



ANÁLISIS DE VIBRACIÓN EN MAQUINARIA ROTATIVA

MODALIDAD DE TITULACIÓN:

“TRABAJO PROFESIONAL”

NOMBRE DEL ALUMNO: ANTEZANA CASTRO JAVIER

NÚMERO DE CUENTA: 304558014

CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA

ASESOR: M.I. ROGELIO DARÍO GUTIÉRREZ CARRILLO

AÑO: 2013

ÍNDICE

Introducción	3
1. Descripción de la empresa	6
Historia, Organigrama, Misión, Visión	
2. Descripción del puesto de trabajo	7
3. Descripción de la participación del alumno en la empresa	
Antecedentes. Vibración	8
Escalas	9
Transductores, parámetros y unidades de medición	9
Vibración global, Normas ISO 2372 e ISO 10816	11
Análisis espectral	15
Software para análisis de vibración Condmaster Ruby	17
Casos reales de vibración en maquinaria rotativa	18
Monitoreo de rodamientos, técnicas de detección SPM	22
4. Conclusiones	25
5. Referencias	27
Glosario	28
Anexo	

Introducción

Las técnicas de mantenimiento industrial, han ido evolucionando con los años gracias a las nuevas tecnologías disponibles. La modernización de la instrumentación ha sido sumamente relevante para mejorar la eficiencia de la producción en fábricas, reducir costos de reparación, y costos por paros no planeados.

Alrededor de seis décadas atrás [1], las técnicas que hoy se conocen no existían. Una máquina se reparaba hasta que fallaba, estas fallas llamadas catastróficas implicaban tiempos de reparación muy largos, imprevistos y a veces el daño era tan grande que los costos en refacciones y mano de obra eran incosteables, saber la condición de la máquina era muy difícil. A este tipo de mantenimiento se le conoce como *Mantenimiento Correctivo*. Se caracteriza por requerir de grandes inventarios, tiempo extra para las reparaciones, fallas catastróficas inevitables.

Con el paso del tiempo, la experiencia de los técnicos y algunos datos estadísticos de fallas de las máquinas; los ingenieros de mantenimiento se dieron cuenta que podían estimar el tiempo de vida útil de sus equipos. Esto les permitía llevar a cabo un plan de mantenimiento periódico en el cual, los paros inesperados de producción se reducían y podían elegir el momento menos inoportuno antes de la falla para realizar lo que se conoce como *Mantenimiento Preventivo*.

Un estudio de la compañía de aviación American Airlines, reveló que la probabilidad de falla en un equipo se incrementa después de intervenciones periódicas y esto se atribuye a tres causas: refacciones defectuosas, procedimientos de mantenimiento inadecuados, cambio de lubricantes y del programa de actividades.

Cabe mencionar que si bien, los paros inesperados se redujeron en gran manera, el costo de este tipo de práctica es demasiado elevado y poco justificable.

Para llevar a cabo un mantenimiento preventivo, se requiere de grandes cantidades de refacciones en almacén, lo cual representa un gasto muchas veces innecesario. En ocasiones las piezas o refacciones reemplazadas aún están en buenas condiciones y se convierten en desperdicio que al final es dinero. Además se debe parar la producción cada determinado tiempo aún cuando no es necesario, repercutiendo en la utilidad de la empresa.

Con los constantes avances tecnológicos, se desarrollaron instrumentos y técnicas para evaluar la condición de la maquinaria. En un principio estas técnicas por ser nuevas causaban desconfianza. Además de representar altos costos que en realidad deberían ser vistos como inversión. También se requirió capacitación del personal técnico para su óptimo funcionamiento, etc. A largo plazo, esta técnica llamada *Mantenimiento Predictivo* es mucho mejor que cualquiera de las anteriores. Los instrumentos utilizados proporcionan información de la condición de la máquina medida en tiempo real. La información obtenida, ayuda a anticiparse a las fallas, muchas veces catastróficas. Saber el estado de la máquina permite realizar acciones que permitan prolongar la vida útil de los componentes y por ende de la máquina.

Existen cuatro técnicas principales que conforman al mantenimiento predictivo:

1. Análisis de vibración
2. Ultrasonido
3. Análisis de lubricantes
4. Termografía

Actualmente se habla de una evolución del *Mantenimiento Predictivo* llamada *Mantenimiento Proactivo*, el cual va un paso adelante enfocándose a determinar no sólo la falla, también la causa raíz de la misma y su solución. [1]

Cada aplicación requiere de técnicas específicas; en este reporte se profundizará sobre la técnica de análisis de vibración, su justificación, para qué se utiliza y qué información se puede obtener.

Como se mencionó antes, existen diversas técnicas que conforman al monitoreo de la condición de las máquinas. Con la ayuda de éstas se puede conocer si existe algún mal funcionamiento o deterioro de manera cuantitativa. También se puede utilizar esta información para asistir alguna tarea de mantenimiento correctivo. [2]

Un posible esquema de cómo implementar el monitoreo de condición de maquinaria es el siguiente:

1. Identificar máquinas críticas (seguridad/costo)
2. Identificar modos de falla
3. Enlistar todos los componentes
 - Modos esperados de falla
 - ¿Se puede generar una gráfica de tendencia?
4. Encontrar el parámetro de monitoreo más sensible
 - Que las averías o daños puedan ser detectados aún cuando la condición general sea buena
5. Usar al máximo la instrumentación disponible
 - Decidir qué nueva instrumentación se necesita
6. Decidir cuál es la mejor manera de monitoreo
 - LLF(look, listen, feel), manual, monitoreo permanente
7. Revisar la practicidad del instrumento
8. Estimar reducción de costos con respecto a un mantenimiento preventivo o correctivo.
9. Realizar la interpretación
10. Llevar a cabo pruebas demostrativas en campo

Se deben establecer los posibles fallos que ocurrirán eventualmente, mediante experiencia sobre la máquina monitoreada. Se requiere monitorear parámetros que puedan arrojar síntomas a través del tiempo para crear una tendencia.

Es muy importante realizar un estimado sobre los beneficios económicos que tiene el monitoreo de la condición sobre el mantenimiento preventivo o correctivo tras una falla catastrófica. Y después de la implementación actualizar y ajustar esta información.

Generalmente en todas las industrias se requiere que el monitoreo de la condición se componga de varias técnicas multi-disciplinarias siendo el análisis de vibración una muy importante pero no la única.

El alcance del análisis de vibración es muy grande, casi todas las máquinas se pueden beneficiar de esta técnica salvo aquellas que operan a velocidades menores a 20 rpm¹ y aquellas donde se tienen aisladores o amortiguamiento entre la fuente y el sensor.

La justificación económica con respecto a la inversión depende de la máquina, qué tan crítica sea así como del proceso mismo.

Cuando el proceso pudiera cobrar vidas humanas por un mal funcionamiento, por ejemplo, en aviación, minería o ambientes explosivos, no solamente se requieren sistemas de seguridad específicos, también el monitoreo es indispensable.

La empresa consultora *March Consulting Group* (1989) realizó una clasificación de la criticidad de las industrias compuesta por 3 categorías A, B y C [2]. No causa sorpresa el saber que el análisis de vibración es mayormente utilizado en la categoría A, la cual incluye industrias como las siguientes:

- Aeroespacial
- Químicas/Petroquímicas
- Defensa
- Manufactura metal-mecánica
- Plantas de generación
- Aceites y Gas

Sin embargo, en la actualidad el análisis de vibración también es utilizado en la categoría B, en donde se incluyen las siguientes:

- Automotriz
- Eléctrica-Electrónica
- Alimentos, bebidas y tabaco
- Instrumentación de ingeniería
- Manufactura de bienes de consumo metálicos
- Ingeniería mecánica
- Equipo de oficina

En la categoría C, se encuentran otras compañías que debido a su sobrada capacidad, turnos de operación menores, bajos costos, etc. Su índice de criticidad es bajo. En estas empresas, el análisis de vibración solamente puede justificarse como una reducción de costos directos en tareas de mantenimiento.

En el capítulo 3 de este reporte se hablará de los aspectos más importantes del análisis de vibración, haciendo especial énfasis en los espectros de vibración. En el monitoreo, hablar de vibración es referirse al rango de frecuencias que van desde menos de 1Hz y hasta 25KHz.

Además se hablará del método de impulsos de choque, que ocurre a altas frecuencias (alrededor de 40KHz) por estar relacionado y ser utilizado para problemas similares.

El objetivo principal de este reporte es, la divulgación de las técnicas utilizadas para el monitoreo de maquinaria rotativa, específicamente del análisis de vibración y el método patentado de pulso de choques en mi área y puesto de trabajo.

¹ En la actualidad el fabricante SPM Instrument, ha desarrollado un método que permite monitorear rodamientos a velocidades de hasta 1 RPM.

