportación.

## **1.2 Ciclo de producción**

La naturaleza nos proporciona los recursos indispensables para poder obtener nuestra materia prima en todas las operaciones productivas que existen, en este caso, nuestra fuente natural es un río. Se considera a la piedra de río de una calidad bastante aceptable en el proceso de producción de pedrín comparándolo con la materia prima obtenida de algunas canteras o almacenamientos de piedra; la dureza y otras características hacen de la piedra de río de buenas condiciones para el proceso.

El proceso de la producción de pedrín comienza en la transportación de la materia prima, que es la piedra tipo bola desde un río. Algunas veces éstas son clasificadas antes de su traslado, lo cual va a depender de los tamaños de piedra que tenga nuestro banco. Existen varios modelos de máquinas trituradoras. Uno de los más utilizados es el tipo portátil, este modelo es muy práctico cuando nuestro banco de piedra está en un río, puesto que posicionamos la máquina lo más cercano posible de él.

Luego de la transportación de la piedra se coloca dentro de la trituradora en la parte llamada unidad primaria (mordaza primaria), llamada así porque es la primera parte del proceso de trituración. La capacidad de abertura de esta mordaza o mandíbula nos proporcionará la dimensión de la piedra que vamos a procesar, posteriormente son transportadas hacia un grupo de tamices llamados también zarandas.

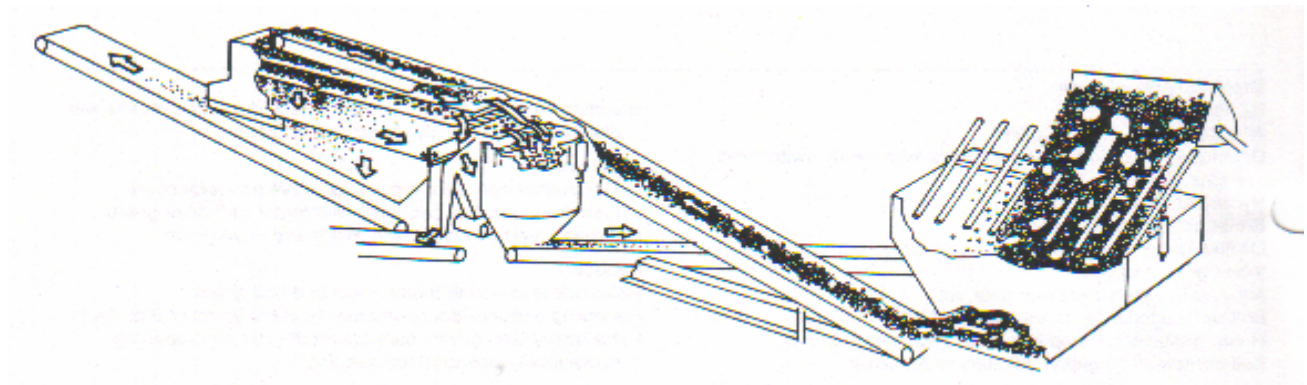
Los tamices seleccionará las piedras semitrituradas y las que no logran el tamaño requerido son devueltas a la modaza principal.

En el caso de las piedras semitrituradas que sí logran el tamaño deseado, son trasportadas nuevamente por bandas al corazón de la máquina.

El cono está calibrado para recibir y procesar cierto tamaño de piedra, dándole ciertas dimensiones, las cuales aún son chequeadas por un juego de tamices o zaranda, al igual que en la primaria y así son clasificadas. Solamente la piedra de determinadas condiciones logra avanzar al lugar de almacenaje, las piedras que no logran dicho tamaño son retornadas al cono a través de las bandas transportadoras y almacenadas en otro lugar distinto para ser vendida como escoria o pedrín de menor tamaño.

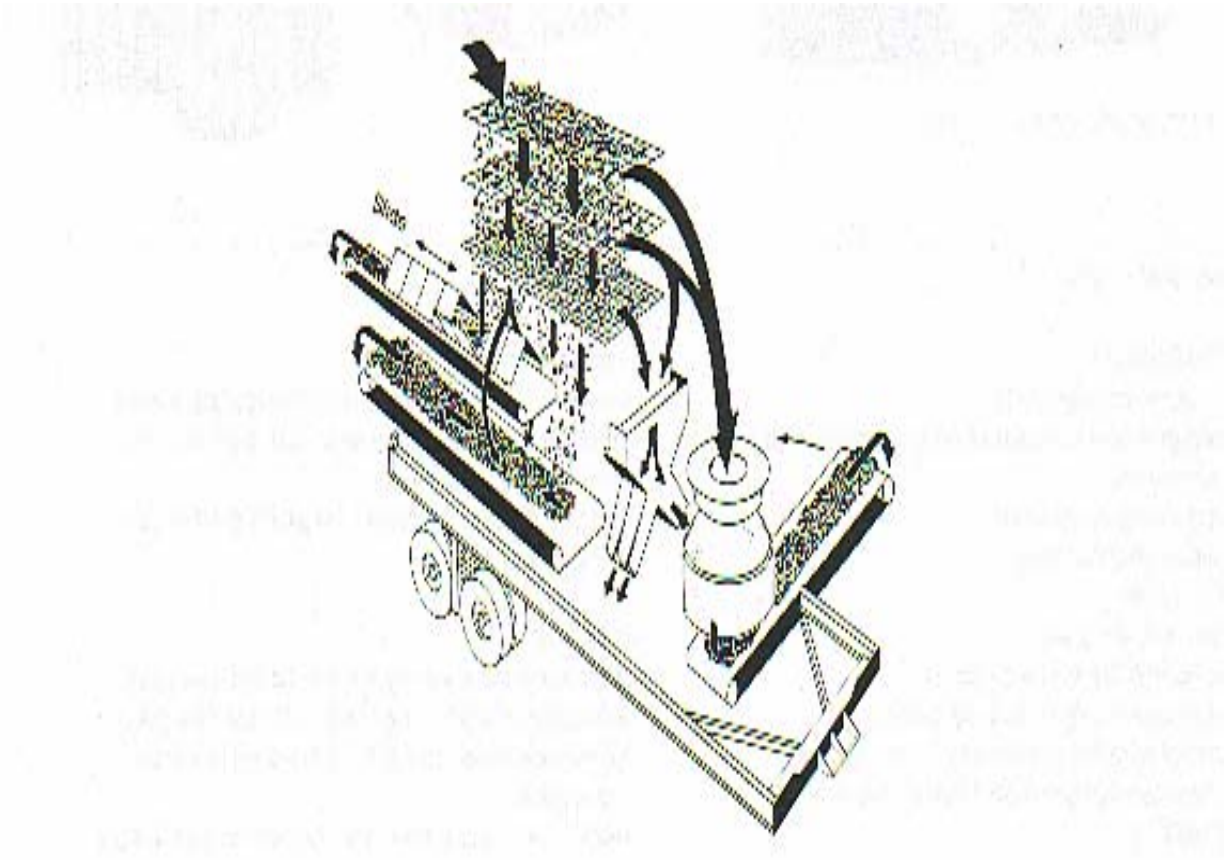
Así se obtiene el producto terminado o final, que es el pedrín en sus diferente presentaciones, y que es clasificado en diferentes copos o montones en forma de conos directamente debajo de la salida de las bandas trituradoras, según sus dimensiones:  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{4}$ ", y 1".

**Figura 1. Proceso del material en una trituradora**



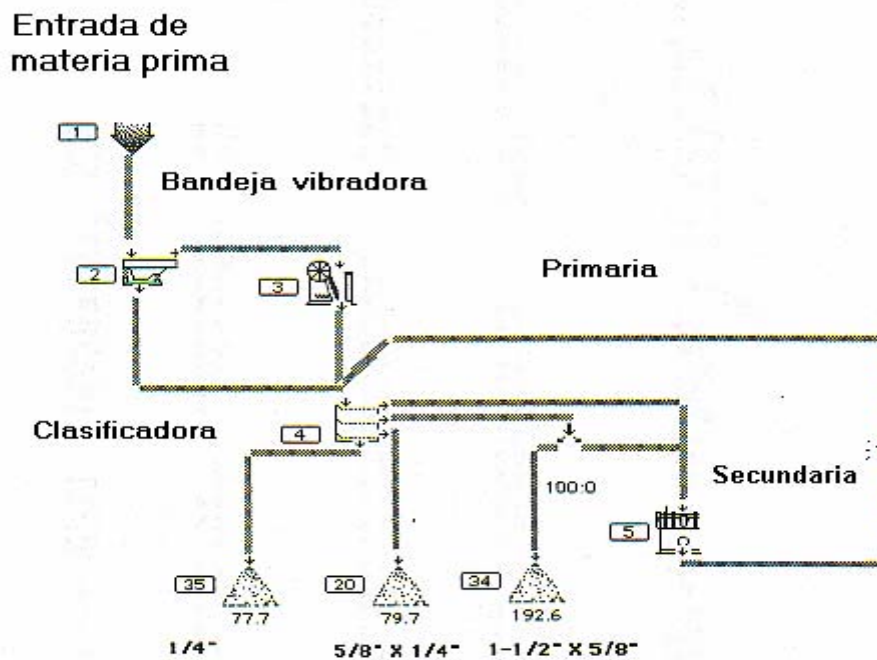
Fuente: A Raytheon, Manual Crushing & Screening, technical, Cedarapids, pág.19.

**Figura 2. Vista general del proceso de producción**



**Fuente: A Raytheon, Manual Crushing & Screening, technical, Cedarapids Company.,  
pág. 21.**

**Figura 3. Diagrama de flujo de una planta trituradora**



**Típico diagrama de flujo utilizando el equipo presentado produciendo entre 350 -400 TPH entre 1-1/2" de tamaño de material.**

**Fuente: A Raytheon, Manual Crushing & Screening, technical, Cedarapids Company, pág. 27.**

### **1.2.1 Puntos claves en el ciclo de producción**

Los puntos claves en una máquina trituradora de piedra son: la mordaza primaria llamada mandíbula primaria, la mordaza secundaria llamada Cono, puesto que en ellos se realiza la trituración, siendo los puntos de mayor atención, pues, según un análisis mecánico, en ellos se generaran los mayores problemas de desgaste, quebradura y otros. Podemos abonar a los mismos en el área de selección, que consiste en los tamices o zarandas por su importancia en el proceso, los cuales son los encargados de la clasificación por tamaños y tienen la capacidad de decisión sobre qué material tiene la medida y cuál debe regresar al cono para una segunda molienda, logrando así su tamaño requerido.



## **2. DESCRIPCIÓN DE UNA MÁQUINA TRITURADORA DE PIEDRA**

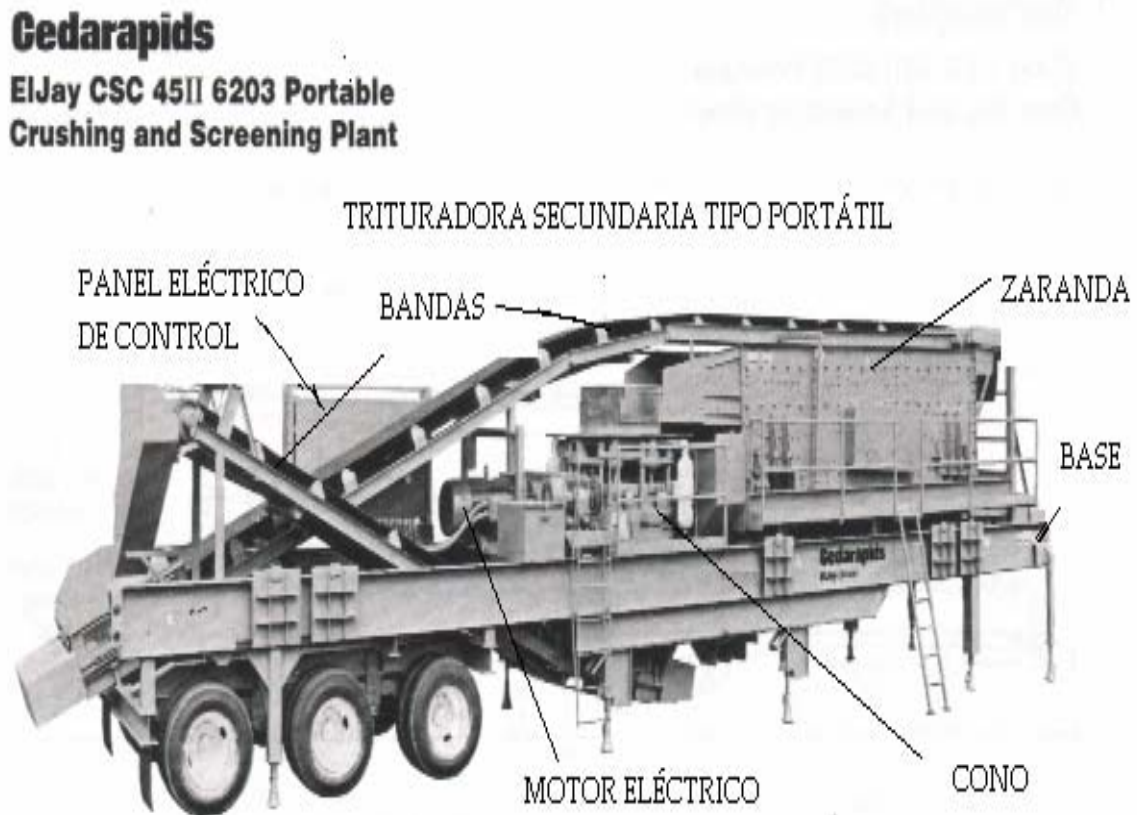
Una trituradora de piedra es una máquina eléctrica mecánica la cual está diseñada para demoler, principalmente en dos procesos. Al primero se le llama proceso primario, el cual es el encargado de demoler o triturar piedras de tamaño arriba de 25 centímetros de diámetro, aproximadamente, y el segundo proceso se le llama proceso secundario, el cual es el encargado de demoler o triturar piedras de menores dimensiones, en promedio debajo de los 25 centímetros, ya sea que se encuentren en dicho tamaño en la naturaleza o previamente tengan que pasar por el proceso primario.

En el proceso primario se encuentran la mandíbula primaria y un alimentador primario; en el proceso secundario, se encuentran el alimentador, si no está acoplada a una proceso primario; mandíbula secundaria o cono, zaranda de clasificación y bandas transportadoras.

### **2.1 Partes principales de una trituradora**

En la siguiente fotografía se muestra una trituradora secundaria Cedarapids, adjunto a ésta se necesita una trituradora primaria para completar la línea de producción de pedrín, tomando en cuenta que es difícil obtener piedra relativamente pequeña en las canteras o ríos.

**Figura 4. Trituradora secundaria**

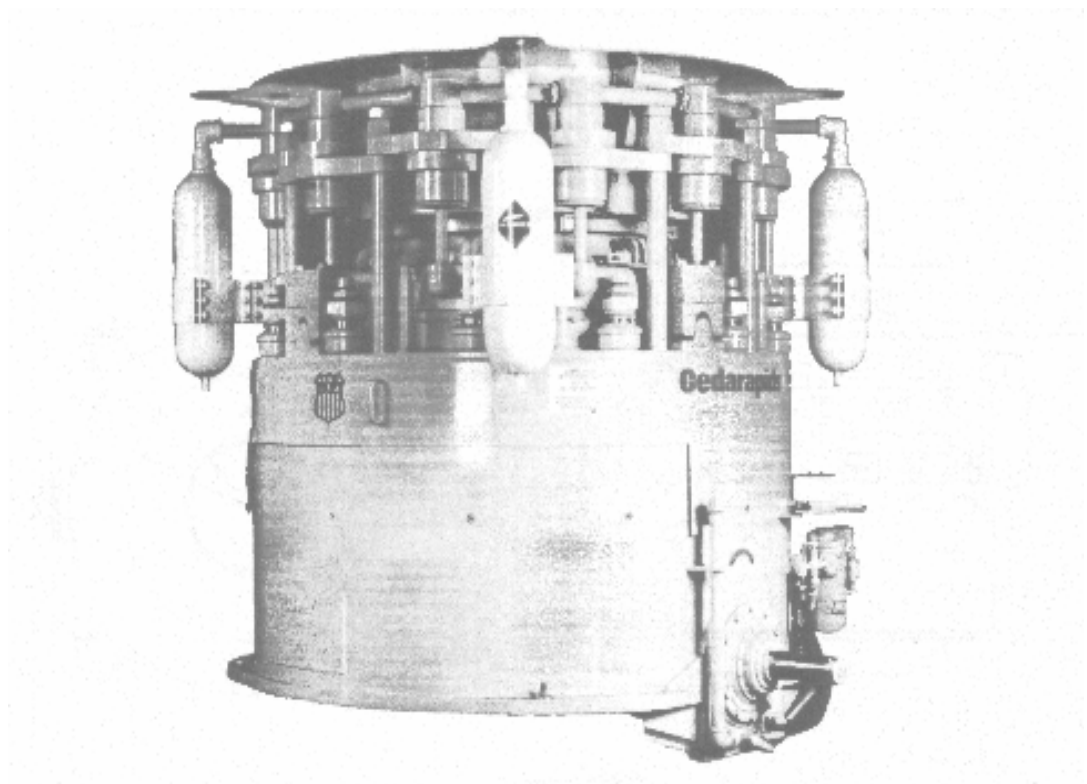


Fuente: A Raytheon, Manual Crushing & Screening, technical, Cedarapids, Company, pág. 28.

### 2.1.1 Mandíbula secundaria o cono

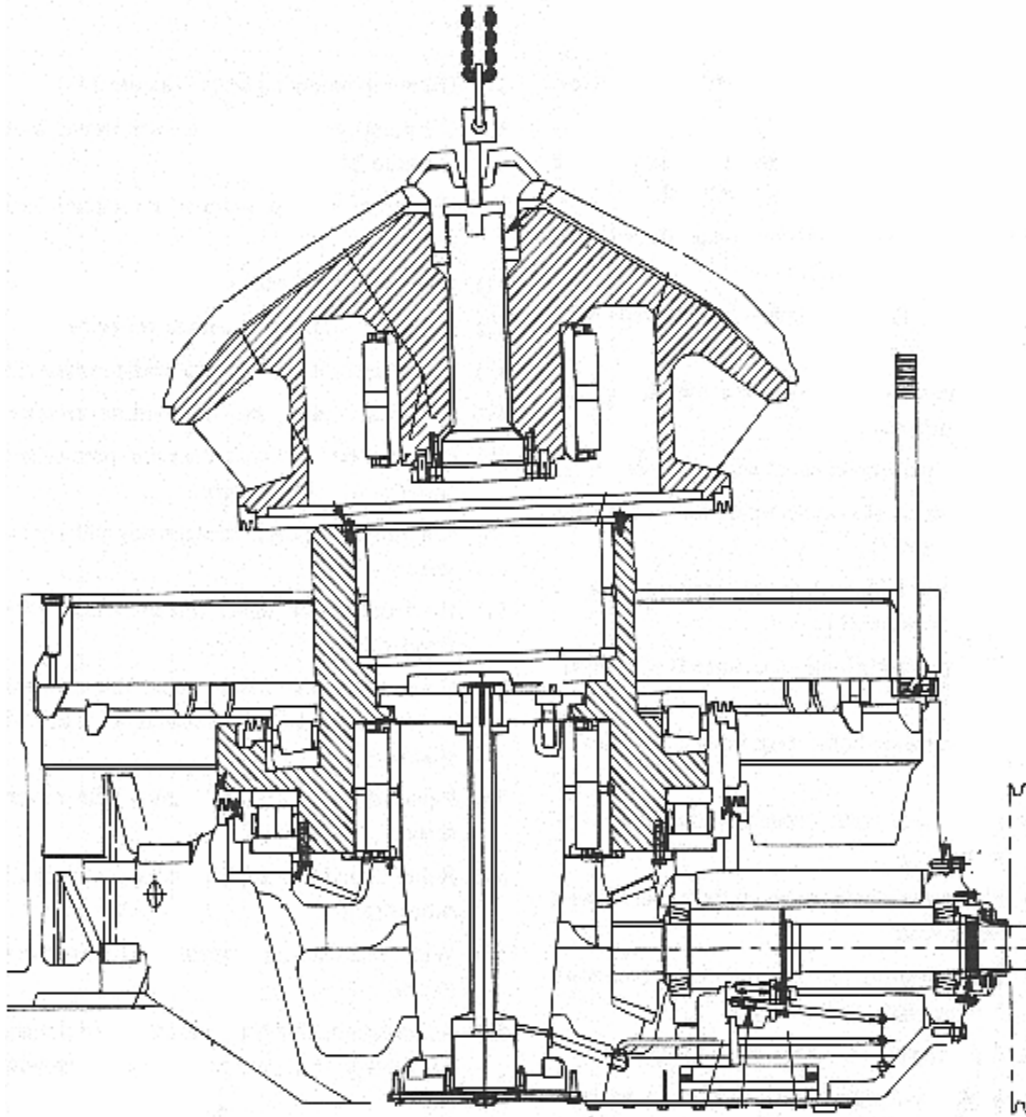
El cono es una máquina diseñada de tal forma que su apariencia interna es similar a un cono, y la apariencia externa es similar a un cilindro de regulares dimensiones. La función principal de esta máquina es la de triturar la piedra, en ella se introducen piedras de determinadas dimensiones, que a la vez son reducidas y su producto final son piedras pequeñas con medidas predeterminadas, según la graduación estipulada de antemano, por ejemplo las medidas más comunes son  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{4}$ ", 1", 1  $\frac{1}{4}$ ", 1  $\frac{1}{2}$ ", 2".

