

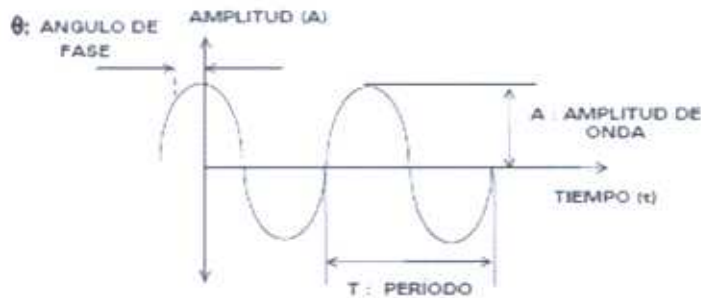
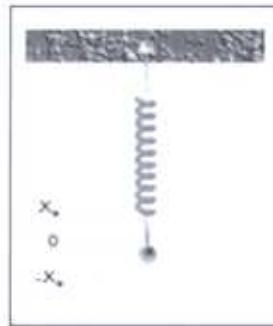
Análisis de Vibraciones

1. Conceptos Básicos

El objetivo general de este apunte es transmitir los conocimientos básicos sobre la detección y análisis de problemas comunes de máquinas rotantes, utilizando el monitoreo y análisis de vibraciones.

Las vibraciones de máquinas surgen por el movimiento oscilante de los componentes mecánicos alrededor de su punto neutro. Este movimiento oscilatorio es generalmente de pequeña amplitud, como resultado de la reacción de fuerzas internas y externas.

Si observamos un conjunto masa resorte como el del siguiente esquema, vemos que en un ciclo de movimiento la masa oscilante sube y baja, pasando por su posición de reposo, O.



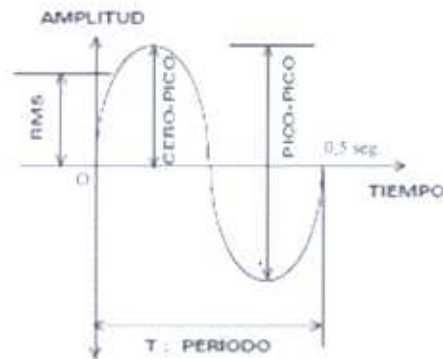
VIBRACION SIMPLE : FRECUENCIA = $1/T$ = # CICLOS POR SEGUNDO o Hz

Si consideramos la oscilación como una función del tiempo, la posición del punto genera una onda senoidal. La masa está en reposo en el punto O, es decir el punto de inicio. Para un ciclo completo de la masa hay un desplazamiento positivo (X_0) y otro negativo ($-X_0$) respecto de la referencia O.

El desplazamiento es el cambio de distancia o posición de un objeto, relativo a una referencia. La magnitud de este desplazamiento se denomina "amplitud". Para el caso de las vibraciones mecánicas, cuanto mayor sea la amplitud de la señal vibratoria, mayor será la severidad del problema.

Lo que se acostumbra, es establecer la diferencia o relación de dos mediciones efectuadas en las mismas condiciones y en diferentes momentos, de esta forma se comparan los niveles "normales" de una medición con los de las consecutivas. Al valor normal se lo denomina valor "bueno". Esto indica el estado actual de la máquina y su evolución en el tiempo. Si el nivel de vibración aumenta, podemos presumir que hay avería o fallo potencial.

Cada problema mecánico o defecto en los componentes genera vibraciones en forma particular. Para investigar el tipo de vibración utilizamos herramientas de análisis para identificar el defecto y su causa raíz. Veamos algunos parámetros de las señales sinusoidales.



Llamamos **Ciclo** al periodo de tiempo entre puntos repetitivos de una onda periódica. En el ejemplo, el ciclo o periodo es de 0.5 seg.

La **Frecuencia** es el número de ciclos de la vibración en un periodo de tiempo determinado.

La frecuencia es la recíproca del periodo: $F = 1/T$. En el ejemplo $f = 1/0.5 = 2$ ciclos/seg.

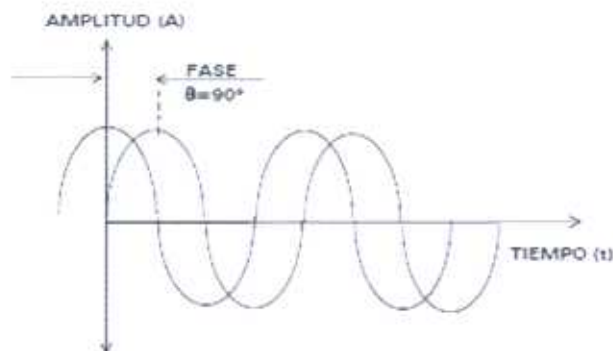
HERTZ (Hz) es una unidad de medida de la frecuencia. 1 Hz=1 ciclo/seg. En el ejemplo $f=2$ Hz.