Capítulo 1 “Descripción de la empresa”

La empresa MPC, Mantenimiento Productivo Computarizado S.A. de C.V., es una empresa privada mexicana, fundada el 3 de marzo de 1996. Inició con la venta de instrumentos para el análisis de vibración, monitoreo de rodamientos, checadores de motores y equipo de análisis de maquinaria de la marca sueca SPM Instrument®. Teniendo desde entonces la representación a nivel nacional de la marca.

Dedicada al área del mantenimiento predictivo y proactivo desde hace 17 años. Los principales servicios son, la venta y distribución de equipos de diversas técnicas predictivas como son: análisis de vibración, alineación, montaje de rodamientos, cámaras termográficas. Además de la impartición de cursos de: tecnología de rodamientos, lubricación, análisis de vibración entre otras técnicas del mantenimiento predictivo.

En el año 1998 se agregó la marca sueca Fixturlaser®, fabricantes de alineadores mediante rayo láser, otorgándole la representación de la marca a nivel nacional.

También ese mismo año, se obtuvo la concesión para la representación de la marca inglesa Rayhome LTD, fabricante de lanas pre cortadas de acero inoxidable para alineación.

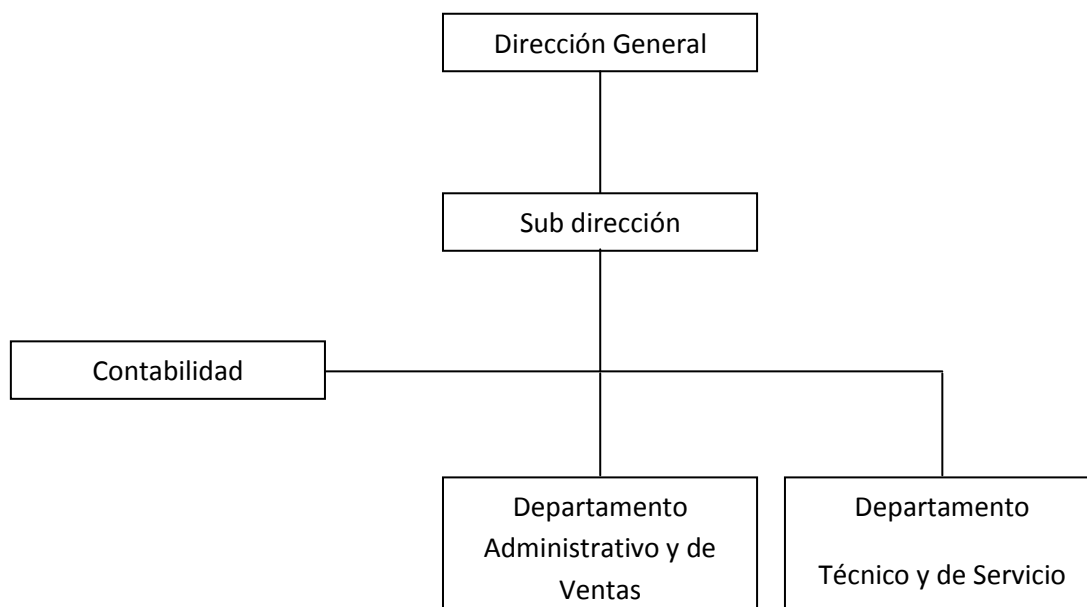
En el año 2000, ingresa a la lista de productos la marca holandesa BEGA Tools, la cual fabrica herramientas para montaje y desmontaje de rodamientos (calentadores por inducción, extractores hidráulicos y mecánicos) así como herramientas especiales.

En 2008, ingresa la última marca de las que se tiene la representación. Se trata de CTC, Inc. empresa estadounidense dedicada a la fabricación de transductores y sensores para monitoreo y análisis de maquinaria. Fabrica transductores de proximidad, velocidad (sísmicos), acelerómetros y transductores de vibración IEPE. Además de cables y adaptadores de conexión.

La empresa desde su fundación ha tenido el objetivo principal de proporcionar a la industria el conocimiento y herramientas necesarios para la implementación del mantenimiento predictivo, y aprovechar las ventajas que éste nos brinda.

La misión de la empresa es: “ser una empresa confiable y reconocida en el ámbito industrial a nivel nacional”.

Organigrama



Capítulo 2. Descripción del puesto de trabajo

En el puesto de Ingeniero de Aplicación y Servicio Técnico. Desempeño varias tareas, la principal y a la que más me he enfocado es al análisis de vibración en maquinaria rotativa.

Dentro del puesto me desenvuelvo en diferentes áreas:

- Ventas técnicas desde la oficina así como demostraciones en campo.
- Soporte a usuarios sobre software e instrumentación.
- Capacitación a usuarios y distribuidores sobre el manejo de los instrumentos y software.
- Servicio en campo de análisis de vibración y alineación láser de maquinaria rotativa.
- Calibración de instrumentos de la marca SPM instrument®.
- Traducción y Publicación de documentos en la página de la empresa.

Para iniciar como analista de vibración requerí la certificación de Analista de Vibración nivel I en el mes de Diciembre.

La certificación la obtuve en la ciudad de Puebla, después de un curso de cuatro días. Actualmente me encuentro certificado por el Vibration Institute de Estados Unidos, como analista nivel I, según la norma ISO 18436-2.

Al tener la representación de la marca sueca SPM Instrument®, tuve que certificarme en el manejo de los nuevos instrumentos para venta y capacitación a distribuidores y usuarios. La certificación se llevo a cabo en la ciudad de Bogotá en Colombia, donde obtuve el certificado después de un curso de cinco días, el pasado mes de Noviembre.

Capítulo 3 “Descripción de la participación en la empresa”

En este capítulo se describe la aplicación del análisis de vibración en maquinaria rotativa. Es una técnica muy importante en la ingeniería de mantenimiento industrial, pues es clave para la planeación de programas de mantenimiento predictivo y correctivo. Es una poderosa herramienta para saber las condiciones de operación de la maquinaria y de cada uno de sus componentes.

¿Qué es vibración?

Una vibración es un movimiento oscilante en cualquier dirección en el espacio que parte de un punto de equilibrio [3]. Generalmente en una máquina rotativa las vibraciones son de naturaleza periódica, es decir, se repiten cada determinado tiempo (usualmente con cada giro del eje de la máquina). Las formas más simples de vibración son las que varían en el tiempo en forma de ondas sinusoidales. Existen vibraciones más complejas como las resultantes de la superposición de varias ondas sinusoidales (generalmente acompañadas de armónicos).

La figura siguiente muestra una onda sinusoidal con amplitud y frecuencia constante. El desplazamiento de una partícula sobre esta onda se puede expresar matemáticamente como:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi) \quad \text{Figura 2.1(a)}$$

Donde: x = desplazamiento instantáneo

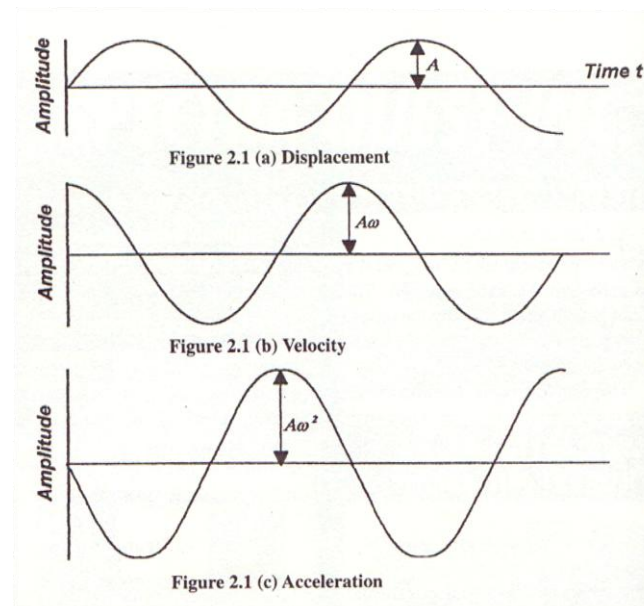
A = amplitud máxima

ω = frecuencia angular ($2\pi f$)

f = frecuencia

t = tiempo

ϕ = desplazamiento angular inicial



La partícula tiene también una velocidad y una aceleración instantánea que se calculan realizando la primera y segunda derivada con respecto al tiempo de la función de desplazamiento respectivamente.

$$v(t)=dx(t)/dt = A \omega \cos(\omega t+ \phi) \text{ Figura 2.1 (b)}$$

$$a(t)=dv(t)/dt = -A \omega^2 \text{sen}(\omega t+ \phi) \text{ Figura 2.1 (c)}$$

En la actualidad se ha adoptado a la velocidad como la unidad principal para diagnosticar problemas en maquinaria rotativa, sin embargo, en algunas aplicaciones como en maquinaria con velocidades bajas de operación, se utiliza el desplazamiento P-P (pico a pico) y en otras, la aceleración por ejemplo en rodamientos rígidos de bolas [4].

