



**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

**Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Mecánica**

# Diagnóstico estado mecánico de equipos rotatorios utilizando análisis de vibraciones.

Seminario de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero de Ejecución en Mecánica.

**Profesor Guía:**  
Sr. Claudio Nabil Villegas Ulloa  
**Ingeniero Supervisor:**  
Sr. Claudio Nabil Villegas Ulloa

Fernando Anselmo Sanhueza Lozano y Ricardo Alfonso Durán Rivas  
A Ñ O  
2014

## Resumen

Este seminario consta de un diagnóstico de estado mecánico de equipos rotatorios utilizando análisis de vibración mecánica en diferentes equipos de la Universidad del BÍO-BÍO, utilizando dos sensores de aceleración que son los encargados de recoger el fenómeno físico (vibración) y transformarlo en señal eléctrica, que es enviada a tarjeta instrumental que a su vez está conectada con un computador, donde éste entrega un espectro y señal de onda, que se utilizara posteriormente para diagnosticar los equipos. Todo este procedimiento dirigidos por nuestro profesor guía.

El análisis de vibraciones fue realizado a 5 equipos en donde se estudió su funcionamiento, y con el estudio de la teoría de vibraciones mecánicas se obtuvo la condición de las máquinas y sus diferentes componentes, todo esto sin necesidad de intervenir dichos equipos, gracias a este tipo de medición.

Al final de este seminario se propone utilizar esta ruta para una actividad de laboratorio y así los alumnos puedan adquirir nuevos conocimientos y a su vez tener un monitoreo periódico de las máquinas.

## Índice

Introducción.....	5
Objetivos.....	6
Capítulo 1: Conceptos generales de vibración.....	7
Capítulo 2: Sierra huincha carpintera.....	13
2.1.- Frecuencias características de la sierra huincha.....	14
2.2.-Forma de onda sierra huincha carpintera.....	15
2.3.- Análisis espectral de la sierra huincha carpintera.....	15
2.4.- Análisis severidad vibratoria de la sierra huincha carpintera.....	18
Capítulo 3: Carro sierra huincha.....	19
3.1.- Huinche.....	20
3.1.1.- Frecuencias características del Huinche .....	21
3.1.2.-Forma de onda Huinche .....	22
3.1.3.- Análisis espectral del Huinche .....	22
3.1.4.- Análisis de severidad vibratoria del conjunto Huinche .....	26
3.2.- Sierra.....	28
3.2.1.-Forma de onda sierra.....	30
3.2.2.- Análisis espectral de la sierra.....	30
3.2.2.- Análisis de severidad vibratoria de la sierra.....	33

Capítulo 4: Compresor Broomwade.....	35
4.1.- Frecuencias características del compresor.....	36
4.2.- Análisis espectral del compresor.....	37
4.3.- Análisis forma de onda del compresor.....	38
Capítulo 5: Banco de pruebas GILKES motor-bomba-turbina.....	41
5.1.- Forma de onda bomba.....	42
5.2.- Análisis espectral banco de pruebas GILKES motor-bomba- turbina.....	42
5.3.- Análisis de severidad vibratoria MOTOR BOMBA-TURBINA.....	44
Capítulo 6: Propuesta de experiencia para el laboratorio de vibraciones.....	45
Capítulo 7: Conclusión.....	48
Bibliografía.....	50

## Introducción

Este seminario presenta una de las técnicas más utilizadas de mantenimiento predictivo, que es la medición de las vibraciones mecánicas de una máquina y el posterior análisis de estas utilizando diversas herramientas para lograrlo.

Se explicarán las técnicas empleadas actualmente en la industria para el análisis de las vibraciones y la manera correcta de llevarlas a cabo.

Lo anteriormente mencionado se aterriza en el análisis de equipos muy comunes en la industria y talleres entre otros, como por ejemplo: compresor, sierra huincha carpintera, carro sierra huincha y una bomba conectada a una turbina. Los equipos mencionados se encuentran instalados en dos laboratorios de la UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO el compresor y la bomba pertenecen al laboratorio de termofluidos de DIMEC, la sierra huincha carpintera como el carro sierra huincha están ubicados en el Pabellón Tecnológico de la Madera (PTM) perteneciente a ICIMAD.

Anterior al análisis se describirá brevemente el equipo indicando, sus componentes , la forma de funcionar y del como sus partes interactúan entre sí.

Finalmente se hace el análisis vibratorio y procederá a diagnosticar el equipo indicando en qué estado se encuentra según norma ISO, si se observa alguna anomalía en su funcionamiento o falla en algún componente se emitirán recomendaciones para asegurar el buen desempeño del equipo.

## Objetivos Generales

- Determinación de la condición mecánica de los equipos rotatorios del laboratorio de termofluidos y Pabellón tecnológico de la Madera (PTM) mediante vibro análisis.
- Elaborar una propuesta de experiencia para el laboratorio de vibraciones mecánicas utilizando como base el presente seminario.

## Objetivos Específicos

- Describir de forma general los componentes y funcionamiento de los diferentes equipos a analizar, mencionar frecuencias características de funcionamiento.
- Analizar espectros vibratorios identificando las causas de sus componentes.
- Aplicación de normas de severidad vibratoria ISO 10816 e ISO 2372.
- Determinar un espectro base de los equipos con el fin de futuras reparaciones o mediciones.
- Entregar recomendaciones de mantenimiento en base a los datos obtenidos.

## Capítulo 1

### Conceptos generales de vibración mecánica

#### 1.1.-Vibración

De forma muy simple, una vibración puede ser considerado como un movimiento oscilatorio de una máquina, una estructura o de una parte de ellas, alrededor de su posición inicial de reposo. La posición de reposo es la que tomará cuando la fuerza dinámica sobre el cuerpo sea cero.

La vibración del cuerpo es causada por una fuerza de excitación. Esta fuerza puede ser externa o puede tener su origen en el interior del objeto. Más adelante se verá como la magnitud de la vibración de un objeto dado y su frecuencia está directamente determinada por la frecuencia de excitación. La magnitud de estas fuerzas están relacionadas con el estado del equipo, y el conocimiento de sus características e interacciones permite diagnosticar un problema en la máquina como podría ser desbalance de piezas rotatorias, fuerzas electromagnéticas, falla de alineamiento de acoplamiento o rodamiento, aflojamiento, eje doblado, rozamiento, resonancia, bandas o cadenas de transmisión en mala condición etc.

#### 1.1.1.-Frecuencia de la vibración

La frecuencia de la vibración es la medida de la cantidad de ciclos que acontecen en un determinado tiempo. La relación entre la frecuencia y el periodo de una vibración es expresada por la siguiente fórmula:

$F=1/T$  por lo general es expresada en la cantidad de ciclos que acontecen en un minuto, es decir, cpm.

Otro modo de especificar la frecuencia es en términos de la cantidad de ciclos por segundo, o sea Hertz (HZ)

Si se cuenta con la frecuencia especificada en Hertz, la misma podrá convertirse a cpm, de la siguiente manera.

$$\text{Cpm}=60\text{xHz}$$

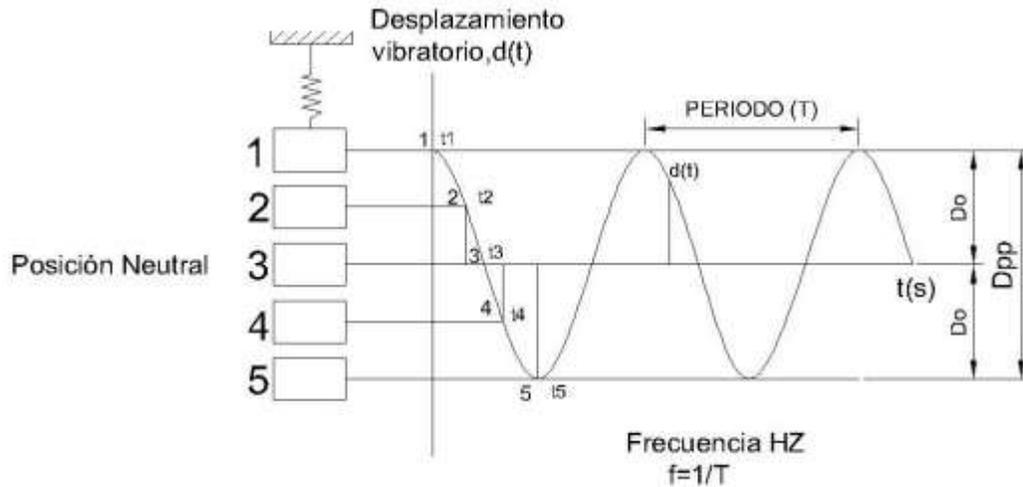


Fig.1.Frecuencia y desplazamiento de una Onda senoidal

$d(t)$ : Distancia a la que se encuentra la masa  $m$  de la posición de equilibrio en cualquier  $t$ .

$D_o$ : Desplazamiento pico o amplitud del desplazamiento.

$D_{pp}$ : Desplazamiento pico a pico o distancia máxima que se desplaza la masa mientras vibra.

La frecuencia de la vibración es indispensable para saber qué pieza es la defectuosa y la causante del problema. Las fuerzas que dan lugar a la vibración son generadas por el movimiento rotativo de los componentes de la máquina. Así, conociendo la frecuencia de la vibración podemos identificar la pieza defectuosa.

### 1.1.2 Desplazamiento de la vibración

El desplazamiento de la vibración es la distancia que recorre la pieza mientras vibra, puede ser del punto de reposo al máximo llamado desplazamiento cero-pico o desplazamiento total llamado pico-pico, la unidad de medida en el sistema métrico es micra  $\mu m$ .

### 1.1.3.-Velocidad de la vibración

La velocidad de la vibración es una medida de la rapidez con que se está moviendo un punto mientras está vibrando. Unidades de medida en el sistema métrico mm/s rms, mm/s pico

### 1.1.4.-Aceleración de la vibración

La aceleración de la vibración es la rapidez de cambio de la velocidad en el tiempo. La aceleración es expresada normalmente en G's pico donde G en la aceleración de gravedad en la superficie de la tierra se utilizará la aceleración en  $\text{mm/s}^2$  en este seminario

## 1.2.-Análisis de la vibración

El Análisis de la vibración es un proceso conformado de dos etapas, la adquisición e interpretación de datos relacionados con la vibración de la maquinaria. El análisis de la vibración tiene como objetivo determinar la condición mecánica del equipo y señalar con precisión si uno o más de sus componentes presenta algún tipo de desperfecto.

### 1.2.1.-Adquisición de datos

La adquisición de datos está basado en la recolección digital de datos y en el análisis espectral utilizando la transformada de Fourier. Este proceso pasa por diferentes etapas, en donde el acelerómetro capta las vibraciones y las transforma en señales eléctricas proporcionales a la aceleración media de la vibración, esta señal análoga se transforma en digital y finalmente aplicando la transformada rápida de Fourier calcula el espectro. Esto queda representado en la fig 2.

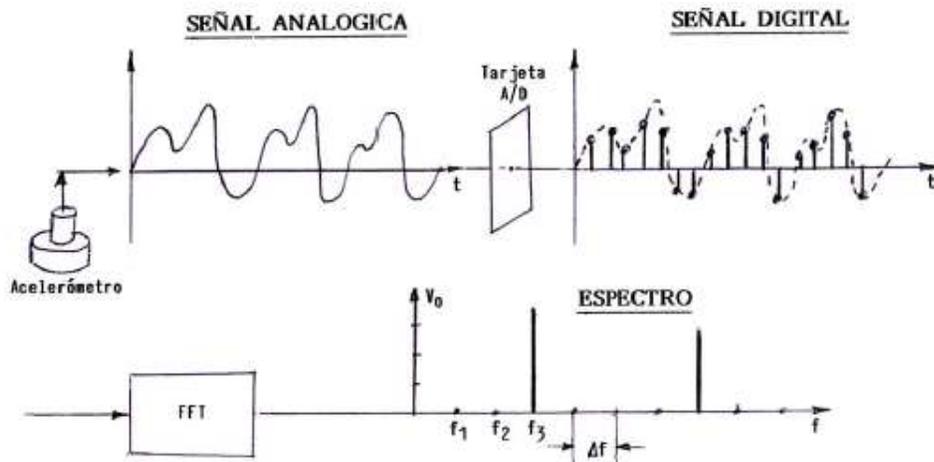


Fig.2 Esquema de adquisición de datos.