CPM (R.P.M.) significa ciclos por minuto. Es una unidad de medición de la frecuencia, 1 Hz=60 cpm. En el ejemplo $f = 120$ cpm.

La **Amplitud** es el desplazamiento de la onda, a partir de la referencia O, medida como cero pico, pico a pico o rms.

Orden respecto de las revoluciones del eje. Es la cantidad de veces, por revolución del eje, que ocurren los eventos.

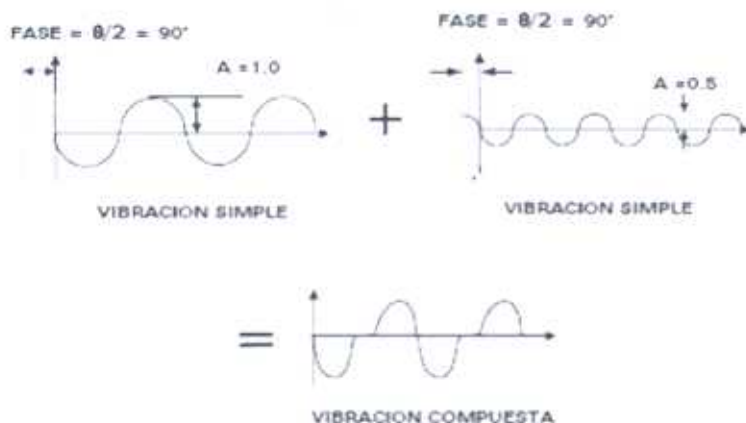
La **Fase** es un retardo en el tiempo de dos señales, expresado en grados de rotación. Así mismo, es la relación angular entre dos puntos de una máquina, que describe el movimiento rotativo entre ellos. También mide el ángulo entre el punto superior de la onda senoidal, y una referencia del eje (O).



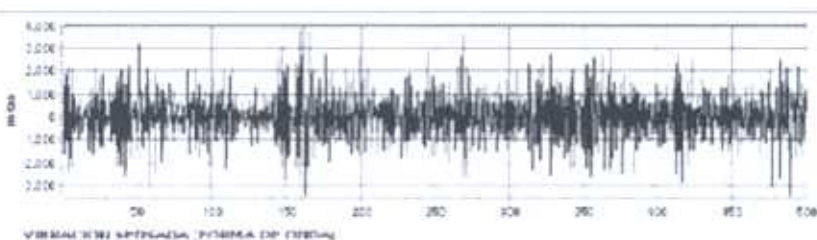
Cada componente de un tren de máquinas, generará sus señales vibratorias específicas, la suma de ellas es lo que se denomina una señal **compuesta**. Esta señal compuesta además incluye a todos los golpeteos y vibraciones aleatorias. Por ejemplo, consideremos el defecto en una pista de rodamientos. El defecto es impactado por las bolas del rodamiento, varias veces por cada rotación del eje. Los impactos múltiples causarán una señal impulsiva en frecuencia, que será significativamente mayor que la velocidad del eje.

Otro ejemplo puede ser las frecuencias bajas, que se generan por desalineación y desbalanceo. Estas señales poseen una frecuencia similar a la de rotación del eje y habitualmente van acompañadas de sus armónicas en 2X, 3X, etc. Además tienen mucha mayor amplitud que aquellas causadas por rodamientos y engranajes.

En el dominio del tiempo la sumatoria de varias señales sinusoidales que comprenden cada uno de los componentes que se encuentran en la máquina, da como resultado una onda compuesta de amplitud y en función del tiempo. Si por ejemplo esta onda global tiene una componente causada por desbalanceo, se la denomina "dominante" ó "portadora". Tienen una amplitud elevada comparada con las de rodamientos y engranajes, y porta a las vibraciones de alta frecuencia. Estas aparecen como pequeñas ondas sobre la fundamental de desbalanceo.



■ VIBRACIONES SIMPLES = VIBRACION COMPUESTA PERIODICA.



En algunos casos los golpeteos intermitentes están asociados a golpes continuos que crean una señal repetitiva. Se encuentran más comúnmente en engranajes, en el paso de las aspas de un ventilador, etc. Este tipo de señales tiende a morir debido a la amortiguación del medio.

Los instrumentos manuales y sencillos tienen como función principal medir el valor global, en términos de la energía global. El valor global de la amplitud vibratoria, es la energía total medida en un rango específico de frecuencias. Un valor mayor que lo normal nos da una indicación rápida que algo de la máquina anda mal. Algunos instrumentos tienen frecuencias predefinidas para un determinado rango. En otros, el usuario puede seleccionar el rango de frecuencias deseado.

Cuando se comparan valores globales, es importante que ambos sean obtenidos del mismo rango de frecuencias.

Muchos instrumentos portátiles de banda fija, miden velocidad en el rango de 10 a 1000 Hz, debido a que se considera el mejor rango para juzgar los problemas rotacionales y

estructurales, tales como desbalanceo, desalineación flojedad y deformaciones aplicadas a componentes, que son las causas más comunes de vibraciones excesivas.

