

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA  
TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ

NOMBRE DEL PROYECTO:

**“Implementación de estrategias de mantenimiento por medio de diagnóstico.  
(Medición de vibraciones y pruebas a aceites lubricantes).”**

RESIDENCIA PROFESIONAL  
PRESA HIDROELECTRICA  
BELISARIO DOMINGUEZ  
CFE.

INGENIERIA MECANICA

9° SEMESTRE

**Presenta:**

RAMOS MORALES HECTOR 14270814

ASESOR EXTERNO:

ING. VICTOR ANTONIO FERNANDEZ NAJERA

ASESOR INTERNO:

ING.SAUL RIGOBERTO RUIZ CRUZ

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida. Por los triunfos y los momentos difíciles que me han enseñado a valorar cada día más.

A mis padres, que con su apoyo constante y entusiasmo me brindaron la fuerza para alcanzar esta meta profesional.

Y en especial a mi madre que fue un pilar muy importante para poder alcanzar mis metas y llegar con su apoyo hasta el día de hoy.

A mi hermano, que aportaron su cariño y paciencia y a todos aquellos que me ayudaron en esta gran lucha de ser profesional y estuvieron cuando más se necesitaba.

A mis amigos, compañeros y maestros principalmente que dedicaron tiempo en la enseñanza de lo que hoy estoy y estamos a punto de lograr que es una carrera profesional.

## INDICE

CAPITULO 1 .....	1
1.1 INTRODUCCION .....	1
1.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO.....	2
1.2.1 Ubicación.....	3
1.2.3 Casa de maquinas.....	3
1.2.4 misión y visión .....	4
1.3 Objetivos .....	5
1.3.1 Objetivos específicos.....	5
1.4 PROBLEMAS A RESOLVER.....	5
1.5 JUSTIFICACION.....	6
CAPITULO 2 .....	7
1.6 MARCO TEÓRICO.....	7
1.6.1 aceites lubricantes: .....	7
1.6.1.1 Por qué es importante realizar una buena lubricación:.....	7
1.6.1.2 Composición del aceite lubricante:.....	7
1.6.1.3 Aceite vegetal y animal: .....	7
1.6.1.4 Aceite mineral. ....	7
1.6.1.5 Aceite sintético.....	8
1.6.1.6 Aditivos.....	8
1.6.2 Propiedades de los aceites lubricantes .....	9
1.6.2.1 Índice de viscosidad .....	9
1.6.2.2 Punto de fluidez .....	9
1.6.2.3 Residuo de carbono.....	9
1.6.2.4 Resistencia a la oxidación.....	9
1.6.2.5 Resistencia a la corrosión .....	10
1.6.2.6 Reacción con el agua .....	10
1.6.3 Factores de deterioro del aceite lubricante.....	10
1.6.3.1 Agotamientos de aditivos.....	10
1.6.3.2 Temperatura de operación .....	10
1.6.3.3 Agua.....	10
1.6.3.4 Sólidos y polvos. ....	11
1.6.4 Vibraciones mecánicas .....	11

1.6.4.1 Desplazamiento .....	13
1.6.4.2 Velocidad.....	13
1.6.4.3 Aceleración.....	13
1.6.4.4 Fase.....	14
1.6.4.5 Periodo (T).....	15
1.6.4.6 Frecuencia .....	15
1.6.4.7 Frecuencia natural.....	15
1.6.4.8 Vibración forzada .....	16
1.6.4.9 Resonancia .....	16
1.6.4.10 La prueba del Impacto.....	16
1.6.4.11 El arranque y rodamiento libre. ....	16
CAPITULO 3 .....	18
1.7 DESARROLLO .....	18
1.8 TIPOS DE MANTENIMIENTOS EN LA CENTRAL .....	19
1.8.1 Mantenimiento preventivo.....	19
1.8.2 Mantenimiento rutinario: .....	19
1.8.3 Mantenimiento menor:.....	19
1.8.4 Mantenimiento mayor: .....	19
1.8.5 Rehabilitación:.....	19
1.8.6 mantenimiento correctivo o no programado. ....	20
1.8.6.1 mantenimientos por falla .....	20
1.8.6.2 mantenimientos por emergencia.....	20
1.9 MANTENIMIENTO RCM.....	20
2. PLANIFICAR LA IMPLANTACIÓN RCM.....	21
3. DETECCIÓN Y ANÁLISIS PARA EL DIAGNÓSTICO.....	22
3.1 Detección de fugas de agua, aire y aceites en forma cualitativa. ....	25
3.2 Chumacera de carga y alimentación de aceite. ....	26
3.3 Sistema de lubricación de las chumaceras de la turbina y el generador. ....	27
3.4 Chumacera de carga.....	29
3.5 Chumacera guía superior .....	29
3.6 Chumacera guía inferior.....	29
3.7 Chumacera guía generador. Sistema de lubricación.....	30
4. GENERALIDADES.....	31

4.1 TIPOS DE LUBRICACIÓN .....	31
4.1.1 Hidrodinámica. ....	31
4.1.2 Hidrostática. ....	31
4.1.3 Elastohidrodinámica.....	31
4.1.4 Lubricación de película mínima o al límite.....	32
4.1.5 Lubricación de película sólida. ....	32
5. MANTENIMIENTO DE LOS ACEITES DE EQUIPOS PRINCIPALES DE LA UNIDAD. ....	32
6. MÉTODOS RECOMENDADOS PARA LA TOMA Y EL MANEJO DE MUESTRAS DE ACEITE LUBRICANTE Y COMBUSTIBLE. ACEITES LUBRICANTES.....	33
6.1 Volúmenes necesarios de muestra. ....	34
6.2 Recipientes para el envío de muestras .....	34
6.3 Información que debe acompañar a las muestras.....	35
7. RESULTADOS DE PRUEBAS (Aceites lubricantes) .....	35
7.1 Pruebas en la unidad auxiliar (Aceite Lubricante).....	35
7.2 Hoja realizada para las pruebas de campo de aceites lubricantes .....	39
8. RESULTADOS ESPERADOS DE LOS ANÁLISIS DE LUBRICANTES. ....	40
9. TRANSDUCTORES DE VIBRACIÓN.....	41
9.1 Transductores de velocidad tipo electromecánico .....	45
9.2 Sensores de aceleración y velómetros piezoeléctricos.....	46
10. NORMAS DE VIBRACION .....	50
11. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DIAGNÓSTICO.....	51
11.1 Vibración debida a desbalance .....	51
11.2 Vibración debida a desalineamiento.....	52
11.3 Vibración debida a excentricidad.....	53
11.4 Vibración debida a fallas eléctricas.....	53
12. PROBLEMAS EN CHUMACERAS .....	55
12.1 Holgura excesiva de los rodamientos .....	55
12.2 Torbellino de aceite.....	57
12.3 Torbellinos de Histéresis (Resonancia inducida por las chumaceras).....	57
12.4 Falta de carga en la chumacera.....	58
12.5 Lubricación Inadecuada (frecuencias de rozamiento) .....	58
13. ACTIVIDADES REALIZADAS (vibraciones mecánicas).....	59
14.- CONCLUSIONES DEL PROYECTO.....	67

15. RECOMENDACIONES .....	67
16. FUENTES DE INFORMACIÓN.....	68

### INDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1 .- Busto de homenaje Dr. Belisario Domínguez.....	2
Figura 2 Ubicación de la C.H Belisario Domínguez.....	3
Figura 3 Casa de máquinas de la C.H Belisario Domínguez .....	4
Figura 4 Unidad auxiliar hidráulica .....	5
Figura 5 Movimiento vertical describe una forma senoidal.....	11
Figura 6 Formas de medir los parámetros de una onda senoidal.....	12
Figura 7 muestra el comportamiento del movimiento armónico simple entre desplazamiento, velocidad y aceleración .....	14
Figura 8 defasamiento entre 2 ondas senoidales.....	14
Figura 9 Representación de un periodo.....	15
Figura 10 Prueba de impacto en zona de cabezales .....	16
Figura 11 Diagrama de cascada muestra las velocidades críticas de un rotor .....	17
Figura 12 Transformada tiempo- frecuencia .....	17
Figura 13 Registro de vibraciones en un ciclo de trabajo .....	17
Figura 14 medidores de flujo .....	23
Figura 15 Medidores de temperatura.....	24
Figura 16. Tanque de presión (Aire/Aceite) .....	25
Figura 17 Chumacera de carga (14 segmentos).....	26
Figura 18 Bomba principal de inyección de aceite.....	28
Figura 19 Bomba Centrifugadora de aceite .....	33
Figura 20 Propiedades del aceite .....	38
Figura 21 Indicador de cambios de color del aceite .....	38
Figura 22 Hoja realizada para pruebas a aceites de la unidad.....	39
Figura 23 Sensor de desplazamiento su proximitor.....	42
Figura 24 Ubicación de sensores de desplazamiento.....	43
Figura 25 Sensor de velocidad tipo electromecánico .....	46
Figura 26 .- Muestra el arreglo de un acelerómetro típico.....	47
Figura 27 Espectro típico de desbalance .....	52
Figura 28 Comportamientos de excentricidad.....	53
Figura 29 Vibración ocasionada por un fenómeno eléctrico .....	55
Figura 30 Orden de Holguras.....	56
Figura 31 Holguras severas.....	56
Figura 32 Toma de Holguras U.2 (indicadores de caratula y lainometros).....	56
Figura 33 Lubricación de los segmentos de la chumacera .....	59
Figura 34 Tornillos utilizados para separar las partes del depósito de aceite.....	59
Figura 35 Espárragos utilizados para bajar la tapa inferior del depósito de aceite.....	60
Figura 36 Tapa inferior del depósito de aceite completamente abajo .....	60
Figura 37 Montaje de la cuba y depósito de la chumacera de carga.....	61
Figura 38 Toma de medidas con lainometros e indicadores de caratula.....	61

Figura 39 conector de sensores triaxiales .....	62
Figura 40 chumacera guía. ....	62
Figura 41 Chumacera de carga.....	63
Figura 42 Terminales de los sensores de desplazamiento .....	63
Figura 43 Mantenimiento e incorporación de sensores triaxiales de vibración .....	64
Figura 44 Diagrama obra de toma .....	64
Figura 45 Diagrama obra de toma (automation) .....	65
Figura 46 Medición de vibración a equipo principal.....	66
Figura 47 Toma de vibración equipo Auxiliar.....	66

### **INDICE DE TABLAS Y GRAFICAS**

TABLAS Y GRAFICAS 1 .- Información general de las unidades .....	2
TABLAS Y GRAFICAS 2.- Tipos de aditivos y propiedades .....	8
TABLAS Y GRAFICAS 3 Prueba 1 unidad auxiliar (termómetros).....	36
TABLAS Y GRAFICAS 4 .- Prueba 1 unidad auxiliar (cámara termografica) .....	36
TABLAS Y GRAFICAS 5.- Prueba 2 unidad auxiliar (termómetros) .....	36
TABLAS Y GRAFICAS 6.- Prueba 2 unidad auxiliar (cámara termografica) .....	37
TABLAS Y GRAFICAS 7.- Especificaciones de aceites .....	40
TABLAS Y GRAFICAS 8.- Características de los aceites lubricantes.....	41
TABLAS Y GRAFICAS 9.- Respuesta sensor desplazamiento.....	44
TABLAS Y GRAFICAS 10.- Ubicación de frecuencias naturales de sensores piezoeléctricos .....	48
TABLAS Y GRAFICAS 11.- Respuesta de voltaje de un sensor piezoeléctrico .....	48
TABLAS Y GRAFICAS 12.- ISO 10816 (vibraciones).....	51

## CAPITULO 1

### 1.1 INTRODUCCION

La C.H Belisario Domínguez es una instalación que permite aprovechar las masas de agua en movimiento que circulan por el río denominado Grijalva, para transformarlas en energía eléctrica, utilizando turbinas acopladas a generadores eléctricos.

El proceso de generación de energía comienza por medio de la presa en donde se acumula cierta cantidad de agua formando un embalse, con el fin de generar un salto de agua cuya energía potencial pueda transformarse en energía cinética por medio de una tubería forzada.

Dicha tubería forzada se sitúa aguas arriba de la presa con una toma de admisión protegida por una rejilla metálica, esta toma de admisión tiene una cámara de compuertas que controla la admisión del agua, que tiene como finalidad llegar hasta las turbinas de la central, alojadas en casa de máquinas.

El agua al llegar a las turbinas, actúa sobre los álabes del rodete, haciéndolo girar y perdiendo energía. El rodete de la turbina está unido por un eje al rotor del alternador que, al girar con los polos excitados por una corriente continua, induce una corriente alterna en las bobinas del estator del alternador.

Mediante transformadores, es convertida en corriente de baja intensidad y alta tensión, para ser enviada a la red general mediante las líneas de transmisión. El agua, una vez que ha cedido su energía, es restituida al río, aguas debajo de la central.

En este documento se describe la importancia de los mantenimiento y la implementación de estrategias de mantenimiento por medio de diagnóstico (medición de vibraciones y pruebas a aceites lubricantes).siguiendo un criterio del mantenimiento por confiabilidad conocido como RCM.

La realidad industrial, matizada por la enorme necesidad de explotar eficaz y eficientemente la maquinaria instalada y elevar a niveles superiores la actividad del mantenimiento. No remediamos nada con grandes soluciones que presuponen diseños, innovaciones, y tecnologías de recuperación, si no mantenemos con una alta disponibilidad nuestra industria.

Es decir, la Industria tiene que distinguirse por una correcta explotación y un mantenimiento eficaz. En otras palabras, la operación correcta y el mantenimiento oportuno constituyen vías decisivas para cuidar lo que se tiene.

## 1.2 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO.

Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) es un organismo público descentralizado, con personalidad jurídica y patrimonio propio. Que tiene por objeto la planeación del Sistema Eléctrico Nacional, así como la generación, conducción, transformación, distribución y venta de energía eléctrica para la prestación del servicio público y la realización de todas las obras, instalaciones y trabajos que se requieran para el cumplimiento de su objeto.

Comisión Federal de Electricidad cuenta con plantas que generan seis tipos de energía: Hidroeléctricas, Termoeléctricas, Geotermoeléctricas, Carboeléctricas, Eoloelectricas y Nucleoeléctricas. CFE rinde un homenaje al héroe chiapaneco Belisario Domínguez, ordenando que tanto la presa como la central hidroeléctrica lleven su nombre. (Figura 1).



Figura 1 .- Busto de homenaje Dr. Belisario Domínguez

La planta es totalmente subterránea y tiene cinco unidades de 180 000KW cada una.

TABLAS Y GRAFICAS 1 .- Información general de las unidades

No. De Unidades	5
Marca	Escher Wyss
Capacidad por unidad	184 000 Kw
Frecuencia	60 c/s
Velocidad mínima	$128.6 \frac{r}{min}$
Velocidad máxima	$245 \frac{r}{min}$
Carcasa en forma de espiral	24 alabes anti distribuidores
Alabes directrices	26
Rodete	14 alabes fijos
Capacidad efectiva	900 MW
Caudal por unidad	$219 \frac{m^3}{seg}$

### 1.2.1 Ubicación

La presa Belisario Domínguez, se localiza al sureste de la República Mexicana es una presa ubicada en el cauce del río Grijalva a 29 km del municipio Venustiano Carranza, Chipas, México, ya 58 km al sureste de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

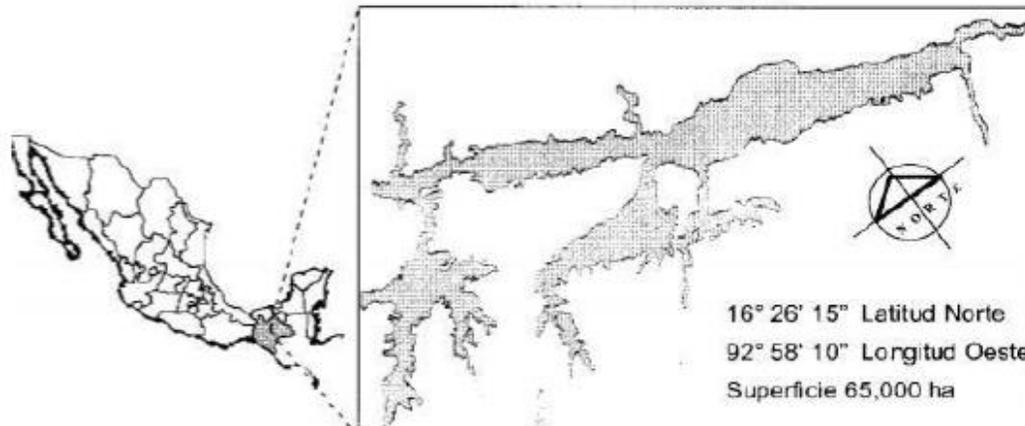


Figura 2 Ubicación de la C.H Belisario Domínguez

La C.H utiliza las aguas del río Grijalva para generar energía eléctrica. El río Grijalva original se forma con corrientes que nacen en la sierra norte de Chiapas, y que ya en Tabasco reciben los nombres de Pichucalco, Teapa, Oxolotan, Amatan y Tacotalpa, los cuales al unirse forman el río la Sierra, este río atraviesa la parte central del estado de Tabasco de sur a norte y posteriormente recibe las aguas del llamado río viejo Mezcalapa, y es desde esa intersección que recibe el nombre de Grijalva.

### 1.2.3 Casa de máquinas

La “casa de máquinas” de tipo subterráneo, es construida en el interior de montaña y su acceso es a través de un túnel de 640m de longitud, su construcción se efectuó con 2 etapas alojando en la primera etapa las unidades 1,2 y 3 en la segunda etapa 4 y5. Cuenta con diferentes elevaciones o llamados pisos: bóveda, aire acondicionado, piso de generación, piso de turbinas, galerías de inspección, playa de montaje, asiento tubo y succión y galería de drenaje.

Las 5 turbinas de la central son de tipo Francis Vertical y se encuentran alojadas en la caverna que forma casa de máquinas, localizadas en la elevación de 420 m.s.n.m.



Figura 3 Casa de máquinas de la C.H Belisario Domínguez

La rotación es en sentido a las manecillas del reloj, vista desde arriba, cuenta con una carcasa espiral, es de construcción completamente soldado de acero de construcción de grano fino con un total de 24 alabes ante distribuidores que fueron soldados en los talleres del fabricante efectuando pruebas hidrostáticas con una presión de 20, 26 alabes directrices y un rodete de acero al carbón con 13% cromo y 1% níquel con 14 alabes totalmente fijos.

#### 1.2.4 misión y visión

Misión:

Prestar el servicio público de energía eléctrica con criterios de suficiencia, competitividad y sustentabilidad, comprometidos con la satisfacción de los clientes, con el desarrollo del país y con la preservación del medio ambiente.

Visión:

Ser una empresa de energía, de las mejores en el sector eléctrico a nivel mundial, con presencia internacional, fortaleza financiera e ingresos adicionales por servicios relacionados con su capital intelectual e infraestructura física y comercial.

Una empresa reconocida por su atención al cliente, competitividad, transparencia, calidad en el servicio, capacidad de su personal, vanguardia tecnológica y aplicación de criterios de desarrollo sustentable.