### 1.2.2.-Interpretación de datos

La interpretación de datos es el segundo eslabón en el proceso de análisis de la vibración. Es acá donde se selecciona los mejores datos de los tomados para en síntesis determinar el estado de la máquina. Para lograr esto en la industria se cuenta con múltiples herramientas como tablas de severidad vibratorias establecidas en conjuntos por ingenieros del mundo y plasmadas en las normas 2372 y 10813-3.

### 1.3.-Técnicas de análisis vibratorio

Las técnicas de análisis vibratorio existentes son: Análisis frecuencial, análisis de forma de onda, análisis de la fase de las vibraciones, análisis de órbita y posición del eje en el descanso y análisis de vibraciones durante partidas y paradas.

#### 1.3.1.-Análisis frecuencial

El análisis frecuencial es una técnica consistente en descomponer la señal en el dominio tiempo captada por un sensor de vibraciones, en sus componentes (Espectrales o frecuenciales) que la generaron, y luego asociar dichas componentes con las fuerzas dinámicas actuando sobre la máquina.

- Vibraciones propias del funcionamiento de la máquina (fe, fp).
- Vibraciones generadas por condiciones inapropiadas de funcionamiento.
- Vibraciones provenientes de otras máquinas.
- Vibraciones generadas por fallas de la máquina.

Con esta herramienta podemos afirmar en parte que la máquina esta buena si en el espectro solo existen vibraciones normales o inherentes a la máquina y las amplitudes de estas no exceden los valores normales. Para poder entregar con mayor propiedad el estado del equipo se utiliza una técnica llamada evaluación de severidad vibratoria. A continuación en la fig.3 se observa el camino desde las vibraciones propias de la máquina hasta el análisis frecuencial en el espectro

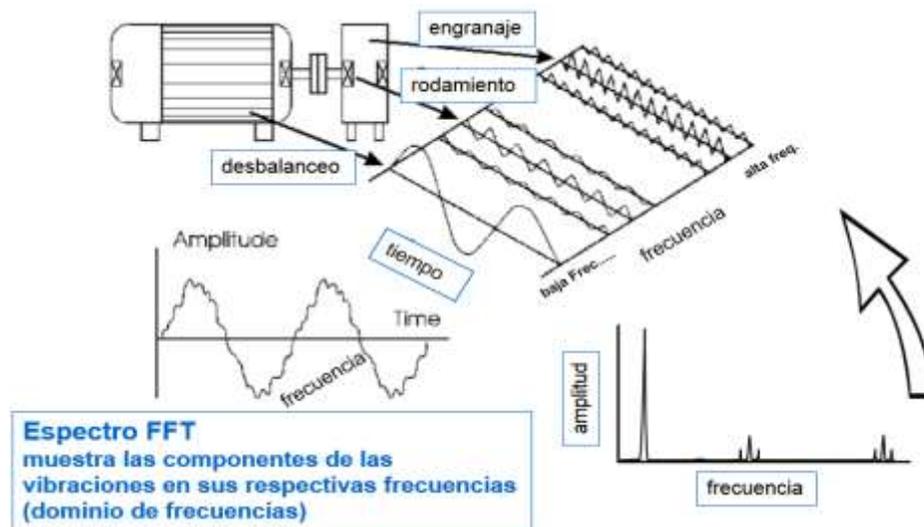


Fig.3 Análisis frecuencial en el espectro FFT.

### 1.3.2.-Evaluación Severidad Vibratoria

La evaluación severidad vibratoria se define como unidad de medida para cuantificar la severidad vibratoria el valor RMS de la velocidad ¿para qué conocer la severidad vibratoria? Las vibraciones en general son dañinas para las máquinas pues generan 3 problemas.

- Generan esfuerzos en los diferentes elementos los cuales si superan la resistencia de ruptura del material éste se romperá.

- Generan fatiga en los materiales piezas de máquinas, sometidas a esfuerzos variables y repetidos en un gran número de veces, se rompen bruscamente, sin que deformación permanente alguna anuncie su rotura.
- Generan fuerzas de inercia: Las fuerzas de inercia se definen como el producto de la masa por la aceleración y frecuentemente se comete el error de no considerarlas en los análisis, lo que ha impedido en varios casos poder determinar la causa de ciertas fallas

Primero se debe asegurar que el rango de frecuencias medido por el acelerómetro se encuentre de 10 a 1000 HZ . Segundo que norma se aplica para el equipo en cuestión ISO 2372 o ISO 10816 que son las normas más actualizadas en Chile en este momento, para aplicar estas normas es necesario clasificar el equipo (clase 1, 2, 3,4) de acuerdo a su potencia kW según norma ISO 2372 o según la altura de eje o tipo de soporte según ISO 10816-3. Después de obtenidos los valores de velocidad RMS para los puntos del equipo, el máximo valor de estos últimos es quien indicara la magnitud de las vibraciones, con este valor se va a la tabla de severidad vibratoria de la norma correspondiente y se procesa a determinar a qué rango de severidad pertenece esta vibración. Quedando de esta manera evaluada el nivel de vibraciones del equipo.

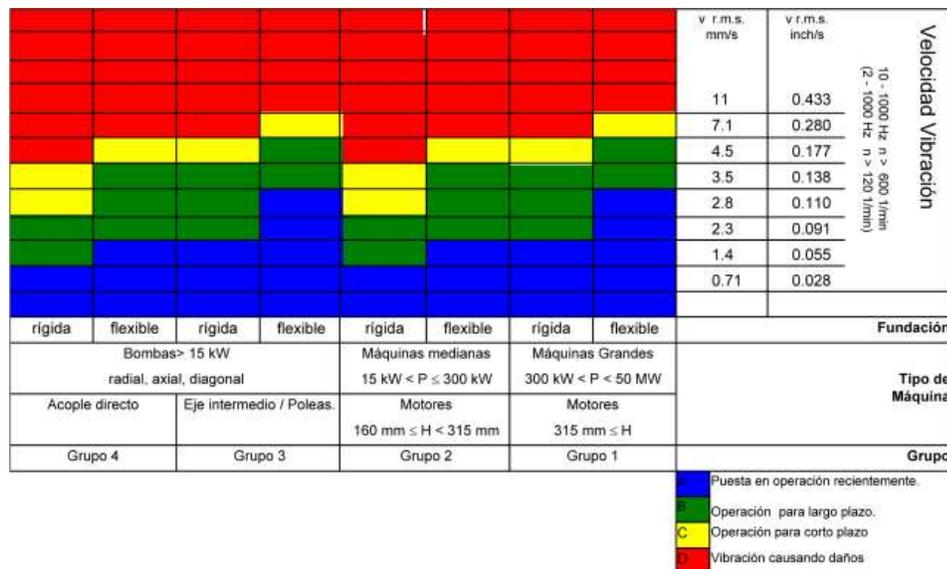


Fig.4 Severidad de la vibración según la norma ISO 10816-3.

## Capítulo 2

### SIERRA HUINCHA CARPINTERA

Es una herramienta de pedal o eléctrica que posee una banda metálica dentada, flexible, larga y estrecha. La banda se desplaza sobre dos volantes que se encuentran en el mismo plano vertical con un espacio entre ellas. Estas **sierras** pueden ser utilizadas en los trabajos de carpintería y carpintería metálica, así como también para cortar diversos materiales. Son muy útiles en el corte de formas irregulares.



Fig.5 Sierra huincha carpintera.

Nombre	Sierra carpintera
Marca	Mini Max
Potencia	1,5 HP 1.1 kW
Velocidad del motor	2994 cpm
Diámetro volantes	45 cm
Largo de la sierra huincha	3634 cm
Correa de transmisión	A-38
Rodamiento delantero del motor	6205 2Z
Rodamiento trasero del motor	6204 2Z
Rodamiento del volante conducido	6202 2Z

Tabla.1 Datos técnicos de sierra huincha carpintera.

2.1.-Frecuencias características sierra huincha carpintera

A continuación se muestran las frecuencias de falla características para cada rodamiento girando a la velocidad correspondiente, estas frecuencias están obtenidas por medio de un software de SKF que tiene disponible en su sitio web.

Designación	Frecuencia cpm
Velocidad giro motor	2994
Velocidad giro correa	461
Velocidad giro volantes	676
Rodamiento 6205 2Z girando a 2994 cpm	
FTF	1194
BSF	7056
BPFI	16212
BPFO	10734
2BSF	14112
Rodamiento 6204 2Z girando a 2994 cpm	
FTF	1140
BSF	5964
BPFI	14736
BPFO	9138
2BSF	11928
Rodamiento 6202 2Z girando a 2994 cpm	
FTF	1140
BSF	5946
BPFI	14820
BPFO	9132
2BSF	11892

Tabla.2 Frecuencias de falla de los rodamientos sierra huincha carpintera.

## 2.2.-Forma de onda sierre huincha carpintera

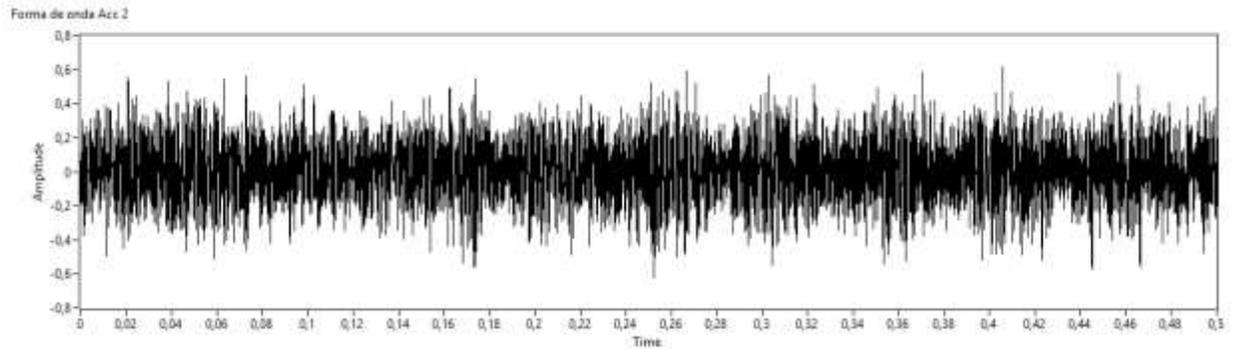


Fig.6 Forma de onda sierre huincha carpintera.

## 2.3.-Análisis espectral sierra huincha carpintera

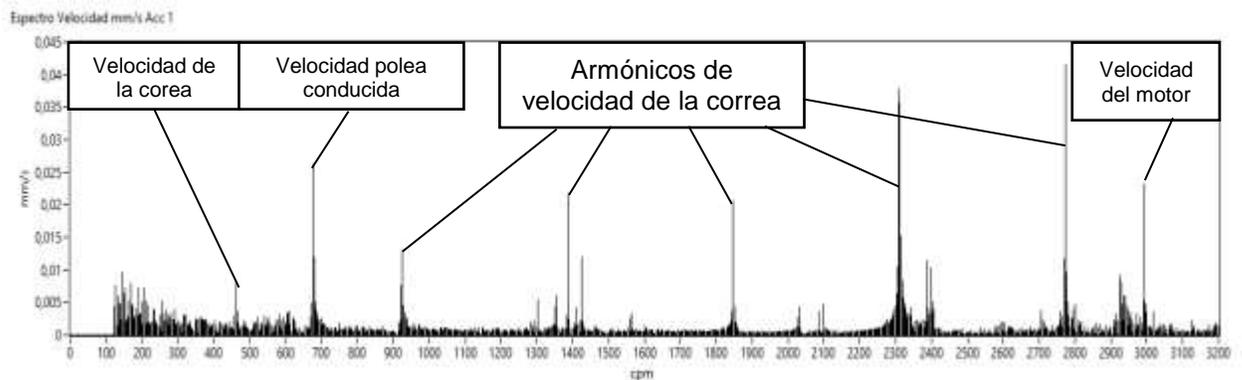


Fig.7 Espectro en velocidad motor punto 1 dirección vertical.