Otros instrumentos más avanzados, monitorean en distintas bandas de frecuencia, y proveen múltiples parámetros de mediciones globales. Miden velocidad entre 10 Hz y 1 kHz, aceleración entre 10 kHz a 30 kHz. Estas mediciones nos permiten enfocar el problema entre bajas frecuencias rotacionales y/o estructurales, y altas frecuencias provenientes de rodamientos o engranajes.

Nótese que la medición no es análisis. Si la medición del valor global aumenta, debe realizarse un monitoreo y análisis más extenso, a fin de diagnosticar la causa del incremento de la vibración; y determinar así la mejor oportunidad para tomar acciones correctivas.

Notas sobre Amplitud y Frecuencia

Cuando se analizan las vibraciones, hay dos componentes de la señal que se deben observar en primer instancia. La primera es la **amplitud** que es el máximo valor que presenta una señal vibratoria, y que además indica la severidad de la falla. Cuanto mayor es la amplitud, mayor es el problema.

En segundo lugar debemos prestar atención a la **frecuencia**, que como vimos es el número de veces que se repite un ciclo. La frecuencia nos indica el origen de la falla.

Los parámetros que se miden principalmente son la velocidad y la aceleración.

Como sabemos, la **velocidad es la derivada del desplazamiento en función del tiempo**, es decir, la variación del cambio del desplazamiento. La velocidad es un buen indicador para evaluar las vibraciones de bajas frecuencias, (desbalanceo, desalineación, flojedades mecánicas y defectos de rodamientos de bajas frecuencias).

La **aceleración es la segunda derivada del desplazamiento respecto del tiempo**, y es la variación del cambio de velocidad. La aceleración es una herramienta muy valorable en el análisis de máquinas rotativas, dado que la medición da como resultado una respuesta lineal sobre una banda ancha de frecuencia, y se visualiza más a medida que la frecuencia se incrementa.

En realidad, la vibración tiene tres características medibles: **desplazamiento, velocidad y aceleración**. Cuando la masa se desplaza por el punto cero, la velocidad es máxima. Asimismo cuando el desplazamiento es máximo, la velocidad es cero. Esto ocurre para cualquier frecuencia.

La aceleración tiene otra relación: cuando el desplazamiento está en el punto máximo positivo, la aceleración lo está en el máximo negativo. Cuando el desplazamiento pasa por cero, la aceleración también posee este valor.

Pero volviendo a la amplitud, cuando comparamos valores debemos tener en cuenta los factores de escala. Estas pueden ser mediciones pico, pico a pico o RMS.

La **amplitud Pico** representa la amplitud desde el valor cero de referencia al tope del valor máximo. Se usa para medir velocidad, habitualmente calculada a partir del valor RMS.-

El valor **Pico a Pico** es la amplitud medida desde el tope positivo al tope negativo. El valor P-P resulta=2 X Pico. Se utiliza para medir desplazamiento.

El valor **RMS** (root mean square) se deriva a través de una conversión matemática que relaciona la energía de la c.c con la de la c.a. Se usa generalmente para medir la energía efectiva de la vibración formada por múltiples señales de distintas frecuencias. Si se mide una onda senoidal pura, el valor RMS es de 0.707 del valor pico.-

El **desplazamiento** representa la distancia, y se utiliza preferentemente para máquinas de bajas revoluciones. El desplazamiento pico-pico es igual a la distancia total recorrida por el componente vibratorio. Se debe medir con sensores de corrientes parásitas (eddy current probe).

Las unidades que se utilizan para medirlo son:

mils (1 mils = 0.001")

micrones (0.0001 cm)

La **velocidad** de la vibración es la unidad que más se utiliza para propósitos generales de evaluación de máquinas de baja y media velocidad. El rango habitual en frecuencia es de 10 Hz a 1500 Hz.

Se mide en **in/sec.** o **Mm/sec.**

La **aceleración** es la relación de cambio de velocidad. Típicamente se mide amplitud pico o RMS, es la más utilizada para evaluar altas frecuencias como las generadas por rodamientos y engranajes. Se mide en:

Gs (1 G = aceleración producida por la gravedad)

In/sec²

Mm/sec²

2. Espectro y Fase

Transformada de Fourier

Hasta ahora solo hemos visto vibraciones en el dominio del tiempo, que no son más que señales directas de la máquina. En estas señales se encuentra toda la información correspondiente a la máquina bajo análisis. Pero hay un problema a la hora de realizar un diagnóstico, y es que estas señales están cargadas de mucha información muy compleja. Así pues, existe otra forma de mirar esta información y es en el dominio de la frecuencia.