**Figura 5. Mandíbula secundaria o cono, vista general**



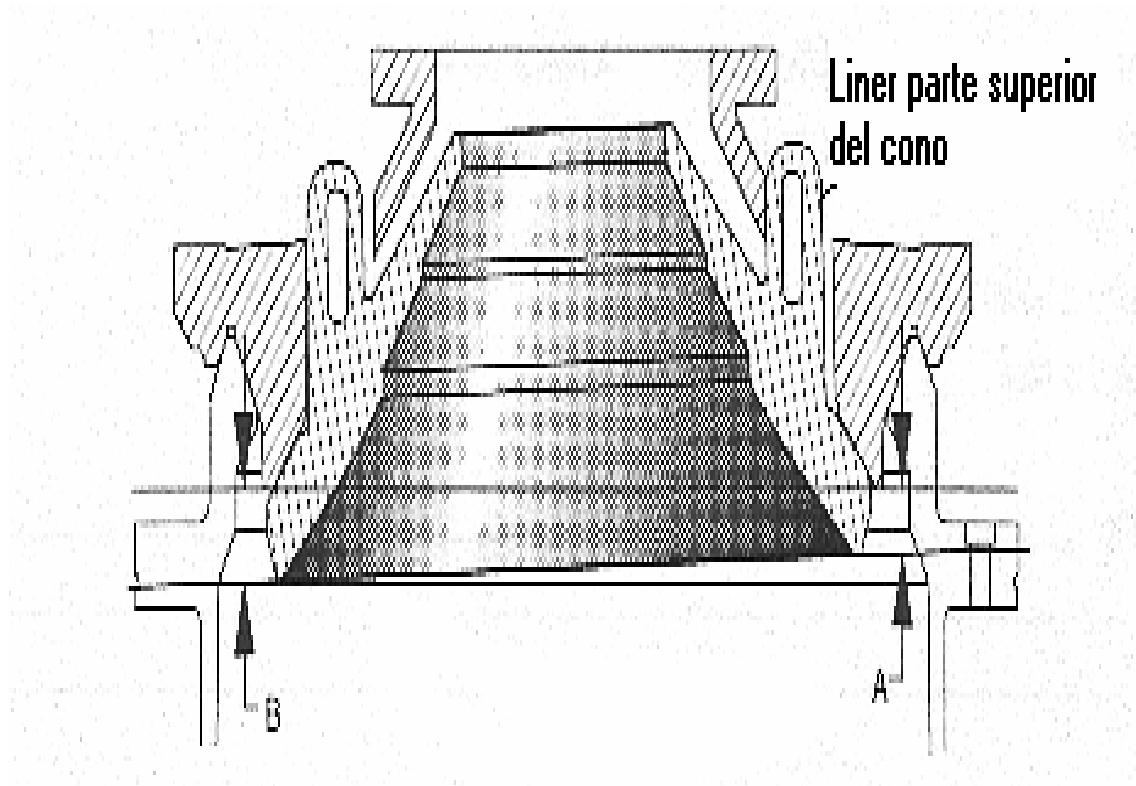
Fuente: A Raytheon, Manual Crushing & Screening, technical, Cedarapids Company, pág. 40.

**Figura 6. Mandíbula secundaria o cono, vista interna**



**Fuente: A Raytheon, Manual Crushing & Screening, technical, Cedarapids Company, pág. 45.**

**Figura 7. Vista de cobertor de magnesio**



**Fuente: A Raytheon, Manual Crushing & Screening, technical, Cedarapids Company, pág. 46.**

**Tabla I. Partes internas de un cono**

Embrague	Cono	Trasero de abeja
Engrane radial	Cilindro de ajuste	Soporte de gorra
Calentador de aceite	Recubrimiento magnesio	Cilindro ajuste engrape
Bomba de aceite	Pieza de paro inferior	Galgas de ajuste
Cojinete de engrane radial	Pieza de paro superior	Tornillo de ajuste
Eje del engrane radial	Anillo de presión	Cojinete radial superior
Cojinete radial inferior	Tuerca de manto	Cojinete fuerza superior
Base del retenedor	Parte superior de base	Segmento de contrapeso
Plato retén cuñero inferior	Tapa de tuerca de manto	Cojinete fuerza inferior
Plato del cuñero	Tornillo del manto	Base principal
Plato retén cuñero sup.	Manto de magnesio	Engrane
Anillo sellador del cono	Cilindro de levante	Base del cuello
Anillo engrapador	Brazo de presión	Tuerca de la base cuello
Plato flotante	Acumulador de 5 galones	Tapadera cobertura freno
Platina torque del cono	Gorra	

Fuente: A Raytheon, Manual Crushing & Screening, technical, Cedarapids, Company, pág. 47.

Esta máquina ha ido evolucionando en el transcurso de los años, por ejemplo la manera de apertura de la misma, últimamente las más comunes utilizan brazos hidráulicos.

### **2.1.2 Base de una trituradora**

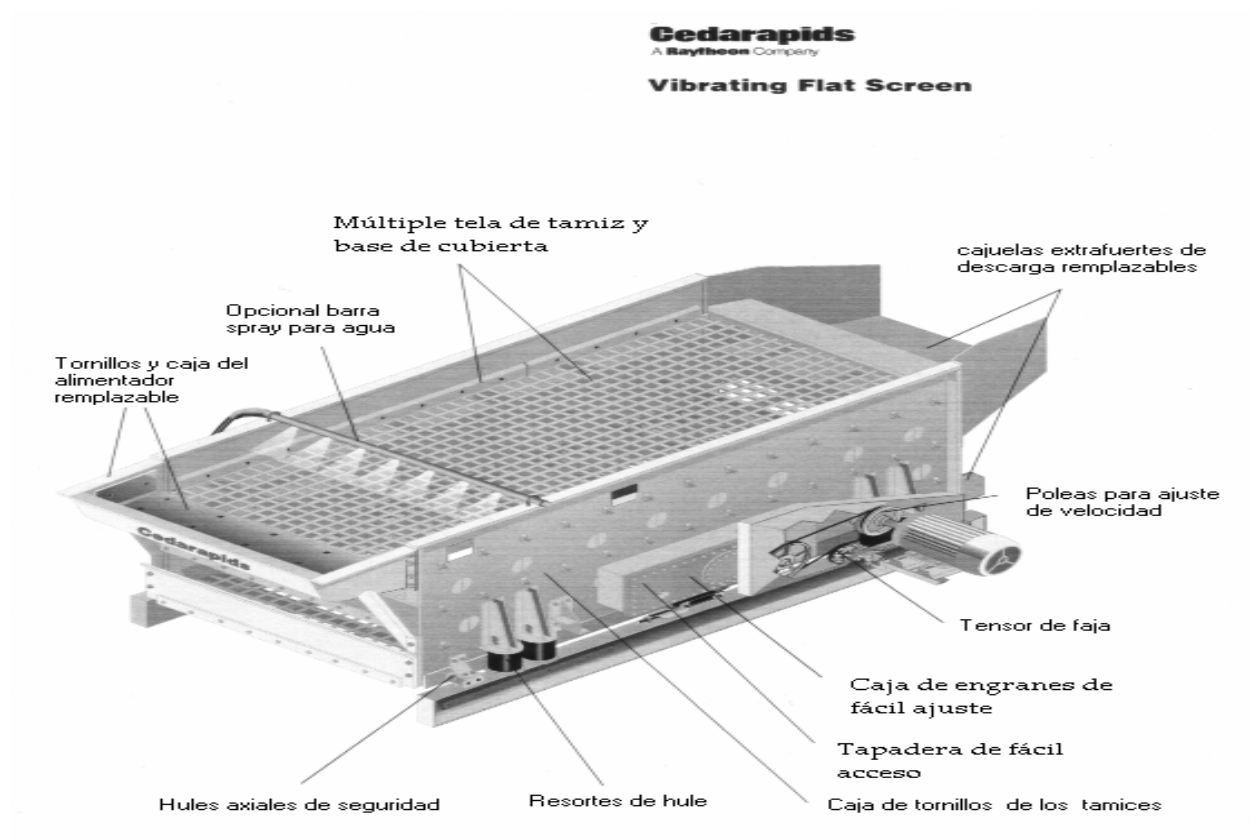
La base o el soporte de una trituradora de piedra es todo aquello que sostiene la totalidad de elementos de la misma, en ésta se encuentran contemplados los soportes ajustables, las ruedas que la hacen portátil, sus pasillos, etc.

### **2.1.3 Zaranda o clasificadora**

Parte considerada principal de una trituradora de piedra, su función es clasificar los tamaños de piedra previamente triturados. Esta máquina tiene una construcción con muchos tornillos con un alto grado de resistencia al corte y a la abrasión, los cuales son utilizados para la fijación de los tamices, sus resortes de suspensión son ajustables, sus platos son reforzados, tiene línea controlada de acción con 45 grados en el golpe, su base del canal y del motor de acero, unidad de vibración de fácil acceso y reparación, base resistentes a la abrasión, cojinetes esféricos auto alienables, ajuste con tornillo del sistema de manera fácil. Además, tiene varios tamices y varias salidas para su selección, su nivel de vibración ajustable, velocidad ajustable, consta de varias telas de tamices para su selección variada, tamices reemplazables dependiendo el tamaño, la vibración la logra a través de contrapesos, dispuestos de tal manera que formen un desfase entre si para lograr la vibración.

La abrasión es uno de los retos a vencer, puesto que los materiales tienen que estar aleados y tratados para poder resistir dicho desgaste.

**Figura 8. Zaranda**



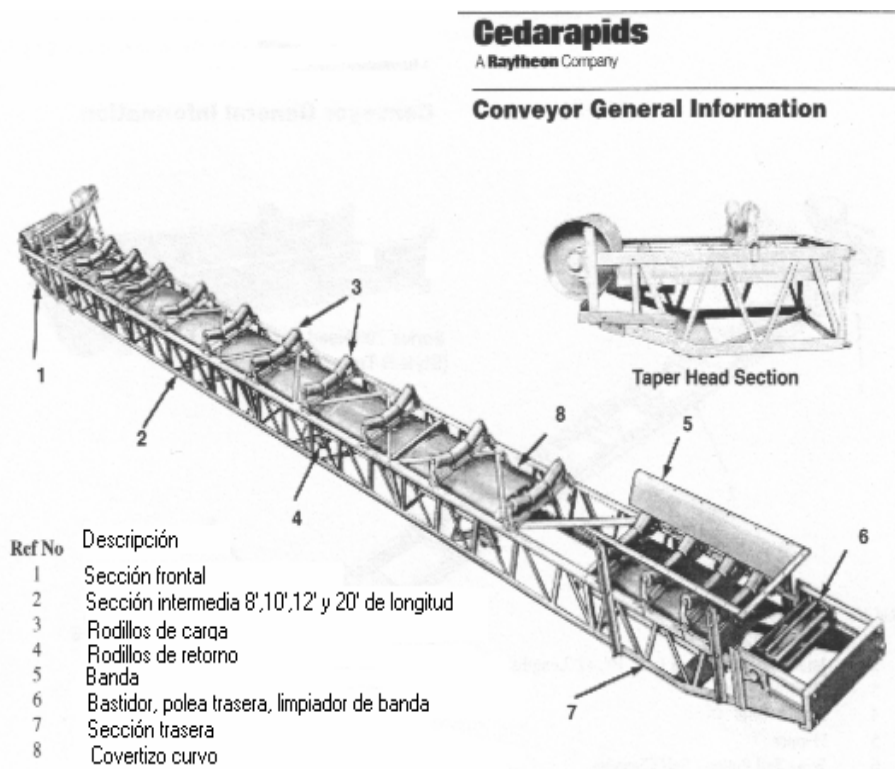
Fuente: A Raytheon, Manual Crushing & Screening, technical, Cedarapids, Company, pág. 44.



### 2.1.4 Banda Transportadora

Las bandas transportadoras son equipos diseñados para la transportación de material de un lado de la máquina a otro, su velocidad se encuentra en los 350 pies por minuto y su capacidad oscila entre los 30 y 100 caballos de fuerza, el motor eléctrico se encuentra en la sección frontal, usa dos tipos de rodillos, los de carga y los de retorno, la banda es de un material especial y es engrapada en sus extremos.

**Figura 9. Banda transportadora**

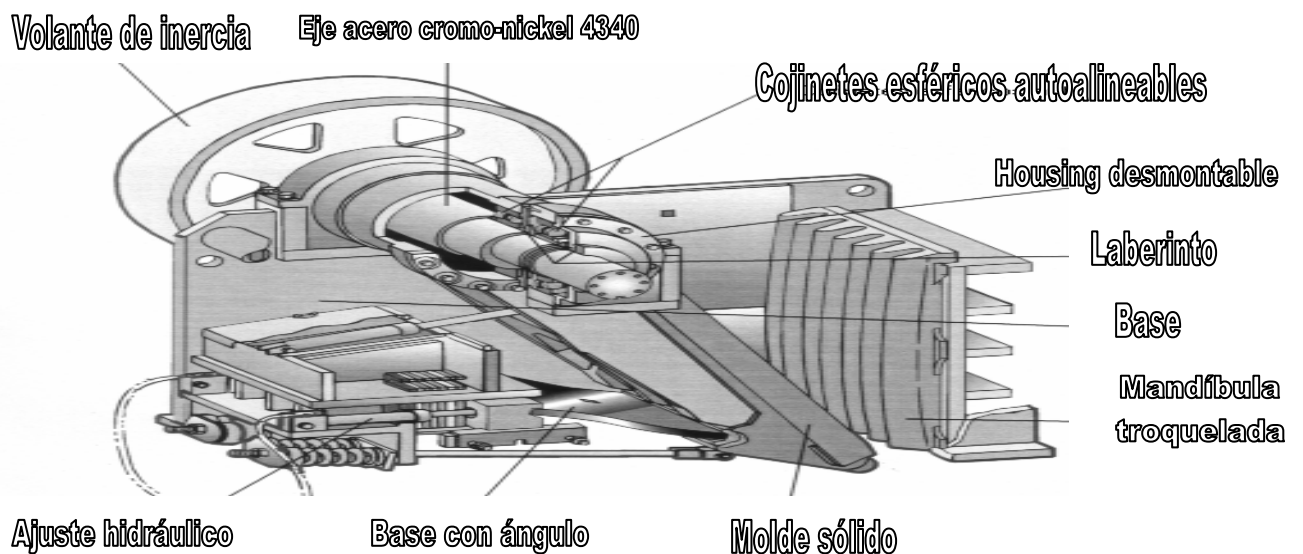


Fuente: A Raytheon, Manual Crushing & Screening, technical, Cedarapids, Company, pág. 34.

### 2.1.5 Mandíbula primaria

La mandíbula primaria está diseñada para la trituración de piedra de mayor tamaño. En algunos lugares, cuando el banco de piedra o el tamaño de la piedra de río lo permite, solamente se usa la secundaria, pero por lo regular se necesita colocar una máquina primaria, puesto que el tamaño de las piedra sobrepasa la capacidad de ingreso del cono, estas mandíbulas están diseñadas de tal manera que su capacidad y resistencia sean de alta efectividad. Las mordazas son hechas de magnesio, tiene ajuste hidráulico, cojinetes esféricos autoalineables, lubricación forzada, ejes forjados de alto grado al corte de aleación cromo níquel hierro 4340, etc.

**Figura 10. Mandíbula primaria**

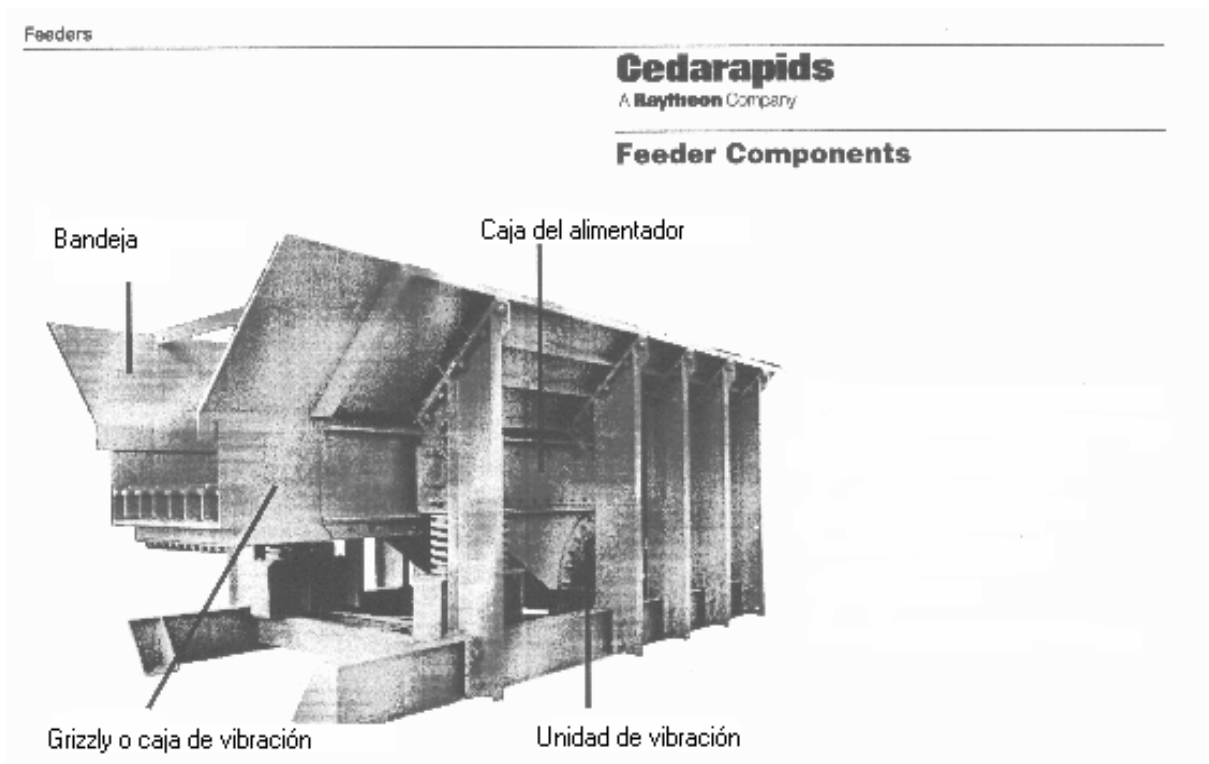


Fuente: A Raytheon, Manual Crushing & Screening, technical, Cedarapids, Company, pág. 38.

### 2.1.6 Alimentador

Componente de una trituradora primaria que es la parte principal de ella, en la cual se descarga primeramente la materia prima por medio de un camión de volteo, una retroexcavadora o un cargador frontal. Esta maquinaria es la que provee o alimenta el resto de la trituradora, a la vez realiza una preselección, quitando la arena que pueda contener el material.