La fig.7 muestra la velocidad de la polea conductora, polea conducida y varios armónicos de la velocidad de la correa, lo cual nos indica un desperfecto en esta.

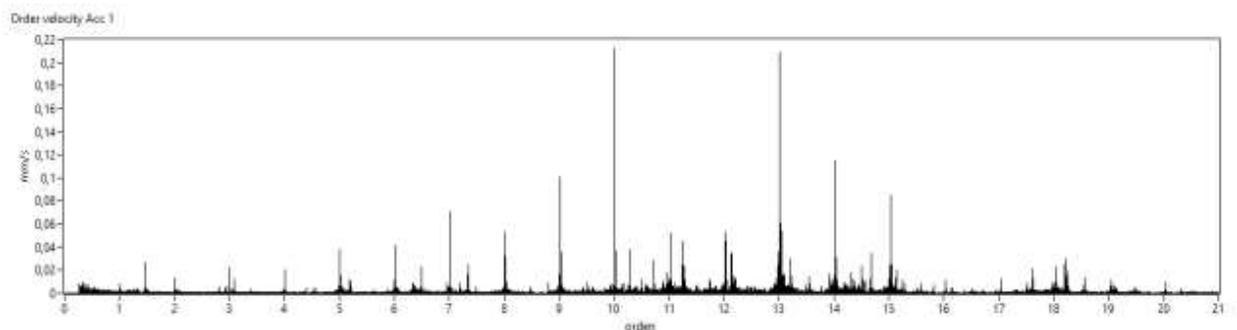


Fig.8 Espectro de orden, en la velocidad del motor.

La fig.8 muestra 20 armónicos de la correa lo cual ratifica que se encuentra con problemas. Más adelante cuando se procedió al cambio de la correa se pudo comprobar que se encontraba con claros signos de desgaste así como también grietas.

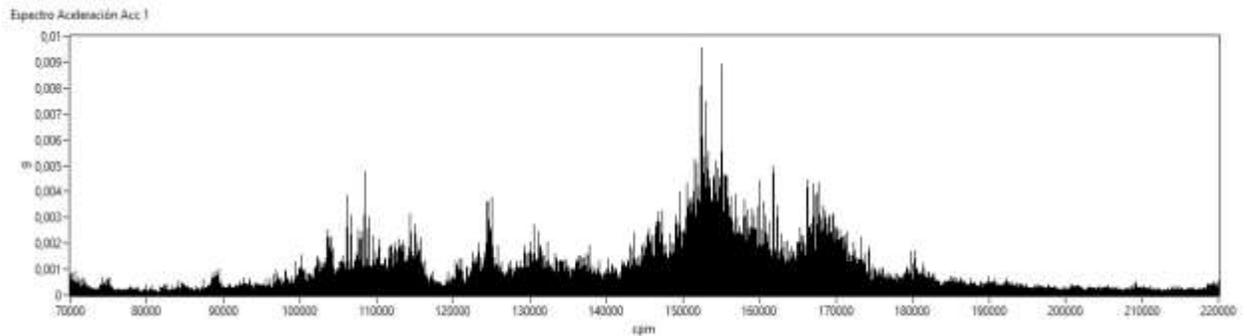


FIG.9 Espectro en aceleración motor punto 1 dirección vertical.

La fig.9 muestra una gran gama de amplitudes a altas frecuencias espectro típico cuando existen problemas de lubricación en los rodamientos.

Se procedió a efectuar el cambio de la correa dañada por una nueva, a continuación se muestran los resultados.

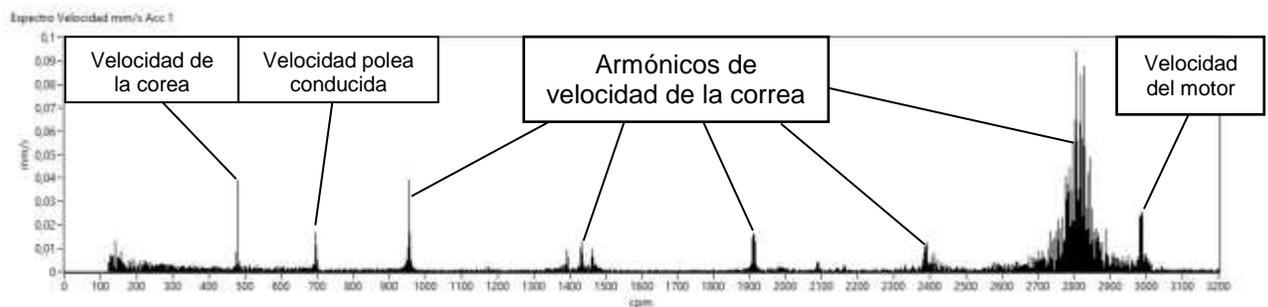


Fig.10 Espectro en velocidad motor punto 1 dirección vertical con correa nueva.

La fig.10 muestra velocidad de la polea conducida, polea conductora además de varios armónicos de la velocidad de la correa.

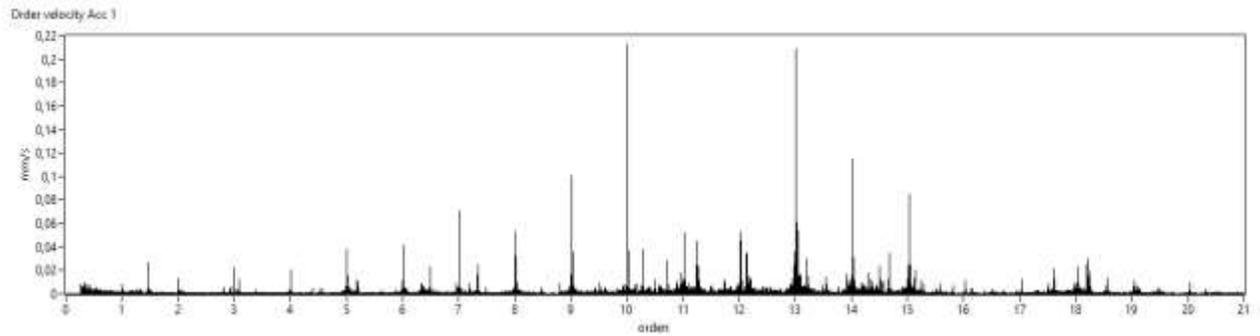


Fig.11 Espectro de orden, en la velocidad de la correa dañada 20 armónicos.

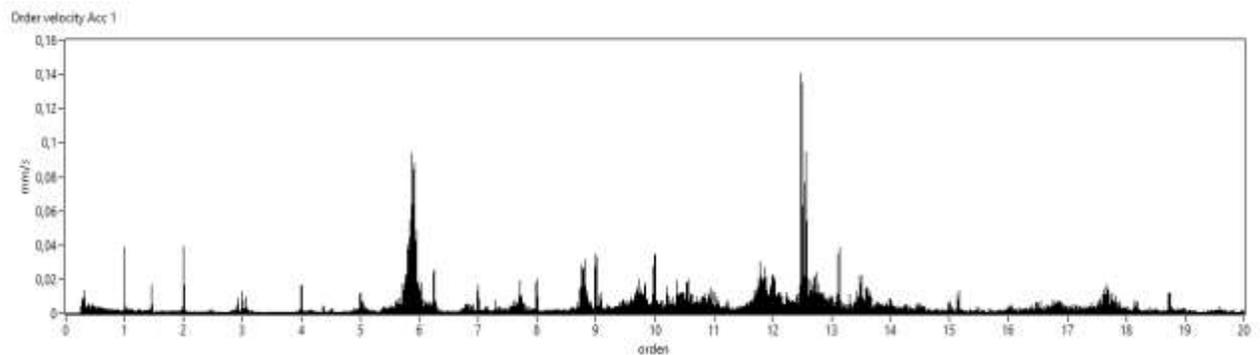


Fig.12 Espectro de orden, en la velocidad de la correa reemplazada 16 armónicos.

La fig.12 muestra 16 armónicos de la correa, se puede apreciar la disminución del número de armónicos de 20 a 16, se esperaba que desaparecieran lo que no sucedió por motivo de no utilizar la instrumentación adecuada para realizar el cambio de una correa, como un láser para la alineación de las poleas. La presencia de numerosos armónicos también se debe a que al estar nueva la correa esta se encuentre demasiado rígida, esto provoca un leve cambio en las velocidades de giro de la correa y por ende las velocidades de las poleas. Con el tiempo y el uso la correa ira adquiriendo más flexibilidad.

#### 2.4.-Análisis severidad vibratoria sierra huincha carpintera

Se utilizó la norma ISO 2372 la cual regula la cantidad de vibraciones del equipo para evitar fatiga de los elementos de la máquina y bases soportes. La severidad vibratoria queda determinada por el mayor valor obtenido se la Velocidad RMS medida en un rango de 10 a 1000 Hz.

La clasificación de la sierra es clase I por poseer una potencia menor a 15 kW.

Punto	Descripción	Dirección	Valor RMS(mm/s)
1	Motor lado acople	Horizontal	0,41
		Vertical	0,37
2	Descanso ventilador	Horizontal	<b>0,45</b>
		Vertical	0,40
Condición ISO 2372 clase I: <b>BUENA</b>			

Tabla .3 Valores velocidad RMS, en cada punto del motor Sierra Huincha Carpintera.

Los niveles de severidad vibratoria para la sierra huincha carpintera se encuentran dentro de la condición BUENA. De acuerdo a norma ISO 2372, para máquinas de clase I. El mayor valor observado corresponde en el punto 2 perteneciente al motor, donde se registró un valor máximo de 0.45 (mm/s) RMS en el sentido horizontal.

### Capítulo 3

#### CARRO SIERRA HUINCHA

El equipo denominado carro sierra huincha es una máquina destinada a la fabricación de tablas, tablones y vigas de madera, se utilizan principalmente en aserraderos. Está compuesta por 3 partes, el principal y el que le da el nombre a la máquina es la sierra la cual consta de una cinta vertical que gira impulsada por medio de dos volantes. Otro elemento es el carro de avance, su función es servir de soporte del tronco y a su vez regular el ancho del corte de la madera para obtener distintos formatos de productos. Por último el Winch su función brindar el avance longitudinal del carro y consigo el tronco, el Winch regula la velocidad del corte.



Fig.13 Carro Sierra Huincha ubicado en PTM

### 3.1. Huinche

El Huinche está formado por un motor que entrega movimiento a una polea el cual transmite su potencia a un eje paralelo mediante 4 correas en V, este último está soportados por dos rodamientos. Este eje se conecta a otro similar paralelo por dos medios una cadena y engranajes, ambos ubicados en sus extremos respectivamente. El engranaje y rueda de la cadena giran locos en este último eje y se acoplan al mismo mediante dos embragues ubicado en sus extremos con el fin seleccionar una de las dos funciones avance o retroceso del carro.



Fig.14 Conjunto llamado Huinche.

3.1.1.- Frecuencias características del Huinche

Motor	
Modelo motor	VDE 0530
Potencia equipo	7.5 kW
Velocidad	750 cpm
Rodamiento Motor Lado Ventilador	6209-Z-C3
Rodamiento Motor Lado Polea	6309-C3
Rodamiento Descanso Punto 3	6210-2Z
Rodamiento Descanso Punto 4	6210-2Z
Correa	4X B-76
Diámetro polea 1	17 cm
Diámetro polea 2	44 cm
Número de dientes piñón	Z1 15
Número de dientes corona	Z2 84
Clasificación según norma ISO 2372	Clase I

Designación	Frecuencia cpm
Velocidad giro motor	750
Velocidad giro eje 2	286
Frecuencia de engrane	4290
Rodamiento 6209 Z-C3 girando a 750 cpm	
FTF	303
BSF	1908
BPFI	4458
BPFO	3042
2BSF	3822
Rodamiento 6309 C3 girando a 750 cpm	
FTF	284

BSF	1464
BPFI	3720
BPFO	2280
2BSF	2934
Rodamiento 6210 2Z girando a 286 cpm	
FTF	117
BSF	762
BPFI	1692
BPFO	1170
2BSF	1524

Tabla. 4 Frecuencias características de falla de rodamientos del conjunto Huinche.