En la práctica sin embargo, no es común encontrar señales de vibración puramente sinusoidales, sino una combinación de armónicas con diferente amplitud, frecuencia y ángulos de fase, como se muestra en la figura 2.2.

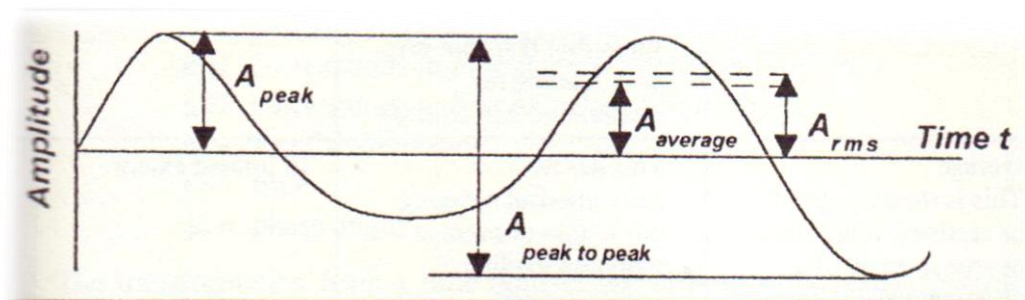


Figure 2.2 – Illustration of the various ways of defining vibration level

Escalas

Es importante mencionar que existen diferentes escalas de medición en el análisis de vibraciones, como se muestra en la figura anterior. Las más comunes son: Pico-Pico (P-P), Pico (0-P) y RMS (root mean square) o valor efectivo.

En la actualidad se utiliza en la gran parte de los casos la escala RMS, pues los valores de vibración en las normas ISO 10816 e ISO 2372, se encuentran en RMS.

La importancia de saber la escala con la que se realiza la medición y el análisis es precisamente esa, la de poder comparar la magnitud o severidad de la vibración con los valores establecidos como estándares en las diferentes normas. Además para el monitoreo de una máquina es importante que las mediciones de la vibración se realice con la misma escala y el mismo rango de frecuencias.

Transductores, parámetros y unidades de medición

Los parámetros utilizados son: desplazamiento, velocidad y aceleración. Elegir el parámetro depende del transductor que se utilizará para la medición, y la elección del transductor depende de la aplicación.

Generalmente para análisis de vibración se utilizan transductores (acelerómetros), los cuales están compuestos de materiales piezoeléctricos que transforman la excitación mecánica en una señal de voltaje.

Existen también transductores de velocidad, sin embargo, son más costosos y frágiles. Debido a la naturaleza y comportamiento de la señal de vibración es más costoso y da mejores resultados utilizar acelerómetros y llevar a cabo un proceso de integración mediante circuitos digitales presentes en los instrumentos.

En la industria se utiliza la escala Pico – Pico, únicamente con transductores de proximidad cuyo funcionamiento es el de las corrientes parásitas de Eddy. Mediante estos transductores se calcula el desplazamiento relativo de una flecha a los alojamientos o chumaceras donde se encuentran los transductores.

La figura 1 muestra el comportamiento de los diferentes parámetros a distintas velocidades de operación o frecuencia.

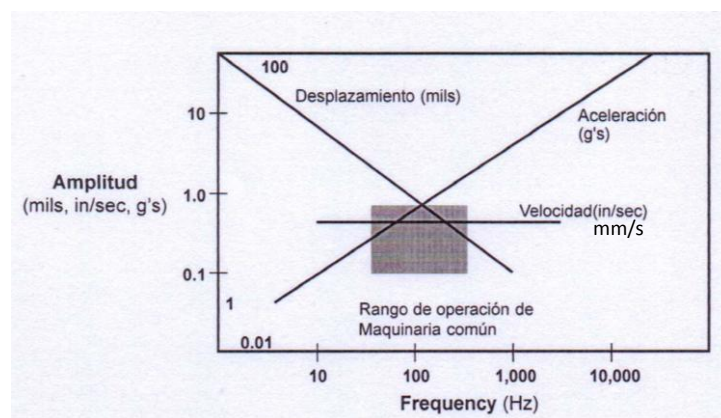


Figura 1. Comportamiento de los transductores de vibración.

Como se puede observar, el parámetro de velocidad es el que se comporta de manera lineal en un amplio rango de frecuencias.

La aceleración se comporta en un rango de frecuencias muy amplio también incluyendo bajas frecuencias que no podríamos captar finamente con la velocidad y hasta frecuencias muy altas que la velocidad de igual modo no captaría.

En cambio el desplazamiento se comporta de manera contraria a la aceleración, la amplitud captada a bajas frecuencias es alta y se va perdiendo al aumentar la frecuencia.

Esto último es sumamente importante para el análisis espectral, pues aunque se utilizan acelerómetros principalmente, es importante configurar correctamente los instrumentos para lograr obtener la información de la máquina que se requiere.

De manera general, cuando se quieren observar fenómenos de desbalance, desalineación solturas mecánicas, entre otros, se selecciona el parámetro de velocidad puesto que ocurre dentro de los 10,000Hz.

Cuando se desea monitorear elementos de alta frecuencia como son rodamientos y engranajes entre otros, se utiliza el parámetro de aceleración puesto que la energía de los impactos de estos elementos es tan baja que el parámetro de velocidad nos daría componentes de una

amplitud imperceptible. Los transductores sísmicos (acelerómetros) pueden captar señales en el rango de (0 a 40KHz).

Con lo último dicho, los daños en los rodamientos se presentarían en rangos mayores a 10 veces la velocidad de giro del eje y los problemas inerciales como desbalanceo y desalineación se presentarían en el rango de 1 a 10 veces la velocidad de giro del eje.

Vibración global

Es la vibración resultante, de la suma vectorial de las vibraciones de cada componente en una máquina. Al ser una cantidad vectorial, se tiene una magnitud y una dirección.

Todas las máquinas vibran al estar en funcionamiento, algunas vibran más que otras simplemente por su aplicación como por ejemplo las cribas. Para saber qué nivel de vibración es permisible en una máquina debemos tener una referencia.

Existen en la actualidad varias normas para maquinaria rotativa, sin embargo, las más utilizadas y más vigentes son las normas ISO 2372 e ISO 10816. La última es la más reciente.

La diferencia entre la norma ISO 2372 y la ISO 10816 es la clasificación de las máquinas y los parámetros que se toman en cuenta para la misma.

Norma ISO 2372

Vigente desde 1974, clasifica la severidad de la vibración en máquinas con velocidades de operación entre 600 y 12000 RPM.

Las principales características son:

- Rango de Velocidad (600-12000 RPM)
- Se requiere saber el valor global de vibración en escala RMS, en un rango de frecuencia entre 10 y 1000 Hz, distinguiendo varias clases de equipos rotativos según la siguiente tabla. [5]

Clase	Descripción
Clase I	Equipos pequeños hasta 15 kW.
Clase II	Equipos medios, de 15 a 75 kW o hasta 300 kW con cimentación especial.
Clase III	Equipos grandes, por encima de 75 kW con cimentación rígida o de 300 kW con cimentación especial.
Clase IV	Turbomaquinaria (equipos con RPM > velocidad crítica).

Tabla 1. Clasificación de máquinas según norma ISO 2372.

Una vez clasificada la máquina se evalúa el valor global obtenido, según la tabla 1 de severidad.

Velocidad (mm/s, rms)	Tipos de máquinas			
	Clase I	Clase II	Clase III	Clase IV
0,18 a 0,28	A			
0,28 a 0,45				
0,45 a 0,71				
0,71 a 1,12				
1,12 a 1,8	B			A
1,8 a 2,8				
2,8 a 4,5	C		B	A
4,5 a 7,1				
7,1 a 11,2	D			C
11,2 a 18				
18 a 28	D			

Tabla 2. Rangos de severidad de vibración según la norma ISO 2372. Las zonas indican lo siguiente: A-Buena, B-Satisfactoria, C-Insatisfactoria, D-Inaceptable.

Norma ISO 10816

Norma para la evaluación de la vibración de maquinaria rotativa, medida en partes no rotativas. Del año 1995, es una actualización a la anterior ISO 2372.

Los criterios son sólo aplicables a las vibraciones producidas por la máquina y no por aquellas que pudieran transmitirse a ella.

Se debe prestar atención al montaje de los transductores y se debe realizar la medición en tres direcciones: vertical, horizontal y axial. La medición se debe llevar a cabo cuando la máquina ha alcanzado un estado estable de operación y bajo condiciones nominales o específicas (p.e. velocidad, voltaje, flujo, presión y carga). En máquinas que operan a velocidad variable, se debe medir en las condiciones más críticas.

La norma consta de 6 partes [6]:

Parte 1 – Guías generales

Parte 2 – Turbinas de vapor y generadores que superen los 50 MW con velocidades típicas de trabajo de 1500, 1800, 3000 y 3600 RPM.