**Figura 11. Alimentador primario**



**Fuente: A Raytheon, Manual Crushing & Screening, technical, Cedarapids, Company. pág. 34.**



### **3. HERRAMIENTAS DE APOYO PARA UN BUEN MANTENIMIENTO PREDICTIVO**

En mecánica existe diversidad de herramientas, pero cuando hablamos de herramientas de apoyo para un mantenimiento predictivo, tenemos forzosamente que hablar de varios temas como análisis de vibraciones, análisis de ruidos y análisis de aceites, a continuación se da una base de conocimiento para cada área mencionada.

#### **3.1 Conceptos básicos sobre vibraciones**

Vibración es la variación de la configuración de un sistema con respecto al tiempo, alrededor de una posición de equilibrio estable.

Dado que las excitaciones más frecuentes son armónicas, lo cual se traduce en una variación temporal de las vibraciones también de tipo armónico, este movimiento adquiere una singular importancia en estudios vibratorios. Incluso cuando las excitaciones son periódicas, esto es, la configuración del sistema se repite a intervalos de tiempo iguales y el sistema es lineal, debido al análisis de Fourier y al principio de superposición, podemos concretarnos en el estudio de funciones armónicas.

Los analistas de vibración tienen por objeto proporcionar a la industria el conocimiento que permita mantener la operación eficiente y productiva de la maquinaria rotativa. Este servicio se basa en una idea simple: todas las máquinas vibran.

En este momento podemos preguntar ¿por qué vibran las máquinas?:

Vibran a causa de defectos mecánicos (en el caso de una trituradora, su zaranda vibra para lograr tamizar el pedrín). Estos defectos son inherentes al proceso tecnológico de fabricación, pues hasta nuestros días no hemos fabricado máquinas perfectas. Además causan pequeñas vibraciones y si se convierten en averías, tendremos mayores vibraciones.

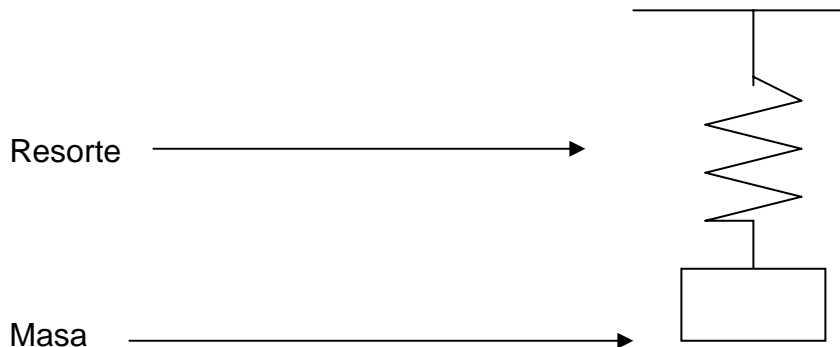
Los especialistas en vibración también proporcionan el equipo necesario que permitirá un orden a su grado de complejidad: medición, diagnóstico y protección. Así, una medición de niveles de vibración es una medición de la condición mecánica de la máquina. El análisis de la vibración identificará el problema y su causa. Por lo tanto, necesitamos dos elementos: el equipo para medir y analizar la vibración y el conocimiento de lo que es vibración, su causa, cómo medirla y analizarla.

En términos simples, podemos decir que vibración es el movimiento de vaivén de un punto de una máquina o pieza de una máquina a partir de su posición de reposo. La vibración tiene como causa la presencia de fuerzas.

### **3.1.1 Movimiento armónico**

De manera sencilla, la vibración puede ser descrita como un movimiento armónico simple.

**Figura 12. Movimiento armónico**



**Fuente: Bently Nevada, Manual de medición de vibraciones, técnicas de medición, Pág. 48.**

Ecuación de equilibrio

$$-mk = mg \quad \text{entonces} \quad mg+kx= 0$$

Ecuación No. 1

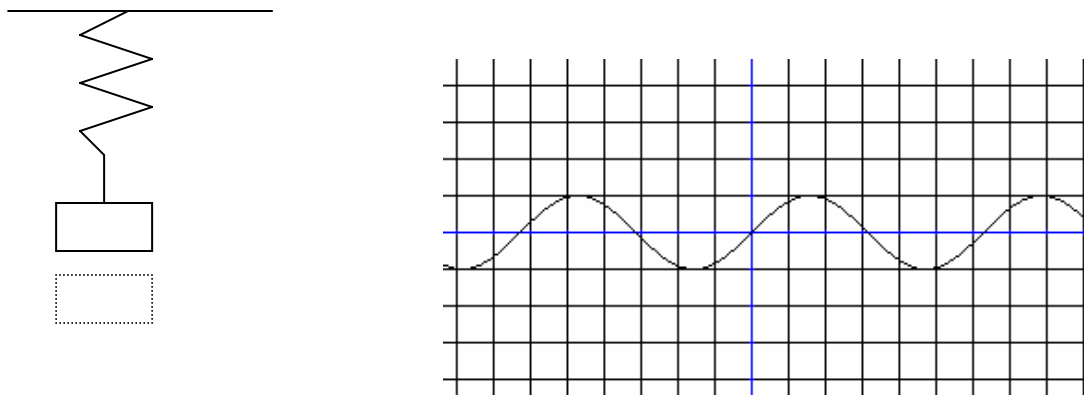
k: constante del resorte

m: masa del cuerpo suspendido

Hasta cuando no es aplicada una fuerza al peso no existe vibración, al aplicársele se moverá de un lado a otro de su posición de equilibrio. En ausencia de fricción, el movimiento en el dominio del tiempo es mostrado en la figura siguiente, tenemos así representada la vibración.

### 3.1.2 Movimiento con amortiguamiento

**Figura 13. Movimiento amortiguado**



**Fuente: Bentley Nevada, Manual de medición de vibraciones, técnicas de medición, pág. 50**

El movimiento del peso de su posición neutral hasta el límite más alto del recorrido de vuelta por el punto neutral, al límite más bajo del recorrido y su regreso a la posición neutral, representa un ciclo de movimiento.

El tiempo que se requiere para un ciclo es el periodo de vibración. El número de ciclos por período de tiempo es la frecuencia de vibración.

La ecuación de movimiento en este caso está dada por la expresión:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + k \frac{dx}{dt} = 0 \quad \text{Ecuación No. 2}$$

m: Masa del elemento

k: Constante del resorte

x: Posición (Amplitud).



La solución a esta ecuación diferencial es :

$$x(t) = x_0 \text{ Sen } ( \omega t + \theta ) \quad \text{Ecuación No. 3}$$

$x$  : Máxima amplitud.

$\omega$ : Velocidad angular (Radianes/ segundos)

$\theta$  : Ángulo de fase

$f$  : Frecuencia de la vibración ( en CPM o CPS = HZ).

$T$ : Período de la vibración

Donde:

$$\omega = 2 * \pi * f \text{ (Radianes/ segundos)}$$

$$T = \frac{1}{f} \text{ (segundos)}$$

La posición del peso en cualquier instante dado con referencia a algún punto fijo es la fase de la vibración.

Si la ecuación No. 3 se deriva dos veces, obtenemos:

$$\frac{dx}{dt} = x_0 \omega \cos ( \omega t + \theta ) \text{ velocidad}$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -x_0 \omega^2 \text{ sen } ( \omega t + \theta ) \text{ Aceleración}$$

Si hacemos los reemplazos en la ecuación anterior y simplificamos, podemos encontrar

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \text{ y como } f = \frac{\omega}{2 * \pi}$$

Tenemos:

$$f = \frac{1}{2 * \pi} * \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Esta es la frecuencia natural del sistema: depende de las propiedades físicas  $k$  y  $m$  y no de la perturbación inicial.

### **3.1.3 Vibraciones en sistemas con un solo grado de libertad**

Se dice que un sistema mecánico tiene un solo grado de libertad, si podemos expresar su posición geométrica en cualquier instante mediante un solo número.

#### **3.1.3.1 Vibraciones libres con amortiguamiento viscoso**

El estudio anterior permitió establecer que el movimiento en ausencia de amortiguamiento continúa permanentemente, por supuesto que esto nunca ocurre en la naturaleza, todas las vibraciones libres acaban por sucumbir después de cierto tiempo, debido a la acción de fuerzas de fricción, estas a su vez pueden ser causadas por rozamiento seco (Coulomb), rozamiento fluido o rozamiento interno entre moléculas.

Un amortiguamiento que ofrece especial interés es el llamado amortiguamiento viscoso y que se caracteriza porque la fuerza de rozamiento es proporcional a la velocidad del sólido amortiguado.

La ecuación de movimiento para este sistema se da a continuación, el término  $cx$  representa acertadamente las condiciones de amortiguamiento debidas a la viscosidad del aceite en un amortiguador.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad \text{Ecuación No.4}$$

La ecuación característica de esta ecuación diferencial es :

$$mr^2 + cr + k = 0 \quad \text{Ecuación No.5}$$

Cuyas raíces son :

$$r_1, r_2 = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}$$

El coeficiente de amortiguamiento crítico  $c_c$  se define como el valor de la constante de amortiguamiento que anula el radical.

$$\left(\frac{c_c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m} = 0$$

$$c_c = 2\sqrt{km}$$

Según  $c_c^2 = 4 km$ , el valor que tenga  $c$ , se distinguen tres casos generales de amortiguamiento viscoso.

### 3.1.4 Amortiguamiento supercrítico $c > c_c$

Las raíces  $r_1$  y  $r_2$  de la ecuación característica, son reales (negativas) y distintas por lo que la solución general de la ecuación diferencial, viene dada por:

$$x = Ae^{r_1 t} + Be^{r_2 t}$$

Que no corresponde a ningún movimiento vibratorio.

Para  $c > c_c$  no se observa comportamiento oscilante, lo que hace inapropiado el amortiguamiento supercrítico para fines prácticos de amortiguación.

Amortiguamiento crítico  $c = c_c$

La ecuación característica posee una raíz doble y la solución general es

$$r = -\frac{c}{2m}$$

Y la solución general de la ecuación 4 es:

$$x = (A + Bt)e^{rt}$$

Tampoco se tiene movimiento vibratorio. Los sistemas con amortiguamiento crítico son muy importantes en todas las aplicaciones técnicas, debido a que recobran su posición de equilibrio sin que tenga lugar ninguna oscilación y en el menor tiempo posible.

### 3.1.5 Amortiguamiento subcrítico $c < c_c$

Las raíces de la ecuación No.5 son complejas y la solución de la ecuación No.4 será:

$$x = x_0 e^{-\left(\frac{c}{2m}\right)t} * \text{sen}(w'_n t + \theta)$$

Donde

$$w'_n = \sqrt{\frac{k}{m} - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} = \sqrt{\frac{k}{m}} * \sqrt{1 - \left(\frac{c}{c_c}\right)^2}$$

El movimiento definido por la ecuación del amortiguamiento subcrítico es vibratorio, con una amplitud que disminuye con el tiempo, el tiempo transcurrido

$T = \frac{2\pi}{w_n}$  entre dos máximos consecutivos, se toma como período de la

vibración amortiguada. Si observamos el valor que da la ecuación anterior y si

éste lo reemplazamos en  $T = \frac{2\pi}{w_n}$ , es evidente que  $T$  es mayor que el

período de la vibración del sistema si no existiera amortiguamiento.

### 3.1.6 Vibraciones forzadas

Aquí suponemos sin pérdida de generalidad que la fuerza exterior aplicada al sistema es armónico.

### 3.1.6.1 Vibraciones forzadas sin amortiguamiento

Un sistema que vibre forzosamente sin amortiguamiento lo representa la siguiente ecuación:

La ecuación del movimiento es entonces:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = f_o \text{sen}(wt) \quad \text{Ecuación No. 6}$$

Es razonable suponer que la función:

$$x = x_o \text{ sen}(wt)$$

Pueda satisfacer esta ecuación:

En efecto, al sustituir esta función en la ecuación 5 y dividir por  $\text{sen}(wt)$  en ambos miembros de la ecuación resulta:

$$-mw^2 x_o + kx_o = F_o$$

Factorizando tenemos:

$$x_o(k - mw^2) = F_o$$

$$x_o = \frac{F_o/k}{1 - \frac{mw^2}{k}} = \frac{F_o/k}{1 - \left(\frac{w}{w_n}\right)^2}$$

y como

$$\frac{f_o}{k} = X_{est} \text{ (deformación estática)}$$

Al reemplazar en la ecuación 6 obtenemos:

$$\frac{x}{x_{est}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{w}{w_n}\right)^2} \text{sen}(wt) \quad \text{Ecuación No.7}$$

Esta ecuación es una solución particular de la ecuación 1.15. La solución general está dada por la solución homogénea mas esta particular, por lo tanto encontraremos :

$$X = A \text{ Sen } (w t + \theta) + \frac{x_{est}}{1 - \frac{w}{w_n}} \cdot \text{Sen } (wt) \quad \text{Ecuación No.8}$$

Ahora examinaremos el término dado por la ecuación No.7

Esta ecuación representa una onda senoidal de amplitud

$$\frac{1}{\left(1 - \left(\frac{w}{w_n}\right)^2\right)}$$

Si  $\frac{w}{w_n} < 1$  las amplitudes son positivas, pero si,  $\frac{w}{w_n} > 1$ , las amplitudes son negativas. Para comprender el significado de estas amplitudes negativas recordemos que la solución a la ecuación No.5 fue supuesta como:

$$X = X_o \text{ Sen } wt$$

Parece ser que en la región  $\frac{w}{w_n} > 1$  los resultados de  $X_o$  son negativos

Pero podemos escribir:

$$- X_o \text{ Sen } wt = X_o \text{ Sen } (wt + 180)$$

Lo que muestra que una amplitud negativa es equivalente a la amplitud positiva de una onda que esté simplemente desfasada 180 grados con la onda original.

Físicamente esto significa que mientras que  $\frac{\omega}{\omega_n} < 1$  la fuerza y el movimiento están en fase, estarán en oposición cuando  $\frac{\omega}{\omega_n} > 1$ . Mientras que cuando  $\frac{\omega}{\omega_n} < 1$  la masa está debajo de la posición de equilibrio cuando la fuerza empuja hacia abajo; encontramos que  $\frac{\omega}{\omega_n} > 1$  la masa está por encima de la posición de equilibrio mientras la fuerza empuja hacia abajo.

En el punto A la frecuencia de la fuerza es sumamente lenta y la masa se habrá deformado por la fuerza solamente en magnitud de su deformación estática.

$$( X_o = X_{est} ).$$

De otra parte para frecuencia muy altas  $\frac{\omega}{\omega_n} > 1$  la fuerza se mueve tan de prisa que la masa simplemente no tiene tiempo para responder y la amplitud resulta muy pequeña.

Pero para el punto C donde la amplitud tiende a infinito, coincide la frecuencia natural con la frecuencia forzada, presentándose el fenómeno conocido como resonancia.



### **3.1.7 Medición de vibración**

Hemos visto como en sistemas lineales la respuesta a una excitación interna y/o externa tiene características que permiten identificar la fuente de perturbación y la denominamos vibración.

Las fuerzas causantes de movimientos dinámicos pueden estar cambiando en dirección y magnitud. El efecto total que nosotros denominamos vibración tiene las siguientes propiedades:

1. Amplitud
2. Frecuencia
3. Fase
4. Forma de onda

#### **3.1.7.1 Amplitud de la vibración**

La distancia total recorrida por una masa suspendida vibrando alrededor de su posición de equilibrio es conocida como amplitud de vibración.

En maquinaria rotativa la amplitud de la vibración es la magnitud de los movimientos dinámicos presentes en sus componentes. Estos movimientos dinámicos se pueden cuantificar por tres parámetros diferentes: desplazamiento, velocidad, y aceleración.

La amplitud de la vibración determina la severidad de los movimientos dinámicos y nos dará a conocer con claridad el estado e integridad de las máquinas. Podemos aquí contestar la pregunta: ¿opera suavemente la máquina?.

Los parámetros que cuantifican la amplitud se expresan en términos de:

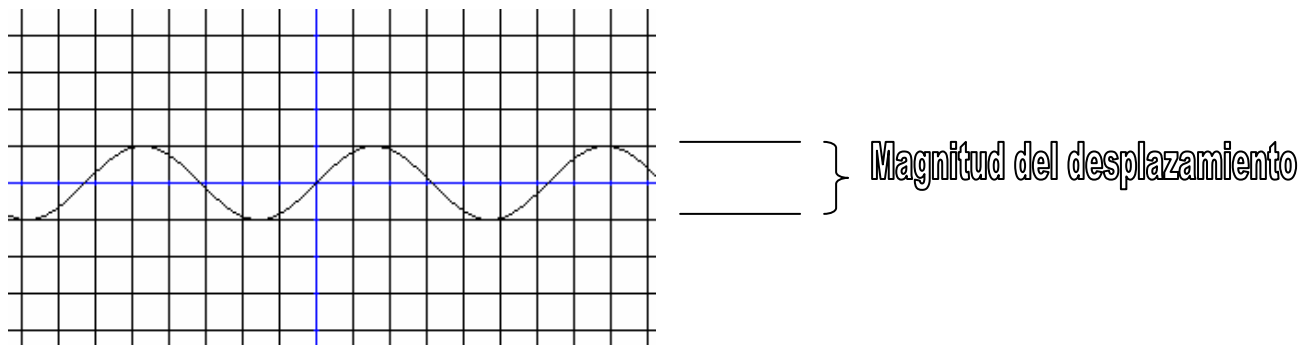
Desplazamiento – Mils o micrones

Velocidad – Pulgadas/ Segundos o MM/ segundos

Aceleración- Pulgadas/ Segundos<sup>2</sup> o MM/Segundos<sup>2</sup>

$$-G'S \quad 1G = 9.8 \text{ M/Segundos}^2$$

**Figura 14. Magnitud del desplazamiento**



**Fuente: Bently Nevada, Manual de medición de vibraciones, técnicas de medición, pág. 54.**

La distancia total recorrida por un elemento de máquina vibrando alrededor de su posición de equilibrio desde un máximo positivo hasta un máximo negativo, es un movimiento pico a pico, por lo tanto el parámetro desplazamiento es una medida de amplitud de vibración pico a pico.

Cualquier cambio en la magnitud de la amplitud medida es considerado razón suficiente para iniciar un estudio a fondo del estado de la máquina.

### 3.1.7.2 Velocidad y aceleración pico

El movimiento de un elemento de máquina vibrando alrededor de su posición de equilibrio es un movimiento con velocidad variable. Definimos velocidad pico como la velocidad máxima ( $dx/dt$ ), que adquiere el elemento en movimiento durante un ciclo de vibración. Al igual que el desplazamiento, la velocidad de la vibración nos indica la severidad del movimiento dinámico presente en la máquina.

La variación de la velocidad en la unidad de tiempo ( $dv/dt$ ) es definida como la aceleración. Para el movimiento dinámico de un elemento de máquina alrededor de su posición de equilibrio, la aceleración es variable a través del ciclo de vibración. Escogemos como otra medida de la amplitud de la vibración el valor máximo de la aceleración, en un ciclo de vibración y lo denominamos aceleración pico.

Es importante notar que los valores de interés utilizados en maquinaria rotativa para cuantificar la amplitud de la vibración en términos de velocidad y aceleración, son valores pico, ya que representan los valores máximos de energía a ser transformada como consecuencia de malos funcionamientos en máquina.