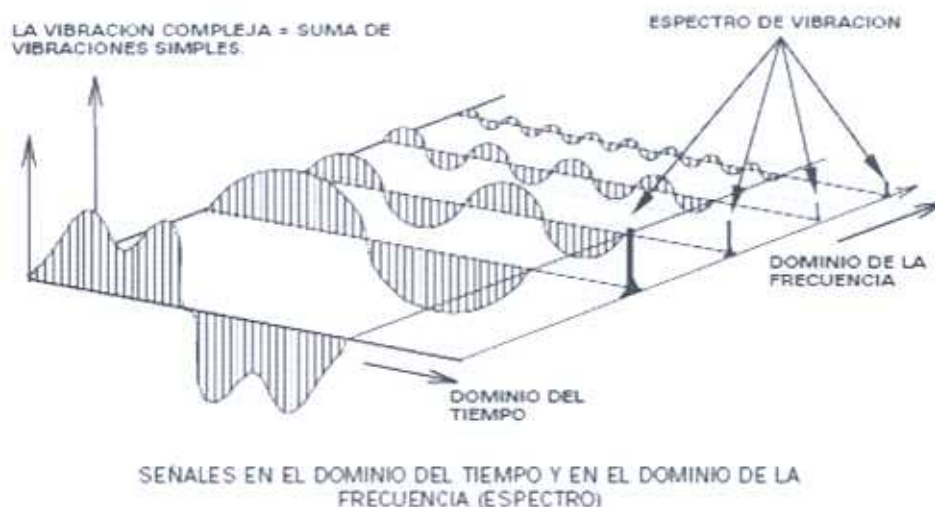
Esta es la gráfica de Amplitud vs. Frecuencia y es conocida con el nombre de espectro.

El análisis espectral es la interpretación que se le hace a un espectro para determinar el significado físico de lo que pasa en una máquina. Los problemas de las máquinas generan vibraciones en frecuencias específicas. Por ejemplo el desbalanceo produce el mayor valor en baja frecuencia (1 x r.p.m.)

Los problemas en cojinetes producen señales en altas frecuencias y de mucha menor amplitud. La frecuencia de engrane se produce en $z \times r.p.m.$ y se denomina frecuencia de engrane.

El método más usado para ver las señales vibratorias es la aplicación de Fast Fourier Transformation (FFT).

Un analizador de espectros que trabaja con la transformada rápida de Fourier captura la señal de la máquina, luego calcula todas las series de señales sinusoidales que contiene la señal compleja y por último las muestra en forma individual en el eje x de la frecuencia.



Esto significa que la señal global se descompone en sus componentes individuales, las que son graficadas en función de la frecuencia. Debido a que se conoce que ciertos problemas ocurren a determinadas frecuencias, se analiza el espectro FFT para determinar cambios en las amplitudes, dentro de los rangos de frecuencias de interés.

Pero antes debemos recolectar la mayor cantidad de información necesaria e identificar los componentes que pueden causar vibraciones. Ejemplos:

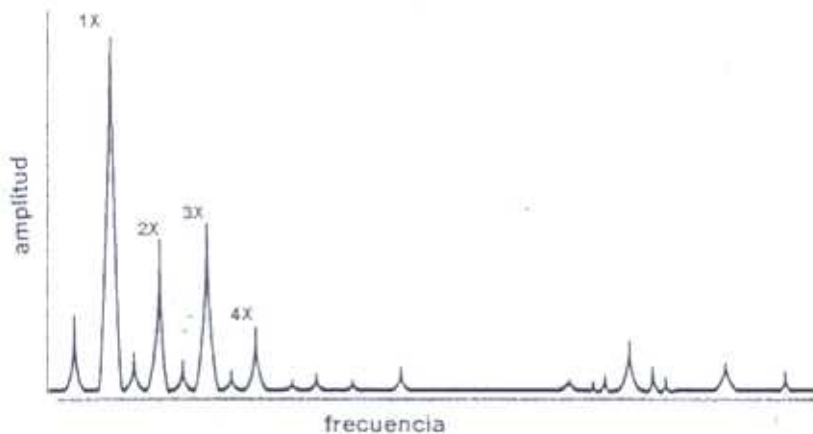
- Si la máquina está conectada a un ventilador conocer el número de palas.
- Si hay rodamientos, conocer sus características para determinar sus frecuencias de falla.

- Si hay engranajes conocer el número de dientes.
- Si hay correas hay que conocer la longitud.
- Si la máquina opera con otra muy próxima, conocer la frecuencia de la segunda, dado que puede tener mucha influencia debido a que las vibraciones se conducen a través de las fundaciones.

Pero el conocimiento de la velocidad de rotación de la máquina es fundamental cuando se analiza un espectro FFT. Conviene observar los espectros a 1500 o 3000 r.p.m. si el motor es de inducción. Los motores típicamente operan a esa frecuencia.

En un espectro FFT, el pico correspondiente a la velocidad normalmente es el primero desde la izquierda. Debemos mirar ese pico y observar si hay armónicas en (2X, 3X, 4X).