### 1.3 Objetivos

El objetivo fundamental de la implementación, es aumentar la disponibilidad y disminuir costos de mantenimiento, así como, mejorar la comprensión del funcionamiento de los equipos y sistemas.

#### 1.3.1 Objetivos específicos

- Disminuir fallos técnicos o funcionales de criticidad
- Aumentar disponibilidad y disminuir costos de mantenimiento
- Mejorar la vida útil de las piezas mecánicas
- Mejorar la comprensión del funcionamiento de los equipos y sistemas

### 1.4 PROBLEMAS A RESOLVER

La Central Hidroeléctrica Belisario Domínguez cuenta con 5 unidades generadoras las cuales tienen una variación de lubricantes para evitar el desgaste de los materiales principalmente de las chumaceras que sirven como guía y carga de la misma. Así mismo cuenta con vibraciones constantes al poner en marcha las unidades las cuales a largo tiempo generan algunos desperfectos.

Se pretende homologar los aceites lubricantes de todas las unidades sin perder las propiedades necesarias que necesitan para evitar el desgaste de las mismas y que no alcance temperaturas mayores a las indicadas en el manual, para así poder presentar una alternativa de aceites. En el caso de las vibraciones mecánicas se necesita tener un estudio minucioso de las mismas para así poder determinar alguna anomalía de la unidad y poder presentar métodos de prevención antes de una falla mayor.

Actualmente las pruebas se realizan en una unidad auxiliar para así poder pasar a las unidades generadoras con el fin de tener algo más cercano a la realidad de la misma.



Figura 4 Unidad auxiliar hidráulica

## 1.5 JUSTIFICACION

Para la empresa el realizar estrategias de mantenimiento por medio de diagnóstico (medición de vibraciones y pruebas a aceites lubricantes). Le conlleva un plan de mantenimiento basado en la confiabilidad de las maquinas llamado RCM.

Es un proceso que ayuda a determinar las mejores estrategias para administrar las funciones de los activos físicos y para administrar las consecuencias de sus fallas.

El RCM se enfoca en preservar la función de sistemas. Permite preservar las funciones (de seguridad y producción) de los sistemas identificando los modos y causa de fallas y seleccionando únicamente tareas de mantenimiento y mejora que contribuyan a preservar esas funciones.

El RCM sistemáticamente identifica todas las funciones de los activos y sus fallas funcionales, así como todos los modos de falla posibles (causas de falla.). Además identifica los efectos de los modos de falla. Y por último selecciona la estrategia más apropiada para eliminar las fallas.

El interés de las Vibraciones Mecánicas llega al Mantenimiento Industrial de la mano del Mantenimiento Preventivo y Predictivo, con el interés de alerta que significa un elemento vibrante en una Maquina, y la necesaria prevención de las fallas que traen las vibraciones a medio plazo.

El interés de realizar pruebas a aceites lubricantes es una técnica simple, que realizando medidas de algunas propiedades físicas y químicas, proporciona información con respecto a:

La salud del lubricante

Contaminación del lubricante

Desgaste de la maquinaria

El análisis de lubricantes nos permite monitorear el estado de desgaste de los equipos, detectar fallas incipientes, y también establecer un programa de Lubricación, como herramienta del diagnóstico técnico en el mantenimiento de máquinas y equipos.

## CAPITULO 2

### 1.6 MARCO TEÓRICO.

#### 1.6.1 aceites lubricantes:

##### 1.6.1.1 Por qué es importante realizar una buena lubricación:

Si dos superficies metálicas secas, están en contacto bajo presión y moviéndose una con respecto a la otra, ocurre una fricción excesiva, calentamiento y desgaste. Si un fluido se mantiene entre dichas superficies de contacto, de tal manera que no se toquen los metales, entonces las pérdidas por fricción antes mencionadas son despreciables.

##### 1.6.1.2 Composición del aceite lubricante:

El fluido o lubricante ideal deberá ser lo suficientemente viscoso para mantener las superficies apartadas, permanecer estable bajo los cambios de temperatura, mantener limpias las superficies lubricadas, no permitir la formación de residuos gomosos, no permitir la formación de lodos y no deberá ser corrosivo.

Los aceites lubricantes están constituidos por una base lubricante la cual provee las características lubricantes primarias. La base lubricante puede ser base lubricante mineral (proveniente del petróleo crudo), base lubricante sintético o aceite base lubricante vegetal y animal según la aplicación que se le va a dar al aceite.

##### 1.6.1.3 Aceite vegetal y animal:

Las bases lubricantes vegetales y animales tienen tasas de biodegradación más altas, por esto estas bases lubricantes son usadas para producir "aceites verdes" o aceites más biodegradables que el aceite mineral. Estos aceites combinados con los aditivos correctos pueden ser biodegradables y no tóxicos.

Estos aceites se adhieren a las superficies por lubricar un poco mejor que los aceites minerales, pero desgraciadamente ocurren cambios químicos cuando existe un sobrecalentamiento, se queman y generan una goma semejante al barniz, siendo por lo tanto inaceptables para lubricación de motores. Para la mayoría de los motores se deberán emplear lubricantes minerales refinados en forma apropiada.

##### 1.6.1.4 Aceite mineral.

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

#### 1.6.1.5 Aceite sintético.

Las bases lubricantes sintéticas son fabricadas por procesos especiales (distintos a la refinación) para realizar funciones específicas, lo cual les otorga una mayor uniformidad en sus propiedades.

Estos aceites son la solución para trabajos en condiciones extremas (temperaturas muy altas o muy bajas). Las principales ventajas del uso de bases sintéticas comparadas con las bases minerales son: amplio rango de temperaturas de operación, mayor resistencia a la oxidación, ahorro de energía, mantenimiento con menor frecuencia, menor uso de aditivos y más fácil degradación.

#### 1.6.1.6 Aditivos.

Pequeños porcentajes de diferentes materiales solubles en aceites se agregan a estos, de tal manera que les importan características que no se obtienen por el proceso de refinamiento. A esos materiales se les llama comúnmente aditivos y existen varios tipos, tal como se describe en la tabla (numero). Los aceites usados para lubricar los motores de combustión interna pueden contener uno o más de los diversos tipos de aditivos, dependiendo del diseño de la máquina de las condiciones de funcionamiento.

TABLAS Y GRAFICAS 2.- Tipos de aditivos y propiedades

PROPOSITO	TIPOS DE COMPUESTOS USADOS	RAZONES DE SU USO	MECANISMO DE ACCIÓN
Anti-oxidantes o inhibidores de oxidación	Compuestos orgánicos que contienen azufre, fósforo o nitrógeno, tales como aminos orgánicos, sulfuros, hidroxisulfuros, fenoles. Con frecuencia se incorporan metales como el estaño el zinc o el bario.	Para evitar las acumulaciones de barniz y cienes sobre las partes del motor. Para evitar la corrosión de los cojinetes aleados.	Disminuye la cantidad de oxígeno absorbido por el aceite, reduciéndose así, la formación de cuerpos ácidos. El aditivo generalmente se oxida con preferencia al aceite.
Anti-corrosivos, preventivos de corrosión o anticatalíticos.	Compuestos orgánicos que contienen azufre activo, fósforo o nitrógeno, tales como los sulfuros orgánicos, fosfitos, sales metálicas de ácido tio fosfórico, y ceras sulfuradas.	Para evitar que fallen los cojinetes aleados por la acción corrosiva. Para evitar el ataque corrosivo en otras superficies metálicas.	Inhibe la oxidación de tal manera que no se formen cuerpos ácidos, o permite que se forme una película protectora sobre los cojinetes u otras superficies metálicas. La formación química de una película sobre las superficies metálicas disminuye la oxidación catalítica del aceite.
Detergentes	Compuestos méatalo-orgánicos tales como fosfatos, fenolatos, alcoholatos. Jabones de alto peso molecular que contienen metales como el magnesio, el bario o el estaño.	Para mantener limpias las superficies del motor y para evitar depósitos de cienes de todos los tipos.	Por reacción química o dirección de la oxidación se evita que los productos de oxidación solubles en aceite lleguen a ser insolubles y se depositen en las diversas partes del motor.
Dispersantes	Compuestos méatalo-orgánicos tales como nafenatos o sulfonatos. Sales orgánicas que contienen metales como calcio, cobalto y estroncio.	Para que la formación potencial de cienes se mantenga soluble y en suspensión, evitando que se deposite en las partes del motor.	La aglomeración de hollín del combustible y de productos insolubles de la descomposición del aceite, se evita cuando se convierten a un estado finamente dividido. En forma coloidal, las partículas contaminantes permanecen suspendidas en el aceite.
Agentes de presión extrema	Compuestos fosforados como el fosfato tricresil, compuestos halogenados. Jabones de plomo.	Para evitar desgaste innecesario de las partes móviles, así como rayado o escorado.	Por reacción química se forma la película sobre las superficies metálicas, la cual evita la soldadura o agarre cuando se rompe la película de aceite lubricante.
Preventivos del moho	Aminos, aceites grasos y ciertos ácidos grasos Derivados halogenados de ciertos ácidos grasos Sulfonados.	Para evitar herrumbre en los motores nuevos y reparados, durante su almacenamiento o embarque.	Mejor bañado de las superficies metálicas mediante una mayor capacidad de adherencia.
Depresores del punto de congelación.	Productos de condensación de alto peso molecular, tales como fenoles condensados con cera clorinada. Polímeros de metacilato.	Para disminuir el punto de fluidez de los aceites lubricantes.	Los cristales de cera en el aceite se cubren para evitar su crecimiento y la absorción del aceite a temperaturas reducidas.
Mejorantes del Índice de Viscosidad	Olefinas polimerizadas o iso-olefinas. Butilpolimeros, esterres de celulosa, caucho hidrogenado.	Para disminuir la razón de cambio de viscosidad con la temperatura.	Los mejorantes se afectan menos que el aceite debido al cambio de temperatura. Aumentan su viscosidad a 210° F. en mayor proporción que a 100°F.
Inhibidores de espuma	Silicones	Para evitar la formación de espuma estable	Hace posible que la espuma se rompa rápidamente y desaparezca.

## 1.6.2 Propiedades de los aceites lubricantes

### 1.6.2.1 Índice de viscosidad

La relación que existe entre la viscosidad y la temperatura de un aceite es conocida como índice de viscosidad (LV.). Al establecer la escala para medir el índice de viscosidad se le dio un valor de 100 al índice de un aceite altamente parafínico y cero a un aceite altamente nafténico. Un aceite de bajo LV tiene un cambio más grande de viscosidad con la temperatura que un aceite de alto LV la escala del índice de viscosidad es muy sensitiva, por lo que pequeños errores en la viscosidad provocan variaciones muy grandes en el valor del LV. El índice de viscosidad es de importancia cuando el arranque se efectúa en clima frío. Bajo las condiciones de funcionamiento el índice de viscosidad es de poco significado, puesto que existen otros dos factores de mayor importancia que el LV, primero:

En un motor, todos los aceites tienden a conservar la misma viscosidad; aceites que tienen inicialmente mayor viscosidad desarrollan mayor fricción, trabajan a mayor temperatura y su viscosidad se reduce a un valor menor.

Segundo: los aceites tenderán a hacerse delgados cuando aumente la temperatura o con el aumento de presión, sin embargo, se espesan de tal manera, que cuando los aceites se encuentran bajo presiones críticas en un motor, los de menor LV pueden ser los más viscosos.

El índice de viscosidad de un aceite puede elevarse incorporando aditivos clasificados como mejoradores del índice de viscosidad.

### 1.6.2.2 Punto de fluidez

La temperatura a la cual el aceite escasamente fluye bajo condiciones de prueba controlada, se llama punto de fluidez. Esta prueba combinada con la viscosidad determina si un aceite es aceptable para un funcionamiento en clima frío.

El punto de fluidez de un aceite puede bajarse agregando materiales que se llaman depresores del punto de fluidez

### 1.6.2.3 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 éste 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.

### 1.6.2.4 Resistencia a la oxidación

Cuando un aceite está sujeto 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.

#### **1.6.2.5 Resistencia a la corrosión**

Para determinar si un aceite corroe el metal de que esta 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 perdidas de peso en la probeta podrá decirse que este lubricante no será corrosivo cuando este en servicio.

#### **1.6.2.6 Reacción con el agua**

La habilidad de un nuevo aceite para separarse del agua se mide por la agitación de una mezcla formada de partes iguales de agua aceite, anotando el tiempo requerido que necesita dicha separación. Esta prueba es de cierto valor cuando se sabe que el agua puede introducirse a los tanques de almacenamiento de aceite. Después de que el aceite ha pasado por la operación en el motor, la tendencia de su emulsificación depende de la cantidad de carbono otros contaminantes presentes que a veces tienen alguna relación con la demulsibilidad inicial del aceite. Muchos aditivos detergentes y dispersantes usados en el aceite a veces reaccionan con el agua. Tales aditivos absorben pequeñas cantidades de agua pero se separan del aceite si está presente una gran cantidad de agua.

### **1.6.3 Factores de deterioro del aceite lubricante.**

#### **1.6.3.1 Agotamientos de aditivos**

Los aditivos se incorporan al lubricante para mejorar sus características en tales áreas como estabilidad a la oxidación, lubricidad, antidesgaste, antiarrumbre y propiedades de detergencia. Los compuestos que importen estas propiedades van siendo gradualmente usados durante el desarrollo de sus respectivas funciones.

#### **1.6.3.2 Temperatura de operación**

Los lubricantes derivados del petróleo son hidrocarburos, estos se descomponen cuando están sometidos a altas temperaturas, esto hace que el aceite se oxide o se polimerice. Un aceite descompuesto de esta manera puede presentar productos solubles o insolubles, los productos solubles por lo general, son ácidos que forman emulsiones estables en presencia de agua y que atacan químicamente las superficies metálicas. Si estos productos no se eliminan del aceite pueden deteriorar las superficies metálicas que lubrican o taponan las tuberías de conducción del mismo.

La oxidación la polimerización depende en mayor grado del tipo de base de que este compuesto el aceite del grado de refinamiento que posea, aunque es posible evitar que ocurran mediante la utilización de aditivos antioxidantes aunque es más recomendable el cambio completo del lubricante.

#### **1.6.3.3 Agua.**

Esta se encuentra principalmente por la condensación del vapor presente en la atmosfera o en algunos casos se debe a fugas en los sistemas de enfriamiento del aceite. El agua presente en el aceite provoca emulsificación del aceite, o puede lavar la película lubricante que se encuentra sobre la superficie metálica provocando desgaste de dicha superficie.

#### 1.6.3.4 Sólidos y polvos.

Se deben principalmente a empaques sellos en mal estado, permitiendo que contaminantes del medio entren al aceite. Aunque otros contaminantes menos frecuentes aunque igualmente perjudiciales son: tierra partículas metálicas provenientes del desgaste de las piezas, hollín y subproductos del trabajo realizado por la maquinaria.

#### 1.6.4 Vibraciones mecánicas

Es un fenómeno que describe oscilaciones en forma periódica, es decir, es un movimiento que se repite con todas sus características después de un cierto intervalo de tiempo llamado período de la vibración. Este fenómeno se puede considerar simplemente un movimiento armónico.

La vibración en las máquinas es un fenómeno no deseado y un problema difícil de resolver en ocasiones, que en muchos casos pone en riesgo la capacidad de producción y provoca altos costos de operación, por lo que es un tema que ha despertado el interés en la época moderna.

La vibración se produce debido a una fuerza de excitación que causa el movimiento. Un ejemplo se ilustra en la figura 2.

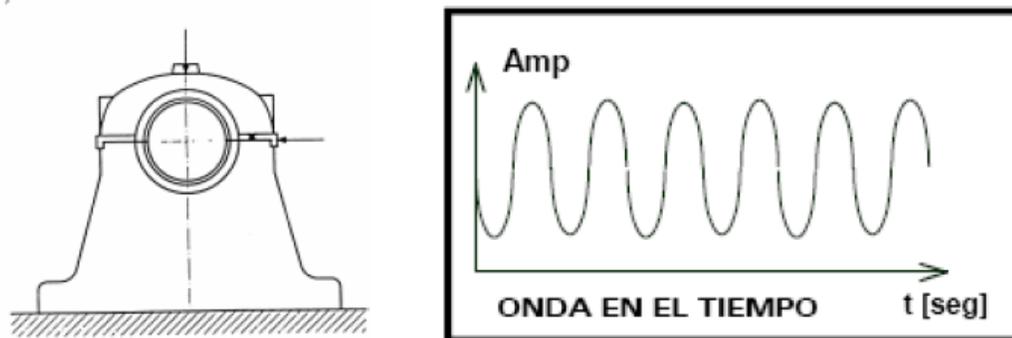


Figura 5 Movimiento vertical describe una forma senoidal

Para entender este fenómeno, pensemos en un sistema armónico simple de un solo grado de libertad como el de la figura 1, donde a la masa  $m$  le ponemos un lápiz que esté en contacto con un papel y que avanza a una velocidad constante. Si ponemos a oscilar este sistema, el lápiz dibujaría en el papel un movimiento sinusoidal ó sea un movimiento armónico simple.

De este movimiento podemos conocer los parámetros que lo describen, como son: la amplitud  $A$ , el período  $T$  y la Frecuencia  $F$ .

Existen tres formas de medir la magnitud de vibración:

0 to Peak	(0-p);	Desplazamiento, Velocidad, Aceleración
Peak to Peak	(p-p);	Desplazamiento
RMS;		Velocidad y Aceleración

A la magnitud del movimiento de vibración se le conoce como amplitud, la amplitud es una medida de la energía o movimiento de un objeto desde una posición neutral.

De la amplitud normalmente interesa el máximo valor, como se observa en la figura 3.

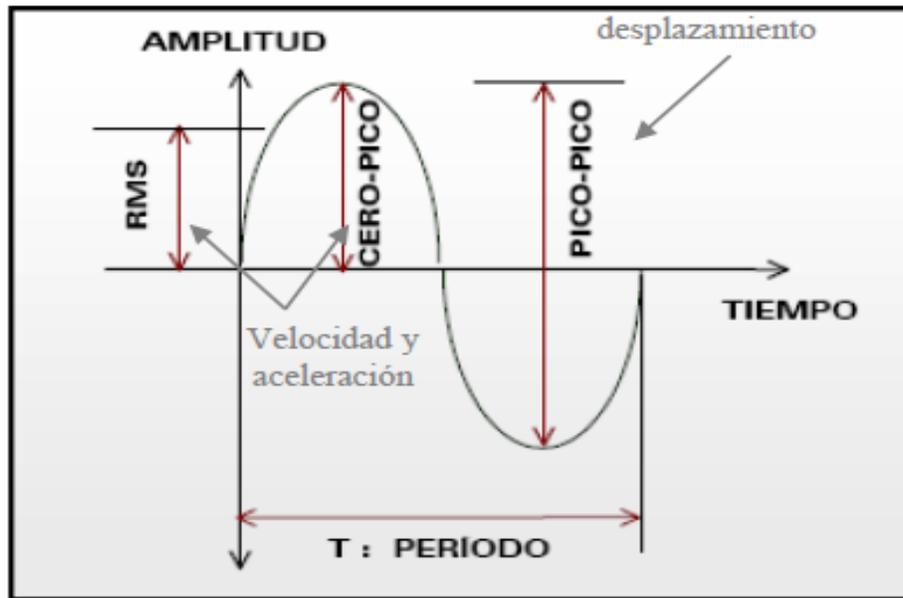


Figura 6 Formas de medir los parámetros de una onda senoidal.