### 3.1.2.-Forma de onda Huinche

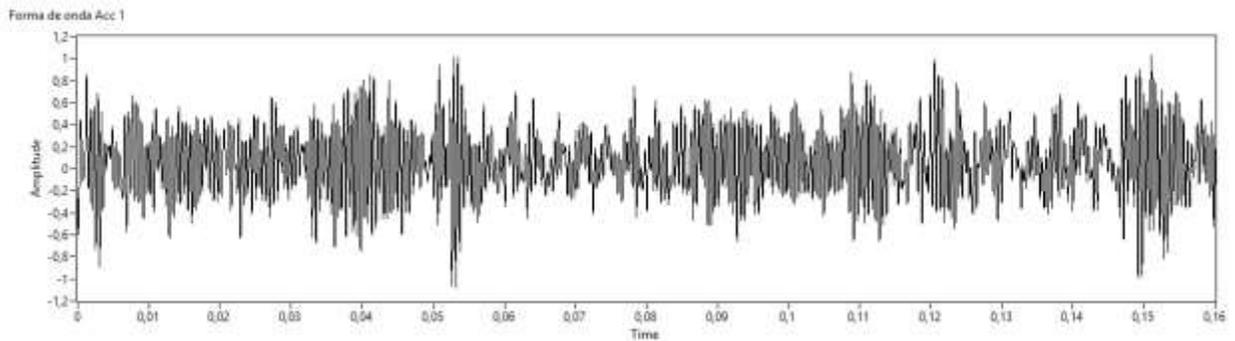


FIG 15 forma de onda Huinche punto 2 dirección vertical.

### 3.1.3. Análisis espectral Huinche

Analizando el espectro de velocidad de los puntos de medición 1 y 2 correspondientes a ambos extremos del motor se puede distinguir una gran amplitud a los 18000 cpm que es producto del VDF, esta frecuencia es 6 veces la frecuencia de la línea 6XFL. Cabe señalar que ésta vibración no es propia del

motor, es una vibración externa del VDF que a través de sus armónicos contamina toda el área.

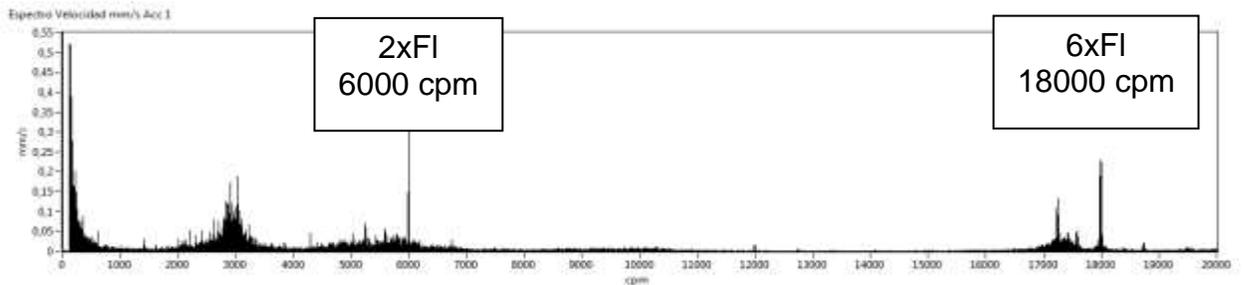


Fig.16 Espectro en velocidad motor punto 1 dirección vertical

En la fig.16 se distinguen amplitudes marcadas a la 2xFL de magnitud 0.31 mm/s producto del estator excéntrico otra amplitud a 6xFL de magnitud 0.26 mm/s proveniente del VDF.

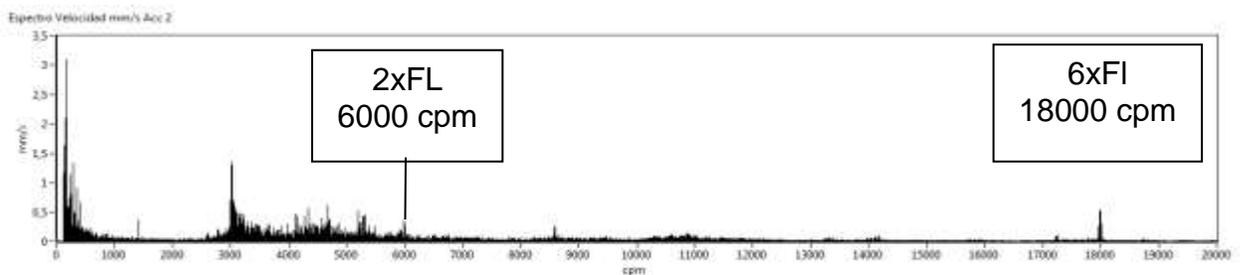


Fig.17 Espectro en velocidad motor punto 1 dirección Horizontal.

El espectro de velocidad de la fig.17 pertenece al punto de mayor vibración del conjunto según valor de velocidad RMS del análisis de severidad vibratoria, observar la diferencia de amplitudes entre la medición vertical y horizontal de un mismo punto sobre todo en la zona de baja frecuencia con picos de 0.52 mm/s y 3 mm/s respectivamente.

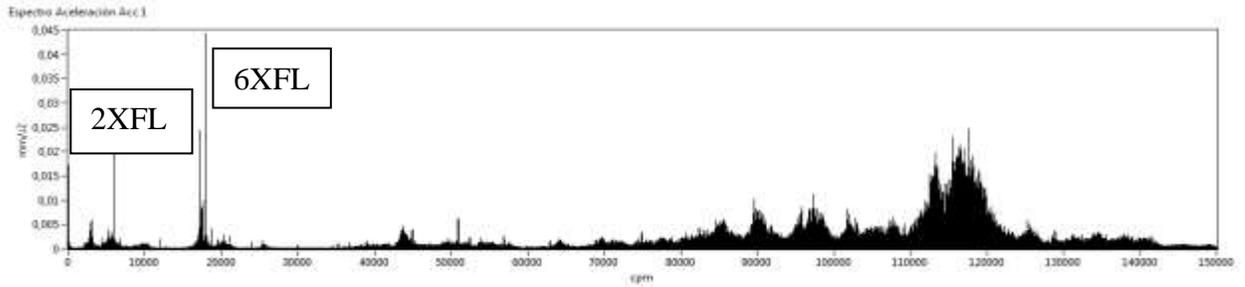


Fig.18 Espectro aceleración motor punto 1 dirección vertical.

Analizando la Fig.18 se distinguen señales aleatorias a altas frecuencias lo que indica una mala lubricación en los rodamientos del motor.

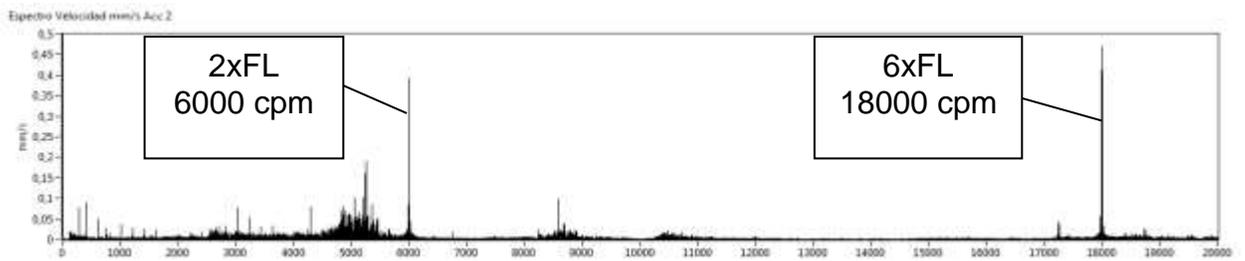


Fig.19 Espectro en velocidad motor punto 2 dirección horizontal.

En la fig.19 nuevamente se distinguen amplitudes marcadas a la 2FL de magnitud 0.39 mm/s y 6 FL de magnitud 0.47 mm/s.

Se puede distinguir en la fig.16,17,18 y 19 una componente de gran amplitud al doble de la frecuencia de línea 2xFL (6000cpm), lo cual es un indicio que el motor presenta problema en el estator.

La excentricidad del estator produce un entrehierro estacionario desigual entre el rotor y el estator que ocasiona una vibración muy direccional. Las diferencias en el entrehierro no deben exceder del 5% para motores de inducción y del 10% para motores síncronos. Las patas sueltas y las bases alabeadas (deformadas) pueden producir un estator excéntrico

Las laminaciones cortocircuitadas del estator pueden ocasionar un calentamiento localizado y desigual que puede distorsionar al propio estator esto produce una

vibración inducida térmicamente que puede aumentar significativamente con el tiempo ocasionando distorsión del estator y problemas de entrehierro estático.

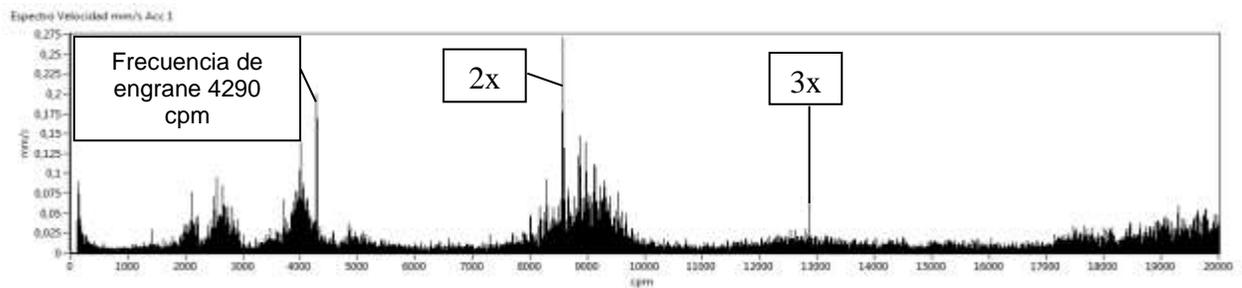


Fig.20 Espectro de velocidad tomado en rodamiento punto 3 Vertical.

En la fig.20 se distinguen claramente la frecuencia de engrane así como su segundo y tercer armónico. Poco a poco conforme se va acercando al eje que posee el Huinche aparecerán frecuencias aleatorias que interfieren con el análisis de frecuencias.

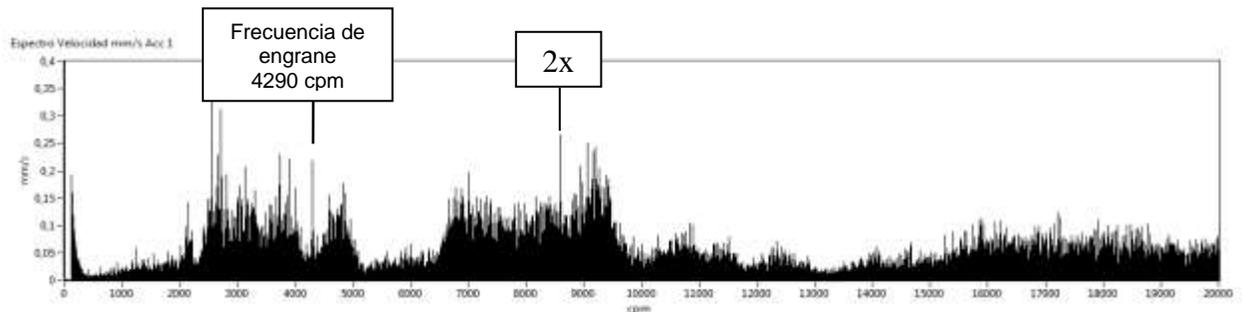


Fig.21 Espectro de velocidad tomado en rodamiento punto 4 vertical.