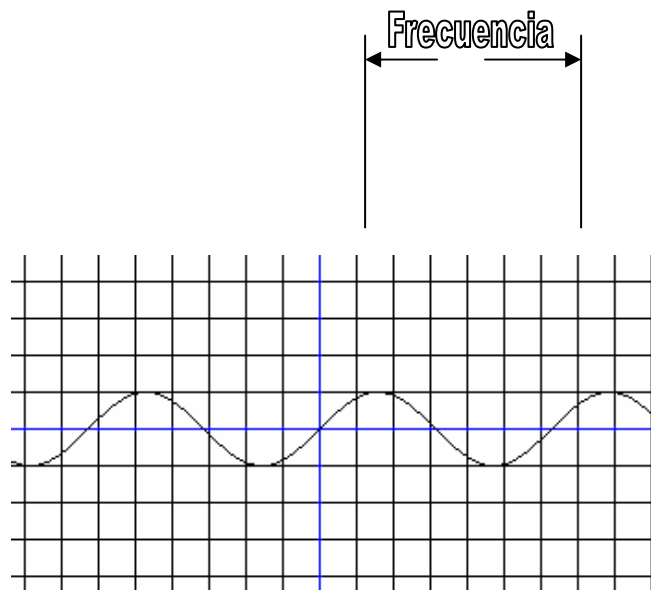
Un sistema para referirse a la medición de amplitud cuando el movimiento dinámico del elemento de máquina vibrando describe una onda seno, es el valor R.M.S (root Mean Square). Esta designación es muy común en los sistemas de medición europeos.

### 3.1.7.3 Frecuencia de vibración

El número de eventos que se repiten en la unidad de tiempo, se denomina frecuencia. Ésta es, en términos de vibración, el inverso del periodo.

$$F = \frac{1}{T}$$

**Figura 15. Frecuencia de vibración**



**Fuente: Bently Nevada, Manual de medición de vibraciones, técnicas de medición, pág. 56**

La frecuencia de la vibración permite identificar la causa de la vibración y así relacionar problemas en particular. Es por lo tanto uno de los parámetros más importantes a medir.

### 3.1.7.3 Ángulo de fase

Este parámetro se utiliza para describir la vibración comparando los movimientos dinámicos de elementos vibrando, o simplemente relacionando el movimiento dinámico de un elemento en particular con una referencia dada.

La comparación entre dos señales dinámicas permite determinar si los movimientos dinámicos presentes están en fase, o el grado de desfase existente.

En el análisis de maquinaria es muy útil esta consideración cuando se quiere evaluar si una vibración en realidad causa traumas en la máquina o si, por el contrario, es simplemente un comportamiento inherente de la máquina. Por ejemplo, si analizamos componentes de máquinas estáticos y/o componentes dinámicos, es muy probable que si las señales dinámicas presentes están en fase, la vibración no sea peligrosa, pero si los movimientos dinámicos presentan ángulo de desfase, entonces es muy posible que las fuerzas generadoras de estos movimientos dinámicos sean peligrosas para la integridad y buen funcionamiento de la máquina.

Un ejemplo típico ocurre cuando las máquinas se aflojan de sus bases, en este caso la señal de vibración tomada en la carcasa de la máquina estará desfasada con respecto a la señal tomada en la base.

La utilización del faser de referencia permite medir el ángulo de fase con exactitud y establecer si la vibración es sincrónica o asincrónica. Cuando ocurren vibraciones asincrónicas es determinante conocer si éstas tienen un movimiento de presesión hacia delante o hacia atrás con respecto a la dirección de rotación del eje, como se da cuando ocurre roce o giros de aceite.

La fase define comparativamente el lugar de un problema en particular, por ejemplo, el lugar del punto pesado en un rotor o el sitio donde un diente en un engranaje ha fallado. Por esto, mediciones exactas del ángulo de fase son extremadamente importantes en el balanceo de rotores y pueden llegar a ser fundamentales en el análisis y diagnóstico de maquinaria rotativa.

El comportamiento de la fase de la vibración en el tiempo es un indicador muy útil para la predicción de fallas. La variación de la fase puede ocurrir en lapsos de tiempo cortos o largos.

Este comportamiento, asociado a la variación de amplitud, permite identificar problemas como desbalanceo progresivo, torceduras y distorsiones térmicas a que están sujetos los rotores.

Cuando ocurren problemas como: partes sueltas en rotores, burbujas circulando en impulsores de bombas o modulación de la frecuencia de deslizamiento en motores de inducción, es típico encontrar variación de la fase en un ciclo de vibración, acompañado por modulación de la amplitud.

#### **3.1.7.4 Forma de onda**

Éste es el medio más importante de presentar los datos de vibración, nos permite comprender el comportamiento de cada máquina en particular ya que disponemos de la señal fiel de la vibración.

En muchas ocasiones, ocurre que información adicional es requerida para diagnosticar un defecto en particular o para estudiar el comportamiento dinámico de una máquina bajo condiciones específicas de operación. Es por esta razón que el análisis de la forma de onda en el tiempo es muy importante.

La forma dinámica de la vibración puede ser observada en un osciloscopio o bien en un analizador de tiempo real, el cual tiene la capacidad de capturar la señal en su memoria digital. De cualquier forma, la señal dinámica que describe el comportamiento del elemento de máquina o estructura sujeta a vibración puede proveer la siguiente información:

1. Descripción gráfica del comportamiento total en el dominio del tiempo.
2. Medición de la posición de un punto en cada instante de tiempo relativo a su posición de equilibrio.
3. Medición de la amplitud pico a pico en cada instante.
4. La relación de fases entre diferentes frecuencias diferentes posiciones.
5. Verificación de la simetría de la señal, la cual está relacionada con la linealidad del sistema vibrante y/o la naturaleza de la fuerzas existentes.
6. Podemos calcular la medida de amortiguación para el sistema.
7. La dirección de la fuerza inicial de excitación.
8. Duración de una perturbación como roce y cálculo de la zona que sufre calentamiento.
9. Efecto de las variables de proceso sobre el comportamiento dinámico.

El análisis de la forma de onda depende en grado considerable del reconocimiento de las señales presente, cuando se analizan casos particulares y no existen patrones estándar que permitan asociar la forma de la onda a un problema particular en forma directa. Por esta razón, el conocimiento y la experiencia acumulada del ingeniero en vibraciones son determinantes en la detección de problemas cuando se observan señales.

Para facilidad de interpretación de formas de onda con base de tiempo, éstas generalmente se presentan en coordenadas cartesianas. En la ordenada se representa la amplitud especificando niveles positivos o negativos a partir de

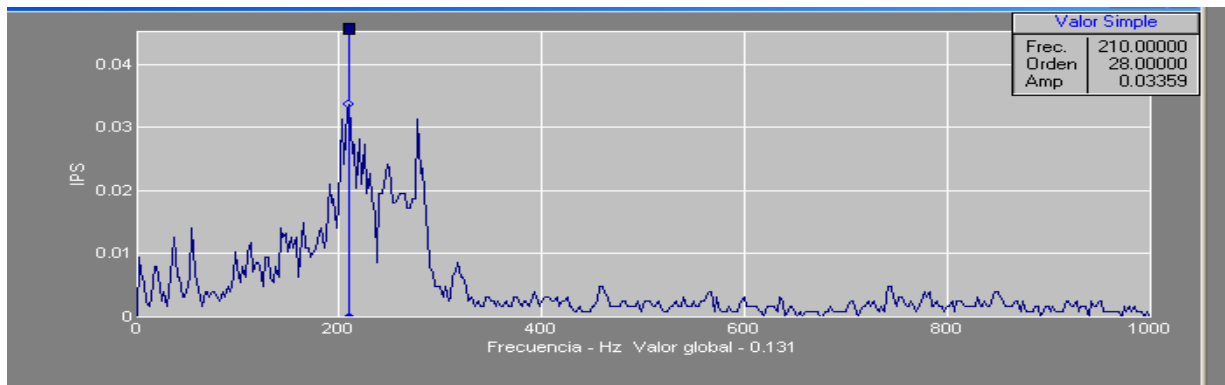
la abscisa, donde la amplitud vale cero y en la abscisa representamos el tiempo.

Dependiendo del rango de tiempo a ser observado, podemos encontrar señales muy comprimidas o señales muy expandidas, por lo tanto, el rango seleccionado deberá permitir adecuada descripción visual del fenómeno de interés.

Aplicaciones generales de la forma de la onda en el dominio del tiempo son:

1. Permite observar pulsos agudos y repetidos típicos en rodamientos.
2. Permite observar cambios de fase y modulación de amplitud.
3. Podemos diferenciar fácilmente entre desbalanceo y desalineación. Hoy día, podemos calcular longitud de grietas en rodamientos defectuosos con base en el análisis de la forma de la onda.
4. Podemos determinar condiciones de inestabilidad en cojinetes, que no son detectables mediante el análisis frecuencial.

**Figura 16. Espectro de vibración**



Fuente: SKF, Manual del usuario, Microlog, CMVA 60, demo database, pág. 24.



### 3.1.7.5 Órbitas

Una variación del análisis de la forma de la onda es la combinación de las señales obtenidas de los sensores de proximidad dispuestos a  $90^{\circ}$  en un mismo plano. Si una de las señales es aplicada a la entrada horizontal de un osciloscopio y la señal de otro sensor es aplicada a la entrada vertical, entonces en la pantalla del osciloscopio obtenemos un patrón de Lissajous, también llamado órbita.

Las órbitas así construidas representan una fotografía magnificada del movimiento del eje dentro del juego interno del cojinete. Esta es una información valiosa en el diagnóstico del problema como desalineamiento, desbalanceo, inestabilidad de máquinas y roces.

Cuando la órbita incluye la señal de referencia (provista casi siempre en el eje z de un osciloscopio), será posible efectuar balanceos dinámicos o bien observar armónicos del movimiento dinámico presente. De otra parte, la distorsión de la órbita generalmente indica condición de precarga (fuerzas interiores y/o exteriores) que se traduce en una trayectoria forzada que representa el movimiento del centro del eje.

Adicionalmente, se puede observar en la órbita la generación de lazos internos y/o de lazos externos, característico de inestabilidad del tipo externo. La órbita también indica la diferencia de rigidez propia del sistema medido. Si ésta es circular, la rigidez en las dos direcciones es la misma, pero si la órbita es óptica, la rigidez en las dos direcciones es diferente. Esta característica obedece a condiciones constructivas, técnicas y de diseño propias de las máquinas.

De la misma forma que las señales en el dominio de tiempo, las órbitas pueden ser filtradas para facilitar la tarea de interpretación y diagnóstico, cuando las señales son complejas para que componentes de la vibración a diferentes frecuencia no sean eliminadas, se deben utilizar filtros de alta calidad.

### **3.1.8 Transductores para la medición de la vibración**

Al presentar los parámetros de la vibración expresamos que la amplitud de la vibración es cuantificada por tres magnitudes diferentes, pero íntimamente relacionadas que son:

1. Desplazamiento de no contacto
2. Velocidad pico
3. Aceleración pico

Ahora bien, la forma práctica de medir vibración está basada en el desarrollo de traductores que nos permiten convertir energía mecánica (presente en las máquinas en forma de vibración) a energía eléctrica.

Estos transductores nos brindan información estrictamente relacionada con los parámetros que cuantifican la amplitud de la vibración.

Los transductores más comúnmente usados en maquinaria rotativa son:

1. Sensor de no contacto
2. Sensor sísmico
3. Acelerómetro

### **3.1.8.1 Sensor de no contacto**

Este sensor, también conocido como sensor de corriente parásita no contactante, mide el entrehierro y presenta un voltaje proporcional al entrehierro; se utiliza para medir la distancia (GAP) o el cambio de distancia que hay entre cualquier material conductor y la punta del sensor.

El transductor es básicamente una bobina de alambre de extremo plano que se encuentra en el extremo de una punta cerámica. La bobina está protegida por 0.010 pulgadas de fibra de vidrio epóxica y no es visible. La punta de cerámica se extiende fuera del cuerpo de acero del sensor.

El sensor es activado por un voltaje de radio frecuencia (R.F) generado por un proximito. La señal de salida del proximito es un voltaje proporcional a la distancia del entrehierro entre el sensor y la superficie observada.

## **3.2 Análisis de aceites**

En un mantenimiento predictivo, es muy importante tomar muestras periódicas de lubricante y mandarlas a laboratorio para conocer su estado, el análisis de aceites es fundamental para conocer las partículas contaminantes en el mismo.

### **3.2.1 Pruebas físicas y químicas**

El fluido ó lubricante ideal deberá ser lo suficientemente viscoso para mantener las superficies apartadas, permanecer estable bajo los cambios de temperatura, mantener limpias las superficies lubricadas y no deberá ser corrosivo.

Los aceites vegetales y animales se adhieren a las superficies por lubricar un poco mejor que los aceites minerales, pero desgraciadamente ocurren cambios químicos cuando existe un sobrecalentamiento, siendo por lo tanto inaceptables para lubricación de máquinas y motores que trabajan a altas temperaturas. Para la mayoría de los motores y maquinaria se deberán emplear lubricantes minerales refinados en forma apropiada.

El aceite mineral es una mezcla de cientos de hidrocarburos diferentes, teniendo cada uno de ellos propiedades individuales. Únicamente ciertos hidrocarburos son aceptables como constituyentes de los aceites lubricantes.

Después de un refinamiento adecuado para eliminar constituyentes indeseables, el lubricante puede ser clasificado generalmente como nafténico o parafínico. Cada clase tiene sus ventajas individuales y por lo tanto una es más aceptada que la otra para ciertas condiciones de funcionamiento.

Los lubricantes de bases nafténicas se evaporan en una forma muy limpia de las paredes del cilindro y del área de los anillos después de haber lubricado el motor, dejan solamente una pequeña cantidad de carbón, evitándose de este modo el atascamiento de los anillos. Los lubricantes de base parafínica no se espesan tanto como los otros a bajas temperaturas si se han refinado apropiadamente, siendo más aceptables para motores que tienen que efectuar el arranque en tiempo frío.

Pruebas se han desarrollado para medir la calidad de un aceite lubricante, las cuales sirven como un medio de identificación y también dan una indicación de cómo se comportará al usarse. Muchas de ellas son pruebas físicas, incluyendo las de apariencia, olor, color, gravead, llamarada, incendio, punto de fluidez, viscosidad, residuo de carbono y cenizas.

Entre las pruebas químicas más importantes están el índice de neutralización y el índice de saponificación.

Las características de comportamiento de un aceite se determinan posteriormente por pruebas que miden la estabilidad de oxidación, resistencia a la corrosión, detergencia y dispersión. Otras pruebas miden la estabilidad de la espuma, presión extrema, reacción con el agua, homogeneidad y compatibilidad.

Todas las pruebas anteriores, agregadas a las que se hacen en las máquinas y motores de prueba, sirven para predecir el comportamiento de un aceite nuevo. Pruebas adicionales se emplean cuando va a analizarse un aceite usado.

Existen varias pruebas de los aceites no usados para saber si éstos son de base nafténica o parafínica, ó saber si contienen algún aditivo.

Si la apariencia y el olor de un aceite son anormales, usualmente es una indicación de que se encuentra presente uno o más aditivos.

El color de un aceite fue alguna vez de importancia. La mayoría de los aceites destilados eran de color rojo, mientras que los aceites que contenían residuos eran verdes o negros. Con reflejo de la luz, los aceites nafténicos tenían una fluorescencia azul, mientras que los parafínicos daban un color rojo o ligeramente verde. A medida que la tecnología en el refinamiento y el uso de aditivos han avanzado, tales generalizaciones han sido inaplicables.

El peso específico de un aceite se mide por la gravedad A.P.I. Los aceites que tienen una gravedad arriba de 24 son usualmente clasificados como parafínicos, y aquellos que la tienen debajo de 24 son nafténicos. Esta división no puede seguirse estrictamente, ya que algunos aceites son mezclas de constituyentes nafténicos o parafínicos.

La volatilidad del aceite se indica por las pruebas de llamarada, de encendido y residuo de carbono. Los aceites nafténicos tienen más llamarada y encendido bajo que los aceites parafínicos de grado equivalente.

Si no hay aditivos presentes, el residuo de carbono de un aceite nafténico es más ligero y blando que el de un aceite parafínico.

La fluidez de un aceite se mide por su viscosidad, por su índice de viscosidad y por su punto de derrame. Los aceites parafínicos tienen más altos índices de viscosidad que los aceites nafténicos. Los aceites parafínicos desencerrados apropiadamente son más fluidos a bajas temperaturas que los aceites nafténicos de grado comparable.

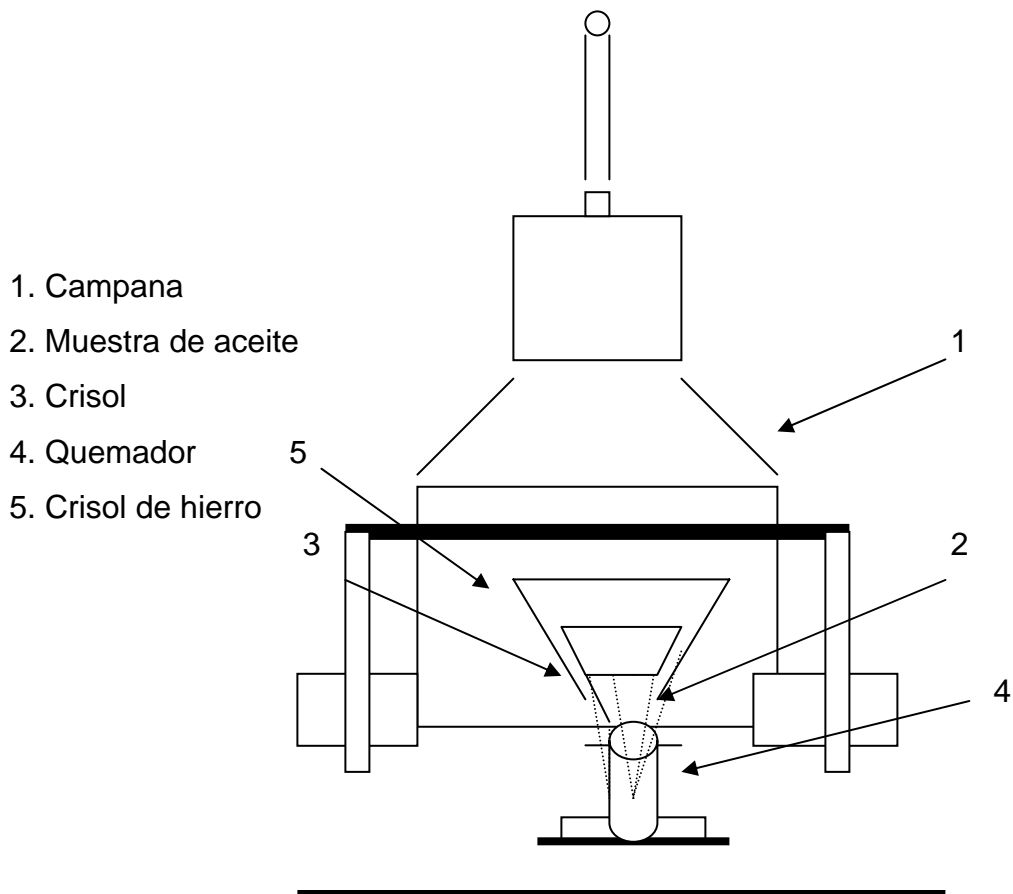
Si un aceite deja un residuo apreciable después de quemarse, al hacer la prueba de cenizas, es probable que estén presentes aditivos metálicos. Esto también puede verse al hacer la prueba del residuo de carbono.

### **3.2.1.1 Residuo de carbono**

La prueba del residuo de carbono determina la cantidad de carbono que permanece después de la evaporación de la parte volátil de un aceite, cuando éste es sometido a calentamiento sin estar en contacto con el aire, desplazando a este del recipiente que contiene el aceite, por medio de vapor de escape. Esta prueba es una indicación de la volatilidad de un aceite y es la medida de la

cantidad de componentes pesados que, en lugar de evaporarse cuando se calientan, permanecen en el fondo en forma de coke.

**Figura 17. Quemador de prueba de aceite**



**Fuente: ALTING, Leo. Procesos para la ingeniería de manufactura. Ediciones Alfa omega, 1990. pág. 88.**

### **3.2.1.2 Resistencia a la oxidación**

Cuando un aceite está a altas temperaturas en presencia de aire, se forman productos de oxidación que son perjudiciales. La habilidad de un aceite para resistir la oxidación bajo ciertas condiciones se determina calentando el aceite usualmente entre 300-500° F, algunas veces pasando aire a través del aceite y estando presentes cobre o hierro como catalizadores.