Un análisis eficiente requiere obtener datos triaxiales (H, V, A) en cada cojnete.



Una vez identificada la frecuencia de rotación, debemos determinar el rango de frecuencias del espectro, identificar las armónicas de las r.p.m. (1X, 2X, 3X, etc), identificar las frecuencias de fallas de rodamientos, identificar frecuencias de álabes de ventiladores, identificar el número de dientes de los engranajes y sus frecuencias de engrane, identificar la frecuencia del impulsor de la bomba, identificar vibraciones de máquinas adyacentes, identificar picos a frecuencias de línea de los motores eléctricos.

Generalmente la práctica nos indica cuales de estos parámetros son los que primero debemos determinar.

El espectro puede producir picos a frecuencias identificadas como falla. Estos picos pueden o no representar una falla. Observe si hay armónicas de la frecuencia de falla.

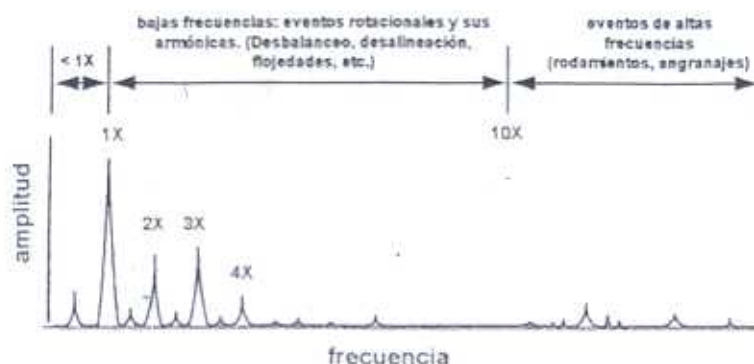
- Si el pico aparece a la frecuencia fundamental de falla, y otro pico aparece al doble seguramente la falla existe.
- Si no aparece un pico a la frecuencia de falla, pero está presente a dos, tres y tal vez cuatro x, es una indicación válida de frecuencia de avería.

Para determinar la severidad de la falla, se puede comparar la amplitud con lecturas anteriores, tomadas en condiciones similares. También, como vimos anteriormente, se puede comparar con lecturas de máquinas similares, operando en las mismas condiciones.

Pero lo que todo análisis requiere es interpretar los modelos espectrales, para ello debemos reconocer tres rangos de frecuencias bien definidos. Esto lo vemos en el espectro de velocidad de la página siguiente.

Los defectos en la jaula del rodamiento (típicamente alrededor de 1/3 de las r.p.m.), roces, remolino de aceite (Oil Whirl), recirculación en bombas o resonancia (muy común); ocurren a < de 1X de la velocidad de rotación.

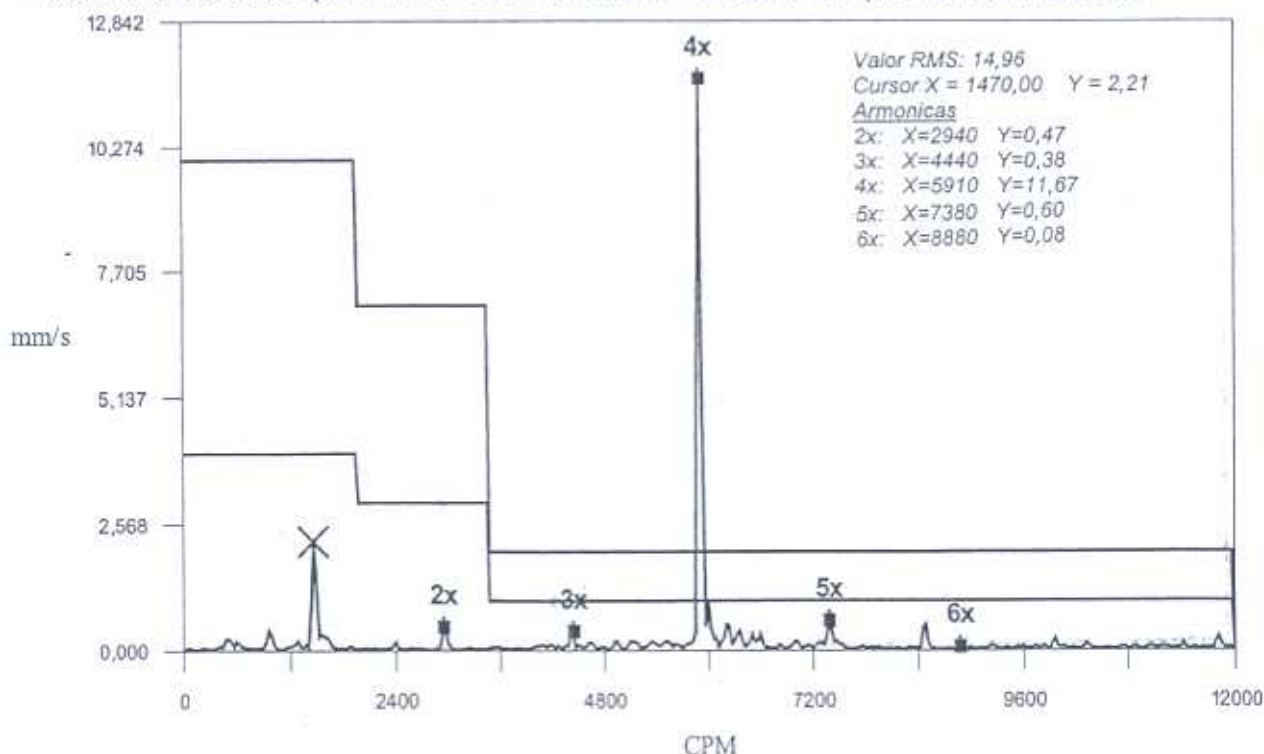
Por su parte los problemas de desbalanceo (1X), desalineación (1X, 2X), eje torcido (1X, 2X), flojedades (1x – 10X), palas de ventiladores (número de palas x r.p.m.), cojinete flojo, y resonancia; ocurren entre **1X de la velocidad de rotación y armónicas hasta 10X.**