Las formas de medición de este parámetro son:

Medidas de amplitud (Resumen)

Peak	0 a A	(pico)
Peak-Peak	$2,0 \times A$ ó $(A \text{ a } -A)$	(pico a pico)
RMS	$0,707 \times \text{Peak}$	(Raíz cuadrático media)
Peak	$1,414 \times \text{RMS}$	(pico)

Nota: Las conversiones indicadas arriba son verdaderas únicamente en el caso de ondas senoidales.

#### 1.6.4.1 Desplazamiento

El desplazamiento es la medida del recorrido total de la masa, esto es, aquello que muestra cuán lejos llega la masa de un lado a otro cuando vibra. El desplazamiento de la masa puede expresarse en mils (p-p) (1 mil = .001 de pulgada) o en micras (p-p) (1 micra = .001 de mm). Una extrapolación subsecuente del mismo desplazamiento de forma de onda sinusoidal dará por resultado los valores de velocidad y aceleración.

#### 1.6.4.2 Velocidad

La velocidad de vibración es la medida de la rapidez con que se desplaza o vibra la masa durante su oscilación. La velocidad de la masa es cero en los límites superior e inferior, ya que debe detenerse en tales puntos antes de invertir la dirección y moverse en la dirección opuesta. La velocidad alcanza su expresión máxima (o cresta) en la posición neutral, donde la masa se ha acelerado por completo y empieza entonces su desaceleración. La velocidad se expresa en unidades de pulgada por segundo (pulg/seg 0-p.) o milímetros por segundo (mm/seg. 0-p)

#### 1.6.4.3 Aceleración

La aceleración es el coeficiente de cambio de velocidad; se mide en G 's de aceleración relativas a la aceleración de la gravedad. A nivel del mar, 1.0 G equivale a 32.2 pies/seg<sup>2</sup> que es igual a 386.087 pulg/seg/seg o 9,806.65 mm/seg/seg, esto es, los valores aceptados de la aceleración de la gravedad en los sistemas métrico decimal y en el sistema de medidas inglés (donde pulg/seg/seg se expresa por lo general como pulg/seg<sup>2</sup>), la aceleración alcanza su máxima expresión donde la velocidad está en la mínima. Éste es el punto donde la masa se desacelera hasta detenerse y donde empieza a acelerarse de nuevo (esto es, a moverse más rápido).

Del mismo modo, cuando la carcasa de una máquina vibra, experimenta la fuerza de aceleración, ya que cambia de velocidad continuamente al moverse de un lado a otro. Cuanto más grande es el coeficiente de cambio de velocidad (o rapidez), mayor será la fuerza que soporte la máquina a causa de esa mayor aceleración. Por lo tanto, cuanto mayor sea la aceleración, mayores serán las fuerzas (y los esfuerzos) ejercidas sobre el componente vibrante de la máquina.

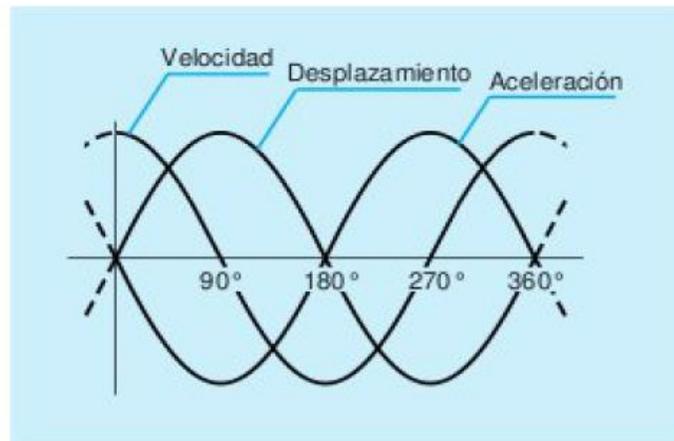


Figura 7 muestra el comportamiento del movimiento armónico simple entre desplazamiento, velocidad y aceleración

#### 1.6.4.4 Fase

La fase o ángulo de fase de vibración es la característica descriptiva final de la vibración. La fase es la desviación relativa de un componente vibrante respecto de un punto de referencia fijo en otro componente vibrante. Esto es, la fase es la medida del movimiento vibratorio que ocurre en un punto en relación con el movimiento vibratorio que ocurre en otro punto. En otras palabras, es el "ritmo de tiempo" de una vibración en relación con una pieza fija o móvil de la maquinaria. Es similar a la referencia de "regulación de tiempo" empleada para afinar un motor recíprocante.

La fase es una poderosa herramienta en el análisis de fallas de máquinas. Ya que la fase es una medida de movimiento relativo. En la Figura 5 se muestran dos sistemas que están vibrando con una diferencia de fase de  $90^\circ$ .

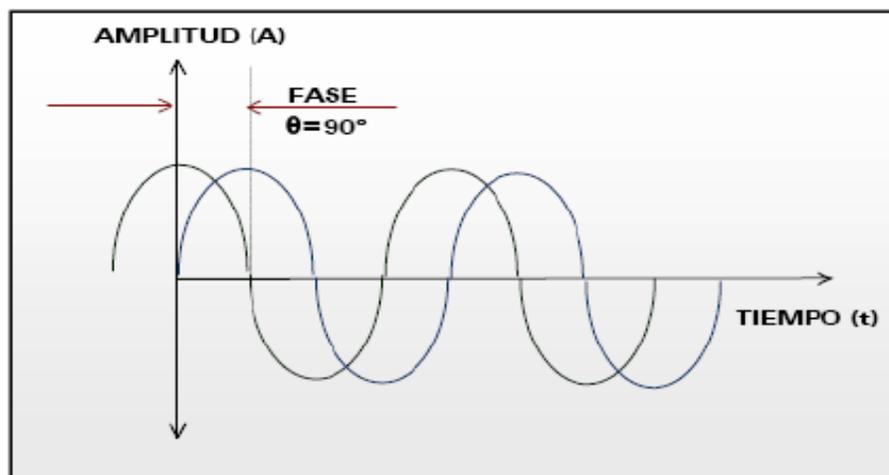


Figura 8 defasamiento entre 2 ondas senoidales.

### 1.6.4.5 Período (T)

Es el tiempo necesario para que ocurra un ciclo completo de movimiento se le llama período de la Vibración y es representada por la letra "T", se mide generalmente en segundos. Un período completo equivale a  $360^\circ$  ó  $2\pi$  rad.

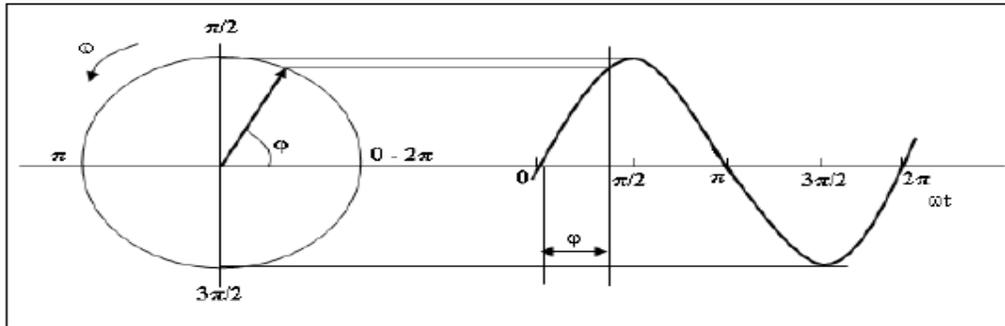


Figura 9 Representación de un periodo

### 1.6.4.6 Frecuencia

Es el número de ciclos ó períodos en una unidad de tiempo se le llama frecuencia de la vibración; y al número de ciclos por segundos se le conoce como Herz. (Hz).

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{s} = \text{Hz o cps}$$

### 1.6.4.7 Frecuencia natural

Se le llama frecuencia natural a la frecuencia en que queda vibrando un cuerpo o sistema después de ser excitado por un impulso momentáneo.

$$\omega^2 = \frac{K}{m}$$

Donde:

K = Rigidez del sistema.

m = masa del sistema.

$\omega$  = Frecuencia natural.

#### 1.6.4.8 Vibración forzada

Cuando un sistema está vibrando con la frecuencia de la fuerza que lo provoca.

#### 1.6.4.9 Resonancia

Cuando en un sistema dinámico la frecuencia de la fuerza de excitación se iguala a la frecuencia natural del sistema.

#### 1.6.4.10 La prueba del Impacto.

Se pega a la máquina con una masa pesada, como una viga de madera, martillo de hule, etc., mientras que se graban los datos.

Si hay una resonancia, la vibración de la máquina ocurrirá a la frecuencia natural, mientras que ella se está extinguiendo.



Figura 10 Prueba de impacto en zona de cabezales

#### 1.6.4.11 El arranque y rodamiento libre.

Se prende y se apaga la máquina, mientras que se graban datos de vibración y de tacómetro. La forma de onda de tiempo indicará un máximo, cuando las RPM igualan las frecuencias naturales.

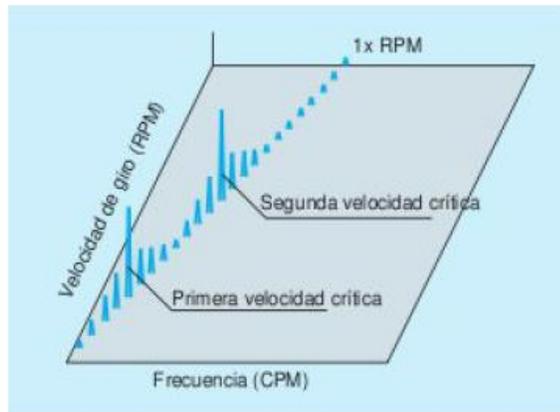


Figura 11 Diagrama de cascada muestra las velocidades críticas de un rotor

El interés de las Vibraciones Mecánicas llega al Mantenimiento Industrial de la mano del Mantenimiento Preventivo y Predictivo, con el interés de alerta que significa un elemento vibrante en una Máquina, y la necesaria prevención de las fallas que traen las vibraciones a medio plazo.

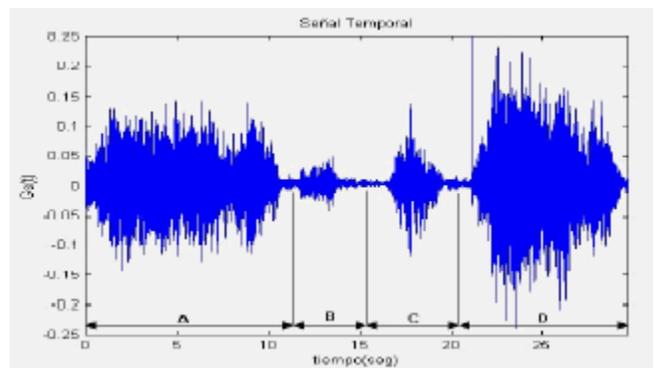


Figura 13 Registro de vibraciones en un ciclo de trabajo

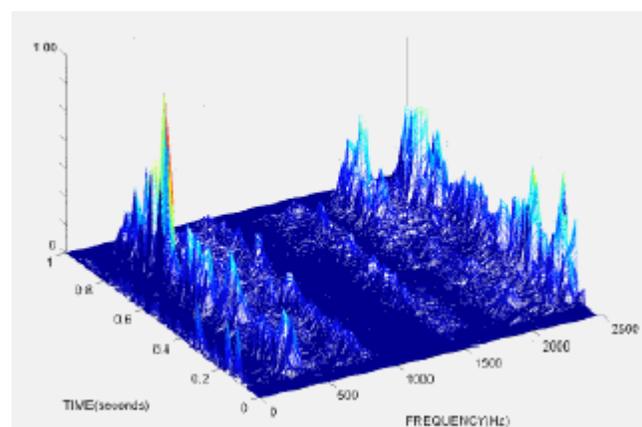


Figura 12 Transformada tiempo- frecuencia

El interés principal para el mantenimiento deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de las vibraciones detectadas en el elemento o máquina, la determinación de las causas de la vibración, y la corrección del problema que ellas representan. Las consecuencias de las vibraciones mecánicas son el aumento de los esfuerzos y las tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales, y las más temidas: daños por fatiga de los materiales, además de ruidos molestos en el ambiente laboral.

## **CAPITULO 3**

### **1.7 DESARROLLO**

Uno de los principales esfuerzos de comisión federal de electricidad, va orientado a contar con el personal mejor capacitado y adiestrado en las diferentes facetas técnico – administrativas que conforman todo el sector eléctrico.

Por lo anterior y con el fin de agilizar la inducción del personal a los diferentes procesos técnico – administrativos que integran los diferentes centros de trabajo, se ha estructurado una introducción a la tecnología de la central hidroeléctrica angostura, donde se obtendrá con ella las siguientes ventajas:

- |         |  |
|---------|--|
| Primera | Una inducción dinámica al proceso de generación Hidroeléctrica.  |
| Segunda | Conocimiento objetivo de una Central Hidroeléctrica para todo el personal de nuevo ingreso a Comisión Federal de Electricidad o ajeno a la misma |
| Tercera | Conocimiento inmediato de todos los sistemas y subsistemas de una central hidroeléctrica.  |
| Cuarta  | Conocimiento específico del equipo que conforma una central hidroeléctrica.  |
| Quinta  | Conocimiento y aplicación de formatos técnicos administrativos de una central hidroeléctrica.  |

- Sexta Sistema de información inherente al historial de los diferentes cambios que puedan suscitarse en los sistemas de una central hidroeléctrica.
- Séptima Por si misma constituye una metodología a seguir en la elaboración de este tipo de material en las centrales hidroeléctricas del sector eléctrico.

## **1.8 TIPOS DE MANTENIMIENTOS EN LA CENTRAL**

### **1.8.1 Mantenimiento preventivo.**

Se subdivide en los siguientes grupos:

#### **1.8.2 Mantenimiento rutinario:**

Es aquel que se efectúa en forma repetitiva en los equipos o instalaciones y que puede o no requerir licencia total de la unidad generadora. Consiste principalmente en revisión y limpieza de: filtros para agua, aceite y aire; niveles de aceite; engrase; así como correcciones menores reportadas por los operadores.

#### **1.8.3 Mantenimiento menor:**

Es el que de acuerdo con los registros de comportamiento (parámetros de operación), diagnósticos (sintomatología), experiencia y/o recomendaciones del fabricante, se requiere dar a los equipos y/o instalaciones, lo anterior no implica desarmar y/o sustituir los componentes principales. Requiere de una licencia total cuya duración dependerá de la capacidad y de las condiciones de las unidades.

#### **1.8.4 Mantenimiento mayor:**

Es el que se realiza bajo la misma premisa que el menor y requiere de mayor tiempo, dependiendo de la capacidad de la unidad generadora, debido a que en este tipo de mantenimiento se requiere desmontar, reparar y/o sustituir las partes principales de la unidad.

#### **1.8.5 Rehabilitación:**

Son aquellas actividades que se realizan en las unidades generadoras y/o en instalaciones y equipos auxiliares, que implica una modificación al diseño original, debido al avance tecnológico y/o al mejoramiento de la instalación. Para su realización en las unidades generadoras se requiere desacoplar la turbina del generador, desmontar totalmente la

unidad y se justifica con base al diagnóstico de la instalación y al correspondiente estudio de rentabilidad de la inversión.

Cuando la central ha concluido su vida útil y se mantienen las instalaciones civiles, y la concesión de agua vigente, es conveniente efectuar un análisis técnico-económico para modernizar la instalación, empleando tecnología actual.

### **1.8.6 mantenimiento correctivo o no programado.**

Se subdivide en dos tipos:

#### **1.8.6.1 mantenimientos por falla**

Son las actividades que se realizan en las unidades generadoras y/o equipos e instalaciones, que implican el restablecimiento de la condición operativa que fue interrumpida por una falla.

#### **1.8.6.2 mantenimientos por emergencia**

Se efectúa tiempo después de que se presenta una alteración en el comportamiento operativo del equipo o instalación y que aun cuando pueda mantenerse en operación la unidad con su capacidad nominal o ligeramente menor, denota un riesgo potencial cuya causa debe ser corregida lo más pronto posible.

Cada vez que se presenten fallas o situaciones de emergencia, como lo descrito anteriormente, deberá realizarse un análisis de las circunstancias o causas que las motivaron a fin de que la corrección a realizar evite su recurrencia.

## **1.9 MANTENIMIENTO RCM**

RCM (Mantenimiento Centrado en Fiabilidad/Confiability) es una técnica más dentro de las posibles para elaborar un plan de mantenimiento en una planta industrial y que presenta algunas ventajas importantes sobre otras técnicas. Inicialmente fue desarrollada para el sector de aviación, donde los altos costes derivados de la sustitución sistemática de piezas amenazaba la rentabilidad de las compañías aéreas. Posteriormente fue trasladada al campo industrial, después de comprobarse los excelentes resultados que había dado en el campo aeronáutico.

Fue documentado por primera vez en un reporte escrito por F.S. Nowlan y H.F. Heap y publicado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América en 1978. Desde entonces, el RCM ha sido usado para ayudar a formular estrategias de gestión de activos físicos en prácticamente todas las áreas de la actividad humana organizada, y en prácticamente todos los países industrializados del mundo. Este proceso definido por Nowlan y Heap ha servido de base para varios documentos de aplicación en los cuales el proceso RCM ha sido desarrollado y refinado en los años siguientes. Muchos de estos documentos conservan los elementos clave del proceso original. Sin embargo el uso extendido del nombre "RCM" ha llevado al surgimiento de un gran número de metodologías

de análisis de fallos que difieren significativamente del original, pero que sus autores también llaman “RCM”. Muchos de estos otros procesos fallan en alcanzar los objetivos de Nowlan y Heap, y algunos son incluso contraproducentes. En general tratan de abreviar y resumir el proceso, lo que lleva en algunos casos a desnaturalizarlo completamente

Como resultado de la demanda internacional por una norma que establezca unos criterios mínimos para que un proceso de análisis de fallos pueda ser llamado “RCM” surgió en 1999 la norma SAE JA 1011 y en el año 2002 la norma SAE JA 1012. No intentan ser un manual ni una guía de procedimientos, sino que simplemente establecen, como se ha dicho, unos criterios que debe satisfacer una metodología para que pueda llamarse RCM.

El objetivo fundamental de la implantación de un Mantenimiento Centrado en Fiabilidad o RCM en una planta industrial es aumentar la disponibilidad y disminuir costes de mantenimiento. El análisis de una planta industrial según esta metodología aporta una serie de resultados:

- Mejora la comprensión del funcionamiento de los equipos y sistemas
- Analiza todas las posibilidades de fallo de un sistema y desarrolla mecanismos que tratan de evitarlos, ya sean producidos por causas intrínsecas al propio equipo o por actos personales.
- Determina una serie de acciones que permiten garantizar una alta disponibilidad de la planta.
- Las acciones de tipo preventivo que evitan fallos y que por tanto incrementan la disponibilidad de la planta son de varios tipos:

## 2. PLANIFICAR LA IMPLANTACIÓN RCM

Definir el alcance, es decir, a qué equipos, subsistemas, sistemas o áreas se aplicará la metodología RCM3. Aunque esta metodología está inicialmente pensada para ser implantada en toda la instalación, RCM3 puede aplicarse a solo una parte. Conviene incluso llevar a cabo una experiencia piloto para tener claro lo que implica. La definición del alcance supone también definir el nivel de profundidad con el que se abordará el estudio

Definir los recursos que se van a emplear, que son fundamentalmente un equipo humano capaz de llevar a cabo el proceso, y puntualmente, el asesoramiento de una empresa externa si se requiriera.