El valor de tales pruebas es problemático, puesto que bajo ciertas condiciones, en servicio real, el aceite está sujeto a una gran variedad de condiciones oxidantes, y, por lo tanto, ninguna prueba bajo las condiciones prescritas puede relacionarse muy bien con el servicio real.

### **3.2.1.3 Resistencia a la corrosión**

Para determinar si un aceite corroe el metal de que está hecho un cojinete se exponen probetas de dicho metal al aceite por unas horas; el aceite es agitado y generalmente mantenido a una temperatura alrededor de 350°F. Si bajo estas condiciones no se aprecian pérdidas de peso en la probeta, podrá decirse que este lubricante no será corrosivo cuando esté en servicio. Sin embargo, puede haber alguna corrosión en el servicio real, dependiendo esto de la severidad de las condiciones de funcionamiento.

### **3.2.1.4 Detergencia**

La detergencia relacionada a los aceites para motores y maquinaria es la característica que evita el depósito inicial de productos de la combustión del combustible y de los aceites oxidados en motores nuevos ó limpios. En motores sucios, la detergencia ejerce una limpieza ó acción disolvente sobre los residuos viejos que se han acumulado en el motor evitando que se formen nuevamente.



Muchos ensayos han sido hechos para encontrar un método simple para evaluar la capacidad detergente de un aceite. Sin embargo, la prueba real con un motor o máquina es la más adecuada para medir estas características.

#### **3.2.1.5 Dispersión**

La dispersión puede ser definida como la característica de un aceite para motor que hace que los depósitos insolubles finalmente divididos que resultan de la combustión y la oxidación del aceite, se mantengan en estado de suspensión por todo el aceite. En un aceite con pobre calidad de dispersión ocurre la aglomeración o precipitación de esos productos, formándose una notable cantidad de depósitos sobre las partes del motor.



## **4. DESCRIPCIÓN DE MANTENIMIENTO INDUSTRIAL**

La necesidad de personal calificado hoy en día en las empresas es cada vez más necesario. Cuando el personal no está capacitado, por lo regular no conoce los diferentes tipos de mantenimiento que existen, por lo cual solamente aplican correcciones en el momento de ocurrir la falla. Para tener un conocimiento de lo que estamos refiriendo, realizamos una descripción de por lo menos tres tipos de mantenimiento industrial.

### **4.1 Mantenimiento correctivo**

Simplemente trabaje la máquina hasta que ésta falle y luego repárela.

### **4.2 Mantenimiento preventivo**

Basado en inspecciones periódicas, ajustes y reemplazos de partes desgastadas, también incluye arme y desarme de equipo programado en mantenimiento. Este tipo de mantenimiento es ciertamente mejor que el anterior pero eventualmente resultará en mayores costos por:

- Reemplazo de partes en buen estado.
- Cambio de fluidos y componentes de mayor vida útil.
- Daños de partes buenas debido a inapropiada instalación después de una inspección.

### 4.3 Mantenimiento predictivo

Monitoreo regular de la condición de la máquina, permitiéndole trabajar hasta justo antes de un mantenimiento programado.

Métodos de mantenimiento predictivo implican la habilidad de conocer cuando una máquina o componente puede necesitar mantenimiento ó reparación. Este método excluye paradas e inspecciones en equipos con buenas condiciones de operación programadas en mantenimiento preventivo.

Programas de mantenimiento en maquinaria rotativa, basados en muestras e inspecciones periódicas han sido mejorados por la adición de instrumentos y monitores de vibración. Aunque el mantenimiento preventivo ha sido valioso para aumentar la producción y disminuir tiempos de parada imprevistos, la filosofía del mantenimiento ha evolucionado y la medición directa de la condición de la máquina es ahora la base de programas de mantenimiento predictivo.

El análisis de vibraciones, análisis de aceite, análisis de ruidos etc, como parte del mantenimiento predictivo, han probado ser una técnica que aumenta la confiabilidad operativa, que disminuye los costos de operación, que aumenta los tiempos de producción y que previene fallas catastróficas en máquinas.

La introducción de nuevas técnicas de medición y monitoreo han ayudado al personal de mantenimiento en el análisis y diagnóstico de problemas en maquinaria rotativa.

En particular, la habilidad de monitorear movimientos del eje con sensores de proximidad ha aumentado la información disponible para determinar la condición de la máquina.

Apoyados en criterios económicos, tecnológicos y utilizando información significativa, podemos decidir la implementación de programas de mantenimiento predictivo.

#### **4.4 Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de mantenimiento**

El concepto de mantenimiento preventivo y predictivo requiere una organización puesta en marcha, e implementación de programas de mantenimiento. Todos los esfuerzos encaminados a garantizar la mejor operación de la planta deberán ser justificados en términos económicos y técnicos.

Una guía adecuada para la correcta selección se basa en las ventajas y desventajas de cada uno de los diferentes tipos de mantenimiento, que presentamos a continuación:

##### **4.4.1 Ventajas del mantenimiento correctivo**

- No requiere planeación.
- No requiere grabación de datos.
- No requiere costos de mantenimiento programados.

##### **4.4.2 Desventajas del mantenimiento correctivo**

- Pérdidas de producción no catalogadas.
- Reparaciones mayores.

- Elevado inventario de repuestos.

#### **4.4.3 Ventajas del mantenimiento preventivo**

- Pérdida pequeña de producción por parada programada.
- Requiere reparaciones menores.
- Inventario de repuestos reducidos.
- Buenos hábitos de compra.

#### **4.4.4 Desventajas del mantenimiento preventivo**

- Inspección detallada del equipo, basada en períodos de tiempo y no en condiciones de operación.
- Muchas máquinas son inspeccionadas sin necesidad (desarmadas).
- Necesidad de una planeación extensa.
- Mucha información debe ser archivada.

#### **4.4.5 Ventajas del mantenimiento predictivo**

- Incluye las ventajas del mantenimiento preventivo.
- Elimina pérdidas de producción.
- Elimina la necesidad de una inspección programada al equipo (desarme).
- Reduce tiempos de mantenimiento.
- Encuentra serios problemas.
- Elimina llamadas de emergencia.
- Se conoce con precisión cuando y qué debe ser comprado.

#### **4.4.6 Desventajas del mantenimiento predictivo**

- Necesidad de implementación del programa.
- Planeación requerida.
- Entrenamiento de personal.
- Costo de instrumentación requerida.
- Necesidad de archivo de información.

#### **4.4.7 Características adicionales del mantenimiento predictivo**

- Incremento en la seguridad de la planta: monitoreo permanente ó periódico de vibración, puede detectar potenciales e incipientes transformaciones destructivas de energía que pone en peligro el personal de la planta.
- Reducción en costos de mantenimiento: el mantenimiento predictivo garantiza una disminución de costos en equipo monitoreado como una función real de la condición de la máquina en el tiempo. Adicionalmente inventario de repuestos puede ser reducido si una máquina es apropiadamente monitoreada y mantenida.
- Vida útil de la máquina: cuando la maquinaria rotativa es monitoreada ésta podrá ser operada continuamente hasta que la condición real indique el término de vida útil.
- Mayor disponibilidad de la máquina: las paradas serán programadas sólo cuando sean estrictamente necesarias, sin interrupciones sorpresivas de producción y sin los problemas de un mantenimiento imprevisto.
- Bajos costos en seguros: como el sistema de monitoreo garantiza la protección del equipo, los riesgos asumidos son menores, esta característica implica una disminución en costos de pólizas.

- Incremento utilidad: todos lo numerales anteriores enmarcan una disminución real de costos.

#### **4.5 Técnicas aplicadas en mantenimiento predictivo**

- Análisis de vibraciones.
- Balanceo de equipos, en taller, en el campo.
- Inspecciones termográficas
- Pruebas no destructivas N.D.T
- Detección acústica de fugas
- Análisis de aceites lubricantes
- Control de calidad en trabajos de mantenimiento
- Pruebas de motores eléctricos, amperaje y temperatura.
- Análisis de fallas de rodamientos
- Análisis de fallas de equipos
- Control de calidad en reparación de motores eléctricos.

#### **4.6 Costos en un mantenimiento predictivo**

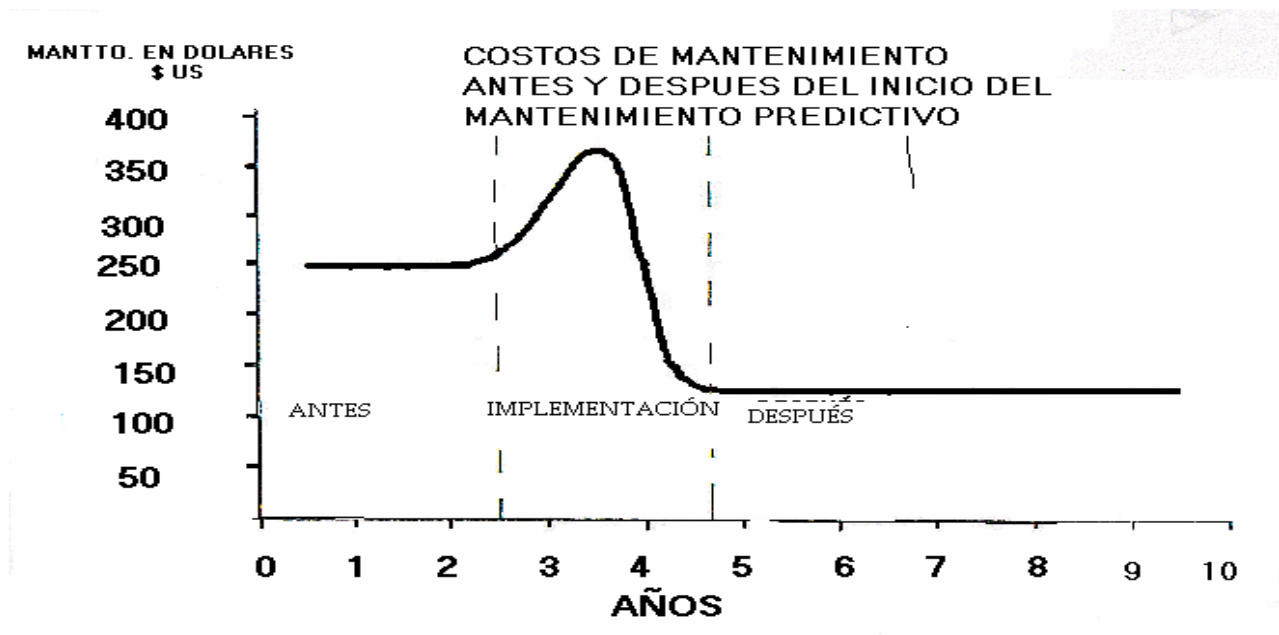
En una implementación de un mantenimiento predictivo, los costos son una variable muy importante, al igual que en todas de las inversiones en las industrias, muchas veces nos basamos en ellos para la toma de decisiones o influyen en gran medida para la realización de un proyecto. En un mantenimiento predictivo se tiene un costo y es por ello que el gerente de mantenimiento o el ingeniero a cargo de la implementación del proyecto, deberá justificar y vender la idea de una muy buena manera.



La gráfica siguiente describe perfectamente el comportamiento del costo en la implementación. Inicialmente, aplicando un mantenimiento correctivo o preventivo solamente, el costo es elevado; en el momento de la aplicación del mantenimiento predictivo, la curva nos muestra un pico, un alza, por la compra de equipo, implementación y gastos de contratación de personal.

Posteriormente a la implementación los costos disminuyen, puesto que la vida de los equipos es monitoreada y no se cambian repuestos que aún tengan vida útil, tampoco se mal gasta lubricante en buenas condiciones de operación y no se realizan paros innecesarios, los cuales representan pérdidas.

**Figura 18. Costos de mantenimiento**



Fuente: JOHNS S. Mitchel, Estableciendo un programa de mantenimiento predictivo, SKF Condition Monitoring, pág. 45.



## 5. PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Es importante entender los objetivos y responsabilidades de cada uno de los departamentos en las diferentes compañías, empresas etc, por esta razón, se debe hacer hincapié en el concepto: sistema de información para maquinaria.

Antes de implementar un programa de mantenimiento predictivo, cuatro preguntas deben ser resueltas a cerca del sistema de información:

- Quiénes necesitan información del programa de mantenimiento predictivo en su organización: personal de operación, ingenieros de mantenimiento, o especialistas en maquinaria.
- Qué tipo de información es necesaria: variables de proceso, temperatura en cojinetes, análisis de lubricantes, valores promedio de vibración y tendencias, información dinámica y de vibración en estado estable e información dinámica en estado transiente.
- En qué tipo de maquinaria es necesaria: critica, esencial o de propósito general.
- En qué modo de operación de la máquina la información debe ser adquirida: en líneas continuamente monitoreadas, en periódicamente monitoreadas, durante un arranque, o durante una parada.
- Usted puede asegurar que la correcta información sea obtenida por el personal adecuado, en el tiempo correcto y en los formatos correctos, así que las decisiones serán tomadas en forma correcta.

## **5.1 Guía para la elaboración de un programa de mantenimiento predictivo**

Esta guía no pretende llenar todas las expectativas respecto a la implementación de un programa de mantenimiento predictivo. El ingeniero a cargo tendrá que ser muy cuidadoso en seguir las instrucciones y ser creativo para poder tener éxito. Como toda guía, provee muchas herramientas, sin embargo, demanda mucha concentración y capacidad para vender ideas al área de la gerencia general y al personal operativo, para lograr establecer en su industria dicho plan.

### **5.1.1 Niveles de información requerida**

Son varios los niveles en donde se requiere que la información llegue como el instrumento prioritario para el comienzo del control y la toma de decisiones, por ejemplo:

#### **5.1.1.1 Departamento de operación**

Los operadores son responsables en primer término por la seguridad y eficiencia en la operación de la planta, así que ellos requieren cierta información incluidos valores promedio de vibración, niveles de alarma, tendencia de la vibración, ciertos resultados ya digeridos del análisis de aceites A.P.A., distorsión o ruidos anormales y variables de proceso, entre otros.

Si un problema está desarrollándose en una máquina, no será responsabilidad del operador diagnosticar el problema específico, ésta será una labor del departamento de mantenimiento, en especial de mantenimiento preventivo.

### **5.1.1.2 Departamento de mantenimiento**

Los ingenieros de mantenimiento son típicamente responsables por el mantenimiento, paradas programadas y labores de reparación.

El objetivo fundamental será reducir el número de paradas extendiendo el tiempo de operación de la máquina y, por lo tanto, reduciendo costos de mantenimiento. Ingenieros de mantenimiento requieren información para determinar hasta cuando una máquina puede operar, cuál es el tipo de falla y cuándo será programado el mantenimiento.

Esta información incluye la misma requerida por los operadores más información dinámica de vibración en estado estable, correlacionarla con variables de proceso, análisis periódicos de aceite A.P.A., historial completo.

### **5.1.1.3 Gerencia general**

La información deberá llegar tanto del departamento de operación como del departamento de mantenimiento, el objetivo de la gerencia es proporcionar el recurso financiero si éste faltara.

### **5.1.1.4 Departamento de maquinaria rotativa**

Los objetivos de los especialistas en maquinaria rotativa son los de prevenir serios problemas en maquinaria antes de que ellos ocurran y solucionarlos cuando estén presentes.

En general, el especialista en maquinaria rotativa diagnosticará y eliminará problemas de maquinaria.

Un especialista en maquinaria rotativa usualmente requiere una historia completa de la máquina, pruebas de aceptación en sitio e información dinámica en estado transiente, tomada durante arranques y paradas de la máquina, los análisis A.P.A.. Esta información es agregada a la ya existente para el personal de operación y el departamento de mantenimiento.

### **5.1.2 Aplicación de la información en los diferentes tipos de maquinaria**

La maquinaria rotativa generalmente puede ser dividida en tres clasificaciones:

- Equipos críticos: absolutamente necesarios para garantizar la continuidad de la operación en la planta.
- Equipos esenciales: necesarios para una operación parcial de planta, pero pueden ser parcial o totalmente reemplazados.
- Equipos de propósito general: no esenciales para los procesos de planta fácilmente reemplazables.

Diferentes tipos de información en maquinaria rotativa pueden ser obtenidos a diferentes estructuras de costos. Una compañía puede instalar la más completa instrumentación para sus máquinas críticas e instalar sistemas menos costosos en equipos esenciales o de propósito general.

### **5.1.3 Implementación de recursos humanos e instrumentación**

Un acercamiento a la creación de un programa de mantenimiento predictivo es el establecimiento de recursos humanos con miembros para todos los departamentos involucrados en el programa y con la designación de un especialista en maquina rotativa como director. Estas personas serán responsables por el desarrollo del programa de mantenimiento predictivo desde el concepto mismo hasta una condición de operación real.

Los siguientes pasos son considerados en la creación de un programa de mantenimiento predictivo:

### **5.1.4 Estructura de Inspección**

Tenemos que lograr una estructura, la cual realmente se llene las condiciones establecidas, en forma disciplinada, seria, responsable, puesto que si esto no se realiza de la manera adecuada, entonces nuestro programa de mantenimiento predictivo no daría resultados correctos, todo sería una farsa. Puesto que todos los resultados estarían mal orientados y errados, o simplemente no se podría ejecutar el programa.

Para ello se necesita de personal calificado, objetivos claros, recursos suficientes, designación de la maquinaria la cual se someterá a las inspecciones. Todo para lograr un monitoreo continuo, el cuadro siguiente ayudará a lograr una mejor visualización.

*Tabla II Estructura de inspecciones periódicas*

Establezca director y personal para el proyecto	
Establezca objetivos del programa	
Aliste recursos	Mano de obra Presupuesto
Recuerde de las máquinas	Diseño Comportamiento Costos Problemas
Establezca prioridad para incorporar unidades al programa	

Recuerde la organización operacional deje, responsabilidad y prácticas para determinar información necesaria
Desarrolle un sistema de requerimientos para documentación
Compre e instale instrumentación y programas necesarios
Entrene todas las personas vinculadas al proyecto
Desarrolle y maneje el sistema de información y retro información que les asegure beneficios económicos cuando el programa esté implantado



Continuación

Recuerde que todos los cuidados de planeación y trabajo requerido para justificar un programa de mantenimiento predictivo pueden ser inútiles si el programa no es puesto en marcha cuidadosamente.

**Fuente: JOHNS S. Mitchel, Estableciendo un programa de mantenimiento predictivo, SKF Condition Monitoring, pág. 48.**

Esto identifica que a cada una de las máquinas se le identificará dentro de un subgrupo de acuerdo a líneas específicas de operación y cada punto de medición será establecido.

### **5.1.5 Inspecciones periódicas**

Llamamos inspecciones periódicas a lograr establecer un programa de monitoreo continuo, para esto se deben considerar los siguientes aspectos:

1. Tipo de información

- a) Valores globales
- b) Valores que exceden los límites de alarma
- c) Valores de variables relacionadas

2. Frecuencia:

Establecer tiempo para recolectar la información: diaria, semanal, mensual.

3. Personal responsable

- a) De la recolección
- b) Análisis y tendencias
- c) Reportes y recomendaciones a seguir

La experiencia provee excelente guía para seleccionar intervalos de medición.

Firmas de vibración registradas en un sistema de monitoreo continuo son generalmente tomadas mensualmente en maquinaria que ha experimentado problemas en el pasado o cuando el historial registra que los problemas se han desarrollado súbitamente.

Para casi toda la maquinaria protegida con sistema de monitoreo continuo y una historia buena de operación, firmas de vibración trimestrales son típicas. Intervalos de seis o doce meses son usados algunas veces en maquinaria que ha probado ser altamente confiable.

Mediciones relacionadas con desempeño y condición de componentes específicos, por ejemplo diferencias de presión de tambor de balance, condición de entrada y salida (escape), flujos, etc., son recogidas generalmente al menos una vez al mes en equipo vital sin respaldo.

Monitoreo de mediciones de condición deben efectuarse con un mínimo de intervalos mensuales en equipo vital con respaldo, sin necesidad de monitoreo continuo. Cuando la operación es rotada cada mes entre dos unidades, mediciones de condición son usualmente tomadas en meses alternos cuando el equipo está en operación.