Por otro lado los eventos en **alta frecuencia (mayores de 10X velocidad de rotación)**, corresponden generalmente a daños en rodamientos (Frecuencia de defecto y armónicas), engranajes (número de dientes x r.p.m.), y cavitación.

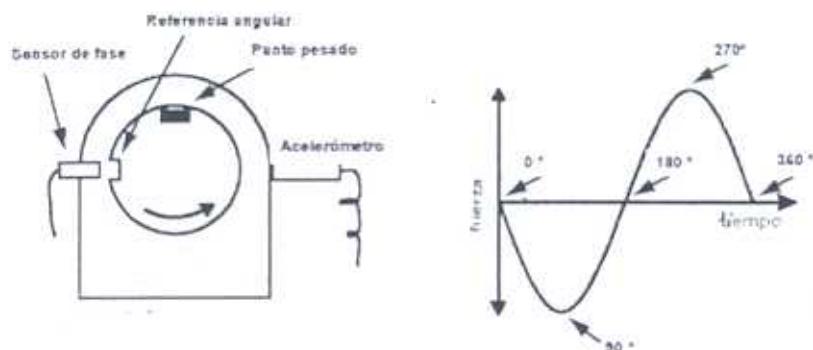
Ocasionalmente aparecen frecuencias alrededor de una frecuencia dominante, a espacios similares unas de otras, que ayudan a identificar problemas eléctricos de motores, y brindan información acerca de la severidad de los defectos de engranajes y rodamientos. Se reconocen como Bandas Laterales.

Pero una de las cosas que sin duda debemos tratar de reconocer siempre, son las armónicas.



Una armónica es una frecuencia múltiplo exacto de la fundamental. Es importante notar que con defectos en las bolas del rodamiento, las armónicas de la fundamental del defecto, típicamente aparecen primero (generalmente a 5-40 x frecuencia de la velocidad). Estas armónicas, son el indicador más temprano de la existencia del problema. Si a lo largo del tiempo el defecto fundamental aparece con sus armónicas, indica el aumento de la avería.

Por último debemos reconocer la fase. La fase es una medición, no un método de proceso. Provee información de cómo una parte de la máquina vibra con respecto de la otra. Indica la diferencia angular entre una marca establecida en el eje de rotación, y la señal de vibración. Esta información es de mucho valor, adicionada a la amplitud, órbita del eje, y posición del eje. También es usada para balanceo y análisis.



El acelerómetro sensa la fuerza de desbalanceo, y un tacómetro la posición del eje.

El ángulo de fase es el ángulo (en grados), que el eje cubre desde el inicio de la toma de datos hasta que el sensor experimente la máxima fuerza positiva.

La fase del ángulo es de 90° si el sensor tiene una fuerza positiva máxima 90° después que se inicia la colección de datos por el tacómetro.

Es importante considerar el sentido de los sensores, que siempre se deben ubicar en la misma dirección para que las lecturas sean correctas.

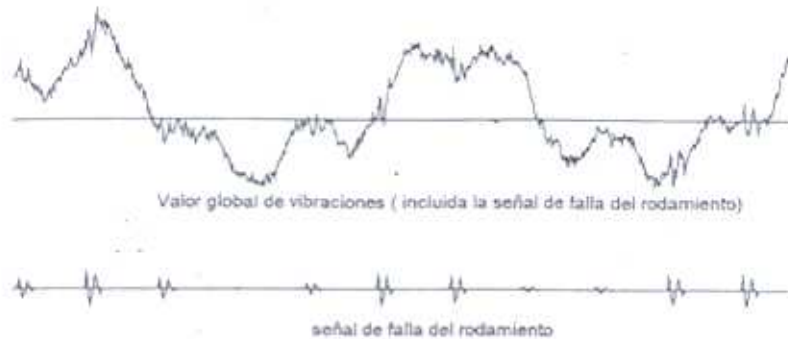
Es decir que la posición del sensor (horizontal, vertical o axial) debe ser la misma para todas las mediciones tomadas a través de la máquina.