Definir la secuencia en la que se van a estudiar los diferentes sistemas incluidos en el alcance.

Fijar plazos, fechas exactas, en las que se debe tener completado cada hito

Realizar una reunión de lanzamiento con todos los implicados.

Un trabajo bien planificado es posible que salga mal. Un trabajo mal planificado es muy poco probable que acabe consiguiendo sus objetivos en los plazos adecuados y con unos costes razonables, incluso es dudoso que pueda conseguirse objetivo alguno.

## LAS MEDIDAS PREVENTIVAS

La siguiente fase en la implementación de RCM a una planta industrial es la determinación de las medidas preventivas a adoptar para evitar los diversos fallos potenciales que puede presentar la instalación.

Es muy importante tener en cuenta un punto trascendental: las medidas que se adopten tienen que tener una relación económica y técnica con el fallo que se pretende evitar, de manera que para un fallo tolerable será absurdo tomar una medida de alto coste, y en cambio, para un fallo crítico será absurdo limitarse a hacer inspecciones visuales cuando otras medidas de mayor calado económico pueden suponer que el fallo potencial se puede evitar.

Las medidas preventivas que se pueden tomar son de seis tipos:

- Implementación de mejoras y modificaciones de la instalación, que será siempre la primera opción a adoptar.
- Modificación de instrucciones de operación, en caso de que las modificaciones no den un resultado suficiente para evitar que el fallo se produzca.
- Modificaciones de instrucciones de mantenimiento, en caso de que lo anterior no de un resultado suficiente para evitar que el fallo se produzca.
- Realización de tareas de mantenimiento programado, solo en caso de que lo anterior no de un resultado suficiente para evitar que el fallo se produzca.
- Adopción de medidas tendentes a atenuar los efectos de los fallos, en caso de que exista la posibilidad de que el fallo se produzca.
- Adquisición de repuesto, solo si es estrictamente necesario

## 3. DETECCIÓN Y ANÁLISIS PARA EL DIAGNÓSTICO

Una vez definidos los conceptos de mantenimiento rutinario, menor y mayor, es necesario complementar las técnicas requeridas para obtener de los equipos la mayor disponibilidad y programar los mantenimientos preventivos con base al análisis de comportamiento de sus componentes, ya sea con la ayuda de las variables medidas en el sistema de monitoreo continuo y/o con un equipo específico, a fin de estructurar un diagnóstico que nos permita corregir con oportunidad y al menor costo las anomalías detectadas.

Se deben tomar en cuenta las siguientes premisas:

- a) Reducir en todo lo posible las indisponibilidades.

- b) Evitar cualquier incidente que pudiera tener consecuencias con el personal o con terceros.
- c) Mantener, y de ser posible, incrementar la eficiencia de las instalaciones.
- d) Maximizar la rentabilidad de las inversiones.

Las pruebas y mediciones para establecer el diagnóstico del equipo, deberán realizarse sin afectar la disponibilidad de los mismos. Las revisiones necesarias para confirmar los resultados del diagnóstico, podrán realizarse durante los mantenimientos rutinarios o durante el paro temporal de la unidad y servirán para establecer las necesidades o decisiones de mantenimiento.

Las inspecciones programadas para tomar holguras, vibraciones y otras referencias sobre la turbina y sus componentes, deberán también definirse en función del trabajo de las unidades generadoras y las condiciones particulares de operación.

Los instrumentos de medición de flujo y temperatura, deberán permitir el efectuar los balances térmicos de los intercambiadores de calor, para programar la limpieza de éstos, en el momento cuando modifiquen su coeficiente de transferencia.



Figura 14 medidores de flujo

En las chumaceras guía, los instrumentos de medición de temperatura, medición de nivel, flujo de agua de enfriamiento, presión de aceite (donde aplique) y medición de la vibración, deberán determinar el momento en el que existe un comportamiento inadecuado, que amerite el efectuar la revisión.



Figura 15 Medidores de temperatura

En las chumaceras de carga, además del seguimiento de su comportamiento operativo, se deberá de efectuar un análisis sistémico con aquellas acciones operativas, que permitan detectar un mal funcionamiento de los sistemas de prelubricación, ejemplo de esto, los tiempos de paro, temperaturas anormales de operación y otros.

Los instrumentos para la medición de nivel y presión en los tanques acumuladores, asociados con los tiempos de recuperación y abatimiento de la presión, indicarán el estado del aceite de las bombas, de la válvula distribuidora, de la válvula piloto y de los servomotores en el sistema de regulación de velocidad.



Figura 16. Tanque de presión (Aire/Aceite)

### 3.1 Detección de fugas de agua, aire y aceites en forma cualitativa.

Con esta inspección se pretende detectar la existencia de fugas en los diferentes sistemas que operen ya sea con agua, aire o aceite.

Estas inspecciones se pueden realizar cuando los sistemas se encuentren dentro o fuera de operación. Se deben realizar de acuerdo al programa de mantenimiento rutinario (corto periodo), o bien cada vez que exista un reporte al respecto (aviso). La existencia de fugas de agua, aire y aceites pueden ser por:

- a) Ruptura en tuberías, válvulas, conexiones y mangueras.
- b) Falla de empaquetaduras y/o tornillos de fijación.
- c) Falla en serpentines o intercambiadores de calor.
- d) Sobre nivel en cubas o tanques receptores.

### 3.2 Chumacera de carga y alimentación de aceite.

Los componentes principales de la chumacera de carga, son el anillo portante que esta colocado sobre la brida de la flecha, los catorce segmentos basculantes, los pernos de apoyo y los apoyos de hierro blando. La carga axial de 800 Tm, que se genera durante el servicio, es transmitida a la tapa de turbina a través del apoyo de chumacera de carga superior e inferior.

La alimentación de aceite de chumacera para ambas chumaceras de guía y chumacera de carga se efectúa por un sistema cerrado. El aceite es aspirado desde el recipiente de aceite de la chumacera de guía inferior con una bomba vertical accionada por un motor eléctrico y empujado por el refrigerador de aceite. Luego el flujo de aceite es distribuido a cada chumacera por diafragmas.



Figura 17 Chumacera de carga (14 segmentos)

El retorno está provisto de un tubo de desborde, de modo que también en el caso de pérdidas en el sistema de tubería de segmentos quedan sumergidos en el aceite. Al tubo de desborde están conectadas dos tuberías de salida vertical. En la parte inferior de la tubería de mayor diámetro está prevista una válvula mariposa que está ajustada de modo tal que esta tubería a servicio normal este llena hasta la mirilla de arriba. De este modo se reduce la formación de espuma por la caída del aceite. Si la bomba de aceite conduce en caso inusitado un caudal mayor, entonces también fluye aceite por la tubería de retorno de menor diámetro, no estrangulada, desde la carcasa de la chumacera superior a la inferior.

En caso de falla de la bomba eléctrica vertical, una bomba de accionamiento eléctrico horizontal, se puede encargar de la alimentación de aceite como respaldo. Durante la puesta en marcha de la maquina se produce la presión necesaria de elevación entre los

segmentos de chumaceras de carga y el anillo portante con una bomba de aceite independiente (bomba de prelubricación). Cada carcaza de chumacera tiene el pasaje de la flecha una cámara de aire de cierre, a fin de evitar la salida de vapores de aceite. Además también hay instalada una extracción de los mismos vapores.

Para supervisión de la chumacera de carga hay los siguientes instrumentos:

- 1.- termómetro de distancia a mercurio en el aceite con un contacto de alarma.
- 2.- termómetro de distancia a mercurio en el metal de chumacera con un contacto de alarma y un contacto de disparo.

### **3.3 Sistema de lubricación de las chumaceras de la turbina y el generador.**

El sistema de lubricación de la turbina está formado por un circuito cerrado único para todas las chumaceras, la de guía inferior que se encuentra en la elevación 418.86 m.s.n.m. adyacente al cárcamo de las bombas de circulación y comunicado por la parte superior.

La chumacera de carga y de guía superior se encuentran juntas en la elevación 423.12 m.s.n.m.

Los elementos principales del sistema de lubricación son los siguientes.

Un cárcamo donde se tiene el tubo de succión de una bomba llamada principal tipo tornillo, de posición vertical accionada por un motor eléctrico de 30 HP trifásico, la bomba tiene un gasto de 930 H/min. A una velocidad de 786 r.p.m., marca Allwertw SNF 1700 – 46. Se tiene otra bomba de respaldo que entra en operación automáticamente al disparo de la principal, es de la misma marca pero del tipo SNH 940 – 46 de posición horizontal alimentada por motor eléctrico de 17 KW de capacidad el gasto es de 1110 Lt/min. A 1760 r.p.m



Figura 18 Bomba principal de inyección de aceite

La descarga de ambas bombas, cuenta con una válvula de retención que evita que el aceite retorne al carcamo a través de la bomba que se encuentre fuera de servicio. Tiene una válvula de alivio que opera conectado a una tubería de retorno cuando se presenta una sobre presión en la descarga de las bombas.

El flujo de aceite pasa a un sistema de filtro marca MANN, tipo 2 –62 –012- 81 – 162, cuyos elementos son de malla fina 0.08 mm. Tipo dúplex, a fin de poder hacer limpieza a uno de los elementos sin suspender la circulación de aceite o sea con dispositivo para conmutación en servicio por lo que puede estar en servicio la unidad; tiene también un sistema de tubería by – pass por si es necesario sacar el filtro totalmente de operación sin interrumpir el flujo.

Después del filtrado de aceite paso a unos intercambiadores de calor, donde es enfriado con agua, las características de los dos intercambiadores son : marca OELTECHNIK, tipo OK 6/240., con una capacidad de aceite de 53 US GAL Y 28 US GAL de agua por la envolvente y los tubos respectivamente.

Sale el aceite enfriado y se conduce a las chumaceras por tuberías que se bifurcan en el trayecto, uno de los ramales está conectado al depósito de aceite de las chumaceras de carga y guía superior, de aquí luego de cumplir su cometido , sale hacia el cárcamo por cuatro tubos de rebalse, siendo ésta la única manera de desalojar el aceite, los segmentos de ambas chumaceras quedan siempre sumergidas en aceite, ya que el nivel de rebalse está por arriba de los segmentos. La tubería que conduce el aceite al depósito tiene un indicador de flujo con contactos de alarma y disparo retardado a 30 segundos por falla en el flujo de aceite.

El otro ramal de la bifurcación a la salida de los enfriadores, lleva el aceite al depósito de la chumacera guía inferior y también llena totalmente este depósito y a los segmentos, pasando el cárter de las bombas por rebalse en la pared que los comunica para iniciar así nuevamente el recorrido ya indica.

La tubería conductora también tiene intercalado un indicador de flujo de aceite con contactos de alarma y disparo por falta de flujo.

Otras protecciones que tienen las chumaceras son las siguientes:

### **3.4 Chumacera de carga.**

Termómetro en el aceite con contacto de alarma ( 60°C).

Termómetro en el metal con contactos de alarma (90°C) y disparo (93°C).

Sensores de temperatura

Indicador de nivel de aceite con un contacto de alarma.

### **3.5 Chumacera guía superior**

Termómetro en el metal con contactos de alarma (65°C) y disparo (70°C).

Termómetro en el aceite con un contacto de alarma (55°C).

### **3.6 Chumacera guía inferior.**

Termómetro en el metal con contactos de alarmas (65°C) y disparo (70°C).

Termómetro en el aceite con contacto de alarma (55°C).

Indicador de nivel de aceite con contactos de alarma.

Cuenta también con un sistema de inyección de aceite a presión a los segmentos de la chumacera de carga para garantizar una lubricación efectiva al arranque y al paro de la unidad mediante una bomba de engranes accionada con un motor eléctrico, esta bomba opera automáticamente al entrar los auxiliares de la turbina y sale cuando la unidad está al 40% de su velocidad nominal y vuelve a entrar en la fase de paro también a la misma velocidad, esta bomba también se puede operar en manual, con máquina rodando o parada.

Su operación es la siguiente: toma aceite del depósito de la chumacera de carga y lo lleva a un cabezal que tiene una alimentación para cada segmento y sale por el centro de la cara de trabajo y forma así una película de aceite de 0.1 mm de espesor, suficiente para iniciar el arranque de la unidad o el paro de la mismas, sus características son:

Bomba de inyección marca.	Bucher.
Tipo.	4 – H3 – 19.
	20 HP.
	1450 r.p.m.
	19 lt / min.
	300 kg / cm <sup>2</sup> .

Cuenta el sistema de lubricación con termómetros de aceite, entrada y salida de enfriadores, termómetros de entrada y salida de agua de enfriamiento, manómetros antes y después de los filtros de aceite y manómetros de agua de enfriamiento.

Indicador de flujo con alarma del agua de enfriamiento. El aceite lubricante empleado es el Mobil DTE Extra Heavy, con un volumen total 5,000 lts.

### **3.7 Chumacera guía generador. Sistema de lubricación.**

Funciona en forma independiente del resto de las chumaceras de la turbina; consta de una cuba o depósito dentro del cual se encuentra sumergida en el aceite lubricante, garantizando así, siempre una lubricación adecuada.

El enfriamiento de este aceite se realiza con el aire frío que pasa por los radiadores y enfría el estator. Para la chumacera un ducto de 8" de  $\phi$  lleva el aire hasta el exterior de la cuba para realizar el intercambio de calor.

Los dispositivos de control que tiene el sistema son:

Termómetro en el metal con alarma (75°C) y disparo (85°C), en unidades 3,4 y 5.

Termómetro en el aceite con alarma (70°C).

Indicador de nivel con alarma y disparo por bajo nivel.

El aceite empleado es el Mobil Heavil Médium, con un volumen de 180 Lts.

## 4. GENERALIDADES

El objetivo de la lubricación es el de reducir el rozamiento de los elementos de máquinas que giran o se desplazan. En el regulador de velocidad, el accionamiento de las válvulas de turbina para su operación normal, disturbios o protecciones, se realiza a través de aceite a alta presión. Un aceite bien conservado evita problemas por obstrucción o desgaste prematuro en las válvulas hidráulicas. Por lo tanto el estudio de lubricación es fundamental siempre que se trate de reducir el desgaste de los equipos en la producción de energía, como en nuestras centrales. El lubricante en la mayoría de los casos es aceite mineral. En algunos casos se utiliza agua, aire o lubricantes sintéticos cuando hay condiciones especiales de temperatura, velocidad, etc.

### 4.1 TIPOS DE LUBRICACIÓN

#### 4.1.1 Hidrodinámica.

Es aquella en la que las superficies del cojinete que soportan la carga están separadas por una capa de lubricante gruesa, a manera de impedir el contacto entre metal y metal. La lubricación hidrodinámica no depende de la introducción del lubricante a presión, aunque esto sí se puede hacer; sin embargo, si se requiere que haya un abastecimiento adecuado de aceite en todo momento. La presión en el aceite la origina la superficie en movimiento, que lo arrastra hacia la zona de carga en forma de cuña, a una velocidad suficientemente grande que origine la presión necesaria para separar las superficies, actuando sobre la carga que obra sobre el cojinete. La lubricación hidrodinámica es llamada también "lubricación de película completa o lubricación de película fluida".

#### 4.1.2 Hidrostática.

Esta se obtiene introduciendo el lubricante, que a veces es aire o agua, en el área de soporte de la carga, a una presión suficientemente elevada para separar las superficies con una capa de lubricante relativamente gruesa. Así a diferencia de la lubricación hidrodinámica, no se requiere del movimiento de una superficie con respecto a la otra, normalmente se utiliza cuando las velocidades son pequeñas o nulas y cuando la resistencia al rozamiento tiene que reducirse al mínimo absoluto.

#### 4.1.3 Elastohidrodinámica.

Es el tipo de lubricación que se produce en elementos altamente cargados donde la presión es tal que la deformación elástica de las superficies metálicas influye en la formación del espesor de película, por ejemplo los engranes y cojinetes de rodamiento (baleros).

#### **4.1.4 Lubricación de película mínima o al límite.**

Este tipo de lubricación se presenta cuando es posible que el área de contacto sea insuficiente, o que se aminore la velocidad de la superficie móvil, o que se reduzca la cantidad de lubricante suministrada a un cojinete, o bien, que se produzca un aumento en la carga a soportar o un incremento en la temperatura del lubricante y en consecuencia disminuya la viscosidad; cualquiera de estas condiciones puede impedir la formación de una película de lubricante suficientemente gruesa para que haya lubricación fluida o de película completa. Cuando esto ocurre las asperezas de mayor altura quedan separadas por películas de lubricante de sólo unos cuantos diámetros moleculares de espesor. El cambio de la lubricación hidrodinámica nunca es brusco o repentino.

#### **4.1.5 Lubricación de película sólida.**

Esta se utiliza cuando los cojinetes tienen que trabajar a temperaturas extremas, utilizando un lubricante de película sólida como el grafito o el disulfuro de molibdeno, porque los aceites ordinarios no dan resultados satisfactorios.

### **5. MANTENIMIENTO DE LOS ACEITES DE EQUIPOS PRINCIPALES DE LA UNIDAD.**

El aceite lubricante deberá centrifugarse al menos cada año, principalmente el del sistema de regulación, ya que las impurezas o materiales extraños en suspensión, afectan la buena operación de los gobernadores de la turbina. Siendo el enfriamiento de este aceite por medio de serpentines, cualquier fuga de agua emulsiona el aceite, esta agua en suspensión origina oxidación en partes vitales del gobernador, debido a estas circunstancias deberá hacerse análisis de aceite independientemente de estas pruebas, a simple vista se puede ver el aceite emulsionado, no confundir, con el aire que se encuentra en el aceite, para este caso será necesario el centrifugado a circuito cerrado en el depósito de recuperación sin necesidad de parar la unidad. En un mantenimiento mayor es conveniente retirar todo el aceite del depósito y efectuar una limpieza a conciencia para retirar los sedimentos acumulados. Es recomendable hacer análisis de laboratorio de los lubricantes del sistema de regulación y de lubricación al menos una vez al año.



Figura 19 Bomba Centrífuga de aceite

## 6. MÉTODOS RECOMENDADOS PARA LA TOMA Y EL MANEJO DE MUESTRAS DE ACEITE LUBRICANTE Y COMBUSTIBLE. ACEITES LUBRICANTES.

Una muestra representativa es aquella cuyas características son iguales a las de la carga total del producto muestreado. Para asegurar que una muestra sea realmente representativa, se debe tomar durante la operación de la máquina. Esta debe haber estado

trabajando algún tiempo para que cualquier material que se haya asentado tenga tiempo de circular nuevamente con el aceite, ya que si una muestra de aceite se toma de la parte superior del cárter o recipiente, después de que la máquina ha estado parada por algún tiempo, ciertos contaminantes tales como agua, suciedad, partículas de metal, etc., pueden haberse asentado. Esta muestra puede ser representativa del aceite una vez asentado, pero no puede llamarse representativa del aceite en circulación. Toma de muestra.