Mediciones de condición trimestrales son generalmente empleadas en equipo no vital con respaldo. En algunos casos, el intervalo es extendido a cada seis meses.

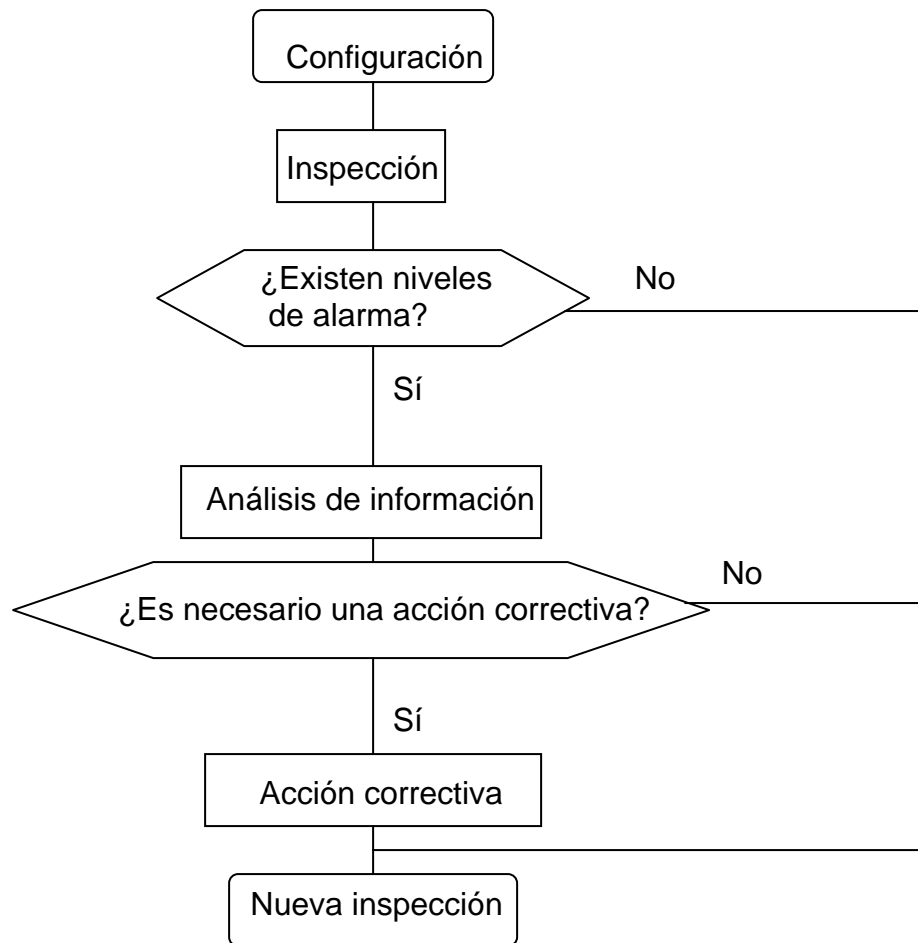
Mediciones de condición trimestral o semestral son recomendadas en equipo no vital operado intermitentemente.

Antes de dejar este tema, hay un punto más que debemos mencionar. Tan pronto como se noten problemas, el intervalo de obtención de mediciones debe reducirse. En algunos casos, mediciones deberán tomarse semanalmente o aún diariamente para proveer suficiente advertencia de un daño.

Si el problema es tan preocupante que mediciones diarias se consideran necesarias, se debe reconocer que el equipo está en condición muy marginal y probablemente no debiera operarse del todo, puesto que en el momento de desarrollarse mediciones diarias concluiríamos que el equipo tiene condiciones severas de funcionamiento, riesgo elevado y en cualquier momento puede ocurrir la falla, por lo tanto no se recomienda que se llegue a esta condición.

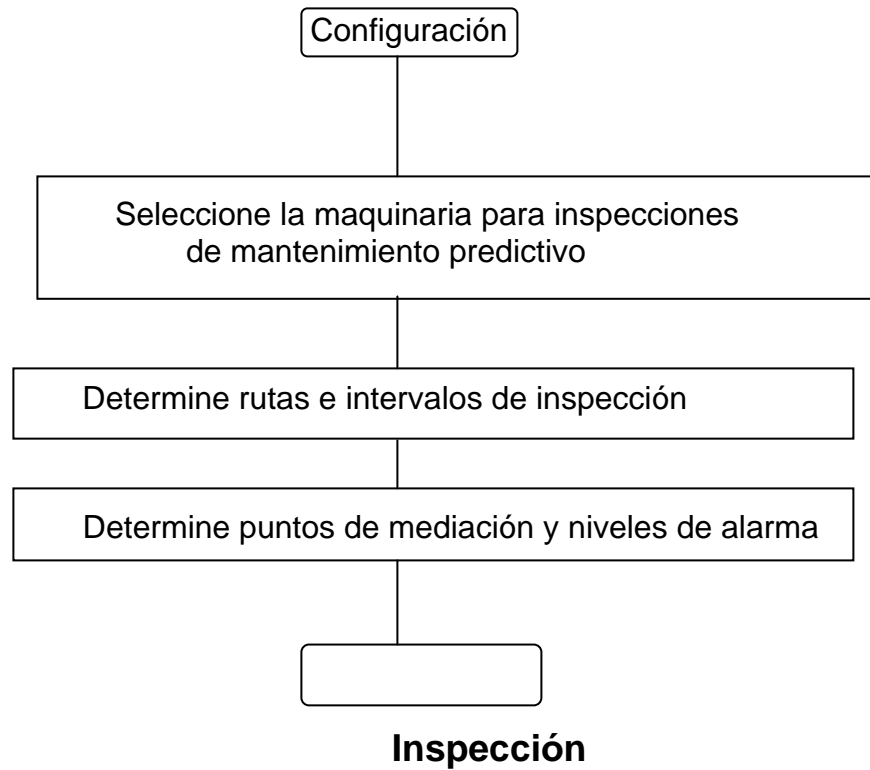
Todo personal que opere en monitoreo debe estar consciente de la importancia de su labor. Dependerá mucho de la concientización del personal los resultados de las inspecciones periódicas, no deberá tomarse a la ligera, puesto que en gran medida depende de la voluntad del equipo de trabajo.

Figura 19 Diagrama de flujo de inspecciones periódicas



Fuente: Asociación colombiana de técnicos de la industria de la pulpa, papel y cartón, manual de vibraciones mecánicas, mantenimiento predictivo. Pág. 60.

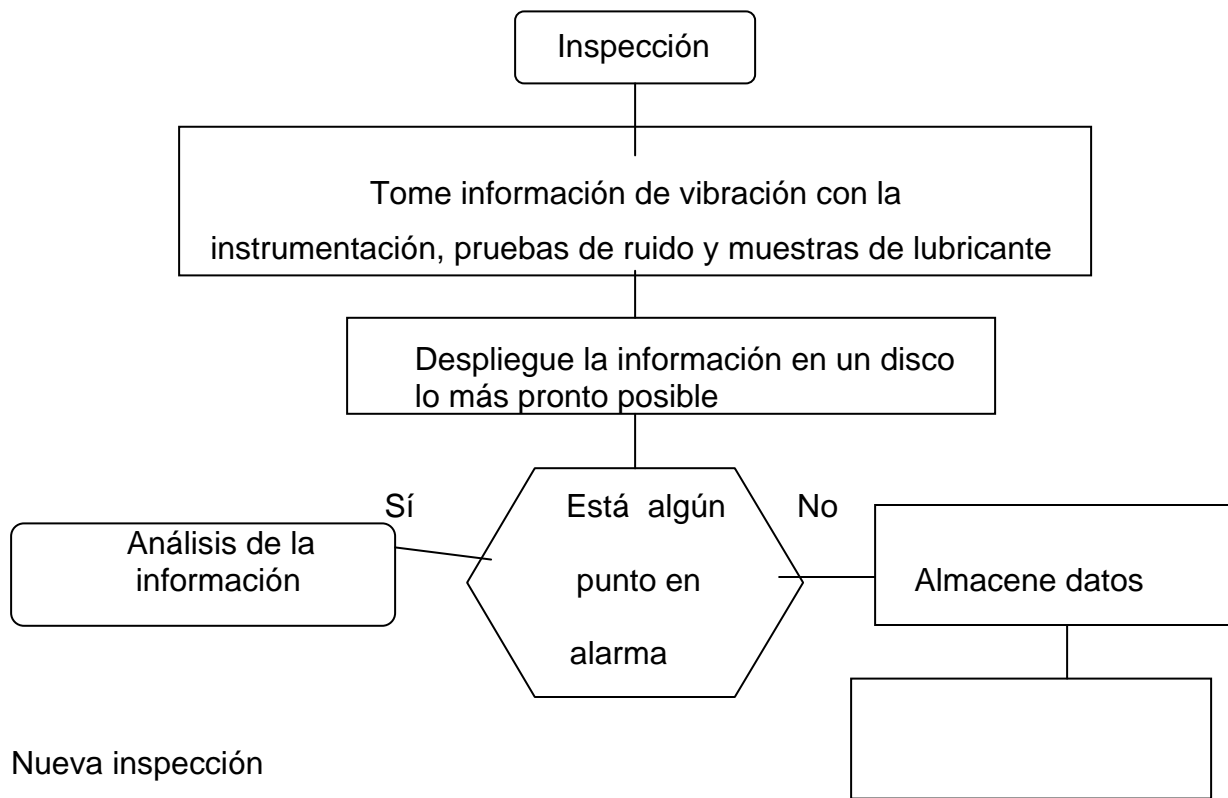
**Figura 20 Diagrama de flujo de configuración**



**Fuente: Asociación colombiana de técnicos de la industria de la pulpa, papel y cartón, manual de vibraciones mecánicas, mantenimiento predictivo. Pág. 62**

Nota: Haga un listado de las diferentes labores a realizar y determine las personas responsables de su ejecución.

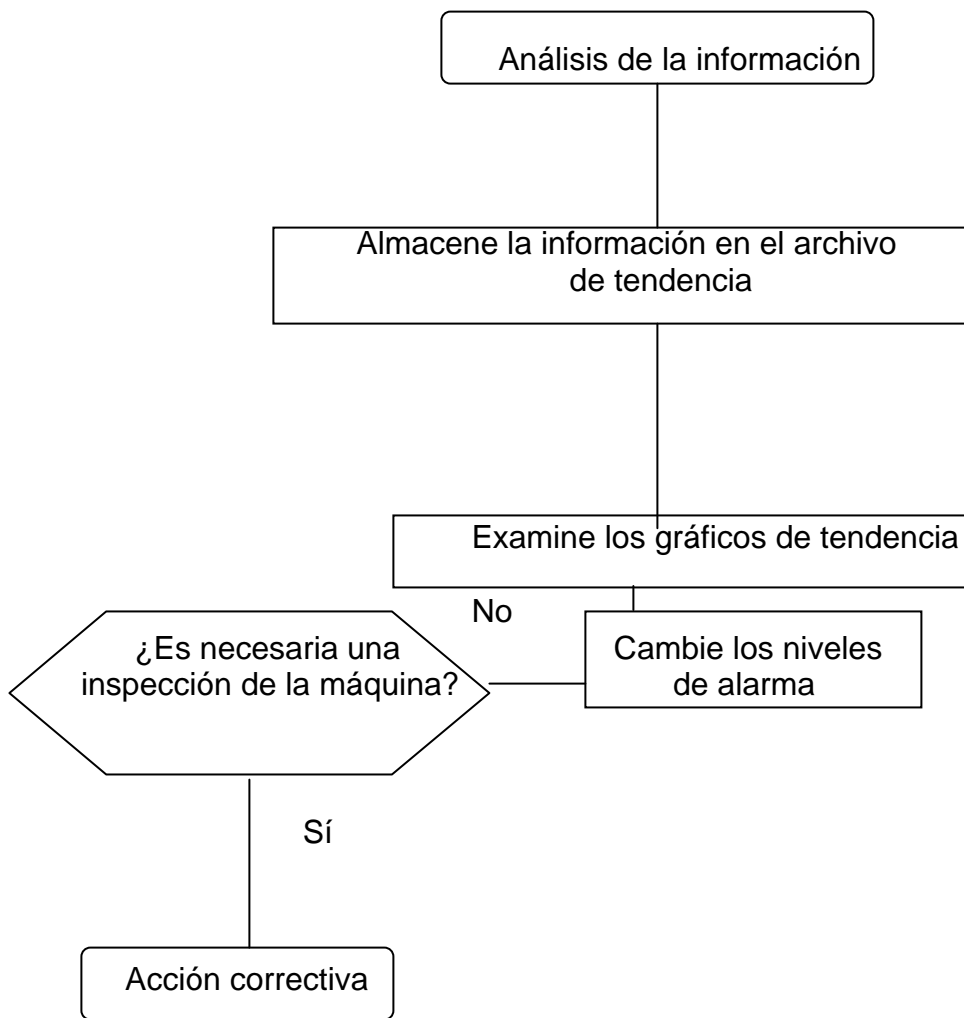
**Figura 21 Diagrama de flujo de inspección**



**Fuente: Asociación colombiana de técnicos de la industria de la pulpa, papel y cartón, manual de vibraciones mecánicas mantenimiento predictivo. Pág. 63.**

Nota: Haga un listado de las diferentes labores a realizar y determine las personas responsables de la ejecución.

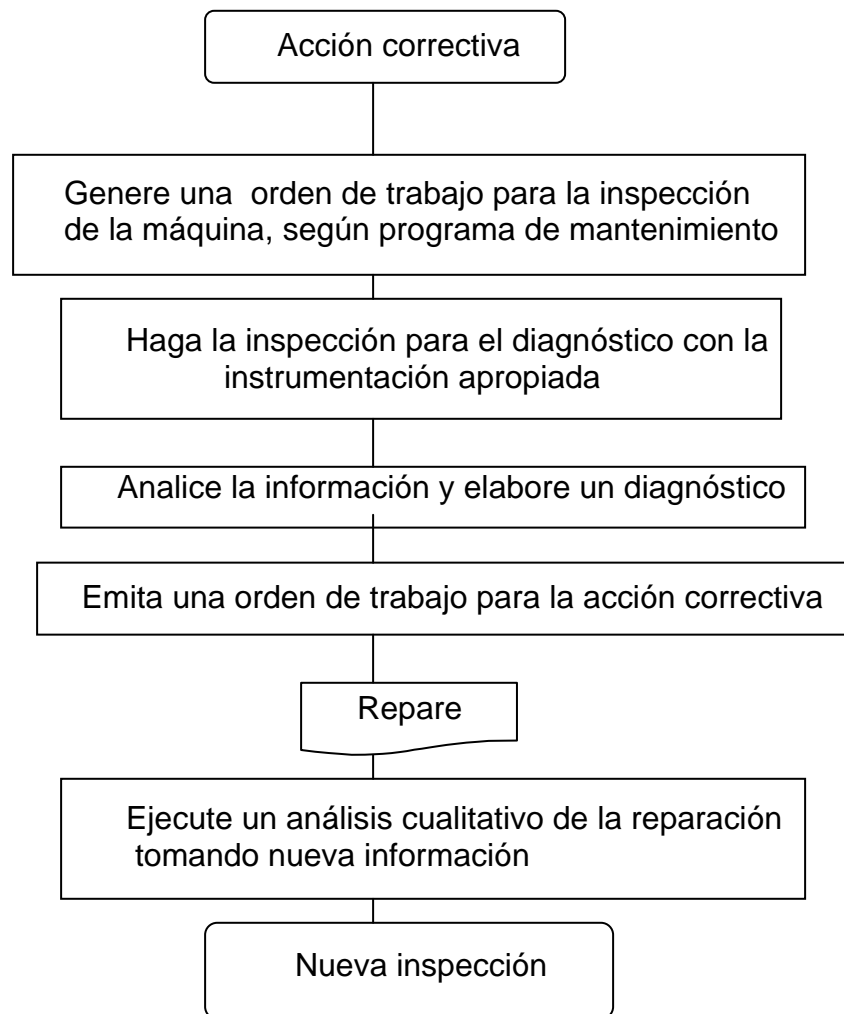
**Figura 22 Diagrama de flujo de un análisis de información**



**Fuente: Asociación colombiana de técnicos de la industria de la pulpa, papel y cartón, manual de vibraciones mecánicas, mantenimiento predictivo. Pagina 65.**

Nota: Haga un listado de las diferentes labores a realizar y determine las personas responsables de su ejecución.

**Figura 23 Diagrama de flujo de una acción correctiva**



**Fuente: Asociación colombiana de técnicos de la industria de la pulpa, papel y cartón, manual de vibraciones mecánicas, mantenimiento predictivo. Pág. 67.**



Desarrollando las rutas de inspección:

En el desarrollo de las rutas de inspección, tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Identificación de los equipos
- Selección de los puntos de prueba
- Diseño de la ruta lógica

Identificación de los equipos: asegúrese que cada uno de los equipos a monitorear se encuentre marcado de una manera clara y fácilmente visible.

Selección de los puntos de prueba: la identificación y ubicación de los puntos de prueba es esencial para tomar medidas consistentes, cada vez que se realice un monitoreo.

Entre los sistemas más utilizados para lograr una buena consistencia en las medidas figuran:

Pintar la ubicación de los puntos de prueba, colocar una placa metálica en cada máquina, con el esquemático del equipo, indicando la posición de los diferentes puntos de prueba. Instalar bases permanentes para los sensores de vibración, en los puntos de prueba.

Diseño de la ruta lógica: la eficiencia es la principal meta en el diseño de las rutas de inspección. La ruta debe ser hecha de manera que el tiempo necesario para recolectar la información sea el menor posible.

### **5.1.6 Evaluación de planta**

Existen varias maneras de realizar la evaluación de planta, entre ellas tenemos:

1. Forma manual
2. Forma automática

Forma manual: es cuando el personal a cargo realiza el análisis a los equipos, uno a uno, con instrumentación sencilla, por ejemplo: amplificador de ruidos portátil, medidor de temperatura infrarrojo, medidor de vibración infrarrojo, medidor de revoluciones por minuto infrarrojo, etc.

Forma automática: es cuando se toman las lecturas de los análisis de forma automática, o sea con equipo de monitoreo directo el cual está brindando información continua. Avances recientes en instrumentación computarizada y tecnología de monitoreo son los aportes significativos a los programas de mantenimiento predictivo que determinan la condición de operación en la planta.

Describimos a continuación tres posibilidades en instrumentación, que nos permiten evaluar la condición de cada uno de los equipos involucrados en un programa:

1. Sistema de salto
2. Sistema dinámico
3. Sistema maestro
4. Sistema SKF

#### **Sistema de salto**

Este sistema automatiza el proceso para la colección y reducción de datos de vibración, haciendo eficiente esta labor en programas de mantenimiento preventivo/ predictivo.

La información obtenida: tendencias, valores promedio e información dinámica ayudarán a identificar problemas en maquinaria rotativa y permitirán determinar hasta cuando el equipo puede ser operado y cuando programar su mantenimiento.

Este sistema es ideal para adquirir información en equipo monitoreado como pequeñas bombas, ventiladores, motores y maquinaria de propósito general, pero también puede ser usado con equipo esencial y crítico que esté siendo continuamente monitoreado.

Rápida y confiable información puede ser obtenida en formatos de fácil interpretación, mediante el uso de programas en sistemas conformados por el salto, computador interfase y paquetes de programas.

Estos proveerán a ingenieros de mantenimiento y especialistas en maquinaria información de la condición de operación de equipo rotativo. Información del deterioro en las condiciones de operación del equipo anticipa problemas mecánicos antes que la falla ocurra, implicando una disminución real de costos de mantenimiento un incremento en la confiabilidad del equipo y un incremento en producción.

### **Sistema dinámico**

Este es otro sistema que automatiza el proceso de obtención de datos de vibración, haciendo eficiente la labor en programas de mantenimiento preventivo y predictivo. La aplicación de este sistema es especialmente para equipos críticos.