En la fig.21 se logra distinguir primer y segundo armónico de frecuencia de engrane como también armónicos de la velocidad de giro del eje, pero ya se hace imposible analizar detalladamente debido a la aparición de este llamado ruido blanco proveniente del golpeteo metal-metal de la cadena y principalmente del roce de los embragues y cambios constantes de sentido de giro del Huinche

### 3.1.4.-Análisis de severidad vibratoria del conjunto Huinche

Se utiliza la norma ISO 2372 la cual regula la cantidad de vibraciones del equipo para evitar fatiga de los elementos de la máquina y bases soportes. La severidad vibratoria queda determinada por el mayor valor obtenido de la Velocidad RMS medida en un rango de 10 a 1000 HZ.

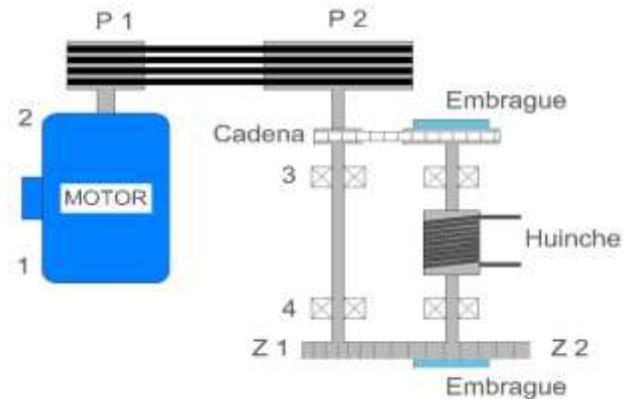


Fig.22 Esquema Huinche muestra los puntos de medición velocidad RMS.

Punto	Descripción	Dirección	Valor RMS mm/s
1	Lado ventilador	Horizontal	<b>6.36</b>
		Vertical	1.47
		Axial	1.93
2	Lado polea	Horizontal	0.98
		Vertical	1.44
		Axial	4.03
3	rodamiento eje lado cadena	Horizontal	1.63
		Vertical	1.53
4	rodamiento eje lado engranaje	Horizontal	2.48
		Vertical	3.35

Tabla .5 Valores velocidad RMS, en cada punto de medición motor y en ambos descansos 3 , 4 del eje.

Los niveles de severidad vibratoria para este equipo huinche se encuentra dentro de la condición **inaceptable** de acuerdo a la norma ISO 2372, para máquinas de CLASE I. El mayor valor observado corresponde en el punto 1 perteneciente al motor, donde se registró un valor máximo de 6.36 (mm/s) RMS en el sentido horizontal.

### 3.2. SIERRA

La sierra tiene como función trozar troncos, para ello utiliza una sierra de cinta montada en dos volantes que giran produciendo el corte por deslizamiento continuo sobre el tronco a cortar, la potencia necesaria la entrega un motor que mediante 5 poleas en V se conecta a la polea del volante inferior.



Fig.23 Sierra.

Motor	
Modelo del motor	VDE 0530
Potencia del equipo	30 kW
Velocidad del motor	1496 cpm
Rodamiento del motor, lado ventilador	6212-Z-C3
Rodamiento del motor, lado polea	6312-C3
Correa	4X B-76
Diámetro polea 1	17 cm
Diámetro polea 2	44 cm
Clasificación según ISO 10816-3	CLASE II

Tabla .6 Datos técnicos de la Sierra.

## Conjunto sierra

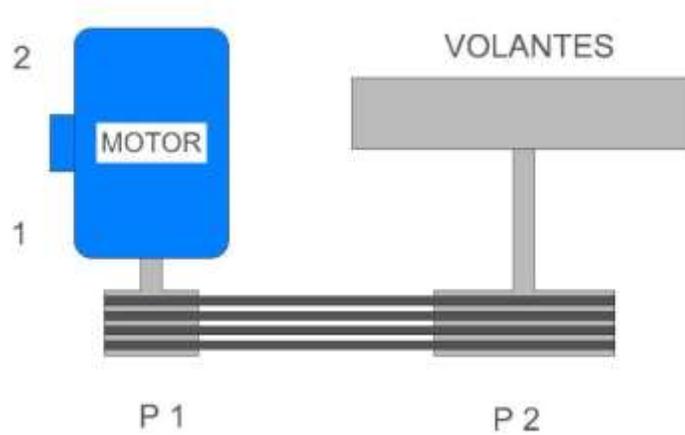


Fig.24 Esquema simplificado del conjunto sierra

### Determinación de los puntos de medición

Los puntos seleccionados son el punto 1 y el punto 2 ubicado a ambos extremos del motor lo más cercano posible a sus descansos. Se escogieron solo estos dos puntos debido a la peligrosidad de tener una sierra de este tamaño funcionando y la gran velocidad que adquieren los volantes. Cabe señalar que nos enfrentamos a un escenario casi idéntico al que podríamos encontrar en una industria donde los protocolos de seguridad siguen reglas muy estrictas en cuanto a la manipulación de un equipo en funcionamiento logrando algunas veces hacer dificultoso la toma de datos para algún tipo de mantenimiento predictivo como este por ejemplo.

Primero se procedió a medir velocidad mediante un tacómetro en la polea 1 y polea 2

- Se tomaron mediciones en los 2 sentidos radiales en el punto 1
- Se tomaron mediciones en los 2 sentidos radiales en el punto 2
- Se tomaron mediciones axiales simultáneamente en los puntos 1 y 2

### 3.2.1.-Forma de onda sierra

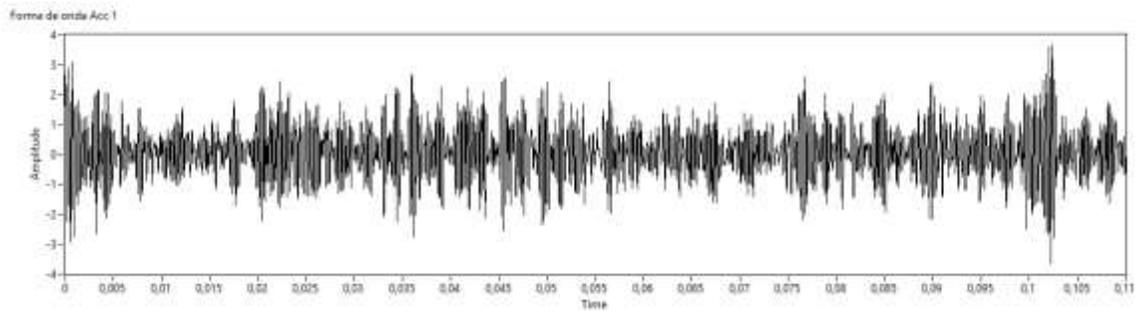


Fig.25 forma de onda sierra punto 1 dirección horizontal.

### 3.2.2.-Análisis espectral sierra

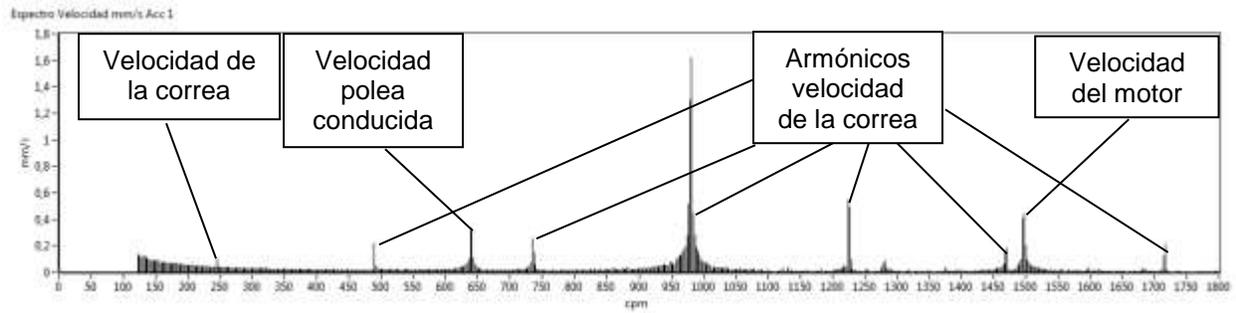


Fig.26 Espectro en velocidad del motor punto 1 dirección vertical.

En la fig.26 se distinguen la velocidad del motor 1496 cpm, velocidad polea conducida 640 cpm y varios armónicos de la velocidad de la correa, se pueden contar 6 armónicos de esta última.

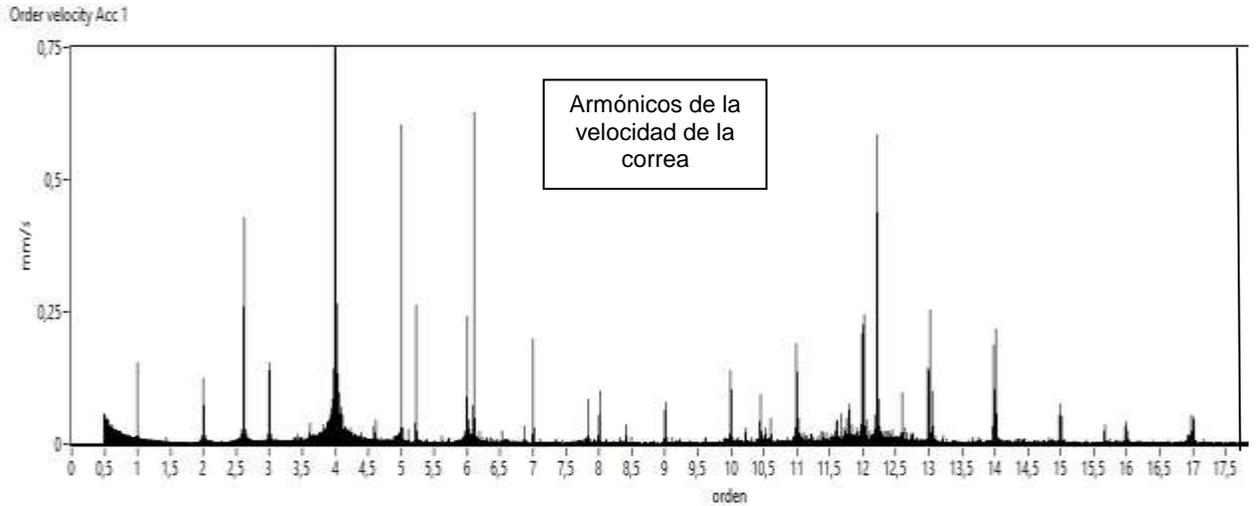


Fig.27 Espectro de orden en velocidad del motor punto 1 dirección vertical.

La fig.27 muestra en el eje x del espectro que existen 17 armónicos de la 1x de la correa lo cual nos quiere decir que ocurre un problema con ellas

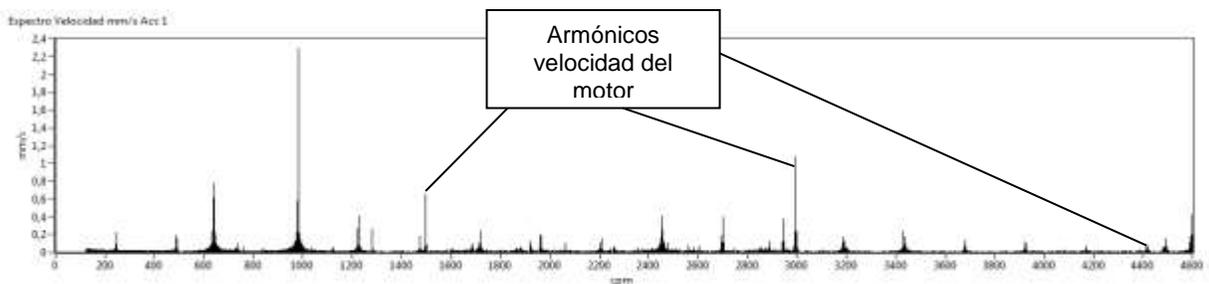


Fig.28 espectro en velocidad punto 1 motor dirección axial

En la fig.28 se distinguen la 1x, 2x y 3x de la velocidad el motor, el armónico número tres es de pequeña amplitud, un rodamiento inclinado en el eje del motor genera este fenómeno de vibraciones axiales considerables. Intentos de alineamientos o balanceos resultaran inútiles para reducir las vibraciones, es necesario retirar el rodamiento e instalarlo correctamente.