Si el cárter o recipiente tiene una abertura para limpieza arriba del nivel del aceite, es fácil recoger un poco de aceite mientras la máquina está en movimiento. Algunas veces, existen válvulas en la tubería de descarga de la bomba donde se puede sacar una muestra siempre y cuando la válvula esté antes de cualquier equipo de purificación.

Si por cualquier razón no se puede tomar una muestra durante la operación de la máquina, el muestreo debe realizarse enseguida de haberse parado, antes de que los contaminantes puedan asentarse o que el aceite se enfríe apreciablemente. Cuando el aceite de turbina tiene una apariencia turbia o rara, un color oscuro o un olor a quemado, o si se encuentra contaminación visible, se debe remitir muestra al laboratorio, para su análisis, independientemente del tiempo transcurrido desde el envío de la anterior. En caso de que la muestra tomada para analizarse no sea representativa del aceite en servicio, se debe adjuntar una explicación detallada de cómo se tomó ésta.

Al tomar una muestra de la válvula de drenado, el primer cuarto de litro del aceite debe descartarse y después tomarla. Al tomar la muestra desde el orificio de drenado se debe tener cuidado de limpiar todas las suciedades alrededor del tapón y aflojar éste lo suficiente, únicamente para permitir que el aceite se escape. No aflojar o quitar completamente el tapón.

### **6.1 Volúmenes necesarios de muestra.**

Para el trabajo de análisis de laboratorio es conveniente enviar las siguientes cantidades de lubricantes usados:

- a) Aceite de turbina, sistemas hidráulicos, sistemas de circulación: 1 litro.
- b) Aceites de máquinas diésel: 1 litro.
- c) Lodos ½ litro.
- d) Depósitos: 30 gramos
- e) Aceites para engranes: ½ litro.

### **6.2 Recipientes para el envío de muestras**

Un envase ideal deberá tener las siguientes características:

- a) Limpio y seco

- b) Irrompible, de preferencia de plástico.
- c) Ligero
- d) De cierre hermético
- e) Nuevo.

### **6.3 Información que debe acompañar a las muestras.**

La información que deberá acompañar a las muestras será la siguiente:

Aceite lubricante.

- 1.- Nombre de la planta, del sistema y del equipo.
- 2.- Marca y tipo del lubricante.
- 3.- Tipo de unidad.
- 4.- Lugar donde se tomó la muestra.
- 5.- Horas totales de servicio de la máquina.
- 6.- Horas de servicio del equipo desde su último mantenimiento.
- 7.- Horas de servicio de la muestra.
- 8.- Capacidad del sistema, litros.

## **7. RESULTADOS DE PRUEBAS (Aceites lubricantes)**

### **7.1 Pruebas en la unidad auxiliar (Aceite Lubricante)**

Las pruebas realizadas para la verificación las diferentes temperaturas generadas en los puntos críticos de la unidad como son la chumacera de generador 1 chumacera turbina y

chumacera generador 2, dependiendo el aceite que se utiliza, Para así poder dictaminar que aceite es el más adecuado para la interacción de la misma y que la unidad no alcance temperaturas muy elevadas.

TABLAS Y GRAFICAS 3 Prueba 1 unidad auxiliar (termómetros)

PRUEBA No. 1	ACEITE HEAVY MEDIUM	MUESTRAS DADAS POR TERMOMETROS EN LA UNIDAD			
		CHUMACERA GENERADOR 2		CHEMACERA TURBINA	
HORA	TEMPERATURA	HORA	TEMPERATURA	HORA	TEMPERATURA
09:08	28°C	09:08	28°C	09:08	28°C
09:18	34°C	09:18	34°C	09:18	32°C
09:28	34°C	09:28	38°C	09:28	36°C
09:38	37°C	09:38	40°C	09:38	40°C
09:48	39°C	09:48	41°C	09:48	42°C
09:58	40°C	09:58	41°C	09:58	42°C
10:08	42°C	10:08	42°C	10:08	44°C
10:18	44°C	10:18	43°C	10:18	47°C
10:28	44°C	10:28	43°C	10:28	48°C

TABLAS Y GRAFICAS 4 .- Prueba 1 unidad auxiliar (cámara termografica)

DATOS CON LA CAMARA TERMOGRAFICA			
HORA	T. CUMACERA TURBINA	T. CHUMACERA GEN 1	T.CHUMACERA GEN2
09:18	37°C	33°C	37.4°C
09:34	41°C	37.7°C	36°C
09:46	44°C	38°C	40°C
09:58	45°C	41°C	43°C
10:12	47°C	43°C	43°C
10:22	48°C	42°C	42°C
10:49	51°C	48°C	45°C
11:34	53°C	50°C	44°C
11:42	54°C	52°C	42°C

TABLAS Y GRAFICAS 5.- Prueba 2 unidad auxiliar (termómetros)

PRUEBA No. 2		ACEITE EXTRA HEAVY				MUESTRAS DADAS POR TERMOMETROS EN LA UNIDAD			
CHUMACERA GENERADOR 1				CHUMACERA GENERADOR 2				CHEMACERA TURBINA	
HORA	TEMPERATURA	HORA	TEMPERATURA	HORA	TEMPERATURA	HORA	TEMPERATURA	HORA	TEMPERATURA
09:08	28°C	09:08	28°C	09:08	28°C	09:08	28°C	09:08	28°C
09:18	34°C	09:18	34°C	09:18	34°C	09:18	34°C	09:18	32°C
09:28	34°C	09:28	38°C	09:28	38°C	09:28	36°C	09:28	36°C
09:38	37°C	09:38	41°C	09:38	41°C	09:38	42°C	09:38	42°C
09:48	40°C	09:48	42°C	09:48	42°C	09:48	44°C	09:48	44°C
09:58	42°C	09:58	44°C	09:58	44°C	09:58	45°C	09:58	45°C
10:08	42°C	10:08	45°C	10:08	45°C	10:08	47°C	10:08	47°C
10:18	48°C	10:18	45°C	10:18	45°C	10:18	49°C	10:18	49°C
10:28	51°C	10:28	48°C	10:28	48°C	10:28	50°C	10:28	50°C

TABLAS Y GRAFICAS 6.- Prueba 2 unidad auxiliar (cámara termografica)

DATOS CON LA CAMARA TERMOGRAFICA			
HORA	T. CUMACERA TURBINA	T. CHUMACERA GEN 1	T.CHUMACERA GEN2
09:18	37°C	36°C	37.4°C
09:34	41°C	38.8°C	38.4°C
09:46	44°C	42°C	40°C
09:58	47°C	46°C	43°C
10:12	51°C	48°C	44°C
10:22	55°C	52°C	46°C
10:49	56°C	55°C	49°C
11:34	58°C	57°C	52°C
11:42	61°C	59°C	55°C

Como resultado de las pruebas realizadas en la unidad auxiliar se dictamino que el aceite más efectivo para que la maquina no llegue a puntos críticos de temperatura es el Mobil Heavil Medium.

Mobil DTE Named Series	Mobil DTE Light	Mobil DTE Medium	Mobil DTE Heavy Medium	Mobil DTE Heavy
ISO Viscosity Grade	32	46	68	100
Viscosity, ASTM D 445				
cSt @ 40° C	31.0	44.5	65.1	95.1
cSt @ 100° C	5.5	6.9	8.7	10.9
Viscosity Index, ASTM D 2270	102	98	95	92
Pour Point, °C, ASTM D 97	-18	-15	-15	-15
Flash Point, °C, ASTM D 92	218	221	223	237
Density @15° C kg/l, ASTM D 4052	0.85	0.86	0.87	0.88
TOST, ASTM D 943, Hours to 2 NN	5000	4500	3500	2800
FZG Scuffing, D51354, Fail Stage	8	9	10	10
Rust Prevention, ASTM D 665:				
Distilled Water	Pass	Pass	Pass	Pass
Sea Water	Pass	Pass	Pass	Pass
Water Seperability, ASTM D 1401, Min. to 3 ml emulsion @ 54° C	15	15	20	30
Copper Strip Corrosion, ASTM D 130, 3 hrs @ 121° C	1B	1B	1B	1B
Foam Test, ASTM D 892, Seq I Tendency/stability, ml/ml	20/0	50/0	50/0	50/0
Air Release, ASTM D 3427, 50° C, min.	2	3	4	8

Figura 20 Propiedades del aceite

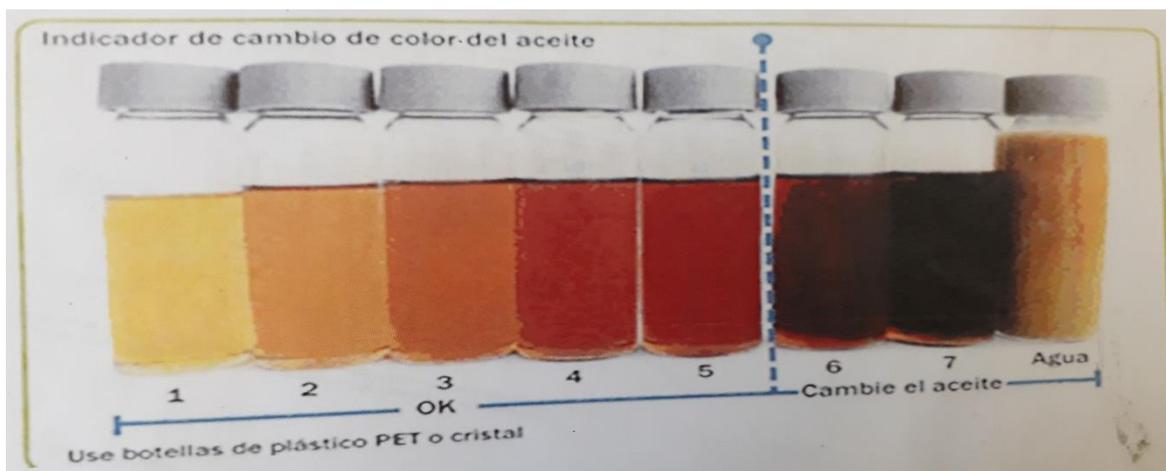


Figura 21 Indicador de cambios de color del aceite

## 7.2 Hoja realizada para las pruebas de campo de aceites lubricantes

CHUMACERA COMBINADA (ACEITE EXTRA HEAVY)	VISCOSIDAD	TIEMPO _____ S (MUESTRA)	TIEMPO _____ S (ACEITE NUEVO)
	SEPARACION AIRE-ACEITE	BURBUJAS, SI ___ NO ___	BURBUJAS, SI ___ NO ___
	SEPARACION AGUA-ACEITE	EMULSION, SI ___ NO ___	EMULSION, SI ___ NO ___
	COLOR	1, 2, 3, 4 5, 6, 7, A	
	OLOR	ACEITE NUEVO	RANCIO ACEITE QUEMADO,
	PARTICULAS SOLIDAS		
	PLANCHA CALIENTE	HUMEDAD SI _____ NO _____	
	SATURACION AGUA-ACEITE	% DE SATURACION _____	% DE SATURACION _____ ACEITE NUEVO
CHUMACERA GUIA GENERADOR (ACEITE HEAVY MEDIUM)	VISCOSIDAD	TIEMPO _____ S (MUESTRA)	TIEMPO _____ S (ACEITE NUEVO)
	SEPARACION AIRE-ACEITE	BURBUJAS, SI ___ NO ___	BURBUJAS, SI ___ NO ___
	SEPARACION AGUA-ACEITE	EMULSION, SI ___ NO ___	EMULSION, SI ___ NO ___
	COLOR	1, 2, 3, 4 5, 6, 7, A	
	OLOR	ACEITE NUEVO	RANCIO ACEITE QUEMADO,
	PARTICULAS SOLIDAS		
	PLANCHA CALIENTE	HUMEDAD SI _____ NO _____	
	SATURACION AGUA-ACEITE	% DE SATURACION _____	% DE SATURACION _____ ACEITE NUEVO
REGULADOR DE VELOCIDAD (ACEITE EXTRA HEAVY)	VISCOSIDAD	TIEMPO _____ S (MUESTRA)	TIEMPO _____ S (ACEITE NUEVO)
	SEPARACION AIRE-ACEITE	BURBUJAS, SI ___ NO ___	BURBUJAS, SI ___ NO ___
	SEPARACION AGUA-ACEITE	EMULSION, SI ___ NO ___	EMULSION, SI ___ NO ___
	COLOR	1, 2, 3, 4 5, 6, 7, A	
	OLOR	ACEITE NUEVO	RANCIO ACEITE QUEMADO,
	PARTICULAS SOLIDAS		
	PLANCHA CALIENTE	HUMEDAD SI _____ NO _____	
	SATURACION AGUA-ACEITE	% DE SATURACION _____	% DE SATURACION _____ ACEITE NUEVO
ESTACION OLEODINAMICO OBRA DE TOMA (MOBIL DTE 25)	VISCOSIDAD	TIEMPO _____ S (MUESTRA)	TIEMPO _____ S (ACEITE NUEVO)
	SEPARACION AIRE-ACEITE	BURBUJAS, SI ___ NO ___	BURBUJAS, SI ___ NO ___
	SEPARACION AGUA-ACEITE	EMULSION, SI ___ NO ___	EMULSION, SI ___ NO ___
	COLOR	1, 2, 3, 4 5, 6, 7, A	
	OLOR	ACEITE NUEVO	RANCIO ACEITE QUEMADO,
	PARTICULAS SOLIDAS		
	PLANCHA CALIENTE	HUMEDAD SI _____ NO _____	
	SATURACION AGUA-ACEITE	% DE SATURACION _____	% DE SATURACION _____ ACEITE NUEVO

OBSERVACIONES: (INDICAR QUE FUE LO MAS RELEVANTE QUE SE ENCONTRO POR EJEMPLO EL ACEITE DE LA CHUM DE CARGA TIENE HUMEDAD, SE REQUIERE CENTRIFUGAR, O TIENE SOLIDOS EN SUSPENSION, HAY QUE FILTRAR, O LA VISCOSIDAD DEL ACEITE TIENE UN VALOR POR DEBAJO DEL ACEITE NUEVO DE UN 20% ES NECESARIO ADITIVAR, ETC.)

Figura 22 Hoja realizada para pruebas a aceites de la unidad

## 8. RESULTADOS ESPERADOS DE LOS ANÁLISIS DE LUBRICANTES.

Normalmente los resultados que se presentan en los análisis de aceites, corresponden a la viscosidad a 40°C. Para aceites de lubricación en turbinas hidráulicas, el contenido mayor de agua en el aceite no debe pasar de 0.10% de la relación del volumen de la muestra. Ni debe tener un contenido mayor de 30 ppm de material ferroso, ni de 15 ppm de silicio. El índice de oxidación no debe pasar de 7. Se muestra una tabla de los parámetros permisibles para aceites lubricantes de turbina ISO VG 32, 46, 68 y 100 según la especificación LAPEM D2100-18.

Los aceites de lubricación para turbinas hidráulicas deben cumplir con las especificaciones de acuerdo al siguiente recuadro:

TABLAS Y GRAFICAS 7.- Especificaciones de aceites

ESPECIFICACIÓN	DTE Medium	DTE Heavy Medium	DTE Heavy
DIN 51515-1	X	X	X
DIN 51517	X	X	X
DIN 51524	X	X	X
GE GEK 46506D			
GE GEK 27070			
GE GEK 28143A	X		

A continuación se muestra una tabla de los valores de las características de aceites lubricantes para turbinas de acuerdo a unos fabricantes:

TABLAS Y GRAFICAS 8.- Características de los aceites lubricantes

TIPO DE ACEITE LUBRICANTE	DTE Medium	DTE Heavy Medium	DTE Heavy
Grado de viscosidad ISO	46	68	100
cSt @ 40°C	44.5	65.1	95.1
cSt @ 100°C	6.9	8.7	10.9
Índice de viscosidad, ASTM D 2270	98	95	92
Punto de congelación, °C, ASTM D 97	-15	-15	-15
Punto de inflamación, °C, ASTM D 92	221	223	237
Densidad @15°C kg/l, ASTM D 4052	0.86	0.87	0.88
TOST, ASTM D 943, Hours to 2 NN	4500	3500	2800
FZG Scuffing, D5182, Etapa de fallo	9	10	10
Agua destilada	Pasa	Pasa	Pasa
Agua de mar	Pasa	Pasa	Pasa
Separación del agua, ASTM D 1401, Min. a 3 ml emulsión @	20	20	30
Corrosión al cobre, ASTM D 130, 3 hrs @ 121°C	1B	1B	1B
Ensayo de espuma, ASTM D 892, Seq I	50/0	50/0	50/0
Desaeración, ASTM D 3427, 50°C, min...	3	4	8

## 9. TRANSDUCTORES DE VIBRACIÓN

El transductor es el elemento que transforma la vibración mecánica en una señal eléctrica analógica, para ser procesada, medida y analizada. Todos los transductores deben ser precisos a la hora de tomar las lecturas de amplitud, ofreciendo repetitividad (dos señales de la misma amplitud tendrán que generar en el transductor la misma salida de tensión).

Los transductores también deben ser muy precisos en la información de frecuencias de la señal mecánica. Esto es fundamental pues, en muchos defectos mecánicos, la relación entre sus frecuencias y la frecuencia del eje de giro que se toma como referencia, proporciona al analista la información precisa para determinar la naturaleza del defecto mecánico que genera la vibración.

Los transductores de vibración se clasifican con base en sus características propias, como son su principio de operación o requisitos de alimentación en transductores de:

- Fenómeno piezoeléctrico
- Movimiento de un conductor perpendicular a un campo magnético
- Corrientes de eddy oscilatorias
- Fenómenos ópticos

Existen tres tipos principales de transductores para vibración:

- De desplazamiento relativo ( de 0 a 1000 Hz)
- Sísmicos de velocidad ( de 20 a 2000 Hz)
- Piezoeléctricos de aceleración o velocidad (de 1 a 20000 Hz)\*.

\* Depende la frecuencia natural

a) Transductor de desplazamiento

Los sensores de desplazamiento relativo (o sensores de proximidad) del tipo de corrientes de eddy, se desarrollaron para su uso comercial en los años 50. Actualmente existen varios fabricantes de sensores de proximidad. El sensor es un sistema que consta de 3 partes:

1. Sonda o probeta (Eddy Probe)
2. Cable de extensión
3. Oscilador demodulador (también conocido como Proximito<sup>®</sup>)



Figura 23 Sensor de desplazamiento su proximito

El funcionamiento del sensor de proximidad está basado en la generación de corrientes de remolino (eddy currents) sobre una superficie metálica cercana a la punta de la sonda. La

generación de corrientes se realiza gracias a la radiación de un campo de radiofrecuencia por una bobina espiral localizada en la punta de la sonda y protegida por una delgada capa de plástico o fibra de vidrio (10 milésimas de pulgada) La frecuencia de dicho campo es alrededor de 2 M Hz a 200 kHz, dependiendo del fabricante.

Parte del circuito oscilador está ubicado en la caja que contiene los circuitos electrónicos (oscilador-demodulador o proximitor), y tanto la bobina de la sonda como el cable de extensión, constituyen la parte inductiva-capacitiva.