### **5.1.7 Análisis de la información y acción correctiva**

Como un preámbulo al análisis de la información, es necesario mencionar que es de suma importancia la creación de un mecanismo que nos permita el almacenaje de nuestra información, esto es, la creación de un banco de datos.

El banco de datos tiene como objetivo reunir toda información posible acerca de determinado equipo con el fin de ser utilizado como una “cartilla médica”, la cual permitirá tener a la mano todas las fallas y reparaciones que se hayan efectuado en la maquinaria. En el caso del registro de vibraciones, los equipos mencionados anteriormente o cualquier equipo de medición descarga toda la información en una memoria ram, esto nos facilita el ordenamiento. Se necesita agregar o crear otro archivo que contenga la información recolectada de forma manual como son los resultados de los análisis de aceites, los resultado de variaciones en los ruidos, lectura de temperaturas etc.

La forma más común de crear un banco de datos es crear una hoja de control, ya sea electrónica o de papel, para anotaciones en donde se deja escrito todo trabajo efectuado con indicaciones de fecha, horómetro, repuestos, costos, tiempo utilizado, responsable, etc.

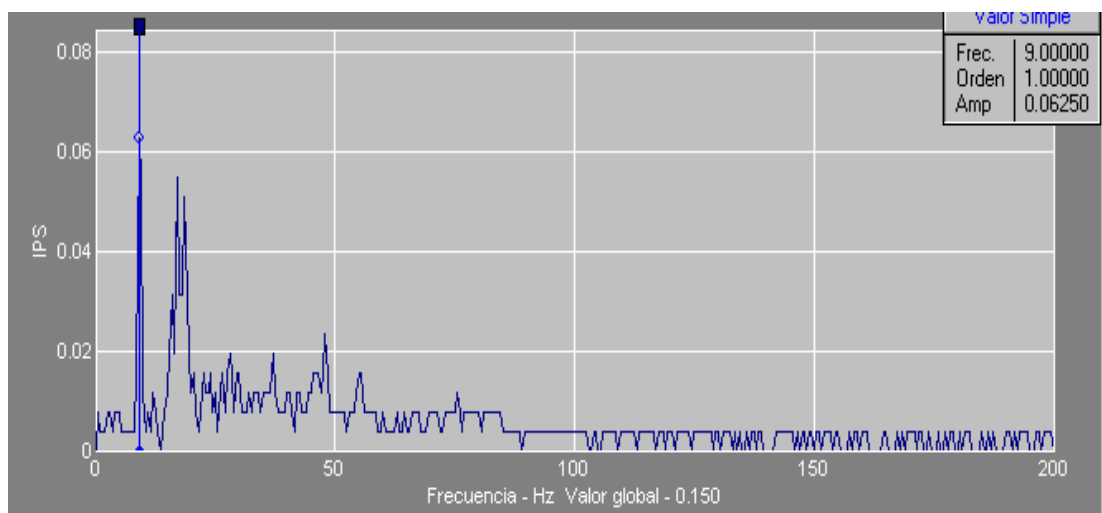
Cuando una máquina es nueva, es aconsejable el monitorear esta información desde el inicio de operación. Se debe tomar una muestra de aceite a las primeras 100 horas de operación a cada componente de la misma para ir monitoreando los desgastes que vayan ocurriendo con el uso.

Cuando una máquina no es nueva y toca empezar a operar y monitorear, se debe investigar y revisar los componentes de la misma con el objetivo de crear un punto de partida, antes de analizar las primeras muestras de aceite.

El historial de la máquina se volverá como la ficha clínica de cada paciente, la cual permitirá ir conociendo las diferentes transformaciones, fallas y reparaciones efectuadas en cada equipo. Con esta misma información por medio de monitoreo permanente de aceite, se obtendrán lecturas de temperatura y la información global de vibraciones.

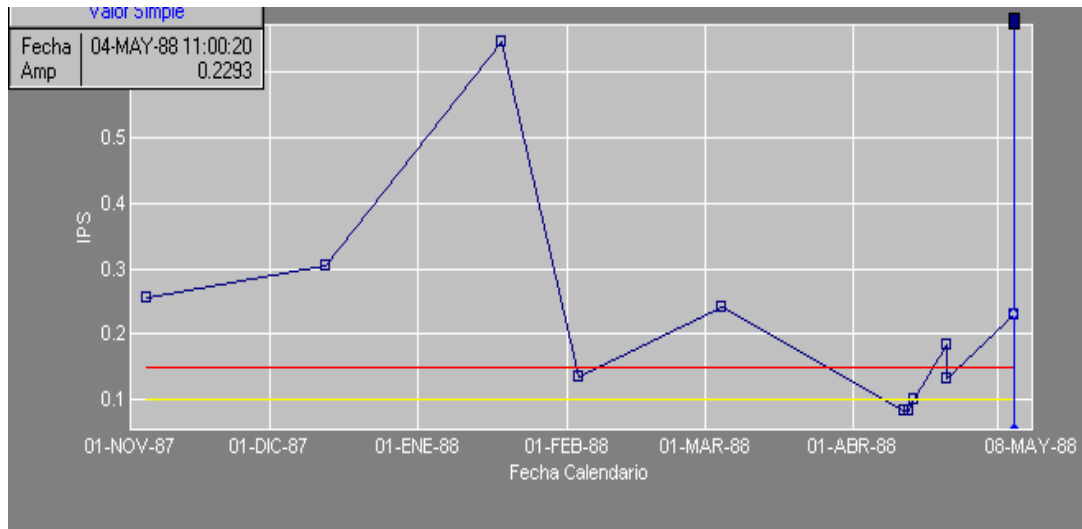
En el análisis de la información, como se ha mencionado anteriormente, se hace con lecturas de temperaturas, análisis de ruidos, muestras de aceites y básicamente análisis de vibración. Para este último se toman las siguientes gráficas: gráfica del espectro, gráfica de tendencia del valor global en función al tiempo, gráfica de espectros en cascada, las cuales se muestran a continuación.

**Figura No. 25 Espectro de vibración de un cojinete**



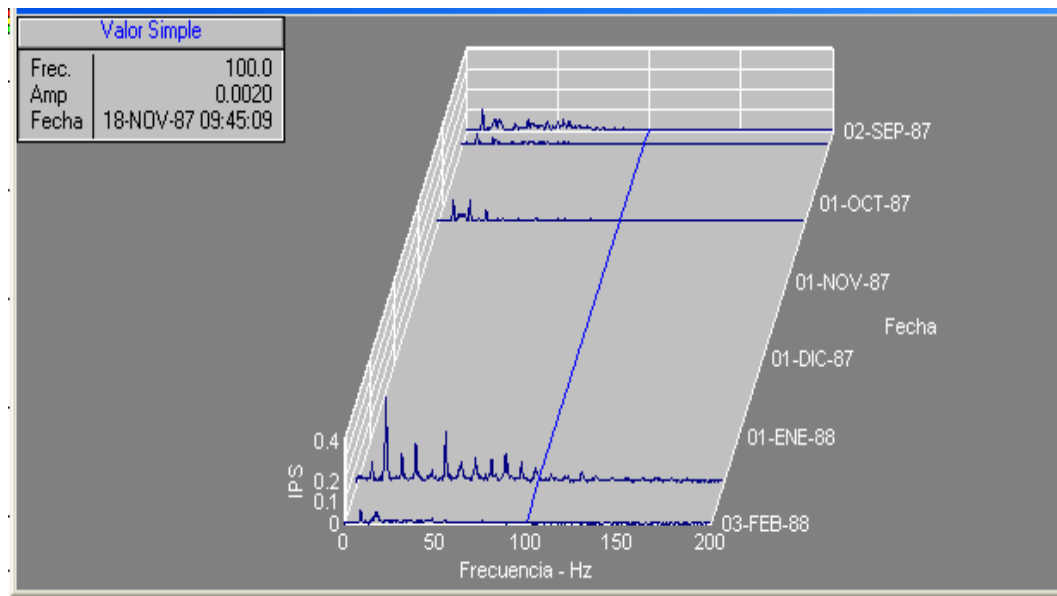
**Fuente: Microlog CMVA 60. manual del usuario, demo database.**

**Figura No. 26 Gráfica de tendencia de valor global en función del tiempo**



Fuente: Microlog CMVA 60. manual del usuario, demo database.

**Figura No. 27 Gráfica de espectros en cascada de un cojinete**



Fuente: Microlog CMVA 60. manual del usuario, demo database.

La influencia de los parámetros y curvas de desgaste en la toma de decisiones:

Al crear un parámetro se delimitan los márgenes de trabajo. Esto es lo que se busca al crear parámetros de desgaste. En la tabla I titulada "Composición de metales en equipos y valores guías de desgaste", presentada posteriormente en las siguientes hojas de este trabajo de graduación, se puede apreciar claramente que la experiencia de muchos años de pruebas a permitido ir creando parámetros máximos y mínimos de prueba. Estos sirven para ir determinando tendencias y crecimientos de cada uno de los elementos analizados.

Para poder tomar una decisión acertada se necesita de un buen criterio, así como de bastante conocimiento de los componentes de cada equipo. Por ejemplo, si determinado elemento muestra una tendencia marcada de desgaste ascendente durante un determinado número de muestras, es un indicio directo de que algo está sucediendo en el componente y es necesario tomar una acción.

No por tener un pico que quede arriba del parámetro máximo se tiene que realizar una inspección; al contrario, se debe tomar una nueva muestra para establecer la tendencia, la cual dirá si la falla continúa o no.

Un ejemplo sencillo es establecer cuando un aceite (aceite 15w-40, de cualquier marca) está protegiendo debidamente a una máquina o un motor.

Según los fabricantes de aceites, un aceite 15W40 debe mantener una viscosidad en  $\text{cSt}^3$  entre 12.5 y 16.5 siendo un valor aceptable 14.00.



Esto quiere decir que en 250 horas de uso, que es el tiempo en horas que se utiliza el aceite en la mayoría de operaciones, el aceite debe permanecer entre el rango y además no perder los aditivos que mantienen protegido al motor de desgaste, suciedad y otros elementos productos de la combustión.

El muestreo y análisis periódico de aceite permite saber con exactitud como se está comportando este durante este proceso. Si un aceite se degrada antes de las 250 horas de operación, su viscosidad bajará demasiado provocando que el desgaste de hierro, cromo, níquel y otros metales sean altos lo cual redundaría en acortar la vida útil del motor. Solo monitoreando estos datos se puede saber cómo reaccionara el aceite dentro del motor y tomar la decisión de seguir utilizando el mismo aceite o cambiar a otro que permita una mejor protección.

Por falta de información en análisis de aceites en máquinas trituradoras, por ejemplo en el cono, los contaminantes encontrados en una muestra de aceite son similares en su análisis, es por ello que cuando analizamos otro componente, la aplicación debe ser similar a la que presentamos a continuación, un ejemplo elaborado, efectuado a un sistema hidráulico de un cargador frontal Caterpillar. Toda la evolución que llevó el proceso es ilustrado por las gráficas a continuación; se pueden apreciar los elementos más importantes como el hierro, cobre, aluminio, así como la gráfica que ilustra el contenido de sílice en el aceite durante la operación.

Con este control se pudo detectar el deterioro que se estaba llevando a cabo en la bomba hidráulica y complementos a causa de la entrada de sílice en el sistema.

El problema fue monitoreado adecuadamente convirtiendo la reparación en una rutina. Al final se cambiaron espaciadores de bronce y se rectificó la bomba hidráulica principal.

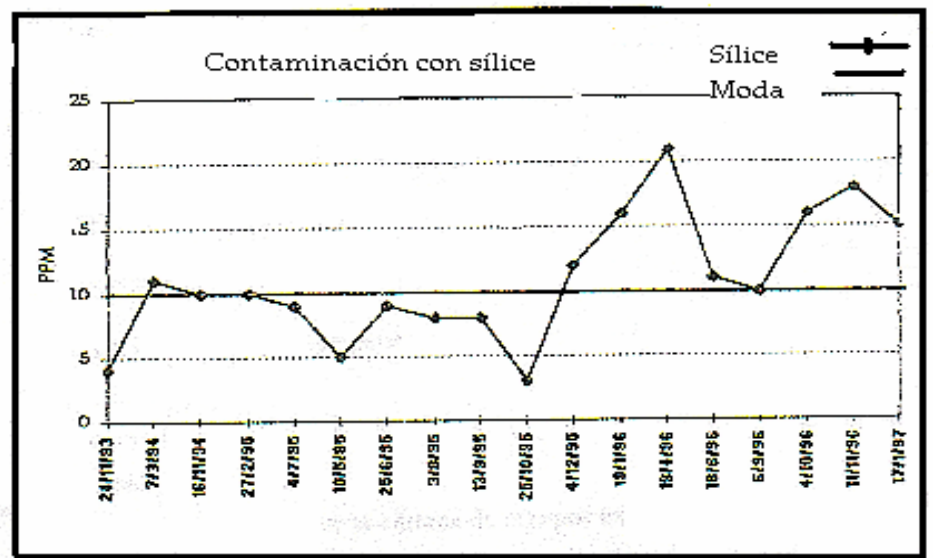
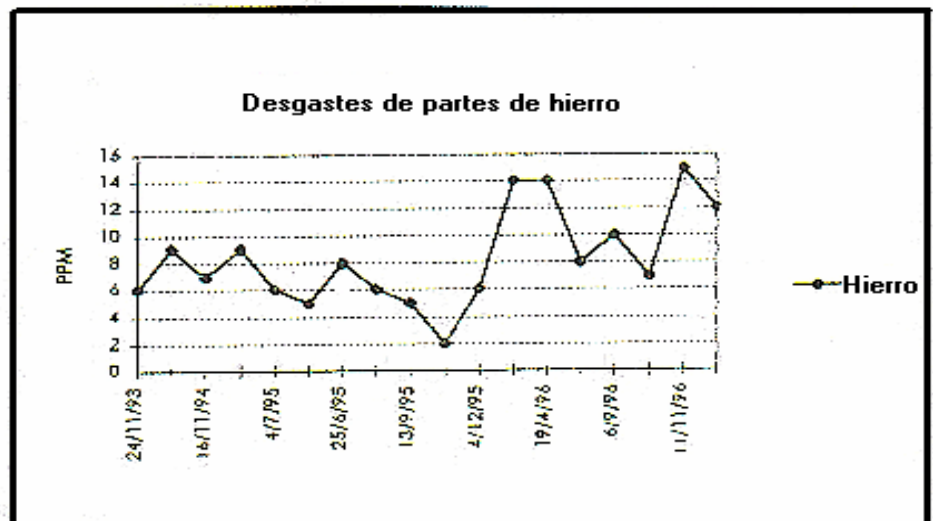
Es bueno notar que estas fallas no se detectan a simple vista ni tampoco con el mantenimiento preventivo de rutina. De no haber sido por el control efectuado la falla se hubiera notado hasta que sistema hubiese fallado totalmente, lo que significaría un cambio completo de la bomba e implementos.

El costo evitado por un mantenimiento predictivo es alto, muchas personas hoy día no tienen confianza en los resultados emitidos por el laboratorio, pues son técnicas relativamente nuevas en la rama de ingeniería mecánica, pero los resultados obtenidos demuestran que la técnica funciona y mucho más cuando combinamos el análisis de vibraciones, ruidos y aceites a través de laboratorio.

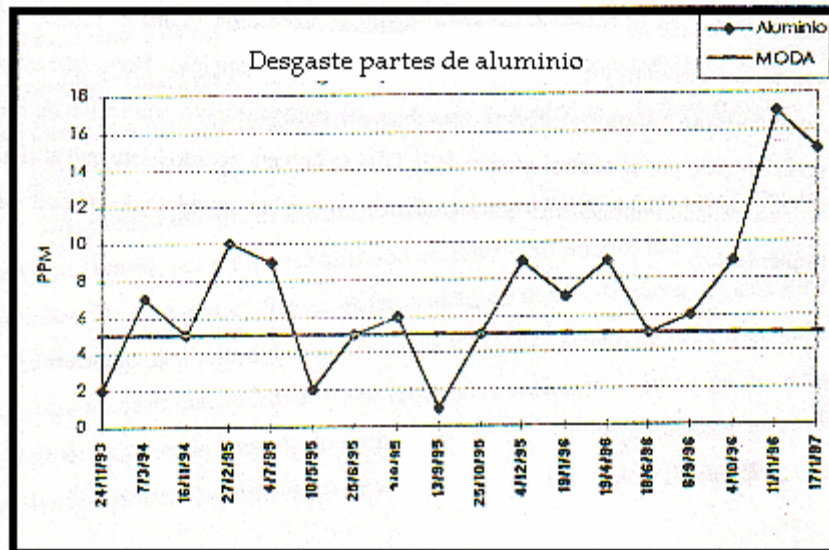
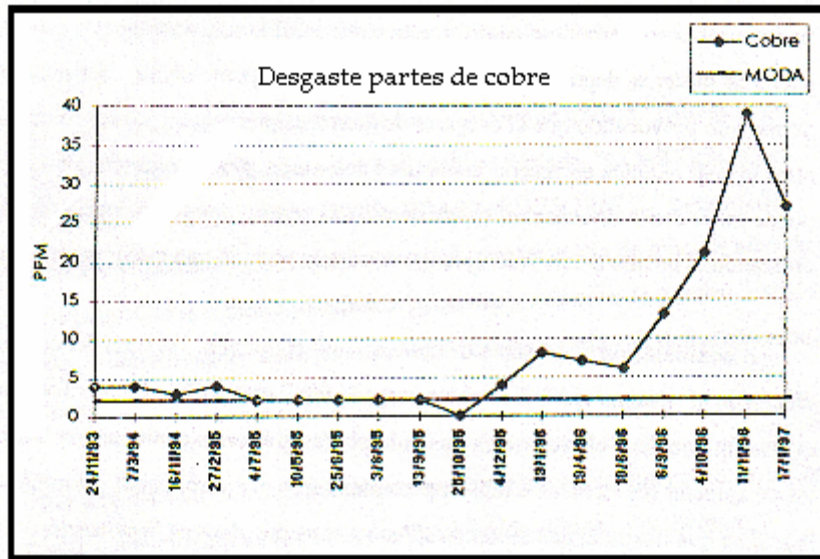
Las muestras que se toman de los equipos, deberán almacenarse en recipientes limpios, que no contengan residuos de algún otro lubricante o solvente de ningún tipo.

Los análisis de laboratorio son muy confiables y nos proporcionan la suficiente información para saber qué pieza está en desgaste dentro de nuestra maquinaria.

Figura 28 Contaminantes de hierro, sílice, cobre y aluminio (PPM), en aceites lubricantes



Continuación



Fuente:  
JOHNS S.  
Mitchel,

Estableciendo un programa de mantenimiento predictivo, SKF Condition Monitoring, pág.

El mantenimiento predictivo descansa en características medibles que definen la condición con precisión. En muchos casos, mediciones que determinan condición con precisión se obtienen rápidamente y se elaboran con facilidad.

En otros casos, características que señalan el problema pueden ser muy difíciles o costosas, o muy difíciles de interpretar. Como resultado no existe nada mejor y más efectivo que un mantenimiento predictivo al 100%.

Mediciones como vibración y temperatura son entendidas por instinto como indicadores de condición. Al corregir problemas, se debe ser cuidadoso para establecer claramente causa y efecto. Por ejemplo, la falta de balance excesivo produce vibración, que a su vez causa fallo del rodamiento.

El fallo actual del rodamiento puede manifestarse por incremento de vibración, sin embargo, es excepcionalmente importante reconocer que el aumento de vibración es únicamente un síntoma en este caso el problema real es la falta de balance. Si no requiere que los rodamientos fallen nuevamente, será mejor que corrija el desbalance.

Hay algunas cosas que debe mantener en mente si el mantenimiento predictivo ha de trabajar en la forma más efectiva para usted:

1. Esté atento a síntomas. Busque y corrija problemas fundamentales; las necesidades de mantenimiento disminuirán entonces.
2. Esté especialmente vigilante a deficiencias de diseño. Problemas y mantenimiento excesivo son con frecuencia causados por defecto o defectos de diseño. En esta situación, corrigiendo la deficiencia básica es la única manera de mejorar el mantenimiento.