Procesamiento de señales

Los defectos de engranajes o rodamientos son señales típicas de baja energía, en el rango de alta frecuencia. Las bajas amplitudes se deben a que son provocadas por defectos de naturaleza pequeña, y la frecuencia alta obedecen a que hay varios impactos por revolución.

También porque esas señales son impactos de corta duración, que generan armónicas en rangos muy elevados. Generalmente, las vibraciones de baja frecuencia y alta energía, enmascaran o tapan las amplitudes mucho más bajas. Esto da origen a técnicas que tratan de filtrar las vibraciones de baja frecuencia, con el fin de aislar y resaltar las señales provenientes de rangos de alta frecuencia.

- Envolvente
- SEE (spectral emitted energy)
- HFD (high frequency detection)



Por otro lado, la envolvente de aceleración o "demodulación" permite, con mucha anticipación, la detección de impulsos repetitivos de baja energía, tales como los defectos de rodamientos o engranajes.

Este proceso de envolvente de aceleración se inicia con el filtrado de las vibraciones de baja frecuencia, luego procesa las armónicas generadas por armónicas repetitivas que, ocurren en una banda de alta frecuencia especificada por el usuario.

Existe un método conocido como SEE (Spectral Emitted Energy), o energía acústica emitida debido a señales de muy alta frecuencia causadas por rodamientos o engranajes. También utilizado para problemas de lubricación de rodamientos causado por contaminación, lubricación inadecuada, o la rotura de la película del lubricante por defecto local. Estas mediciones producen un valor numérico global y un espectro FFT.

Proveedores como SKF entregan estos equipos semejantes a un lápiz, los que son de uso sencillo obteniendo datos rápidamente sin mucha experiencia por parte del usuario.



Es conocido que una de las causas primarias de la falla de un rodamiento es la lubricación inadecuada. Operando en el rango de muy alta frecuencia, las mediciones de SEE detectan la tensión estructural iniciada por problemas de lubricación y por el contacto entre superficies del rodamiento. La medición se debe hacer en la zona de carga del cojinete, o lo más cercano.

El sensor SEE no se apoya directamente sobre la superficie de la máquina, se usa un film de grasa o aceite entre el sensor y la superficie, para ayudar a la conductividad acústica entre ambos.

Una lectura mayor de lo normal del valor global podría indicar una lubricación insuficiente, si luego de la relubricación se reduce a su valor normal, se deduce que esta es la causa. Mientras que si persiste implica deterioro en el cojinete.

Si inicialmente no había señales SEE presentes, se puede utilizar el siguiente rango de valores como guía para evaluar la severidad.

0 – 3 no identifica problemas

3 – 20 problema de lubricación, contaminación, defecto de rodamiento, defecto de rodamiento con poca carga, o pequeña avería con carga normal.

20 – 100 defecto de rodamiento o contaminación del lubricante.

> 100 problema severo de rodamiento.

3. Mediciones

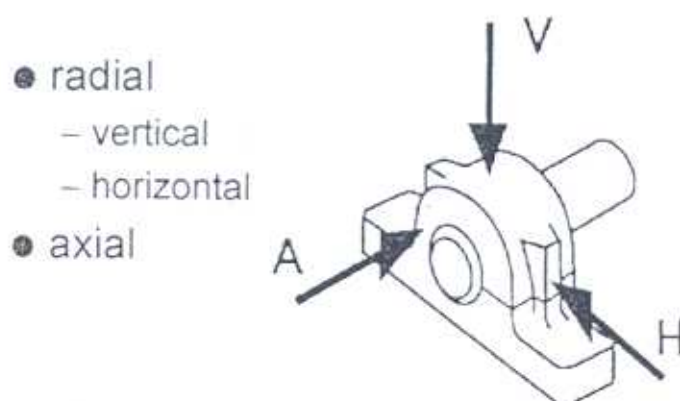
Es muy importante que los datos colectados sean comprensibles y repetitivos. La confianza en la precisión de los datos permitirá al analista detectar cambios en el comportamiento de las máquinas, el diagnóstico de síntomas de fallas mecánicas y de sus causas raíz. Las mediciones se deben tomar en el mismo lugar para poder comparar (moviendo unos centímetros el sensor suele haber diferencias significativas). Cuando se mide con sensores portátiles o magnéticos, se deben marcar los puntos con tintas permanentes, o taladrando un pequeño cono, o montando discos de medición permanentes.

El ángulo del sensor deberá ser recto con respecto a la superficie de medición. En máquinas con variación de velocidad o carga, se debe efectuar distintas mediciones, una para cada condición. Debemos tratar que la descripción del punto de monitoreo identifique claramente el punto.