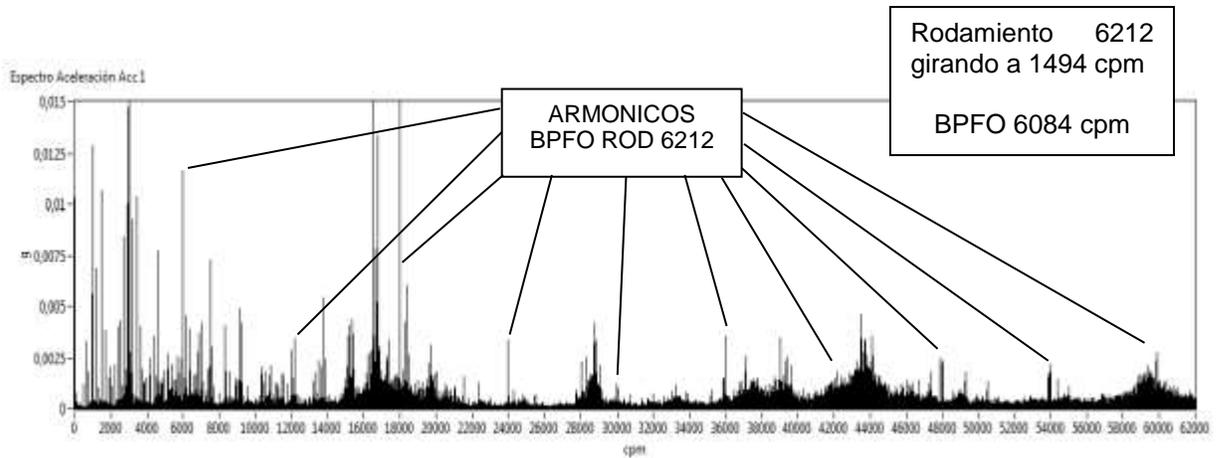


Fig.29 Espectro en aceleración punto 1 motor dirección vertical

La fig.29 muestra 10 armónicos de la frecuencia característica de falla BPFO del rodamiento 6212 lo que nos indica una falla en la pista exterior del rodamiento.

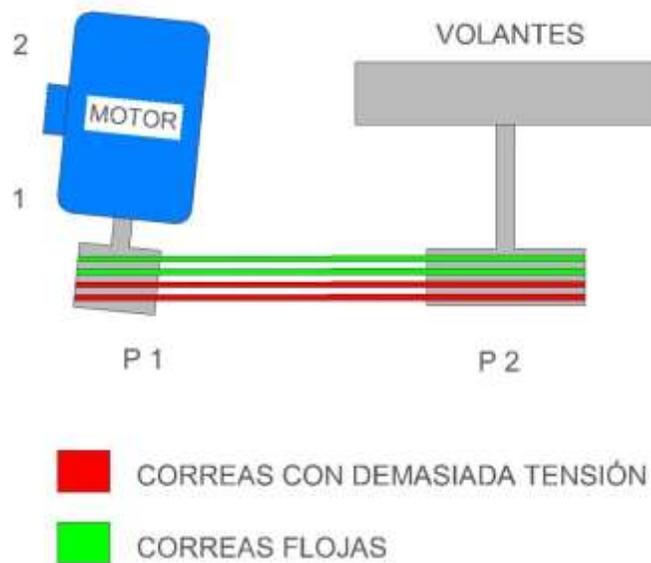


Fig.30 Esquema motor desalineado

Al momento de proceder a la toma de mediciones en la sierra se observó que el motor se encuentra desalineado con respecto a las correas es decir no formaban un ángulo de 90° entre sí. Ver Fig.30 , lo cual provoca que las correas no trabajen de forma uniforme, algunas correas se encontraban tensas en cambio las restantes se encontraban sueltas esto se ve en el espectro de la fig. 26 y 27 con numerosos armónicos de las correas.

Este desalineamiento provoca una sobrecarga en el eje del motor, generando fuerzas mayores sobre los descansos lo que implica un deterioro prematuro de estos últimos. La sobrecarga generada por el desalineamiento provocó que el rodamiento 6212 ubicado en el lado del ventilador del motor se inclinase en el eje causando daño en su pista exterior de rodadura, este fenómeno se puede observar en la fig.29 con armónicos de la BPFO del rodamiento 6112.

### 3.2.3 Análisis severidad vibratoria de la sierra.

Se utiliza la norma ISO 10816-3 este estándar limita la severidad vibratoria para evitar grandes esfuerzos, fatiga de los elementos de la máquina y bases soporte y grandes fuerzas de inercia. La severidad vibratoria queda determinada por el mayor valor obtenido se la Velocidad RMS medida en un rango de 10 a 1000 HZ sobre las cajas de sus descansos.

Punto	Descripción	Dirección	Valor RMS mm/s
1	Lado polea	Horizontal	1.68
		Vertical	1.87
		Axial	2.44
2	Lado ventilador	Horizontal	3.89
		Vertical	<b>4.22</b>
		Axial	2.36

Tabla 7. Valores velocidad RMS, en cada punto del motor Sierra.

Los niveles de severidad vibratoria para este equipo sierra se encuentra dentro de la condición "C" **La condición de la máquina no es adecuada para una operación continua, sino solamente para un período de tiempo limitado.** Se deberían llevar a cabo medidas correctivas en la siguiente parada programada de acuerdo a la norma ISO 10816-3, para máquinas de CLASE II. El mayor valor observado corresponde en el punto 2 perteneciente al motor, donde se registró un valor máximo de 4.22 (mm/s) RMS en el sentido vertical.

## Capítulo 4

### Compresor alternativo BroomWade

Compresor alternativo marca BroomWade instalado en 1973 en laboratorio de termofluidos perteneciente al DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, consta con un estanque, motor eléctrico trifásico, transmisión por 4 correas, y dos pistones. Este equipo tiene un uso promedio de 7 veces por semestre siendo cada experiencia de 30 minutos.

#### Elementos

- Compresor BroomWade Bi-cilíndrico de una etapa, modelo: AC41, presión máxima: 150 PSI.
- Estanque de aire comprimido
- Motor eléctrico trifásico 10 HP, 380 V
- Tacómetro digital
- Manómetro principal (Bourdón)



Fig.31 Compresor alternativo BroomWade.

4.1. Frecuencias características del compresor

Designación	Frecuencia cpm
Velocidad giro motor	1476
Velocidad giro eje pistones	740
Velocidad giro correas	474
Rodamiento motor 6208 Z-C3 girando a 1476 cpm	
FTF	588
BSF	3456
BPFI	8022
BPFO	5293
2BSF	6912
Rodamiento motor 6303 C3 girando a 1476 cpm	
FTF	568
BSF	3018
BPFI	7290
BPFO	4542
2BSF	6030
Rodamiento motor 6210 2Z girando a 286 cpm	
FTF	117
BSF	762
BPFI	1692
BPFO	1170
2BSF	1524

Tabla.8 Frecuencias características de falla de rodamientos obtenidas por software.

#### 4.2.-Análisis espectral compresor

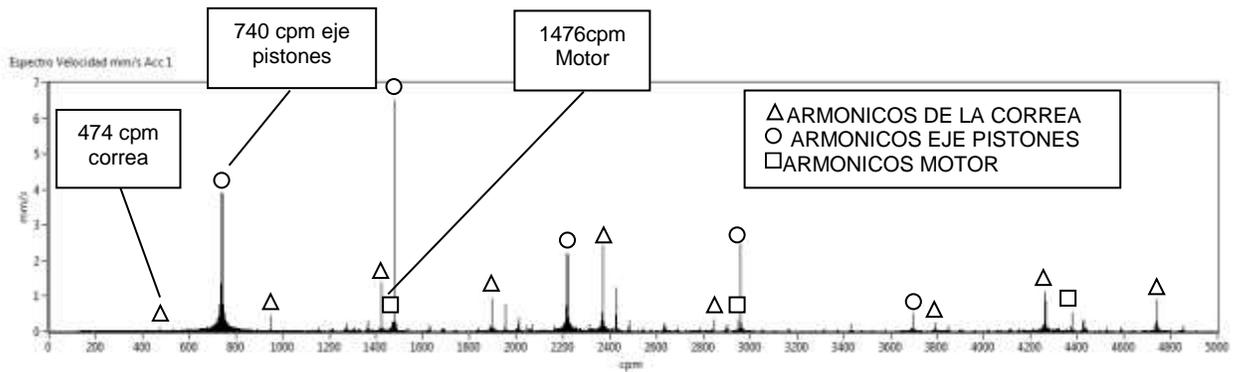


Fig.32 Espectro de velocidad del motor punto 1 dirección vertical

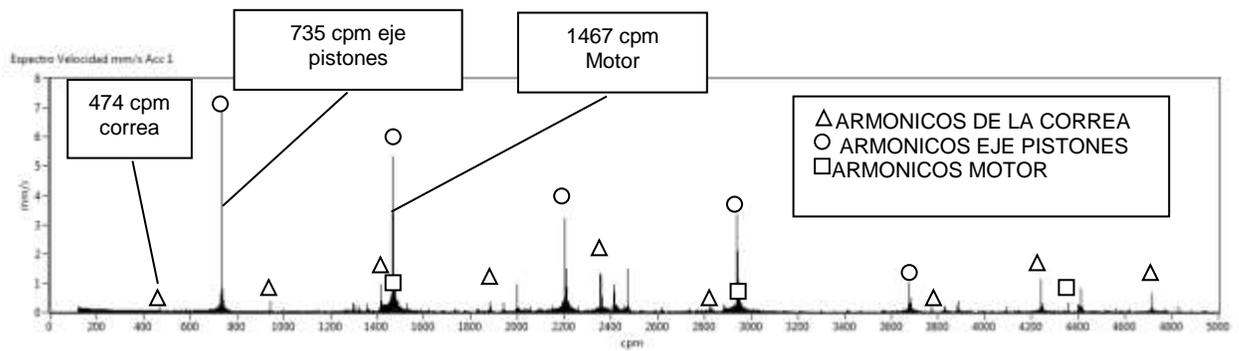


Fig.33 Espectro de velocidad del motor punto 2 dirección vertical

En los espectros de las figuras fig.32 y fig.33 se puede observar 8 armónicos de las correas del compresor lo que nos indica que presentan algún tipo de desperfecto. También se observan 5 armónicos de la velocidad de giro de la polea conducida, podría tratarse de un desbalance residual del eje que contiene los émbolos que comprimen el aire que gira por medio de polea conducida

Espectros obtenidos en mediciones a la carcasa de los pistones del compresor, específicamente en la dirección radial al eje de los pistones

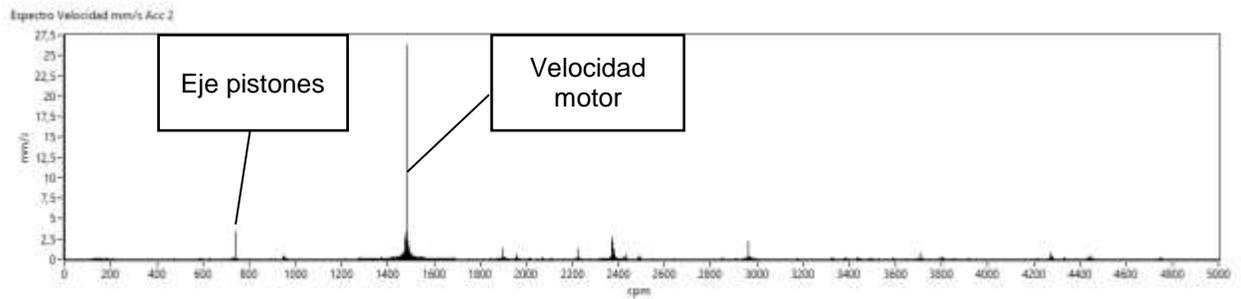


Fig.34 Espectro en velocidad eje de los pistones dirección radial horizontal Canal 1.