Esta parte no cuenta con ningún subgrupo, sin embargo, se hace una división en función de la velocidad de operación.

- 1500-1800 RPM
- 3000-3600 RPM

Parte 3 – Maquinaria industrial con potencia nominal por encima de 15KW y velocidades entre 120 y 15000 RPM.

En esta parte se encuentran la mayoría de los equipos industriales. Se divide en los siguientes grupos.

Grupo 1. Máquinas grandes con potencia nominal entre 300KW y 50MW; máquinas eléctricas con altura de eje $H > 315\text{mm}$

Grupo 2. Máquinas medianas con potencia nominal desde 15KW y hasta 300KW; máquinas eléctricas con altura de eje $160\text{mm} \leq H \leq 315\text{mm}$.

Grupo 3. Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor separado. (Flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15KW.

Grupo 4. Bombas con impulsor de múltiples álabes y con motor integrado. (Flujo centrífugo, axial o mixto) con potencia superior a 15KW.

Después se debe determinar el tipo de apoyo (rígido o flexible). Apoyo rígido se refiere a concreto. Todo lo demás es apoyo flexible.

Y por último la velocidad:

$\omega > 600 \text{ RPM}$

$\omega < 600 \text{ RPM}$

Parte 4 – Conjuntos movidos por turbinas de gas excluyendo los empleados en aeronáutica. Con potencia nominal mayor o igual a 3MW.

Para turbinas con velocidades altas p.e. 22000 RPM, se debe ajustar la frecuencia a 5000 Hz. (Normalmente auto ajustada en los instrumentos de medición).

Parte 5 – Conjuntos de máquinas en plantas de hidrogenación y bombeo (únicamente disponible en inglés).

Se divide en 4 grupos, especificados a detalle en la norma.

Parte 6 – Máquinas reciprocantes con potencia nominal mayor a 100KW.

La norma incluye 7 tablas de valores los cuales se deben seleccionar según los valores de vibración iniciales de la máquina.

Nota: La altura del eje H de una máquina está definida como la distancia medida entre la línea de centro del eje y el plano basal de la máquina misma.

La altura del eje H de una máquina sin patas o de una máquina con pies levantados o cualquier máquina vertical, se debe tomar como la altura de eje H de una máquina horizontal en el mismo marco básico. Cuando el soporte es desconocido, la mitad del diámetro de máquina puede ser utilizada. [5]

Análisis espectral

Como se vio al inicio de este capítulo, la señal en el tiempo de una máquina es la suma de señales de cada uno de sus componentes. El análisis de este tipo de señales, la mayoría de las veces resulta muy complejo.

Las señales de vibración como se mencionó, se conforman de magnitud o amplitud, periodo y frecuencia.

El procesamiento de señales mediante el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT), tiene una infinidad de aplicaciones, entre ellas, el análisis espectral de vibración.

El resultado de transformar la señal en el dominio del tiempo, al dominio de la frecuencia es lo que se conoce como “espectro de vibración”. Un espectro es un gráfico en donde se representa la señal global de vibración de la máquina mediante “componentes”, desglosando cada una de las señales provenientes de cada uno de los componentes de la máquina.

Una componente tiene dos parámetros principales para su análisis.

- 1) Amplitud: severidad de la vibración (energía).
- 2) Frecuencia: fuente de la vibración.

Un espectro tiene dos ejes (figura 2):

El eje de las ordenadas corresponde a la magnitud de las componentes y puede tener unidades de desplazamiento, velocidad o aceleración según la aplicación.

En el eje de las abscisas se encuentra el rango de frecuencias de la medición que va desde cero, hasta la frecuencia configurada por el usuario.

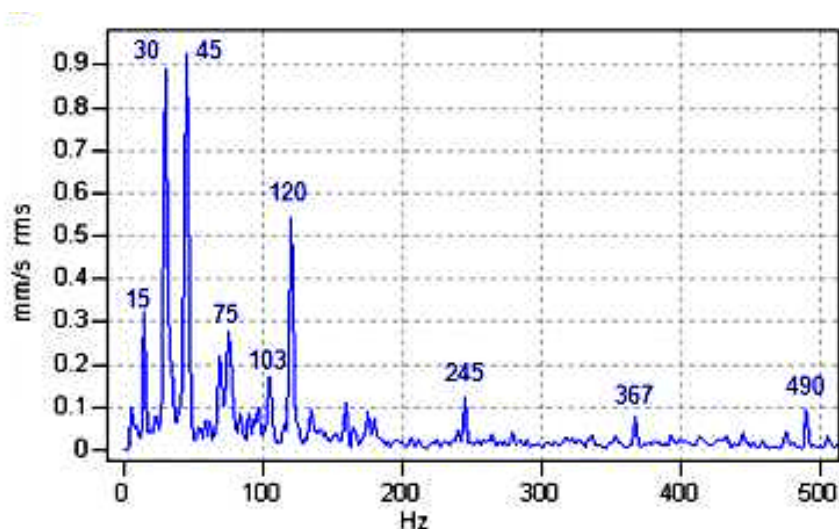


Figura 2. Espectro de vibración en unidades de velocidad valor rms y frecuencia en Hz.

A diferencia de un análisis de vibración global en donde únicamente sabemos cuánto está vibrando la máquina y si se encuentra dentro del rango permisible por las normas, con el análisis espectral podemos saber el valor global de vibración pero también, la energía que corresponde a cada componente de la máquina. Con esto se puede conocer la causa principal de la vibración y así atacar los problemas más graves en nuestra máquina.

Las unidades de los espectros de vibración se pueden configurar según la aplicación. Por ejemplo, para realizar un análisis de rodamientos o engranes, las unidades del espectro convenientes son las de aceleración, por ser de baja energía y de alta frecuencia.

Pero también se puede elegir la unidad de la frecuencia. Generalmente todos relacionan los hertz como unidad de frecuencia. Sin embargo, para efectos prácticos es más común el uso de ciclos por minuto (cpm) debido a la directa relación con las revoluciones por minuto (rpm) a las que gira el eje de la máquina.

Con los parámetros de amplitud y frecuencia, se tiene el 90% de información para determinar el problema en la máquina. El otro 10% se obtiene de la “fase” de la vibración.

La fase es un parámetro que nos indica cómo se está moviendo un punto de la máquina con respecto a otro, es muy útil para determinar problemas que ocurren a la misma frecuencia por ejemplo “rotor excéntrico y desbalance” los cuales ocurren a 1x la velocidad de giro. También se puede diferenciar entre los tipos de desbalance (estático, dinámico, etc.)

Existen diversas tablas de diagnóstico de averías en máquinas. Una de las más conocidas es la tabla de los Asociados Técnicos de Charlotte. En donde se representa cada una de las fallas comunes en una máquina y un espectro demostrativo de la forma que tendría un espectro real. (Para consultar la tabla completa vea el Apéndice)