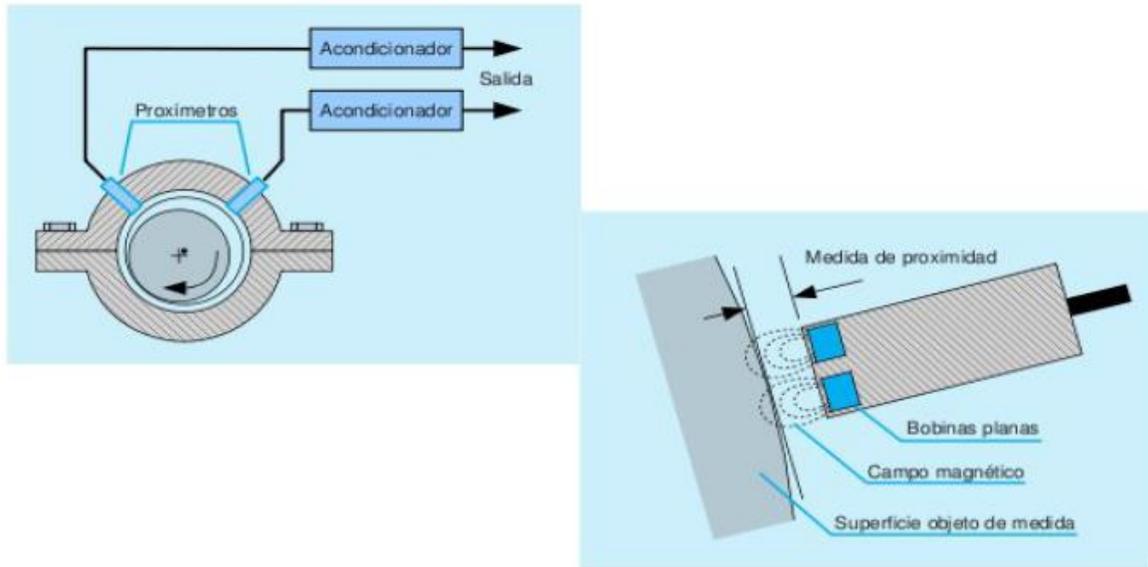
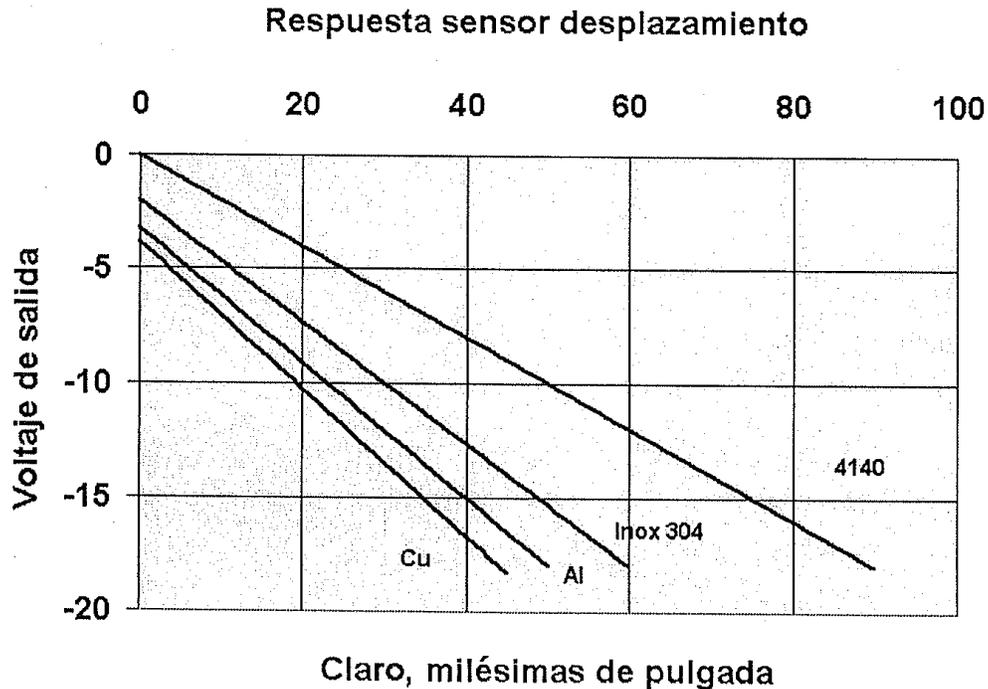


Figura 24 Ubicación de sensores de desplazamiento

El voltaje de alimentación estándar de los osciladores-demoduladores es de -24 V. Puesto que el sistema no cuenta con convertidores de CD a CD, el voltaje de salida es negativo y depende del material de la superficie "observada". Los sistemas están calibrados en fábrica para superficies de acero tipo 4140 a menos de solicitar otra calibración.

La gráfica de abajo muestra varios rangos lineales de salida de acuerdo al material observado. Para el acero 4140, la sensibilidad estándar o pendiente de la recta es de 200 mV por milésima de pulgada.



El claro (o "gap") de instalación recomendado por los fabricantes es de 40 a 50 milésimas de pulgada (-8 a -10 Volts) y el ajuste puede realizarse por medio un voltímetro.

El voltaje de salida depende del claro, por lo que un sensor de proximidad puede emplearse para medir claros estáticos o la combinación de un claro estático más otro variable, como sería el caso de la posición de una flecha dentro de un cojinete más la variación de dicha posición debida a vibración.

Debido a que en la mayoría de las aplicaciones las amplitudes de vibración son pequeñas en comparación al claro, la componente de voltaje constante (generada por el claro constante) se bloquea mediante un filtro pasa altos, normalmente constituido por un capacitor y una resistencia. El rango de utilización es de 0 a 1000 Hz.

No es necesario instalar sensores sísmicos en donde la vibración de las cubiertas sea mucho menor que la vibración relativa (1 a 5 o menos) Este caso se da en cojinetes de turbinas montados sobre pedestales rígidos y en donde el peso de la carcasa es mucho mayor que el peso del rotor (turbinas de vapor). Un ejemplo en donde sí es aplicable, es en turbinas de gas, en donde el peso de la carcasa es similar al del rotor y los soportes de los cojinetes son relativamente flexibles.

Otra aplicación común de los sensores de proximidad es observar una zona de una flecha en donde exista un cuñero. Esto tiene el efecto de generar un pico negativo mucho mayor que la vibración superficial de la flecha y sirve para alimentar tacómetros de sincronía y circuitos de medición de fase.

Es común instalar un par de sondas en los cojinetes para obtener la vibración vertical y horizontal de la flecha y así obtener las órbitas del desplazamiento de su centro en el interior del cojinete. Puesto que la mayoría de los cojinetes tienen cajas bipartidas horizontalmente, se ha adoptado colocar las sondas a 45° de la vertical.

La convención empleada para designar las sondas cuando están montadas a 45° de la vertical es la siguiente:

“La sonda HORIZONTAL será aquella que se ubique 90° a la derecha de la sonda VERTICAL cuando observemos la máquina desde el lado carga o acoplamiento sin importar el sentido de giro de la máquina.”

### 9.1 Transductores de velocidad tipo electromecánico

Sensores de velocidad de tipo electromecánico fueron los primeros dispositivos que se emplearon para el registro de vibraciones. Constan de una bobina suspendida por resortes que se mueve dentro de un campo magnético generado por un imán permanente. La velocidad relativa de la bobina con respecto al campo genera un voltaje de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V = - v l B$$

En donde:

$v$  = es la velocidad con que se mueve la bobina con respecto al campo magnético (m/s)

$l$  = longitud de alambre de la bobina dentro del campo (m)

$B$  = densidad de flujo (Teslas o Wb / m<sup>2</sup>)

La bobina está suspendida por dos resortes planos mientras que el imán permanente está representado por el cilindro central.

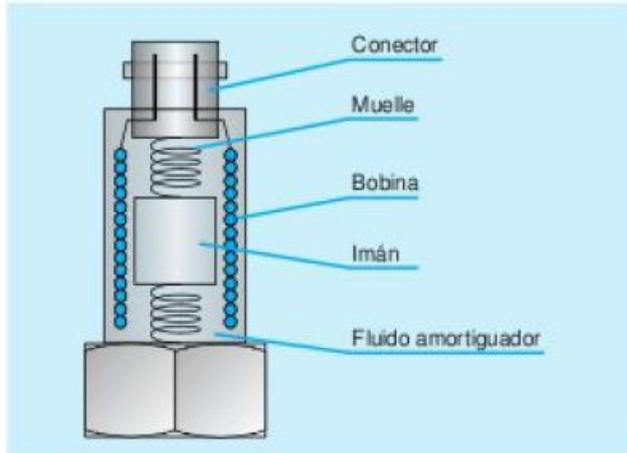


Figura 25 Sensor de velocidad tipo electromecánico

Para que exista velocidad relativa entre la bobina y el imán, el sensor debe operar por arriba de su frecuencia natural. Algunos sensores de velocidad están llenos con aceite para proporcionar la relación de amortiguamiento deseada. Otros sensores se basan en el amortiguamiento por corrientes de remolino (eddy currents) y emplean un carrete de aluminio para soportar la bobina que a la vez sirve para conducir dichas corrientes.

La frecuencia natural de los sensores de velocidad electromecánicos normalmente está ubicada entre 5 y 10 Hz (300 a 600 CPM) por lo tanto, la salida será errónea para valores de frecuencia inferiores a 4 o 5 veces la frecuencia natural del sensor.

El rango de frecuencias confiable en los que se puede emplear un sensor de velocidad electromecánico es de aproximadamente 20 a 2000 Hz (1200 a 120,000 CPM). El límite superior es debido a las resonancias de los resortes de suspensión de la bobina, las cuales distorsionan la señal de salida. La sensibilidad típica de los sensores de velocidad es de 500 mV / ips.

## 9.2 Sensores de aceleración y velómetros piezoeléctricos.

Los acelerómetros (y velómetros) del tipo piezoeléctrico están constituidos por una base con un poste central que sirve para sostener dos o varios discos de un cristal piezoeléctrico como el cuarzo o una cerámica como el titanato de bario o circonato de plomo. Sobre los elementos piezoeléctricos se monta una masa anular. El conjunto se sujeta mediante una tuerca y una rondana tipo resorte.

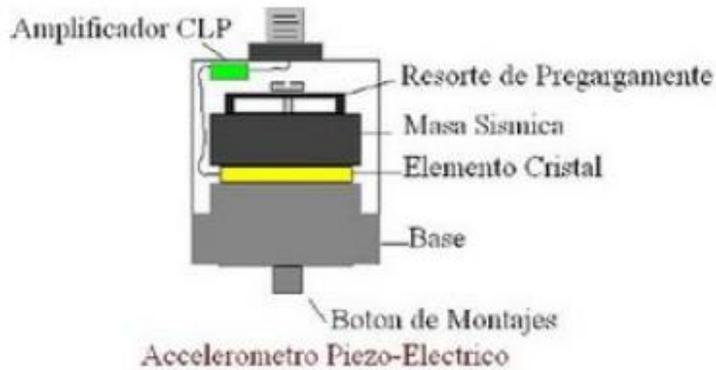


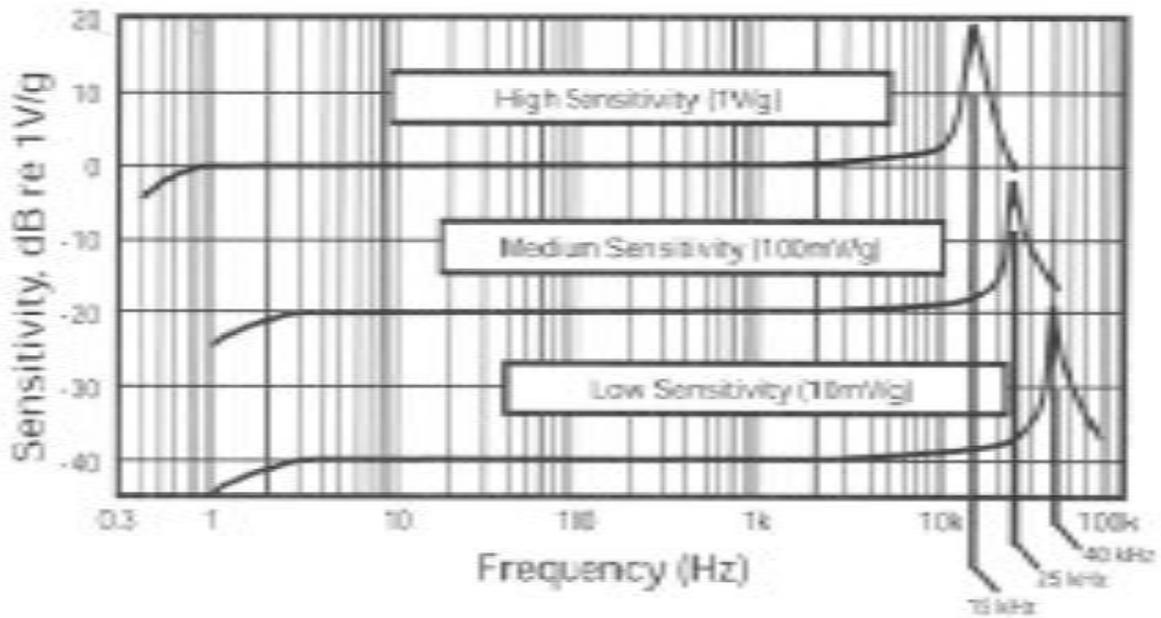
Figura 26 .- Muestra el arreglo de un acelerómetro típico.

Los acelerómetros tienen frecuencias naturales ubicadas entre 20,000 a 100,000 Hz, siendo un valor típico 25,000 Hz.

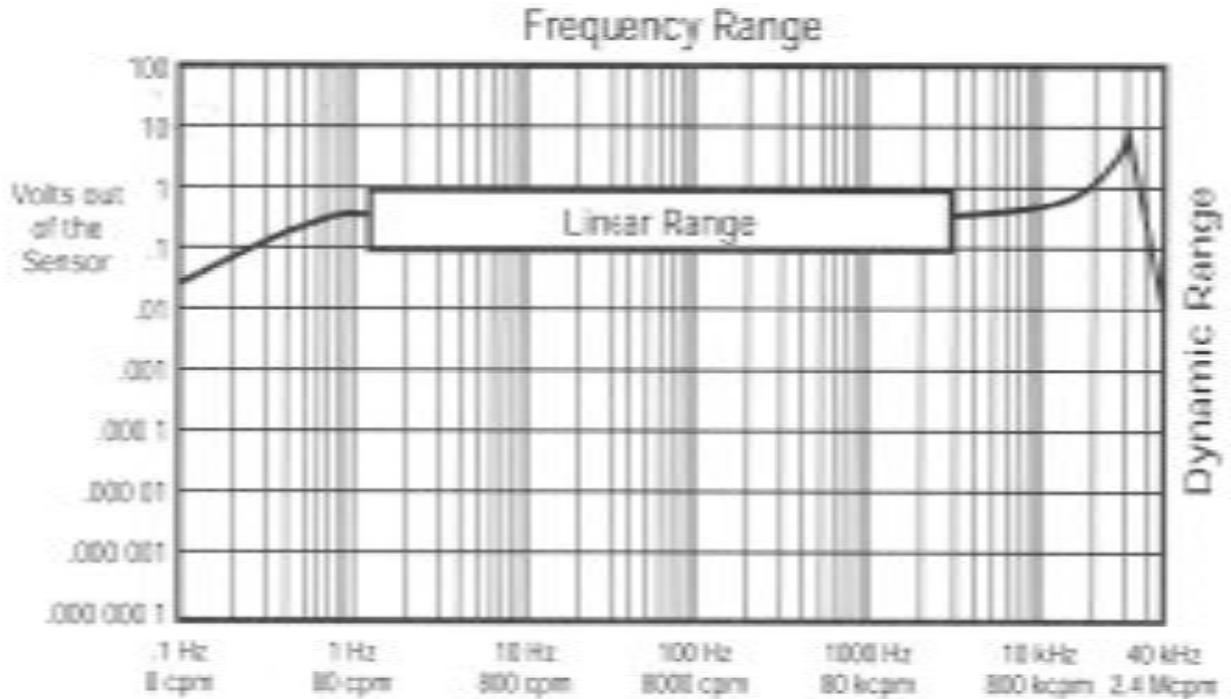
De acuerdo con la figura observamos que para bajas relaciones de frecuencias, el desplazamiento de la masa es prácticamente igual al de la base y por lo tanto, la aceleración de la masa será la aceleración a la que somete la base del sensor. El voltaje generado por el material piezoeléctrico depende de la fuerza con que se presiona y por lo tanto será proporcional a la aceleración de la masa.

Para bajas relaciones de amortiguamiento, la relación de aceleraciones es prácticamente igual a 1 hasta frecuencias de un quinto o un cuarto de la frecuencia natural del sensor. Si un sensor tiene una frecuencia natural de 25,000 Hz, el rango lineal será de 5000 o 6250 Hz como se ilustra en la figura 20. Por arriba de esta frecuencia, el voltaje de salida comenzará a incrementarse en forma notoria.

TABLAS Y GRAFICAS 10.- Ubicación de frecuencias naturales de sensores piezoeléctricos



TABLAS Y GRAFICAS 11.- Respuesta de voltaje de un sensor piezoeléctrico



Las sensibilidades típicas son: 10 mV / g, 100 mV / g y para los acelerómetros diseñados para alta sensibilidad a bajas frecuencias (acelerómetros para medir sismos) 500 a 1000 mV / g.

El rango de utilización típico de un acelerómetro es de 2 Hz a 10 000 Hz pero este rango depende de la frecuencia natural del acelerómetro y el método de montaje como se muestra:

Rangos de Frecuencia aproximados de un sensor Piezoelectricos de 100 mV/g's	
Forma de montaje	Frecuencia Máxima
Sujecion manual	500 Hz
Base magnetica	2000 Hz
Adhesivo	2500 Hz a 4000 Hz
Atornillado	6000 Hz a 10000 Hz
Super iman	7000 Hz a 10000 Hz

Puesto que el voltaje generado por el material piezoeléctrico es de alta impedancia, los acelerómetros modernos cuentan con preamplificadores integrados que permiten emplear cables relativamente largos sin "cargar" la señal. Para emplear únicamente dos hilos

conductores, se emplean limitadores de corriente de 2 a 4 mA. Por esta razón, los acelerómetros no pueden conectarse a una fuente de voltaje en forma directa. Los colectores de datos actuales y analizadores normalmente cuentan con fuentes tipo ICP que permiten la alimentación segura de acelerómetros estándar.

## 10. NORMAS DE VIBRACION

Con el fin de establecer criterios nacionales e internacionales de aceptación y operación de maquina rotatoria, varias organizaciones han publicado normas relacionadas con la calidad de balanceo y severidad de vibración de la misma. Como ejemplo las normas ISO, ANSI, NEMA, AGMA, API, NOM. Las principales normas empleadas en México son la NOM y las ISO.