Ya hemos mencionado vibración y temperatura como dos indicadores instintivamente entendibles de condición. La condición del aceite es regularmente de igual utilidad. Presión, temperatura y flujo son necesarios para calcular funcionamiento y, en algunos casos, pueden muy bien indicar condición mecánica.

El secreto para mantenimiento predictivo efectivo es escoger mediciones que completa y efectivamente definan condición. Este es el punto en el que una cuidadosa selección será de gran beneficio.

Miremos algunos ejemplos. Vibración es un indicador obvio de condición para equipos con partes que rotan. Entre más grande la vibración, más probabilidad de fallo. La misma idea general es cierta para temperatura. Un aumento gradual o repentino sobre el valor normal siempre indica un problema.

Otros cambios en condición no siempre son tan claros. Aumento de tolerancia en una bomba puede no causar un cambio significativo u observable de vibración. Disminución de flujo puede ser una indicación, pero el flujo puede no ser medible. Usualmente otra variable, más fácil de medir, como presión proveerá información requerida. Una reducción continua en salida de presión proveerá información requerida.

Una reducción continua en salida de presión puede ser el mejor indicador de aumento interno de tolerancia. Aumento de amperaje de motor es otro síntoma de deficiencia causado por aumento de tolerancia.

Existen numerosos ejemplos adicionales de mediciones de condición como diferencia de presión en tambor de balance, diferencia de presión y temperatura a través de intercambiadores de calor, filtros y temperatura de metal del cojinete.

El monitoreo debe iniciarse en el orden de prioridades. Las primeras máquinas a incorporarse en un programa de monitoreo de condición deben ser aquellas con problemas conocidos o historia de problemas. Este procedimiento provee los resultados más rápidos, levantando en esta forma entusiasmo y motivando en favor del programa.

Reconociendo desviaciones de condición normal: no es necesario decir que para reconocer una desviación normal, primeramente se debe conocer lo que es norma. En algunos casos esto será muy simple.

Presiones y temperaturas de procesos tienen valores normales designados. Límites son establecidos fácilmente para proveer amplia advertencia de desviaciones de lo normal.

Para otras mediciones vitales de condición (vibración es un ejemplo principal), las normas son mucho más difíciles de determinar. Éstas dependen de la clase de máquina, su construcción y el punto en el cual la medición es efectuada.

La velocidad es considerada por la mayoría como la medida externa más representativa de la condición mecánica de una máquina. Aún cuando mucha de la literatura guiaría a pensar que el criterio de velocidad constante pudiera ser aplicado a la mayoría de las máquinas, definitivamente no es así. Sólo entre bombas puede existir una diferencia de un factor de 3 ó 4 entre niveles de

velocidad tolerable. Un nivel de velocidad de operación normal para una bomba, puede muy bien ser intolerable para otra.

En el caso citado, y otros también, tendrá que establecer su propio criterio y valores límite basados en su experiencia con el equipo específico.

Sujeto a las restricciones que hemos mencionado arriba, puede utilizar la siguiente información como guía general al evaluar condición basándose en velocidad de vibración en general:

Bajo	0.1 IPS	(2.55mm/segundos)	Buena condición
De	0.1 a 0.2 IPS	(2.55-5.1 mm/segundos)	Buena condición/ Tornándose Marginal
De	0.2 a 0.55 IPS	(5.1-14 mm/segundos)	Condición marginal Tornándose inaceptable
Sobre	0.55 IPS	(14 mm/segundos)	Peligro de fallo.

El desplazamiento requiere frecuencia para obtener condición. Si insiste en medir desplazamiento de carcasa puede utilizar la fórmula siguiente para calcular el límite de desplazamiento del criterio de velocidad arriba listado si, y únicamente si conoce la frecuencia en la cual el desplazamiento está ocurriendo:

$$\text{Desplazamiento (pico- pico)} = \frac{V(\text{velocidad} - \text{pico})}{3.14f(\text{frecuencia} - \text{Hz})}$$

¿Cuánto de cambio se debe de permitir? . Para contestar esta pregunta, primero debe establecer cuánto el cambio es norma. La mayoría del equipo es estable y no responde especialmente a cambios en condiciones de operación. Aquí nuevamente necesita establecer una línea normal que incluirá variaciones



normales debido a cambios en condiciones de operación que ofrezcan máxima sensibilidad a cambios reales de condición.

Temperatura de rodamiento radial puede variar sólo unos cuantos grados durante el ciclo completo de operación. Por otro lado, la temperatura de rodamiento de empuje puede variar tanto como 80 - 100<sup>0</sup> F durante el ciclo típico de operación.

Las condiciones usualmente no son suficientes para describir exactamente la condición. Por ejemplo, un sello goteando puede causar en breve un fallo del rodamiento. Si el sello es la fuente del problema, esperar un cambio de vibración para confirmar el inicio de dificultad será un error y desperdiciará el tiempo de advertencia disponible.

Existen muchos ejemplos más de condiciones observadas, tales como nivel bajo de aceite o aceite sucio, partes flojas, goteos de varias clases e incluso sonidos y olores anormales que son indicadores vitales de condición y deben incluirse en cualquier programa comprensivo de mantenimiento predictivo.

En el caso del equipo SKF Microlog tiene códigos numéricos de dos dígitos identificando hasta 99 observaciones visuales comúnmente encontradas. Hasta diez observaciones codificadas pueden registrarse por cada medición.

Un código de nota 00 es usado para identificar equipo que se presume en buena condición pero fuera de operación. Equipo de repuesto operado alternadamente es un ejemplo de donde un código de nota es necesario para explicar la razón de mediciones no tomadas.

La lista completa de códigos numéricos y la definición de cada código es accesible inmediatamente en el colector Microlog con sólo oprimir la tecla MENÚ.

Así como necesitó alguna idea de valores normales desde los cuales calcular cambios, firmas o espectros de vibraciones normales o básicas, son necesarios para utilizar a su máxima ventaja el detalle provisto. El significado de las armónicas es, en el mejor de los casos, confuso. ¿Es un patrón particular de armónicas normales o anormales?. Generalmente nadie lo sabrá con seguridad. Una salida a este dilema es registrar una firma de referencia y luego compararla con firmas subsecuentes.

Si la firma se mantiene igual en un período largo de tiempo, no hay siquiera necesidad de tratar de determinar el significado exacto de componentes individuales. Si ocurren cambios, entonces es necesaria la inversión en tiempo para examinar los cambios de cerca y tratar de determinar su significado.

Firmas de referencia deben ser obtenidas y archivadas de cada punto de medición de vibración no importando la complejidad de la máquina. Espectros de referencia deben registrarse a la resolución más alta posible y sobre una gama o gamas de frecuencia que aseguren información de diagnóstico completa en el evento de problemas subsecuentes. Algunos pueden preferir registrar varias firmas iniciales a intervalos semanales para asegurar su repetición.

Cuando esté satisfecho con las referencias, la colección de formas puede determinarse con razonable seguridad con niveles en general en máquinas simples como bombas de motor con espectros conteniendo sólo uno o dos componentes mayores. En maquinaria más compleja como engranajes, los espectros deben recogerse con cada medida en general.

Este principio de mantenimiento predictivo debe ser evidente. El tiempo se utiliza más productivamente analizando el significado de los cambios y desarrollando soluciones a los problemas. Un equipo en buena condición y operando confiablemente puede dejarse tranquilo con seguridad.

#### **5.1.8 Retroinformación y evaluación del proyecto**

Después de recopilar todos los datos a través de las rutas e implementar todo el programa de mantenimiento predictivo, se debe de retroinformar, esto quiere decir: hacer una evaluación a cada cierto tiempo para análisis, observando si el programa en sí está funcionando y qué mejoras podrían darse. Es necesario pasar algunas encuestas, de preferencia al personal operativo, directamente en la maquinaria, para poder observar si otros sectores logran ver la mejoría.



## 6. ENCUESTA DE OPINIÓN

### 6.1 ENCUESTA EMPRESA No. 1

#### UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Con el objeto de la elaboración del trabajo de graduación denominado: Mantenimiento predictivo de una máquina trituradora de piedra, realizamos la siguiente encuesta. Gracias por su colaboración.

Pregunta No. 1.

Nombre de la empresa: Cementos Progreso

Pregunta No.2

Dirección de la empresa: 15 Avenida 18-01 Zona 6 interior Finca La pedrera, Guatemala

Pregunta No.3

Puesto que ocupa dentro de la empresa: Superintendente de planta, zona 6

Pregunta No.4

Nombre de la persona encuestada: Ingeniero Carlos Castellanos

Pregunta No.5

¿Con qué marca y modelo de máquina trituradora cuentan para trabajar?

Varias marcas como: Cedarapids, Norver, Telesmith.

Pregunta No. 6

¿Qué tipo de cantera utilizan, un río o mina a cielo abierto? Mina a cielo abierto

Pregunta No.7

¿Conoce el mantenimiento **correctivo**?    **Sí**    **X**    **No**





## 6.2 ENCUESTA EMPRESA No. 2

### UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Con el objeto de la elaboración del trabajo de graduación denominado:  
Mantenimiento predictivo de una máquina trituradora de piedra, realizamos la  
siguiente encuesta. Gracias por su colaboración.

Pregunta No. 1.

Nombre de la empresa: Conasa

Pregunta No.2

Dirección de la empresa: La Sonora Villa Nueva, talleres de servicio

Pregunta No.3

Puesto que ocupa dentro de la empresa: Gerente de talleres

Pregunta No.4

Nombre de la persona encuestada: Sr. Luigui Rosi

Pregunta No.5

¿Con qué marca y modelo de máquina trituradora cuentan para trabajar?

Varias marcas como: Norver, Telesmith.

Pregunta No. 6

¿Qué tipo de cantera utilizan, un río o mina a cielo abierto? Como nos  
dedicamos a reparación de carreteras, por lo regular nuestras minas son ríos.

Pregunta No.7

¿Conoce el mantenimiento **correctivo**?    **Sí x**    **No**

Pregunta No.8

¿Conoce el mantenimiento **preventivo**?    **Sí x**    **No**

Pregunta No.9

¿Conoce el mantenimiento **predictivo**?    **Si**        **No X**





Pregunta No.18

¿Considera importante establecer una estructura general para desarrollar un mantenimiento predictivo, como establecer personal a cargo (director y personal para el proyecto), establecer objetivos, alistar recurso, compra de instrumentación y programas necesarios, establecer un banco de datos, entrenamiento del personal?

Sí      X                                  No

Pregunta No. 19

¿Cree que las inspecciones periódicas (como se muestran en los diagramas de flujo), darían resultado al poner en marcha un programa de mantenimiento predictivo?

Si              X                                  No

Pregunta No.20

¿Qué porcentaje de importancia le daría a lo que llamamos análisis de la información?

Marque con una X

0%              20%              40%              60%              80% X              100%

Pregunta No.21

¿Cree, en general, que es funcional el programa presentado anteriormente de mantenimiento predictivo para una maquina trituradora de piedra?

Respuesta: Creo que si, pero necesitaríamos mayor información al respecto para poder aplicarlo.

Comentarios adicionales: Por lo general les brindamos un buen mantenimiento preventivo a nuestras máquinas, sin embargo, si se lograra realizar una plan de mantenimiento predictivo, sería ideal,

### 6.3 ENCUESTA EMPRESA No. 3

#### UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Con el objeto de la elaboración de trabajo de graduación denominado:  
Mantenimiento predictivo de una máquina trituradora de piedra, realizamos la  
siguiente encuesta, gracias por su colaboración.

Pregunta No. 1.

Nombre de la empresa: Constructora Nissi

Pregunta No.2

Dirección de la empresa: 7<sup>a</sup>. Avenida zona 9 edificio Ejecutivo oficina 221

Pregunta No.3

Puesto que ocupa dentro de la empresa: Gerente de planta

Pregunta No.4

Nombre de la persona encuestada: Manuel Salazar

Pregunta No.5

¿Con qué marca y modelo de máquina trituradora cuentan para trabajar?  
Cedarapids.

Pregunta No. 6

¿Qué tipo de cantera utilizan, un río o mina a cielo abierto? Mina a cielo abierto

Pregunta No.7

¿Conoce el mantenimiento **correctivo**? **Sí x No**

Pregunta No.8

¿Conoce el mantenimiento **preventivo**? **Sí x No**

Pregunta No.9

¿Conoce el mantenimiento **predictivo**? **Sí No X**

Pregunta No.10

¿Qué tipo de mantenimiento aplican a su maquinaria?, marque con una X:

Correctivo  Preventivo  Predictivo

Pregunta No.11

El cono utiliza lubricación forzada:

Sí  No

Pregunta No. 12

¿Cada cuánto tiempo cambia el aceite del cono? 1000 horas de trabajo

Pregunta No.13

¿Realizan análisis A.P.A. a las muestras de lubricante?, marque con una X:

Sí No

Pregunta No.14

¿Realizan monitoreo de vibraciones en algún equipo de la maquinaria?

Sí No

A continuación se le proporciona la información de un programa de mantenimiento predictivo para una máquina trituradora de piedra, léala y bríndenos su opinión al respecto.

Pregunta No. 16

¿Cree importante realizar una división en el tipo de equipo, entre equipos críticos, equipos esenciales y equipos de propósito general?

Sí No

Pregunta No.17

¿Considera que el análisis de vibraciones y análisis de aceites son técnicas que podrían llegar beneficiar la vida de una máquina, en el momento de implantar un mantenimiento predictivo?

Sí  No



#### **6.4 Opinión de gerencia sobre la implementación del programa de mantenimiento predictivo**

Por lo general, la gerencia de las empresas entrevistadas está de acuerdo con todo lo que venga con la intención de mejorar, sin embargo están económicamente muy limitados.

#### **6.5 Opinión del área técnica sobre la implementación del programa de mantenimiento predictivo**

El área técnica es la parte más interesada, hace muchas preguntas acerca de las guías técnicas y equipos.

#### **6.6 Análisis y resultados de las encuestas**

La parte del personal técnico en las trituradoras de piedra ve con buenos ojos el hecho de que se implementen nuevos métodos y tecnología en sus máquinas, les emociona el hecho de mejorar en todo lo concerniente a sus sistemas, lo ven como una oportunidad de aprender nuevos conocimientos y técnicas, a la vez consideran que las empresas están obligadas a mejorar, visualizando logros que beneficiaran a la empresa en general.

La parte de gerencia de mantenimiento se ve muy interesada en implementar nuevos sistemas. Cuando se les traslada la información y las metodologías, sueñan con este tipo de programa en su maquinaria, sin embargo, temen que la implementación sea solamente un sueño porque ellos son los encargados de vender la idea a la gerencia general, mas en algunos casos existe alguna señal de esperanza.

La parte de la gerencia general, por falta de conocimiento en el área directamente, le cuesta de primera impresión captar todos los beneficios que un programa como éste les brindaría. Se debe trabajar con mayor ímpetu, se debe trabajar la parte de costos directamente en cifras reales a cada país y a cada cambio de moneda, pues la posición de la gerencia general está más inclinada al análisis de costos y beneficios. Por tanto, es trabajo de la gerencia de mantenimiento lograr establecer un buen resultado con las herramientas que con este material se le proporcionan.





## CONCLUSIONES

1. Un programa de mantenimiento predictivo se adelanta a las fallas futuras que pudiesen ocurrir, minimizando los tiempos de parada y, por lo tanto, los costos de producción mejoran drásticamente.
2. Un programa de mantenimiento predictivo permite planificar adecuadamente las reparaciones mayores, o paradas programadas, minimizando su tiempo de duración y logrando atacar focos potenciales de desgaste.
3. La creación de un banco de datos, con todos los historiales actualizados de cada una de las máquinas dentro del programa de mantenimiento, permite el acceso sencillo a toda la información que pueda ser requerida.
4. Este tipo de control predictivo permite al encargado del mantenimiento de maquinaria mantener controlados los componentes más críticos de la máquina, minimizando así las fallas prematuras.
5. El costo del análisis de monitoreo periódico, tanto de vibraciones como de aceites usados, es relativamente caro, mas que todo en la adquisición del equipo de análisis de vibraciones, se justifica por los ahorros en reducción de costos por menos paradas frecuentes y mayor producción.
6. Es sumamente importante monitorear los contaminantes externos que afectan el ambiente donde las máquinas realizan su trabajo.

7. Es sumamente importante agregar el análisis de temperatura, flujo, ruidos etc., como parte de nuestro mantenimiento predictivo.
8. Siempre se debe trabajar con parámetros de seguridad, los cuales permitan programar las reparaciones antes de que los elementos más críticos sean afectados.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que no intente desarrollar un programa de mantenimiento predictivo si la visión del mismo no está en todo el personal de la empresa, principalmente en la gerencia general. Es necesario el interés de la gerencia de mantenimiento, jefes de área, jefes de producción y personal de piso, puesto que es un esfuerzo en conjunto, de no ser así, no dará los resultados esperados.
2. Nunca se debe ver el mantenimiento como un mal necesario, al contrario, como un departamento que permitirá minimizar costos y aumentar la capacidad de producción, pues alargamos la vida útil de los equipos, mejoramos su eficiencia y por ende, como parte del departamento de mantenimiento y de la empresa en general, conocemos mejor nuestra maquinaria.
3. Cualquier plan de mantenimiento puede estar muy bien desarrollado, pero si la actitud de los involucrados no es positiva y colaboradora, ningún plan será efectivo.
4. El análisis periódico de vibraciones y de aceite usado es un proceso que requiere el intercambio de información, y muchos conocimientos por parte del intérprete y del usuario.
5. Se debe establecer con claridad los objetivos a lograr. En la mayoría de los casos, estos objetivos son ahorrar costos de mantenimiento y mejorar la disponibilidad del equipo.

6. El programa de análisis de vibraciones y aceites usados genera informes basados en un continuo monitoreo de los equipos en cuestión, tanto con el equipo en planta como las muestras llevadas a laboratorio. Las lecturas o muestras tomadas en forma inadecuada tienen como resultados datos erróneos. Las muestras tomadas en forma poco frecuentes pueden no detectar un problema potencial y aquellas tomadas con demasiada frecuencia agregan costos operativos.
  
7. Todo el equipo involucrado en el mantenimiento predictivo, desde el director o especialista, el personal de mantenimiento y la gerencia general, deben comprometerse a actuar sobre la base de la información recopilada por los equipos y los resultados de laboratorio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1.  
Cedarapids A Raytheon Company **Manual Crushing & Screening, technical**, (Anexos o apéndice. Editorial: Raytheon, 1997)
2.  
Nevada Vibran Cía Ltda. Ingenieros consultores en vibraciones. **Manual de medición de vibraciones, técnicas de medición, balanceo y mantenimiento predictivo**. (Editorial: Limusa, 1995)
3.  
Johns S. Mitchel, **Estableciendo un programa de mantenimiento predictivo**, SKF Condition Monitoring, (Editorial y traducción Ana Zárate, 1996)
4.  
**Manual del usuario**, SKF, Microlog CMVA 60.
5.  
Theodore Baumeister. Et. Al. Marks: **Manual del ingeniero mecánico**. (8ª. Ed. México: Mc. Graw Hill, 1,988.)
6.  
Material didáctico de la Asociación Colombiana de Técnicos de la Industria de Pulpa, Papel y Cartón capítulo Valle del Cauca, **Manual de vibraciones mecánicas** ( I seminario técnico, octubre, 1987).



## BIBLIOGRAFÍA

1. Alting, Leo. **Procesos para la ingeniería de manufactura.** Ediciones Alfaomega. Mexico: Editorial Electrocomp,S.A., 1989, pág. 85.
2. BAUMEISTER, Theodore. Et. Al. Marks: **Manual del ingeniero mecánico.** México: 8ª. Ed Mc. Graw Hill, 1988, pág.36.
3. GERE, James et. Al. **Mecánica de materiales.** México: . 2ª. Ed. Grupo Editorial Iberoamericana, 1984, pág. 120.
4. Rubin Cachenoski, **Manual de mecánica industrial.** España: Ediciones Cultural, 1999, pág. 65.
5. Thomson, William T. **Teoría de vibraciones,** Colombia: 1era. Ed. Prentice. may, 1998, pág. 56.