TABLA I - CARTA ILUSTRADA DE DIAGNOSTICO DE VIBRACIÓN

FUENTE DEL PROBLEMA	ESPECTRO TÍPICO	RELACION DE FASE	OBSERVACIONES
Desbalanceo Estático A. Desbalanceo Estático	1X RADIAL		El Desbalanceo Estático estará en fase y estable. La amplitud debido al desbalanceo aumentará por el cuadrado de la velocidad incrementada estando por debajo de la primera crítica del rotor (un incremento de velocidad de 3x = una vibración a 9x mayor). 1XRPM siempre estará presente y por lo general domina el espectro. Puede ser corregido colocando un solo peso de corrección de balance en un plano en el Centro de Gravedad del Rotor (CG). Una diferencia de fase aproximadamente de 0° debe existir entre los Horizontales O&B/B, así como entre las Verticales O&B/B. Usualmente también ocurre una diferencia de fase aproximadamente de 90° entre las lecturas de fase Horizontal y Vertical en cada rodamiento del rotor desbalanceado (a 30°).
Desbalanceo de Par de Fuerzas B. Desbalanceo de Par de Fuerzas	1X RADIAL		Un Desbalanceo de Par de Fuerzas resulta en un desfase de 180° del movimiento en el mismo eje. 1XRPM siempre está presente y normalmente domina el espectro. La amplitud varía por el cuadrado de la velocidad incrementada por debajo de la primera velocidad crítica del rotor. Puede causar una alta vibración axial así como radial. La corrección requiere la colocación de los pesos de balance en al menos 2 planos. Note que debe existir una diferencia aproximada de 180° entre las Horizontales O&B/B así como entre las Verticales O&B/B. También usualmente ocurre una diferencia aproximada de 90° entre las lecturas Horizontal y Vertical en cada rodamiento (a 30°).
Desbalanceo Dinámico C. Desbalanceo Dinámico	1X RADIAL		El Desbalanceo Dinámico es el tipo de desbalanceo que se consigue más comúnmente y es una combinación de Desbalanceo estático y de par de fuerzas. 1XRPM domina el espectro y realmente necesita una corrección en 2 planos. Aquí la diferencia de fase Radial entre los rodamientos externos e internos puede estar en cualquier lugar del rango entre 0° y 180°. Sin embargo, la diferencia de fase Horizontal debe cuadrar usualmente con la diferencia de fase Vertical, cuando se comparan las mediciones de los rodamientos externos e internos (a 30°). Si el desbalanceo predomina una diferencia de fase de 90° resulta entre las lecturas Horizontal y Vertical de cada rodamiento (a 40°).
Desbalanceo de Rotor en Voladizo D. Desbalanceo de Rotor en Voladizo	1X AXIAL & RADIAL		El Desbalanceo de Rotor en Voladizo causa un alto 1XRPM en las direcciones Axial y Radial. Las lecturas Axiales tienden a estar en fase mientras que las lecturas de fase Radial pueden estar inestables. Sin embargo, las diferencias de fase Horizontal usualmente cuadrarán con las diferencias de fase Vertical en el rotor desbalanceado (a 30°). Los Rotores en Voladizo tienen desbalanceos Estáticos y de Par de Fuerzas, cada uno de los cuales requiere una corrección. Así, los pesos de corrección casi siempre tendrán que ser colocados en dos planos para contrarrestar ambos desbalanceos, el estático y el de par de fuerzas.
Rotor Excéntrico	1X MOTOR 1X RADIAL		La excentricidad ocurre cuando el centro de rotación está fuera de la línea de centro geométrico de una polea, engranaje, rodamiento, armadura del motor, etc. La vibración mayor ocurre a 1XRPM de componente excéntrico en una dirección a través de la línea que une el centro de ambos rotores. Comparativamente, las lecturas de fase Horizontales y Verticales usualmente difieren 0° o 180° (cada una de las cuales indica el movimiento en línea recta). El intentar balancear un rotor excéntrico resulta en reducir la vibración en un dirección radial pero incrementarla en la otra (dependiendo de la cantidad de excentricidad).
Eje Doblado	1X AXIAL 2X		Los problemas de Eje Doblado causan una alta vibración axial con un diferencia de fase axial tendiendo a 180° en el mismo componente de la máquina. La vibración dominante ocurre normalmente a 1X si está doblado cerca del centro del eje, pero ocurre a 2X si está doblado cerca del acople. (Ser cuidadoso al tomar en cuenta la orientación del transmisor para cada medición axial si usted volteó la dirección de la probeta). Use un indicador de dial para confirmar el doblar de eje.
Desalineación Angular A. Desalineación Angular	AXIAL 1X 2X 3X		La Desalineación Angular se caracteriza por una alta vibración axial. 180° fuera de fase a través del acople típicamente tendrá una vibración axial en 1XRPM y 2XRPM. Sin embargo no es inusual que tanto 1X, 2X, o 3X domine. Estos síntomas también pueden indicar problemas de acople. Una severa desalineación angular puede excitar muchas armónicas de 1XRPM. A diferencia de la soltura mecánica de tipo C, estas múltiples armónicas no tienen típicamente un incremento de ruido en el piso del espectro.

Tabla 4. Extracto de la carta ilustrada de diagnóstico de los asociados técnicos de Charlotte.

Cada componente en una máquina, vibra a una frecuencia específica. Todas ellas relacionadas a la frecuencia de giro del eje sobre el cual trabajan. De ésta se puede determinar qué está fallando en una máquina.

Los problemas que se presentan a una frecuencia igual a una vez la velocidad de giro, son aquellos que suceden una vez por cada revolución del eje. Por ejemplo, un desbalance provocará un movimiento o vibración una vez cada revolución que predomina en dirección radial debido a la mayor concentración de masa en un punto.

Es fácil apreciar que en máquinas montadas horizontalmente, los apoyos están diseñados para tener mayor rigidez en dirección vertical. Si el valor de vibración fuera mayor en esta dirección el desbalance pudiera ser ocasionado a esta falta de rigidez. En caso de que la máquina no tuviera problemas de rigidez la componente será más grande en dirección horizontal.

Adicionalmente un problema de rigidez en una máquina se podrá observar en un espectro tomado en dirección vertical, en el cual el piso del espectro se levantará además de presentar sub armónicos y medios armónicos de la velocidad del eje, dependiendo del tipo de soldadura presente.

Como se mencionó antes un espectro es el desglose de todas las frecuencias de cada uno de los componentes, es por eso que el análisis espectral es una herramienta tan importante pues se puede obtener mucha información en una sola tarea.

La interpretación de un espectro puede llevar bastante tiempo, pues se requiere un análisis profundo. Este análisis por lo tanto, debe ser justificable.

Según la teoría y las prácticas en la industria, dentro del monitoreo de maquinaria un análisis espectral se debe realizar cuando los valores de vibración global de la máquina están en alarma o cuando se observa un cambio mayor o igual al 30% del valor de referencia. [1]

Para realizar un análisis espectral existen en la actualidad varios programas, la gran mayoría de estos, son desarrollados por los fabricantes de los instrumentos. Estos programas llamados “programas maestros”, poseen librerías de información que han sido recopiladas de catálogos de casi todos los fabricantes de rodamientos, lubricantes, entre otros.

Estos programas son una gran herramienta para el análisis espectral pues facilitan muchos cálculos, reducen el tiempo de análisis permitiendo observar los espectros a color, ocultando frecuencias que no son de interés y muchas otras herramientas.

Condmaster Ruby®

El programa utilizado en la empresa es desarrollado por la marca SPM Instrument®. Este programa maestro llamado Condmaster Ruby® permite crear rutas de medición a manera de bases de datos, almacenando toda la información de una planta industrial.

En este programa se generan las máquinas, puntos de medición y las técnicas de medición que se realizarán. Toda esta información se transfiere al instrumento, ya sea portátil o de monitoreo en línea. Después de la obtención de los resultados, se envía la información a la base de datos en la computadora.

En la figura 3, se muestra una captura de pantalla de una base de datos realizada en una planta de distribución de Gas LP y amoníaco en Topolobampo, Sinaloa. Como se observa, se creó una carpeta para cada área según la designación de la empresa. Dentro de cada una de las carpetas, se crearon las máquinas a monitorear. En todas las máquinas se crearon los puntos de medición. Normalmente se analizan dos, lado libre y lado de carga. Y dentro de cada punto de medición, las técnicas.

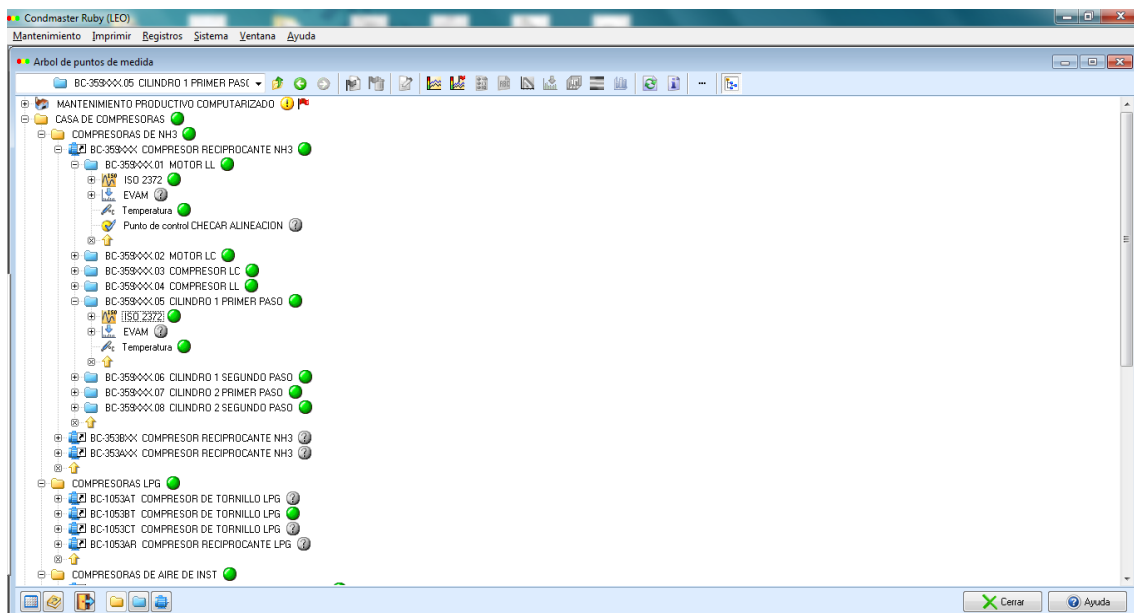


Figura 3. Captura de pantalla del programa maestro Condmaster Ruby®.

Estos programas normalmente tienen códigos de colores como se muestra, para indicar la condición general de la máquina. Dentro de cada técnica se muestran los resultados y gráficos.