#### 4.3.-Análisis forma de onda compresor

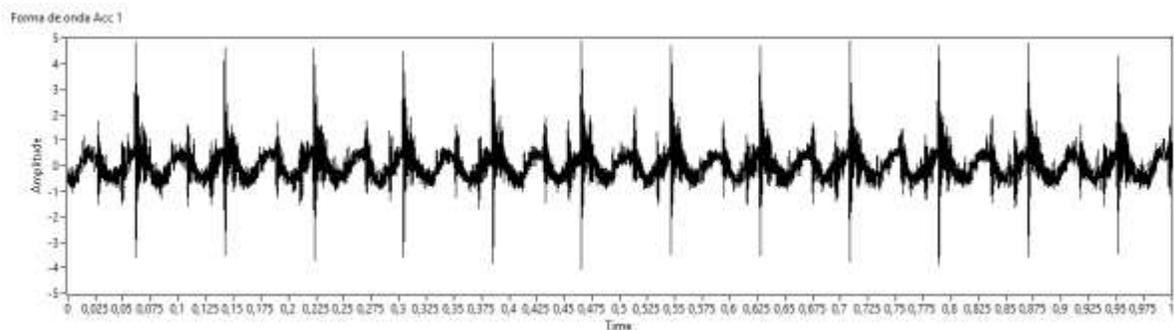


Fig.35 Forma de onda medición tomada en eje de los pistones dirección radial.

La fig.35 muestra la forma de onda de tipo transiente provocada por un impacto el cual es atribuible a las diferentes etapas durante el recorrido del pistón. Se producen 12,35 impactos por cada segundo que gira el eje.

La velocidad del eje de los pistones es 741 cpm.

$741 \text{ cpm} / 60 \text{ s} = 12,35 \text{ cps}$  esto se ve reflejado en la forma de onda y las cantidad de veces que golpetea un pistón.

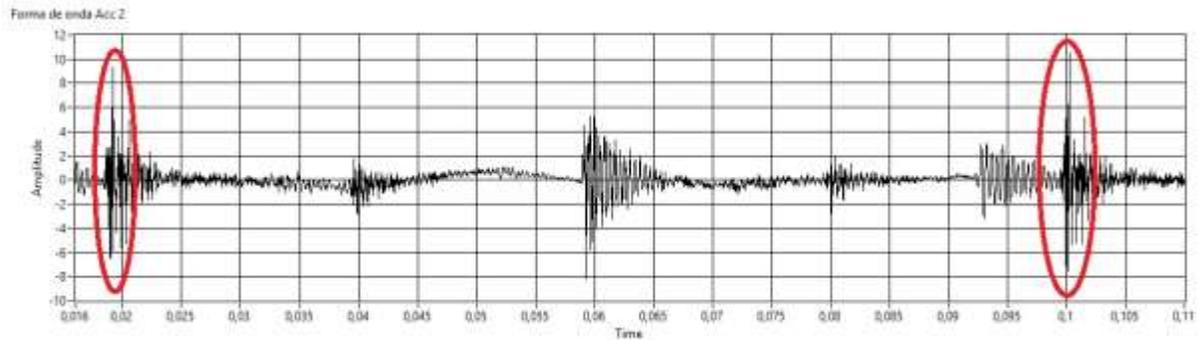


Fig.36 Forma de onda del impacto del pistón para un ciclo

En la fig. 36 se puede obtener el periodo del pistón  $0,1s-0,019s=0,081 s$

$T=0,081 s$

Largo de carrera =102 mm

Con estos datos podemos obtener la velocidad media del pistón

$$velocidad\ media = \frac{2*Lc}{tiempo} = \frac{2*0,102}{0,081} = 2,5 \text{ (m/s)}, \text{ comprobando con otra formula}$$

$$velocidadmedia = \frac{rpm*2*Lc}{60} = \frac{741*2*0,102}{60} = 2,5 \text{ (m/s)}$$

En la gran mayoría de los casos no se analiza la forma de onda de las vibraciones por ser demasiado compleja, recordemos que la forma de onda rara vez es armónica simple lo más normal es que sea una forma de onda compleja, esto se debe a que al sensor llegan simultáneamente vibraciones de distintas causas y el sensor capta la suma de ellas.

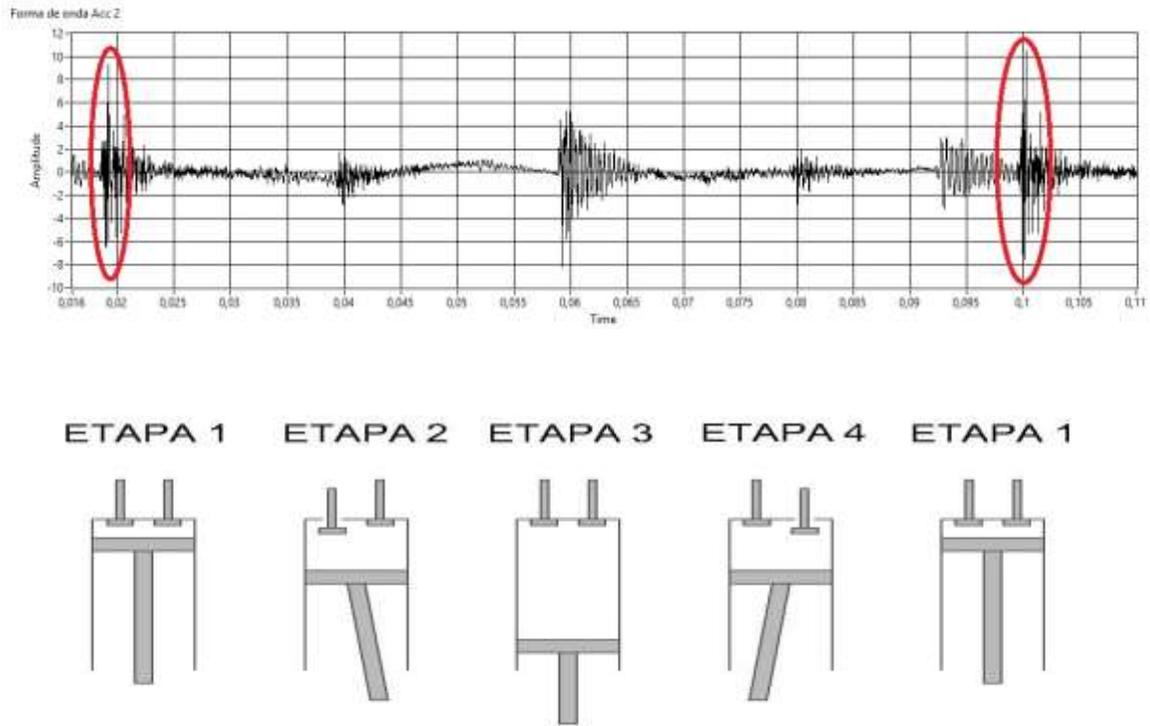


Fig.37 Relación entre forma de onda y fases de la compresión.

- Etapa 1: el pistón alcanza el punto muerto superior (PMS) de la carrera, válvulas cerradas.
- Etapa 2: el pistón baja aumentando el volumen de la recámara, la válvula de admisión se abre, este proceso ocurre a presión constante.
- Etapa 3: el pistón alcanza el punto muerto inferior (PMI) de la carrera, válvulas cerradas, luego el pistón sube comprimiendo el aire en el interior del cilindro.
- Etapa 4: se alcanza la presión del interior del estanque, se abre la válvula de descarga. Luego el pistón sigue subiendo hasta el PMS de la carrera.

## Capítulo 5

### Banco de pruebas GILKES motor-bomba-turbina

Equipo de uso académico del año 1973, que consta con motor trifásico, bomba de 5 álabes, y turbina Francis de 6 álabes, respectivamente conectados

- Motor marca Ormerod Hodgs, 1, 5 kW, 220 V.
- Bomba marca Gilkes Pumps, de 5 álabes
- Turbina Francis de 6 álabes
- Tanque de láminas de acero que contiene el agua, transportable a través de ruedas en su base



Fig.38 Banco de pruebas GILKES motor-bomba-turbina.

### 5.1.- Forma de onda bomba

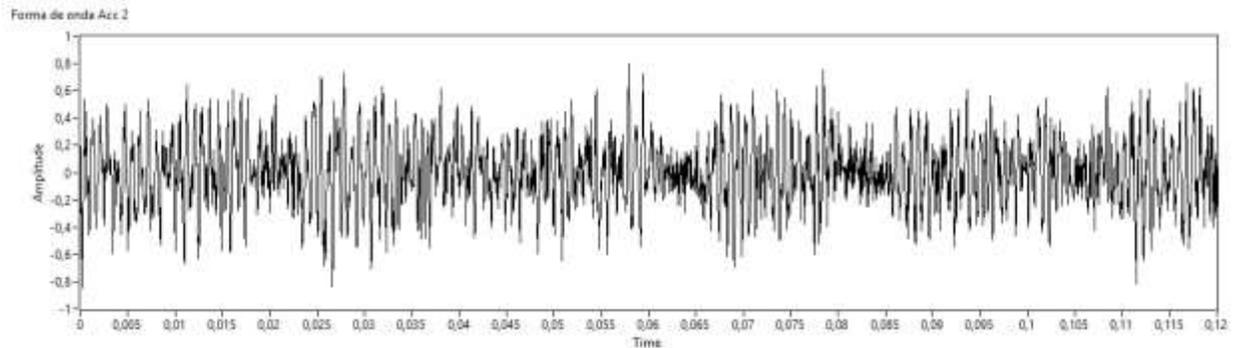


Fig.39 Forma de onda motor de la bomba dirección horizontal.

### 5.2.-Análisis espectral banco de pruebas GILKES motor-bomba-turbina

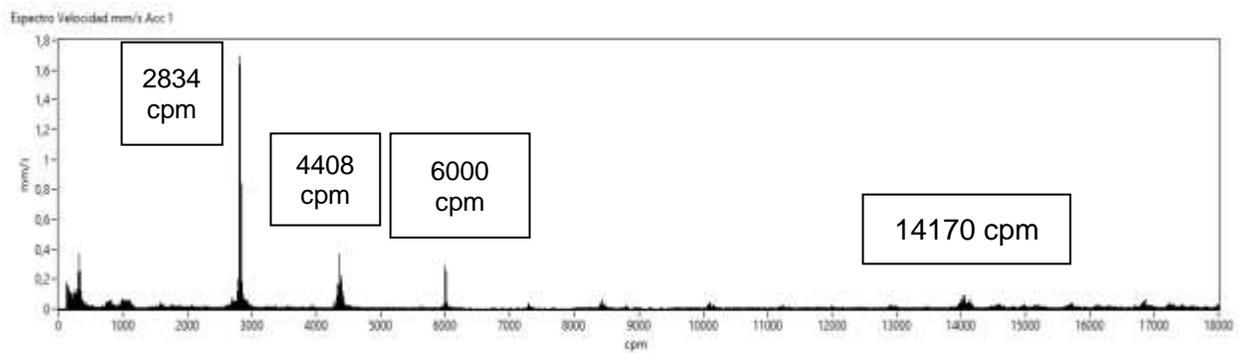


Fig.40 Espectro en velocidad motor lado ventilador dirección horizontal.