### NORMAS ISO

Para la evaluación de la severidad de vibración de maquinaria, es común emplear las siguientes normas:

- ISO 10816 “Vibración mecánica. Evaluación de la vibración de maquinaria mediante mediciones en partes no rotatorias (esta norma sustituye a la ISO 2372 e ISO 3945)
- ISO 7919 “Vibración Mecánica. Evaluación de la vibración de maquina mediante mediciones en partes móviles”.
- ISO 1940-1987 “Calidad de balanceo para cuerpos rígidos en rotación.
- Grafica de Blake “ Evaluación de vibración en desplazamiento, velocidad y aceleración”
- Grafica de Rathbone “ Evaluación de vibración sobre eje”

### ISO 10816 1998

La norma ISO 10816 evalúa la condición dinámica de cualquier equipo rotativo midiendo sobre partes fijas (cubierta de chumaceras), dentro de esta norma existe clasificación de equipos dependiendo de su capacidad. En la tabla 2 se muestra de manera general los límites de tolerancia para esta norma

Tabla 1.- ISO 10816				
63.6	INACEPTABLE			2.503134
36.8				1.5584484
25.5	NO SATISFACTORIO			1.0026678
15.8				0.6236622
10	ACEPTABLE (SATISFACTORIO)			0.395976
6.36				0.2503134
3.96	BUENO			0.155562
2.55				0.1004082
1.58				0.0622248
0.17				0.0395976
0.64				0.0254556
0.4				0.0155562
	CLASE 1	CLASE 2	CLASE 3	CLASE 4
Clase 1: Maquinas pequeñas motores electricos de produccion hasta 15kW				
Clase 2: Maquinas medianas motores electricos de produccion de 15kW hasta 75 kW				
Clase 3: Maquinas grandes de fundicion pesada y soporte rigido				
Clase 4: Maquinas grandes y turbogeneradores arriba de 10 MW				

## 11. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DIAGNÓSTICO

La razón principal para analizar y diagnosticar el estado de una maquina es determinar las medidas necesarias para corregir la condición dinámica, es decir, reducir el nivel de las fuerzas vibratorias no deseadas y no necesarias. De manera que, al estudiar los datos, el interés principal deberá ser la identificación de las amplitudes predominantes de la vibración, la determinación de las causas, y la corrección del problema que ellas representan.

A continuación se muestran las diferentes causas de vibración y sus consecuencias, lo cual nos ayudara enormemente para interpretar los datos obtenidos, determinar el tipo de vibración que se presenta y buscar así la corrección de las mismas.

### 11.1 Vibración debida a desbalance

El desbalance es una de las causas más comunes de la vibración en maquinas industriales, en muchos casos, los indicativos para un desbalance son:

1. La frecuencia de vibración se manifiesta a 1X las rpm del equipo desbalanceado, las armónicas son bajas.

2. La amplitud es proporcional a la cantidad de desbalance.

3- La amplitud de la vibración es normalmente mayor en el sentido de medición radial que el axial.\*

4. La amplitud de la vibración es mayor en sentido horizontal que vertical (equipos horizontales).

5. El análisis de fase indica lecturas de fase estables.

6. La fase se desplazará  $90^\circ$  si se desplaza el captador  $90^\circ$ .

\*Nota (excepción): el desbalance de un rotor saliente a menudo tiene como resultado una gran amplitud de la vibración en sentido axial, al mismo tiempo que en sentido radial.

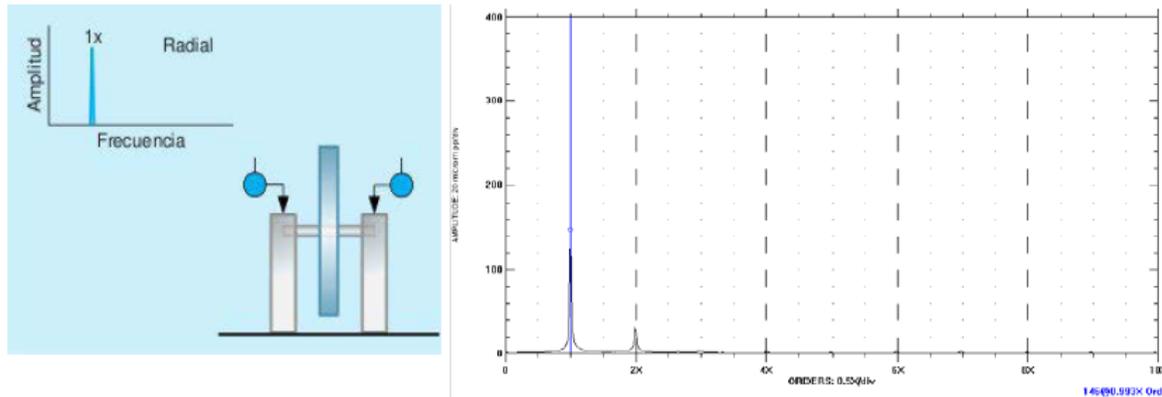


Figura 27 Espectro típico de desbalance

## 11.2 Vibración debida a desalineamiento

En la mayoría de los casos los datos derivados de una condición de falta de alineamiento indican lo siguiente:

1. La frecuencia de vibración es de 1X de la rpm en dirección axial; también 2X y 3X de las rpm en los casos de una grave falta de alineamiento.

2. La amplitud de la vibración es proporcional a la falta de alineamiento.

3. La amplitud de la vibración puede ser alta también en sentido radial, además de axial.

4. El análisis de fase muestra lecturas de fase inestables.

La falta de alineamiento, aun con acoplamientos flexibles, produce fuerzas tanto radiales como axiales que, a su vez, producen vibraciones radiales y axiales.

Nota: Uno de los indicios más importantes de problemas debidos a falta de alineamiento y a ejes torcidos es la presencia de una elevada vibración en ambos sentidos, radial y axial.

En general, cada vez que la amplitud de la vibración axial sea mayor que la mitad de la lectura radial más alta, hay un buen motivo de sospechar la existencia de un problema de alineamiento o eje torcido.

Los tres tipos básicos de falta de alineamiento en el acoplamiento son: angular, en paralelo y una combinación de ambos.

Una falta de alineamiento angular sujeta principalmente los ejes de las maquinas accionadoras y accionada a vibración axial igual a la velocidad de rotación (rpm) del eje.

La falta de alineamiento en paralelo produce principalmente vibración radial con una frecuencia igual al doble de la velocidad de rotación del eje y normalmente mayor la componente vertical que la horizontal.

### 11.3 Vibración debida a excentricidad

La excentricidad es otra de las causas comunes de vibración en la maquinaria rotativa.

Excentricidad en este caso no significa “ovalización”, sino que la línea central del eje no es la misma que la línea central del rotor – el centro de rotación verdadero difiere de la línea central geométrica.

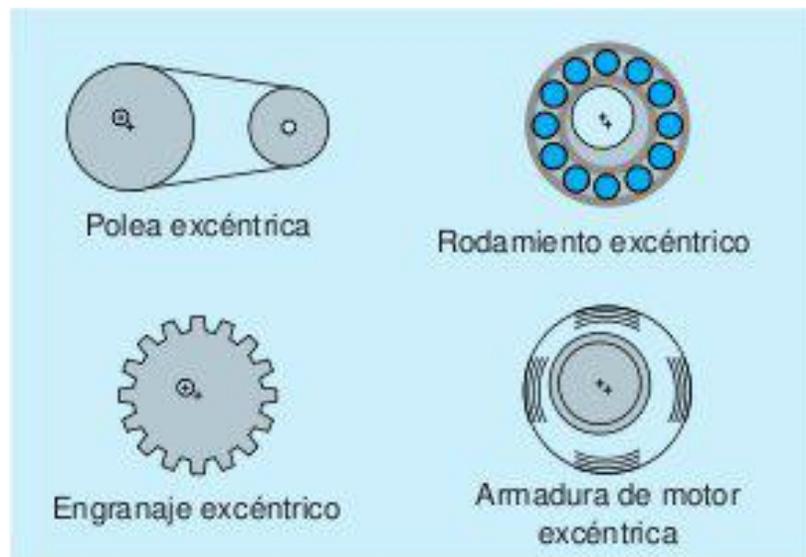


Figura 28 Comportamientos de excentricidad.

### 11.4 Vibración debida a fallas eléctricas

Este tipo de vibración es normalmente el resultado de fuerzas magnéticas desiguales que actúan sobre el rotor o sobre el estator. Dichas fuerzas desiguales son debidas a:

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

En líneas generales, la frecuencia de vibración resultante de los problemas de índole eléctrica será  $1x$  las rpm, y por tanto se parecerá a desbalance. Una manera sencilla de hacer la prueba para verificar la presencia eventual de vibración eléctrica es observar el cambio de la amplitud de la vibración total (filtro fuera) en el instante en el cual se desconecta la corriente de esa unidad. Si la vibración desaparece en el mismo instante en que se desconecta la corriente, el problema con toda posibilidad será eléctrico. Si solo decrece gradualmente, el problema será de naturaleza mecánica.

Las vibraciones ocasionadas por los problemas eléctricos responden generalmente a la cantidad de carga colocada en el motor. En la figura 36 se observa que a medida que se modifica la carga, la amplitud y/o las lecturas de fase indican cambios significativos. Esto explica por qué los motores eléctricos que han sido probados y balanceados en condiciones sin carga muestran cambios drásticos de los niveles de vibración cuando vuelven a ser puestos en servicio.

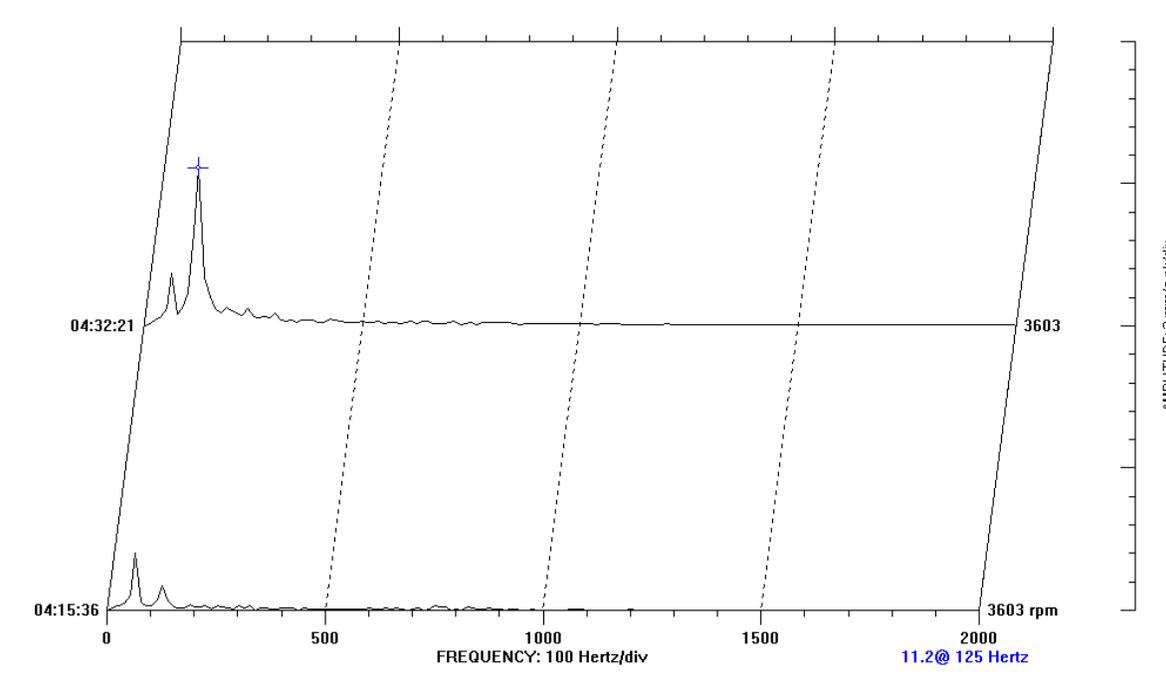


Figura 29 Vibración ocasionada por un fenómeno eléctrico

## 12. PROBLEMAS EN CHUMACERAS

Elevados niveles de vibración, ocasionados por rodamientos de chumacera defectuosos, son generalmente el resultado de una holgura excesiva (causada por desgaste debido a una acción de barrido o por erosión química), aflojamientos mecánicos (metal blanco suelto en el alojamiento), o problemas de lubricación.

### 12.1 Holgura excesiva de los rodamientos

Un rodamiento de chumacera con holgura excesiva hace que un defecto de relativamente menor importancia, tal como un leve desbalance o una pequeña falta de alineamiento, u otra fuente de fuerzas vibratorias, se transformen en vibraciones excesivas como resultado de aflojamientos mecánicos o en golpes repetidos (Machacado).

A menudo se puede detectar un rodamiento de chumacera desgastado por “barrido” efectuando una comparación de las amplitudes de vibración horizontal y vertical. Las maquinas que están montadas firmemente sobre una estructura o cimentación rígidas revelaran, en condiciones normales, una amplitud de vibración ligeramente más alta en sentido horizontal.

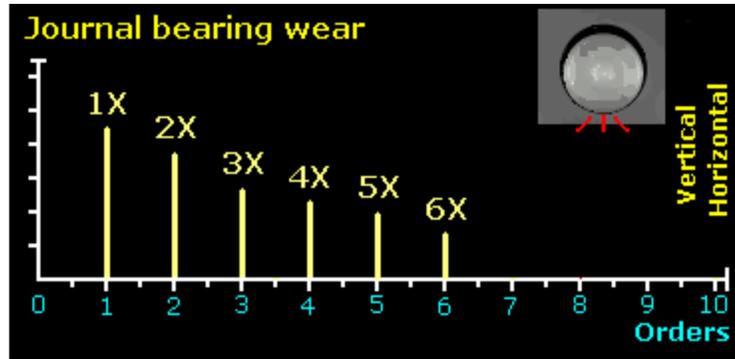


Figura 30 Orden de Holguras

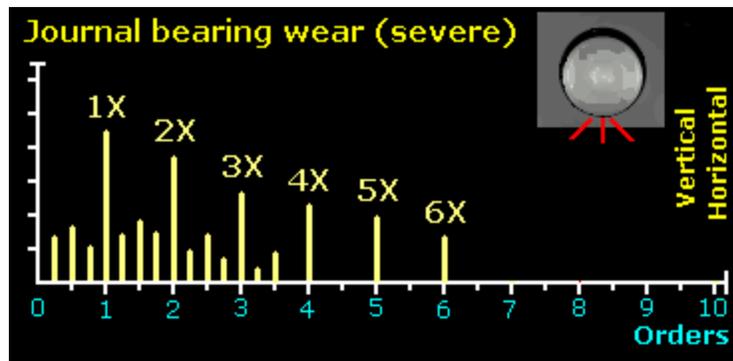


Figura 31 Holguras severas

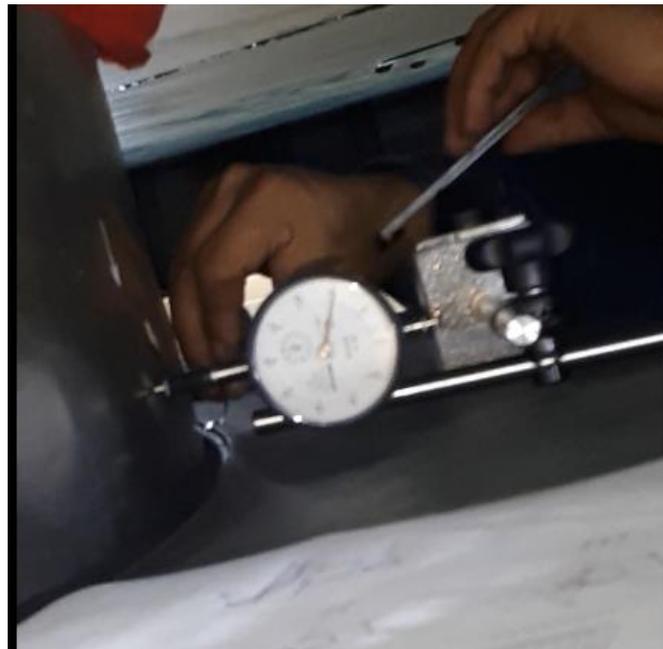


Figura 32 Toma de Holguras U.2 (indicadores de caratula y lainometros)

## 12.2 Torbellino de aceite

Este tipo de vibración ocurre solamente en máquinas equipadas con rodamientos de chumacera lubricados a presión, y que funcionan a velocidades relativamente altas normalmente por encima de las velocidades críticas del motor.

La vibración debida a torbellinos de aceite a menudo es muy pronunciada, pero se reconoce fácilmente por su frecuencia fuera de lo común. Dicha frecuencia es apenas menor de la mitad de la velocidad de rotación del eje – generalmente en el orden del 46 al 48% de las rpm del mismo.

El problema de los torbellinos de aceite normalmente se atribuye a diseño incorrecto del rodamiento, desgaste excesivo del rodamiento, un aumento de la presión del lubricante o un cambio de la viscosidad del aceite.

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

## 12.3 Torbellinos de Histéresis (Resonancia inducida por las chumaceras)

Este tipo de vibración es similar a la vibración ocasionada por el torbellino de aceite, pero ocurre a frecuencias diferentes, cuando el rotor gira entre la primera y la segunda velocidad crítica.

Un rotor que funcione por encima de la velocidad crítica tiende a flexionarse, o arquearse, en sentido opuesto del punto pesado de desbalance. La amortiguación interna debida a histéresis, o sea la amortiguación de fricción, normalmente limita la deflexión a niveles aceptables. Sin embargo, cuando acontece un torbellino por histéresis, las fuerzas amortiguadoras se encuentran en realidad en fase con la deflexión, y por lo tanto, aumentan la deflexión del rotor.

Cuando dicho rotor está funcionando por encima de la primera velocidad critica pero por debajo de la segunda, el torbellino por histéresis ocurre a una frecuencia exactamente igual a la primera velocidad crítica del rotor.

Nota: La frecuencia de formación del torbellino de aceite es levemente menor de la mitad de la velocidad de rotación del rotor.

La vibración ocasionada por un torbellino por histéresis tendrá las mismas características que las ocasionadas por un torbellino de aceite cuando la maquina funcione a velocidades superiores a la segunda velocidad crítica del eje. Es decir, que una severa vibración se producirá a una frecuencia levemente menor que  $0.5x$  las rpm del rotor.

El torbellino por histéresis es controlado normalmente por la acción de amortiguación provista por los rodamientos de chumacera en si. Sin embargo, cuando la amortiguación estacionaria es baja en comparación con la amortiguación interna del rotor, es probable que se presenten problemas. La solución usual para este problema es aumentar la amortiguación estacionaria de los rodamientos y de la estructura de soporte de los mismos, lo que puede lograrse instalando un rodamiento de riñón basculante o de algún rodamiento de diseño especial.

En algunos casos el problema puede ser solucionado reduciendo la amortiguación dada por el rotor – sencillamente, cambiando un acoplamiento de engranajes con una versión sin fricción; por ejemplo, con un acoplamiento de disco flexible.

#### **12.4 Falta de carga en la chumacera**

Ocurre normalmente a frecuencias subsíncronas cercanas a  $1/3$  de la velocidad de giro de la máquina y se debe al rompimiento de la cuña de aceite y al efecto de “chumacera flotante”.