En la figura 4 se muestra un espectro realizado en un compresor recíprocante de NH₃ en el lado libre. Con ayuda del programa maestro se pueden visualizar las bandas de frecuencia que corresponden a una falta de rigidez, esta máquina opera a una velocidad de 514RPM como se indica en la ventana superior derecha, con una vibración global de 1.29 mm/s (RMS) y una aceleración de 0.137g (RMS). Sin embargo, del lado izquierdo observamos los valores de vibración que generan cada una de las componentes.

La desalineación presente genera 0.54 mm/s, las holguras en la estructura 0.36 mm/s y el desbalance 0.40 mm/s.

En la figura 5, se muestran las bandas coincidentes con las frecuencias de desalineación.

Cabe mencionar que al ser una máquina montada horizontalmente, se esperan holguras en dirección radial predominantes en la medición horizontal.

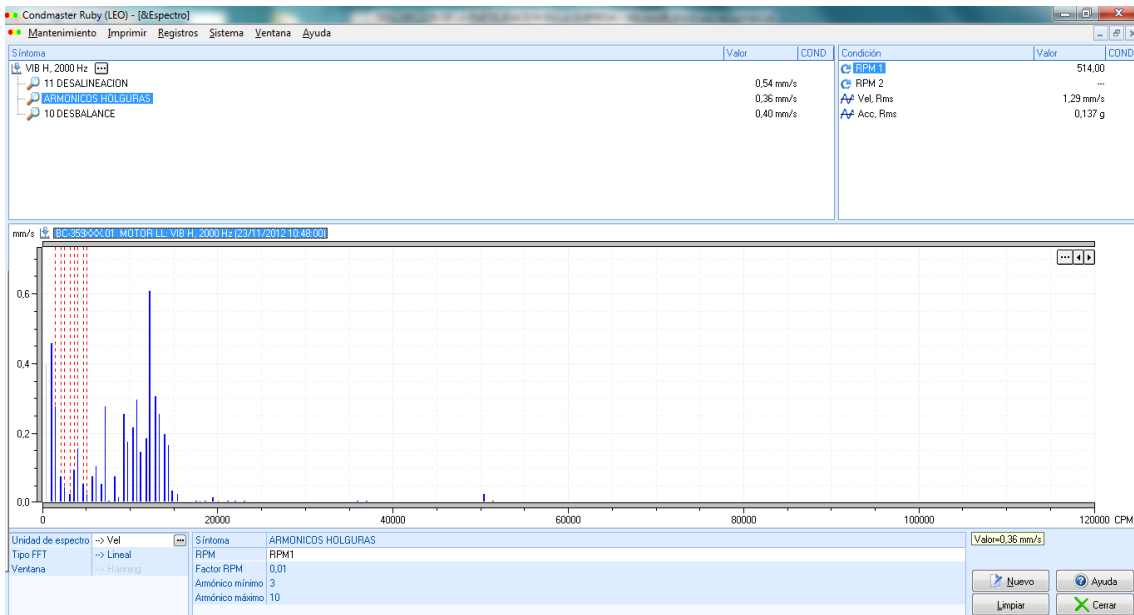


Figura 4. Bandas de frecuencia de holguras estructurales coincidentes con las del espectro.

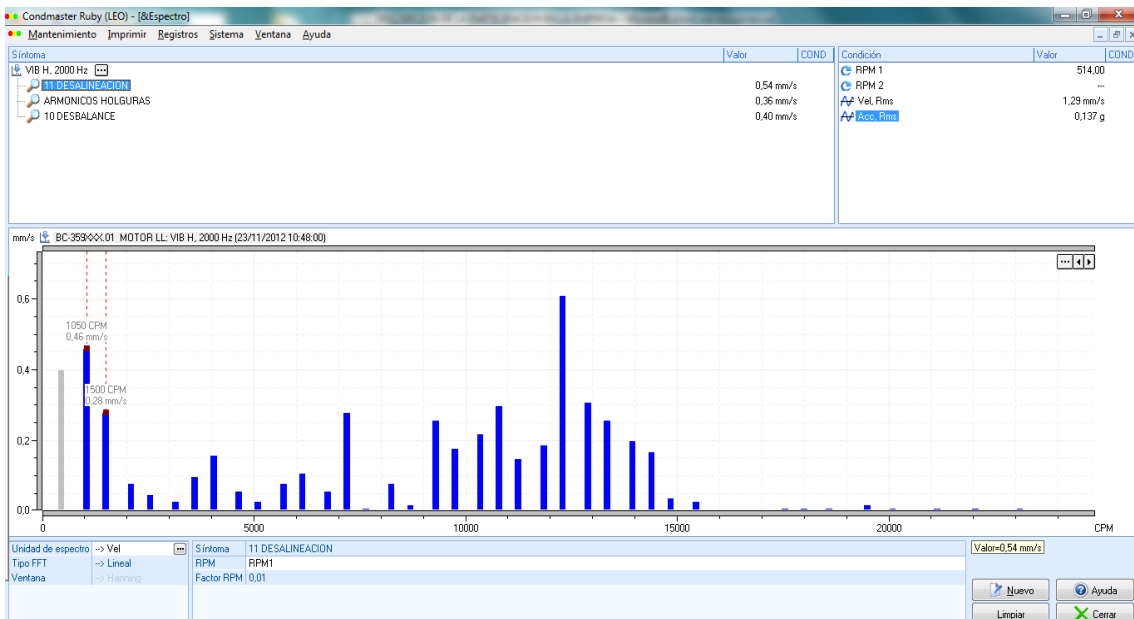


Figura 5. Armónicos a 2x y 3x la velocidad de giro del eje, coincidentes con el síntoma de desalineación.

En los siguientes espectros se muestra un claro desbalance en las tres direcciones. Este espectro corresponde a un Compresor de tornillo de amoniaco.

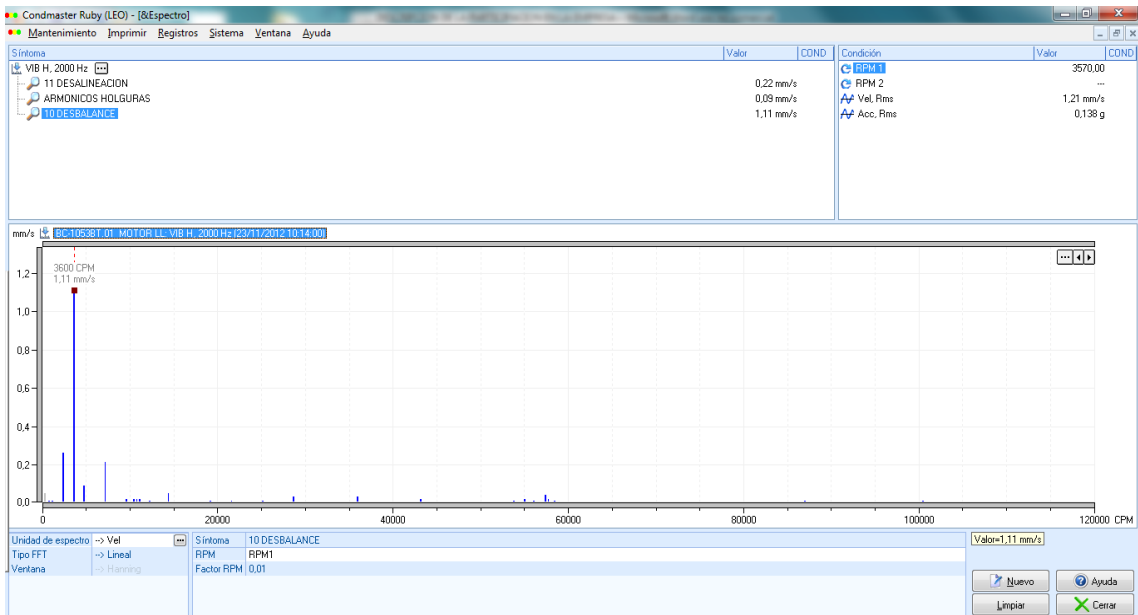


Figura 6. Síntoma de desbalance en compresor de tornillo. (Dirección horizontal)