En la fig.40 se distingue la velocidad de giro del motor, frecuencia paso de alabes de la turbina, frecuencia de línea y frecuencia de paso de alabes bomba (5X2834 cpm)

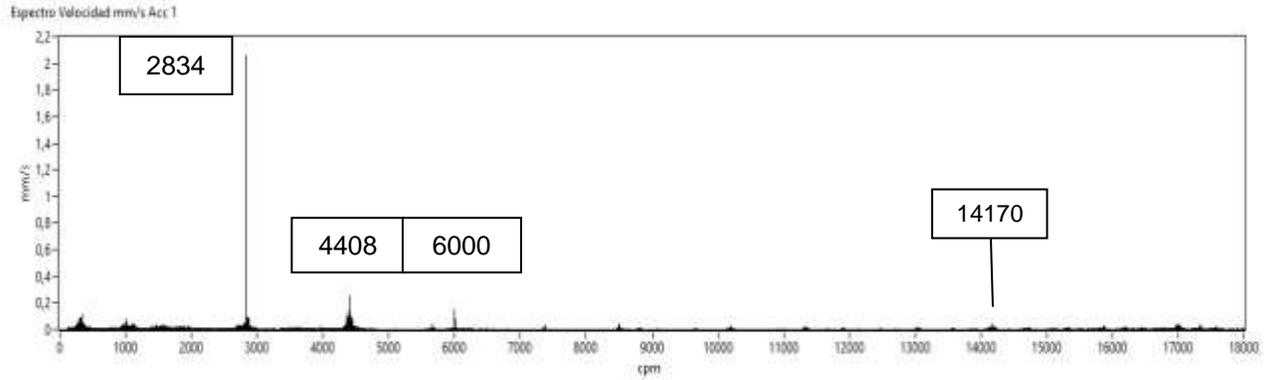


Fig.41 Espectro en velocidad motor lado acople dirección horizontal.

En la fig.41 se distingue la velocidad de giro del motor, frecuencia paso de alabes de la turbina, frecuencia de línea y frecuencia de paso de alabes bomba (5X2834 cpm)

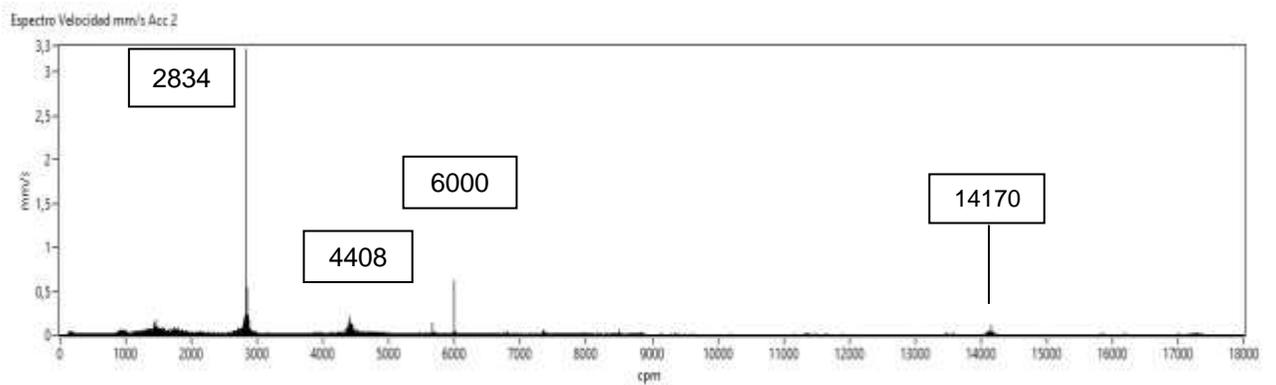


Fig.42 Espectro en velocidad turbina dirección horizontal.

En la fig.42 se distinguen nuevamente las velocidades propias del conjunto motor-bomba-turbina

### 5.3 Análisis severidad motor-bomba-turbina

Se utiliza la norma ISO 2372 la cual regula la cantidad de vibraciones del equipo para evitar fatiga de los elementos de la máquina y bases soportes. La severidad vibratoria queda determinada por el mayor valor obtenido se la Velocidad RMS medida en un rango de 10 a 1000 HZ.

Punto	Descripción	Dirección	Valor velocidad RMS mm/s
1	Motor lado ventilador	Horizontal	<b>3,1</b>
		Vertical	2,05
2	Motor lado acople	Horizontal	1,7
		Vertical	0,89

Tabla 9. Valores velocidad RMS, en cada punto del motor.

Los niveles de severidad vibratoria para motor de la bomba se encuentran dentro de la condición **insatisfactoria** de acuerdo a la norma ISO 2372, para máquinas de CLASE I. El mayor valor observado corresponde en el punto 1 perteneciente al motor, donde se registró un valor máximo de 3,2 (mm/s) RMS en el sentido horizontal.

## Capítulo 6

### Propuesta de experiencia para el laboratorio de vibraciones

A continuación se presenta una propuesta de experiencia para los alumnos que se interesen por el análisis vibratorio, para ello se ha elaborado una guía que contiene los elementos básicos que debieran manejar con fluidez, como son el manejo de los equipos para la toma de datos, comprender la interacción entre ellos, conocer los equipos a los cuales se les aplicara el análisis vibratorio y la manera como se debe analizar los datos obtenidos. Para lograr que esto suceda se debe utilizar este seminario como base para nuevas mediciones de esta manera comparar resultados, llegar a nuevas conclusiones monitorear el deterioro de los equipos o servir de referencia si se aplicase alguna reparación en los equipos.

La experiencia mencionada se realizaría en el laboratorio de termofluidos del departamento de Mecánica y el PTM perteneciente a ICIMAD.

Los objetivos específicos:

- Identificar los puntos de medición.
- Leer placa del motor eléctrico.
- Identificar los componentes de las maquinas en los espectros obtenidos.
- Identificar posibles anomalías en las maquinas medidas.

Nombre de máquina		
Potencia del motor (según placa)		
Velocidad del motor (según placa)		
Rodamientos motor (según placa)	Lado ventilador	Lado polea
Largo de la correa		

Tabla 10. Ficha de datos propuesta para la experiencia (general).

- RMS en los puntos de medición

Punto 1\_\_\_\_\_ RMS

Punto 2\_\_\_\_\_ RMS

Punto 3\_\_\_\_\_ RMS

- Obtener velocidad de la correa según formula

$$f = \frac{\pi * d * n}{L}$$

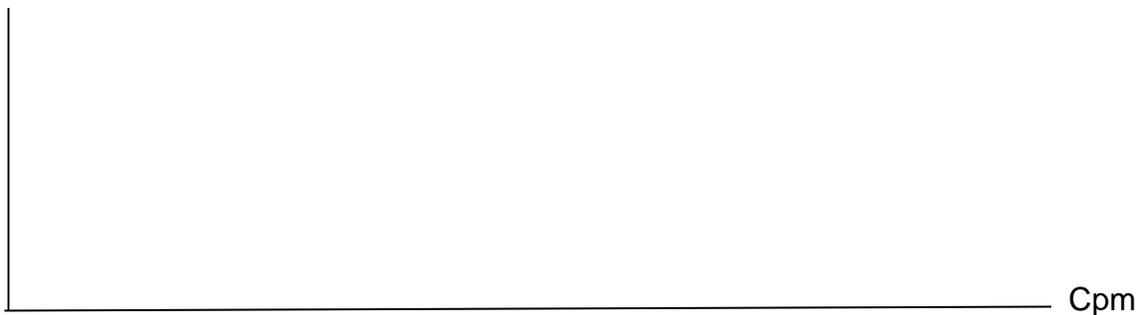
$d$  = diámetro polea

$n$  = velocidad polea

$L$  = largo correa

- Dibujar espectro representativo del equipo, identificando sus componentes

Amplitud



- Identifique los diferentes puntos relevantes del espectro

- Calcular frecuencia de los componentes de los rodamientos.

$$FTF = \frac{RPM}{2} \left( 1 - \frac{d}{dm} \cos\phi \right)$$

$$BPFO = \frac{RPM * n}{2} \left( 1 - \frac{d}{dm} \cos\phi \right)$$

$$BPFI = \frac{RPM * n}{2} \left( 1 + \frac{d}{dm} \cos\phi \right)$$

$$BSF = \frac{RPM * dm}{2d} \left( 1 - \left( \frac{d}{dm} \right)^2 (\cos\phi)^2 \right)$$

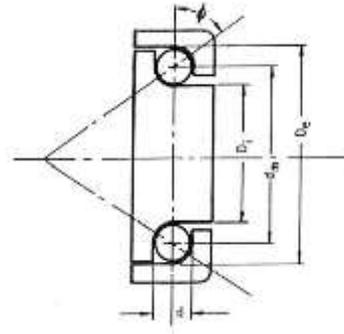


Fig. 43 Frecuencias características de falla en rodamiento.

FTF: frecuencia de rotación del porta elementos o jaula que contiene los elementos rodantes.

BPFO: frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista externa.

BPFI: frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista interna.

BSF: frecuencia de giro de los elementos rodantes.

RPM: frecuencia de rotación del eje (cpm).

Di: diámetro pista interna.

De: diámetro pista externa.

n: número de elementos rodantes.

dm: diámetro entre los centros de los elementos rodantes (diámetro medio)

d: diámetro de los elementos rodantes.

φ: ángulo de contacto.

## Conclusión

Se obtuvo información valiosa luego de analizar uno a uno los espectros obtenidos, lo que brindó una herramienta esencial para detectar el estado de diferentes equipos rotativos: sierra hincha carpintera, sierra turbina, carro sierra turbina, compresor alternativo, equipo bomba-turbina.

Teniendo como respaldo los espectros obtenidos, la comprensión del funcionamiento de los equipos, análisis de severidad vibratorias es que se puede concluir lo siguiente.

Observando el espectro de la sierra carpintera se llegó a la decisión de un cambio de correa pues se encontraba en muy mal estado presentando grietas y obvio desgaste propio del uso prolongado.

El Huinche se encuentra en pésimo estado operando, esto producto del rotor excéntrico que se detectó mediante el análisis espectral en el cual se demuestra en la gran amplitud de la frecuencia  $2xFL$ . Lo anterior quedo corroborado mediante el análisis de severidad vibratoria que arrojó una condición **inacceptable**. Se llegó a la conclusión de que el VDF está influyendo negativamente en el comportamiento del motor, haciendo circular una corriente de alta frecuencia que tarde o temprano perjudicara gravemente a los rodamientos de este último.

El conjunto sierra presenta el rodamiento 6212 en mal estado en su pista externa producto que el motor no se encuentra alineado correctamente con las poleas lo que provocó una sobre carga en el eje, por lo tanto en el rodamiento, al no estar bien alineada la polea algunas correas se encontraban sueltas en cambio otras muy apretadas lo que se vio reflejado por la presencia de múltiples armónicos de las correas en el espectro del motor.

El compresor presenta solo las frecuencias propias de su funcionamiento correas, motor, eje pistones. Si bien el nivel de vibraciones es alto y existen varios armónicos de la velocidad de giro de las correas esto se debe al tipo de máquina que estamos analizando. No es necesario una mantención correctiva pues es normal en su funcionamiento el nivel de vibraciones, el compresor está diseñado para resistir de buena manera los movimientos bruscos que se generan en el proceso de compresión, si estuviera conectado con cañerías por ejemplo o equipos aledaños se debería tomar en consideración las vibraciones que este provoca.

El conjunto motor-bomba-turbina solo presenta las frecuencias características normales a su funcionamiento pudiéndose observar en sus espectros la velocidad del motor, velocidad del paso de alabes de la bomba velocidad de giro de la turbina y la velocidad de paso de alabes de la turbina. El análisis de severidad vibratoria aplicada en el motor da una categoría de insatisfactoria que contrasta con lo observado en el espectro, esto es producto a que el conjunto está montado sobre un carro de transporte con ruedas el cual no brinda rigidez al conjunto lo que provoca que el motor y bomba no tengan como amortiguar las vibraciones. No es necesario realizar un mantenimiento correctivo en este conjunto tampoco pues se utiliza en cortos periodos de tiempo durante las experiencias de laboratorio. Además no se observaron frecuencias de falla de rodamientos u otro componente.

## Bibliografía

Dr. Saavedra Gonzales Pedro. Bases del mantenimiento predictivo y el diagnóstico de fallas en máquinas rotatorias. Concepción, Chile. Universidad de Concepción, Depto. de Ingeniería Mecánica.

Daza Hernández Gonzalo. Apunte del curso “vibraciones mecánicas”. Concepción, Chile. Universidad Técnica Federico Santa María, sede Concepción, 2007.

Zenteno Juan. Reconocimiento de frecuencia de falla. Concepción, Chile. LM-Ingenieros EIRL Mantenimiento Predictivo.