#### **12.5 Lubricación Inadecuada (frecuencias de rozamiento)**

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

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



Figura 33 Lubricación de los segmentos de la chumacera

### 13. ACTIVIDADES REALIZADAS (vibraciones mecánicas).

Durante la estadía en la central hidroeléctrica se tenía prevista la revisión de la chumacera de carga para observar los segmentos de la chumacera lo cual se realizó de la siguiente manera.

Se retirada la tubería de extracción de vapores y de inyección de aceite, se procede a aflojar la tornillería de la tapa inferior del depósito de chumacera y posteriormente a separar las piezas bipartidas de dicho depósito, esto se lleva a cabo insertando 4 tornillos en guías existentes sobre el perímetro del depósito.



Figura 34 Tornillos utilizados para separar las partes del depósito de aceite.

Para poder bajar la tapa inferior es necesario ubicar 8 espárragos de medida M20x2.5 con longitud de 50cm y grado 8.8.



Figura 35 Espárragos utilizados para bajar la tapa inferior del depósito de aceite.



Figura 36 Tapa inferior del depósito de aceite completamente abajo

Después de las pruebas realizadas en los segmentos de chumacera la revisión se prosigue a montar la cuba y el depósito. Cuidando los roces con la flecha.



Figura 37 Montaje de la cuba y depósito de la chumacera de carga

Se realizaron las medidas de las holguras de la flecha con la cuba que va desde los .10 a .15mm y para poder central de mejor manera la flecha se realizó con indicadores de caratula y lainometros.

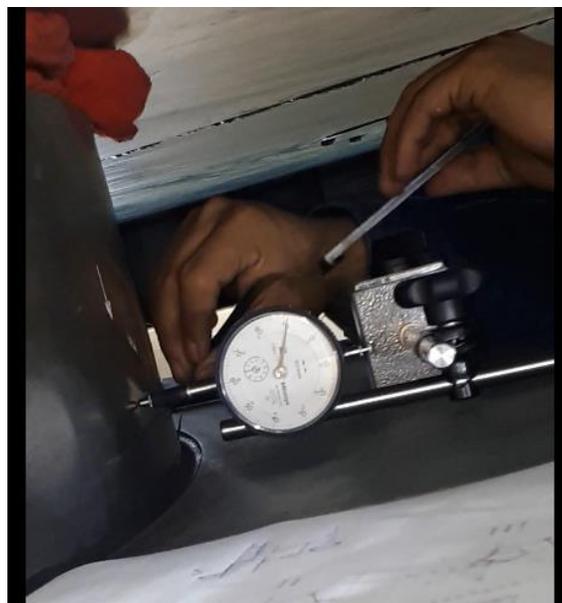


Figura 38 Toma de medidas con lainometros e indicadores de caratula.

Posterior mente al montaje de la cuba y central la flecha para evitar los rozamientos entre ambas y así no provocar vibraciones y desajuste en la unidad se pasó a realizar las pruebas de vibraciones a los puntos establecidos, como son:

1. En piso de generador tomar lectura de 6 sensores tipo triaxiales, con etiqueta azul, café y blanca, para corroborar que las lecturas fueran las satisfactorias.

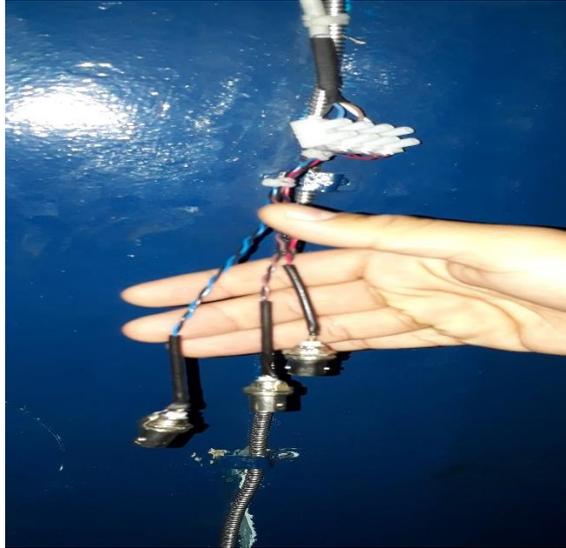


Figura 39 conector de sensores triaxiales

2. En la chumacera de carga y guía se toma la lectura de vibraciones en 4 puntos que son aguas arriba, aguas abajo, margen izquierda y margen derecha.



Figura 40 chumacera guía.



Figura 41 Chumacera de carga

3. En los puntos establecidos de las terminales de los sensores de desplazamiento.

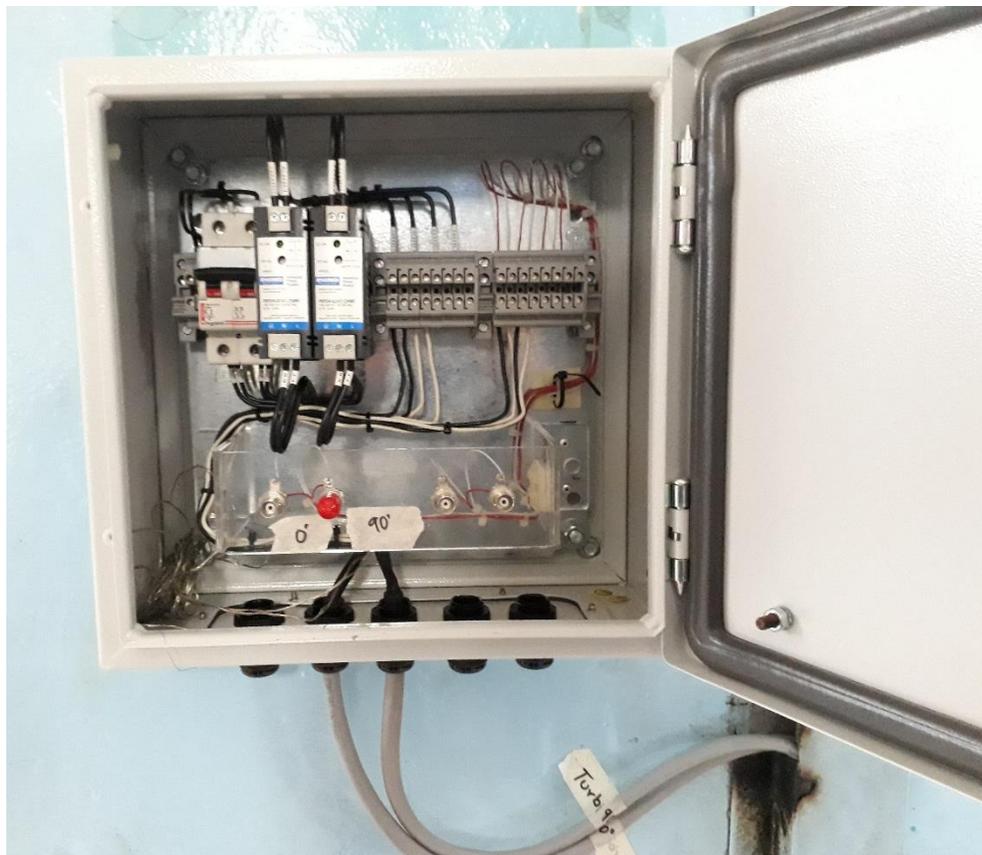


Figura 42 Terminales de los sensores de desplazamiento

Con un resultado satisfactorio en la prueba del rodado de la flecha y la lectura de las vibraciones dada después del montaje de la cuba y revisión de los segmentos de la

chumacera de carga, el departamento eléctrico se incorporó al mantenimiento de los sensores de vibración y la colocación de nuevos sensores triaxiales.

Con el fin de cubrir cualquier indicio de falla por vibraciones, así alargar la vida útil de la unidad y prevenir los mantenimientos por falla.

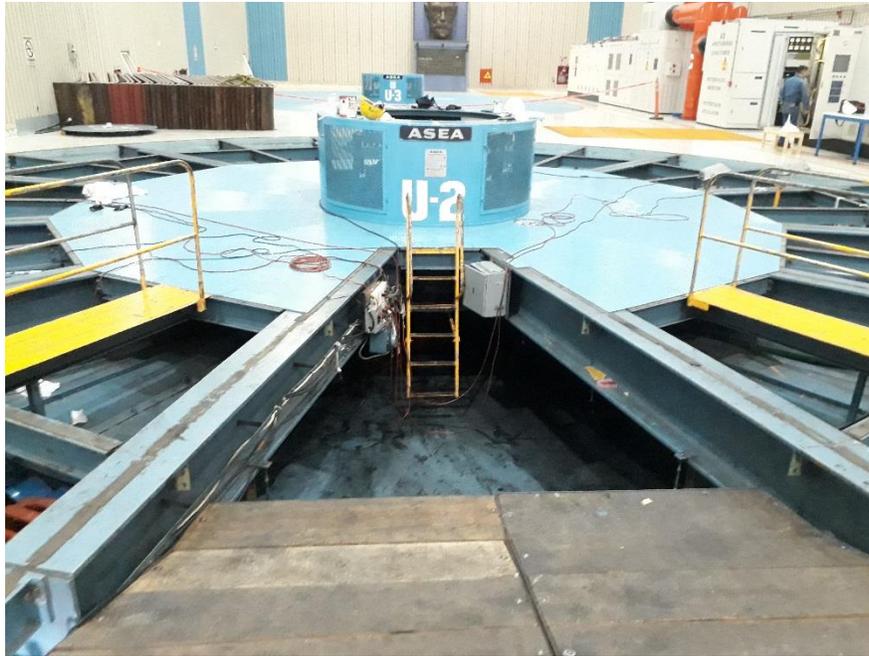


Figura 43 Mantenimiento e incorporación de sensores triaxiales de vibración

Otra de las actividades que se realizaron en la C.H. Belisario Domínguez, consistió en la realización de un diagrama de aceite de Obra de Toma, que se realizó en el programa Automation Studio.

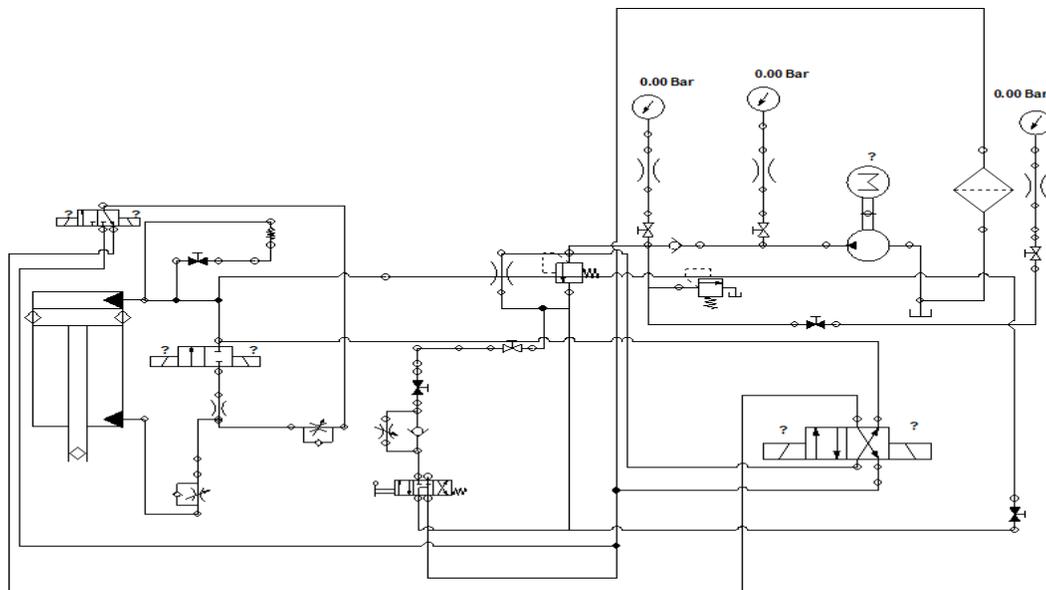


Figura 44 Diagrama obra de toma

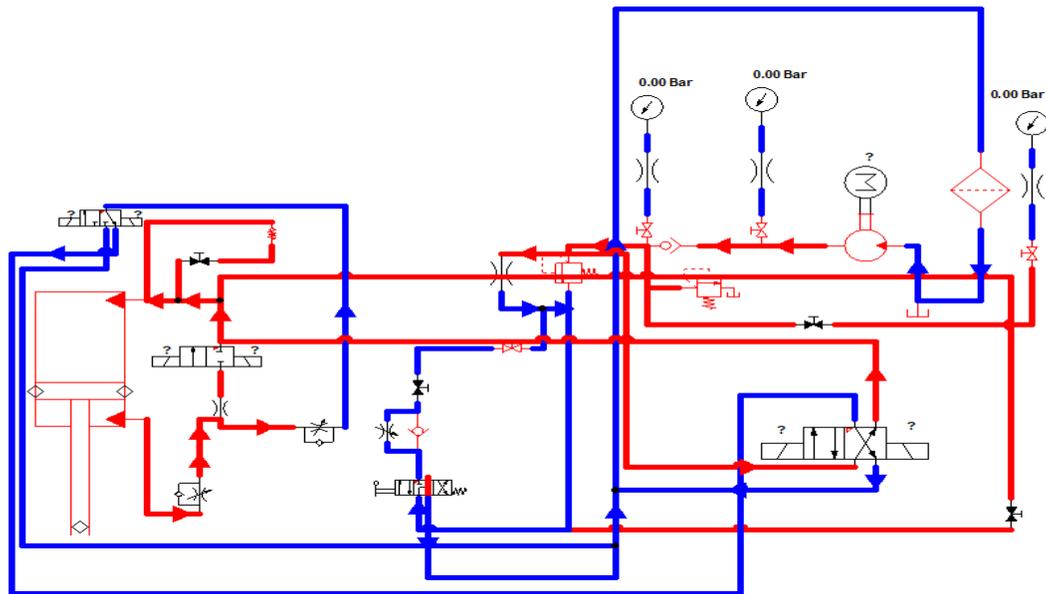


Figura 45 Diagrama obra de toma (automation)

En CFE la subgerencia realizo la compra de un equipo nuevo para la medición de vibraciones de la marca EMERSON en el cual se impartió un curso de la manera adecuada de medir las vibraciones con el nuevo equipo, así mismo estudiar cuales son los puntos más importantes a medir dentro de las maquinas principales , como en los sistemas auxiliares.

Como punto número uno los nuevos sensores triaxiales tiene 3 canales denominados canal (A, B, C). El sistema también cuenta con un tacómetro que se configura en no invertido, para que los datos dados sean en positivo, se coloca a máximo 3 metros de distancia de donde se requiera medir las vibraciones.

A los sensores se les mete un voltaje en negativo para no afectar la señal de las vibraciones tomadas, este voltaje puede variar de los -12v a -24v.

Configurando la base de datos en el programa realizado se configura y se homologa como se tomaran las medidas en los diferentes puntos y sistemas, ya sea el sistema principal o los auxiliares.

Para los sistemas principales, el sensor en plano el canal B tiene que quedar viendo hacia el que está tomando las lecturas y en vertical el canal B queda de manera vertical.

Los canales para los equipos principales quedan agrupados como:

Canal A = Axial Canal B= Vertical Canal C= Horizontal.

Los canales para los equipos Auxiliares quedan agrupados como:

Canal A = Horizontal Canal B = Axial Canal C = Vertical.



Figura 46 Medición de vibración a equipo principal



Figura 47 Toma de vibración equipo Auxiliar

## 14.- CONCLUSIONES DEL PROYECTO

Conforme a las actividades realizadas dentro de la central hidroeléctrica como residente, desarrolle habilidades y tuvo la necesidad de profundizar en temas como aceites lubricantes y toma de mediciones de las vibraciones mecánicas, tipos de sensores, composición y localizar los puntos más factibles para la toma de las vibraciones en la unidad.

La participación y convivencia diaria con el personal que labora en la C.H. Belisario Domínguez. Es una buena oportunidad para entender como es el ambiente laboral en la industria y las lecciones que se pueden llegar a aprender en este ámbito son infinitas, así como también para familiarizarse con herramientas, maquinaria y equipos.

Cabe constatar que el mantenimiento RCM basado en la confiabilidad de las maquinas son muy recomendables ya que nos proporciona confiabilidad, eficiencia y bajos costos de mantenimiento. Como también poder disminuir y prever mantenimientos en la central provocados por falla y así poder aminorar costos de mantenimiento, al igual que poder realizar los mismos en tiempo y forma, como poder planificar el periodo del mantenimiento de cada unidad y los pasos a realizar.

Las pruebas de aceites lubricantes y de vibraciones se irán incorporando poco a poco dentro del mantenimiento rutinario de la central con el fin de detectar con anticipación una falla menor en la unidad, como puede ser un balero o algún dispositivo mal lubricado, con la oportunidad de poder detectarlo con anticipación antes que un mantenimiento de costo menor se convierta en uno de mayor inversión. Y el cual ponga en riesgo la unidad hidráulica.

Dentro del proyecto vienen expresadas las maneras de cómo se deben realizar el mantenimiento de los aceites lubricantes y la importancia de tomar mediciones rutinarias de las vibraciones mecánicas para así poder mantener la unidad bajo un margen mínimo de error.

## 15. RECOMENDACIONES

1. Una de las recomendaciones que se puede dar y no debe omitirse, es la aplicación del programa de mantenimiento, que deben llevarse a cabo en las fechas programadas.
2. Llevar acabo el chequeo necesario de cada uno de los aceites utilizados para la lubricación de la unidad.

3. Checar frecuentemente las mediciones de vibraciones mecánicas de la unidad para estar seguros de que no hay una variación en las oscilaciones de la máquina.
4. No aislarse, ni pretender resolver todos los problemas de mantenimiento con el RCM, recordar que existen otras herramientas que pueden complementar los resultados del RCM y ayudar a optimizar la fiabilidad operacional de forma integral.
5. Recolección de datos eficaz y eficiente. Es fundamental, para asegurar la calidad de los datos, contar con una buena base de datos tanto de los equipos como de las actividades preventivas y correctivas asociadas a ellos.
6. Una vez realizada la implantación de la metodología RCM es importante que todo el trabajo desarrollado se emplee adecuadamente y se integre en la mejora continua de las actividades de la organización.

## 16. FUENTES DE INFORMACIÓN

- Guía de mantenimiento mecánico 2010
- Memoria técnica C.H. Belisario Domínguez
- Cursos de aceites lubricantes SRGHG
- Cursos análisis dinámicos

MOLINA, Javier. "Lubrication Sistem Plataform" Presented by Lubrication Systems Business Manager SKF. LatinAmericaArea 2006-08-11.

VIÑOLAS, Jose. "Introducción a la Lubricación" Campus Tecnológico Universidad de Navarra. 14/09/2004.

W.T Thomson. Vibration Theory and Applications, prentice-Hall, 1965.

Thomson. William T. Teoria de vibraciones (aplicaciones) edit. Prentice Hall Hill. 2a.edic. 1982

Balakumar Balachandran & Magrab Eduard B. Vibraciones, Edit Thompson 2004

Daniel J. Inman Engineering Vibration 3a. edit. Pearson 2008

S.Graham Kelly Mechanical Vibrations/ Schaum's outlines Mc.Graw Hill 1996

Newland, D.E. An Introduction to Mechanical Vibration: Analysis and Computation. Edito