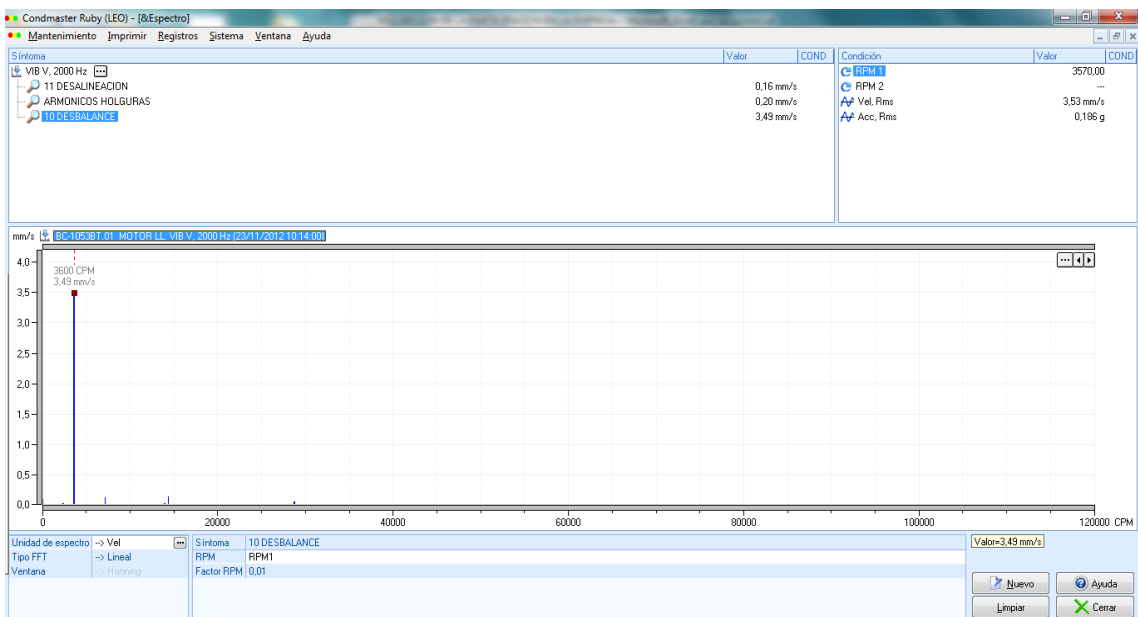


Figura 7. Síntoma de desbalance en compresor de tornillo. (Dirección vertical)

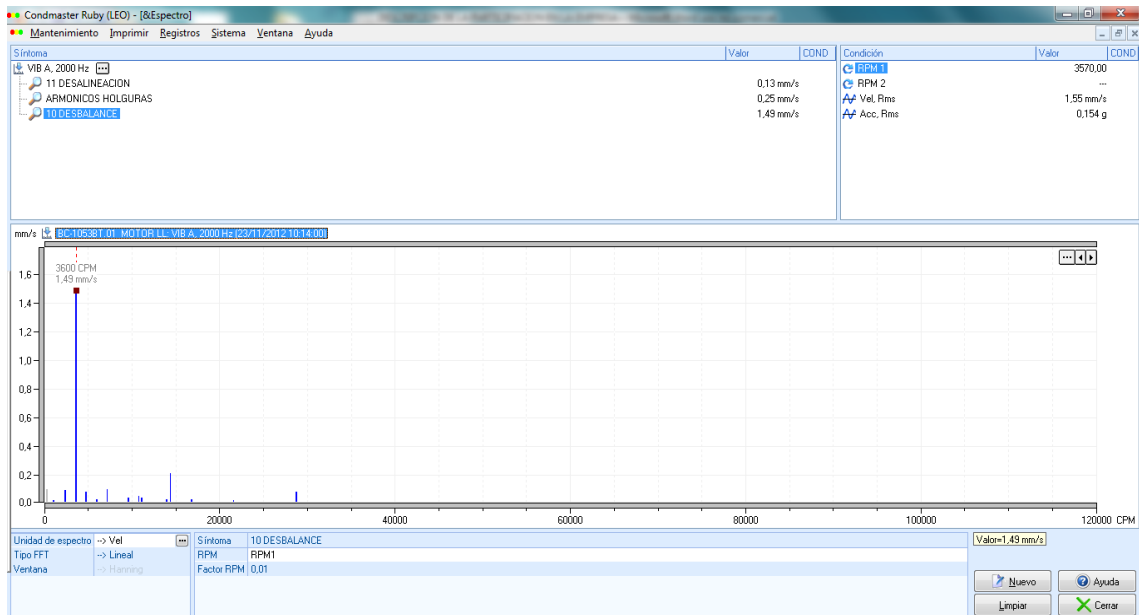


Figura 8. Síntoma de desbalance en compresor de tornillo. (Dirección axial)

En la industria los problemas en maquinaria rotativa son principalmente dos: desalineación y desbalance, es tan alta la probabilidad de que una máquina falle por estas dos razones, que en un 80% de los casos se presentan simultáneamente que podríamos clasificar las fallas como se muestra en la gráfica.

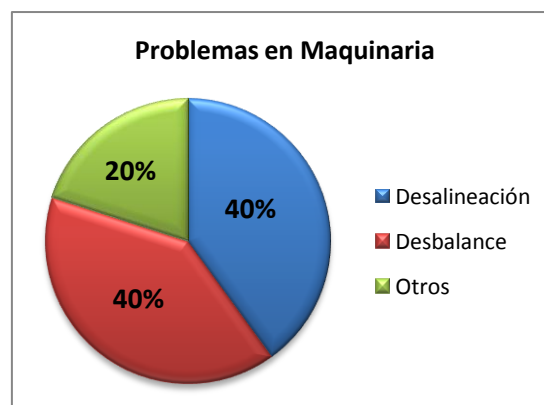


Figura 9. Principales problemas en maquinaria.

Es por eso que al reducir el desbalance y realizando una alineación precisa de la maquinaria, la mayoría de los problemas derivados de estos desaparecen. Es por eso que también se realizan servicios de alineación mediante láser de gran precisión y venta de equipos.

Dentro del 20% nombrado "Otros", se incluyen: lubricación indebida, entorno de trabajo no apto, malas prácticas de mantenimiento, falta de rigidez estructural, etc.

Monitoreo de Rodamientos

Los rodamientos son elementos mecánicos de alta ingeniería diseñados para llevar a cabo dos funciones específicas:

- 1) Permitir el movimiento rotacional
- 2) Transmitir carga

Existen diversos tipos de rodamientos, finamente calculados para cada aplicación. Los hay rígidos de bolas, rodillos, contacto angular, doble hilera de bolas, doble hilera de rodillos, agujas, sellados, abiertos. Hay también diferentes tamaños, y de especificaciones diversas.



Algunos son para altas velocidades y poca carga, otros para bajas velocidades y mucha carga, otros admiten unos pocos grados de desalineación como son los de rótula. También hay algunos que se montan de manera diferente por su aplicación, que son desarmables, algunos están diseñados con juegos especiales entre pistas y elementos rodantes.

Por todo lo anterior, la tecnología de rodamientos es en sí un tema abundante que sólo se comenta de manera general en este documento.

Dentro del mantenimiento es de particular importancia el monitoreo de rodamientos. La razón es simple, son los elementos que más “fallan”. Es importante decir que los rodamientos están diseñados para exceder la vida útil prometida para cada aplicación. Decir que un rodamiento falla es incorrecto, a un rodamiento se le hace fallar.

[7] La vida nominal de un rodamiento se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

Donde:

L_{10} = vida nominal, en millones de revoluciones

C = capacidad de carga dinámica, en N

P = carga dinámica equivalente, en N

p = exponente de la fórmula de la vida

p = 3 para rodamientos de bolas

p = 10/3 para rodamientos de rodillos

Para rodamientos que funcionen a velocidad constante, será más conveniente expresar la duración nominal en horas de servicio usando para ello la ecuación.

$$L_{10h} = \frac{1\,000\,000}{60\,n} L_{10}$$

Donde:

L_{10h} = vida nominal, en horas de servicio

n = velocidad de giro, en rpm

Como se observa, la fórmula presenta un comportamiento exponencial. Por lo tanto al variar la carga dinámica equivalente, se ve afectada de gran manera la vida del rodamiento.

Generalmente, los fabricantes de las máquinas ya han calculado los rodamientos que se requieren para las condiciones de operación de sus equipos, entonces los rodamientos fallan únicamente por factores ajenos a ellos.

Las causas más comunes para que los rodamientos fallen son entonces: sobrecarga, mal sistema de lubricación, mal montaje, mal ajuste, contaminación en ambientes especiales.

La marca SPM Instrument®, se ha dedicado al monitoreo de rodamientos desde los años 1960's, siendo los inventores del método de pulsos de choque.

En Mantenimiento Productivo Computarizado S.A. de C.V., además de realizar análisis de vibración también he realizado monitoreo de rodamientos, contando con una amplia gama de instrumentos desde algunos muy sencillos hasta unidades de alta tecnología.

El monitoreo de rodamientos lo realizo a través de dos métodos, uno de ellos mide los impactos únicamente proporcionando información de la condición de las pistas y elementos rodantes. Las unidades de impacto son los decibeles, y se lleva una tendencia de los valores para determinar el estado del rodamiento. Los límites de impactos se obtienen mediante las especificaciones de cada rodamiento: diámetro interior, tipo de rodamiento, velocidad de operación.

Un método aún más avanzado y patentado por el fabricante SPM Instrument®, proporciona además de los impactos, el espesor de la película de lubricante entre pistas y elemento rodante mediante un algoritmo matemático.

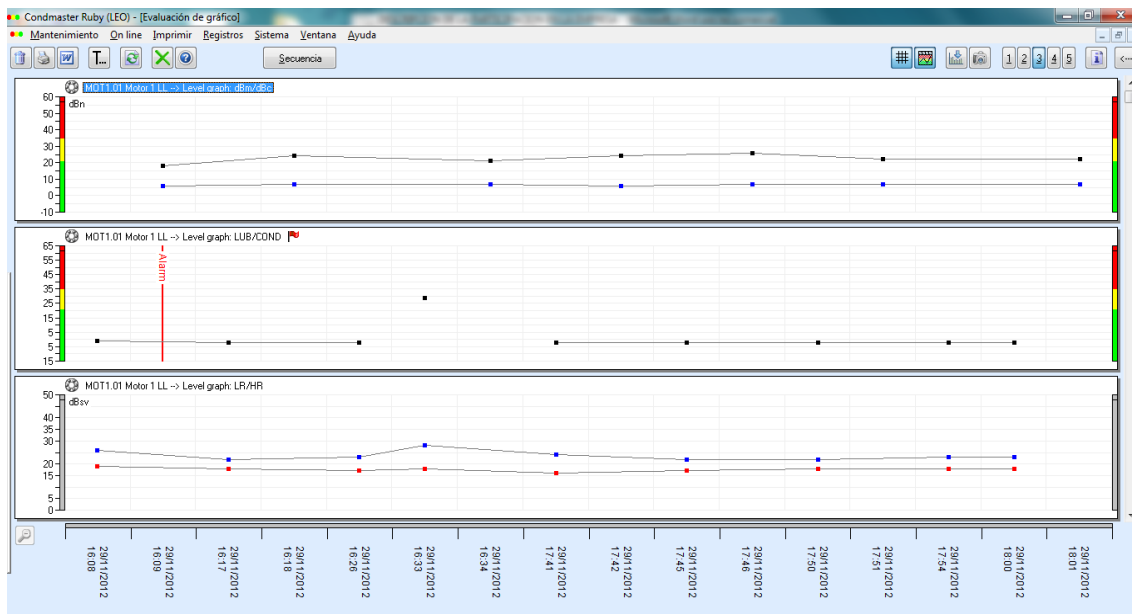


Figura 9. Gráficas de tendencia de un rodamiento 6205 SKF, que trabaja a 1360 rpm. En estado de alarma.

Los métodos utilizados en la empresa para monitoreo de la condición de la maquinaria y el análisis de vibración, son los métodos más avanzados existentes. Se tienen proyectos para impulsar el mantenimiento en línea como en países de primer mundo, mediante instrumentación fija y con comunicación vía internet. Se ha demostrado que las prácticas de mantenimiento se van modernizando a pasos gigantes a la par con las nuevas tecnologías. Y esto se ve reflejado en incrementos de utilidad y eficiencia en todas las industrias que hemos visitado.

Realicé la traducción inglés-español del folleto técnico de los nuevos instrumentos de la marca SPM Instrument®, siendo seleccionada mi traducción para su publicación en todos los países de habla hispana.

Como proyecto se me asignó la investigación y configuración de un equipo de monitoreo en línea de la marca SPM Instrument®, logrando satisfactoriamente la configuración del equipo que será prontamente presentado como propuesta a Grupo Modelo® y Nissan®.

Elaboré el manual para la configuración de la unidad y del equipo de cómputo para su publicación a nuestros diferentes distribuidores.

He realizado visitas a diferentes industrias manufactureras entre ellas NACOBRE®, GM®, Weg® y a PEMEX, realizando demostraciones en campo y capacitaciones al personal técnico.

A partir del mes de Junio estaré a cargo de la supervisión del único departamento de calibración de equipos tanto analizadores de vibración, como alineadores láser en México de los fabricantes SPM Instrument® y Fixurlaser® respectivamente.

Conclusiones

Durante estos primeros seis meses laborando en la empresa Mantenimiento Productivo Computarizado S.A. de C.V., se han logrado los objetivos siguientes:

- Asistencia al seminario “Análisis de Vibración nivel I”, impartido en la ciudad de Puebla, por la empresa “Técnicas Predictivas Proactivas de Mantenimiento Integral S.A. de C.V.
- Certificación de Analista de Vibración nivel I según la norma ISO 18436-2, por parte del Vibration Institute.
- Certificación de manejo del producto Leonova Diamond, por parte de SPM Academy, SPM Instrument AB en Bogotá, Colombia.
- Configuración y programación de la unidad para monitoreo en línea Intellinova.
- Demostraciones en campo a:
 - o PEMEX Refinería. Tula, Hidalgo
 - o PEMEX Distribución de Gas LP y Amoniaco. Topolobampo, Sinaloa
 - o Embotelladora Las Margaritas S.A. de C.V. Pachuca, Hidalgo
 - o Kimberly Clark S.A. de C.V. Orizaba, Veracruz
 - o Lerma Electrical Motors S.A. de C.V. Lerma, Estado de México
 - o General Motors Company S.A. de C.V. Silao, Guanajuato
 - o Nacobre S.A. de C.V. Distrito Federal, México
- Servicio de alineación en campo de un reductor a la empresa Garlock de México S.A. de C.V.
- Soporte técnico a personal de PEMEX en la planta de Rosarito, Baja California.
- Traducción del idioma inglés al español de los folletos técnicos de los instrumentos Leonova Diamond y Leonova Emerald de la marca sueca SPM Instrument, para su distribución en países de habla hispana.
- Elaboración del manual de configuración e instalación de la unidad de monitoreo en línea Intellinova de SPM Instrument en español.
- Calibración, programación y revisión de unidades BDM, VDM y DMM-13 de monitoreo de rodamientos y vibración global para NISSAN DE MEXICO S.A. de C.V.
- Calibración de analizadores de vibración A-30, de la marca SPM Instrument.
- Capacitación sobre el instrumento Leonova Diamond, a los distribuidores REFINSA S.A. de C.V., IR Industriales S.A. de C.V., ubicados en Tampico, Tamaulipas. Y a personal de SOLTEC S.A. de C.V. en Silao, Guanajuato.
- Dominio del software Condmaster Ruby de SPM Instrument.

Mediante los conocimientos adquiridos en la carrera de Ingeniería Mecánica, he obtenido con relativa facilidad las certificaciones arriba mencionadas.

Los contenidos de los cursos: Estática, Cinemática y Dinámica Vibraciones Mecánicas, Matemáticas Avanzadas, Diseño de Elementos de Máquinas, Dinámica de Maquinaria, Mecánica de Sólidos y Mecánica de Fluidos I y II, han sido esenciales para el análisis y solución de problemas que se presentan en la industria.

El mantenimiento predictivo, es una práctica con gran proyección y la especialización en el análisis de vibración y tecnología de rodamientos, es una de mis prioridades.

En este trabajo se ha difundido una de las diferentes técnicas utilizadas en la actualidad para determinar la condición de la maquinaria rotativa. Se presentaron casos reales con espectros de análisis tomados en campo. Se habló de la importancia de la modernización de las prácticas de mantenimiento industrial y de los beneficios que estas nos proporcionan.

Referencias

- [1] Seminario “Análisis de vibraciones nivel I”, TPPMI “Técnicas Predictivas Proactivas de Mantenimiento Integral”
- [2] Machine & Systems Condition Monitoring Series. “Vibration”, Charles W. Reeves, Coxmoor Publishing Company’s. pp. 3-7.
- [3] “Análisis de Vibraciones e Interpretación de datos”, Jesús A. Royo, Gloria Rabanaque, Fernando Torres, DIDYF Universidad de Zaragoza p. 2.
- [4] Machine & Systems Condition Monitoring Series. “Vibration”, Charles W. Reeves, Coxmoor Publishing Company’s. pp. 11, 12.
- [5] SINAIS: www.sinais.es/normativa/
- [6] Leonova Diamond User’s guide, SPM Instrument AB, 2012, Chapter E, pp. 3-11.

Glosario

Hz. (Hertz) Unidad de frecuencia indicando ciclos por segundo.

Cpm. (Ciclos por minuto) Unidad de frecuencia utilizada comúnmente por su relación directa con las revoluciones del eje.

Órdenes. Unidad de frecuencia utilizada por corresponder a los múltiplos de la frecuencia fundamental o de giro del eje. Por ejemplo: 1 orden, 2 órdenes, 3 órdenes, etc.

Desplazamiento. Cambio de la posición de un cuerpo.

Velocidad. Cambio de la posición de un cuerpo con respecto al tiempo.

Aceleración. Cambio de la velocidad con respecto al tiempo.

RPM. (Revoluciones por minuto) Unidad de velocidad angular.

KW. (Kilowatts) Unidad de potencia.

MW. (Megawatts) Unidad de potencia.

ω . (omega) Símbolo de velocidad angular.