El monitoreo debe comenzar por orden de prioridades. Las primeras máquinas a incluir en el programa, pueden ser aquellas con problemas conocidos o problemas históricos. Otros factores a ser considerados para clasificar las máquinas son la seguridad o el medio ambiente.

Es aconsejable confeccionar y completar una planilla de datos para cada una de las mediciones. La planilla nos provee información a fin de identificar las frecuencias características, los puntos de medición, datos de reparaciones, etc.

Los planos de medición son muy importantes identificarlos.



Es recomendable montar el sensor de vibración orientado en los sentidos horizontal, vertical y axial. El montaje radial es el más común. Hay que evitar las posiciones con variaciones de temperatura o excesiva condensación, y en el caso de acelerómetros, el flujo de aire/fluidos sobre el sensor.

Dado que los problemas crean vibraciones en cada plano, la lectura en tres sentidos puede ayudarnos a interpretar el origen de las mismas.

Podemos intentar agrupar los problemas típicos de acuerdo a la orientación del sensor para máquinas horizontales:

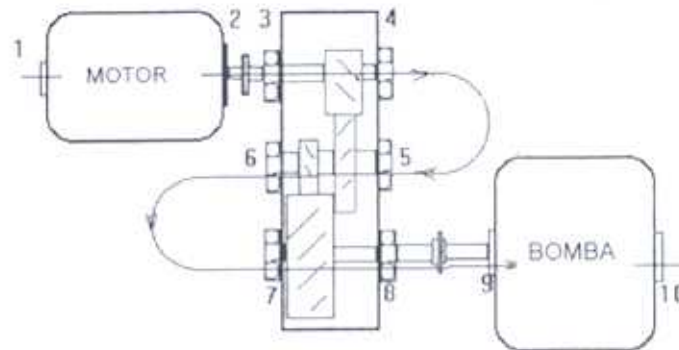
Horizontal: El desbalanceo es la causa más común en el plano radial (horizontal y vertical). Normalmente las máquinas son más elásticas en el plano horizontal, por lo tanto el desbalanceo se manifiesta generalmente en este sentido.

Vertical: Normalmente es menor que en el plano horizontal, debido a la diferencia de rigidez mencionada.

Axial: En condiciones ideales presenta valores más bajos que las radiales, dado que las fuerzas generalmente son perpendiculares al eje. Sin embargo, los problemas de desalineación crean vibraciones en este sentido.-

Equipos montados verticalmente, o con rotores en voladizo, u otros casos particulares, pueden mostrar diferentes respuestas.-

A continuación podemos apreciar la manera típica de numerar los puntos de acuerdo a la cadena cinemática.



Conceptualmente (para propósito de análisis), en máquinas horizontales, las mediciones deben tomarse en los planos horizontales y verticales para cada cojinete y como mínimo una axial en cada eje.

Para propósito de detección muchas veces se toma sólo en horizontal. Cuando se detecta el problema se debe tomar también en vertical.

En las bombas y máquinas verticales se tiene el plano de medición horizontal, con dos mediciones radiales a 90° cada una. Siempre debemos mantener a distancia el sensor de la conexión eléctrica del motor para prevenir la excitación en 50 y 100 Hz.

Las configuraciones de las máquinas son diferentes (tipos, tamaños, función, y componentes). Los datos se toman en cada cojinete, y se identifica numéricamente cada punto de medición con el sentido de la transmisión de la potencia, desde el conductor al conducido. En cada cojinete el plano de medición se identifica por H por horizontal, V por vertical y A por axial. En bombas verticales, las mediciones radiales pueden denominarse F (frontal a la descarga) y T (transversal a la descarga).

Debemos tener en cuenta también el método de montaje de los sensores. En general el método utilizado tiene influencia en la respuesta en frecuencia, (exactitud vs frecuencia) del sensor. Se aconsejan los montajes atornillados, roscados perpendicular a la superficie de montaje.

También se utilizan los sensores montados con cemento adhesivo, este material debe ser lo más fino y rígido posible. Se deben evitar cementos del tipo elastómeros.

Se recomiendan los epoxy con características de rigidez (dureza).

Los adhesivos cianoacrilicos no son recomendables.

Otro montaje típico es con base magnética. Aquí también la superficie de montaje debe estar limpia y plana (y por supuesto magnética). Reducirá la respuesta en alta frecuencia en algunos kilohertz.

Un método a veces utilizado, es con sensor manual, rápido y conveniente por la practicidad, sin embargo introduce una respuesta errónea en alta frecuencia. El grado de error es mucho más pronunciado que el método magnético. La orientación del eje del sensor es muy importante. Moviéndolo el sensor respecto de la perpendicular a la superficie, se introduce un error significativo.

La fuerza que se ejerce con la mano, en especial cuando se utilizan acelerómetros, introduce errores en la lectura.

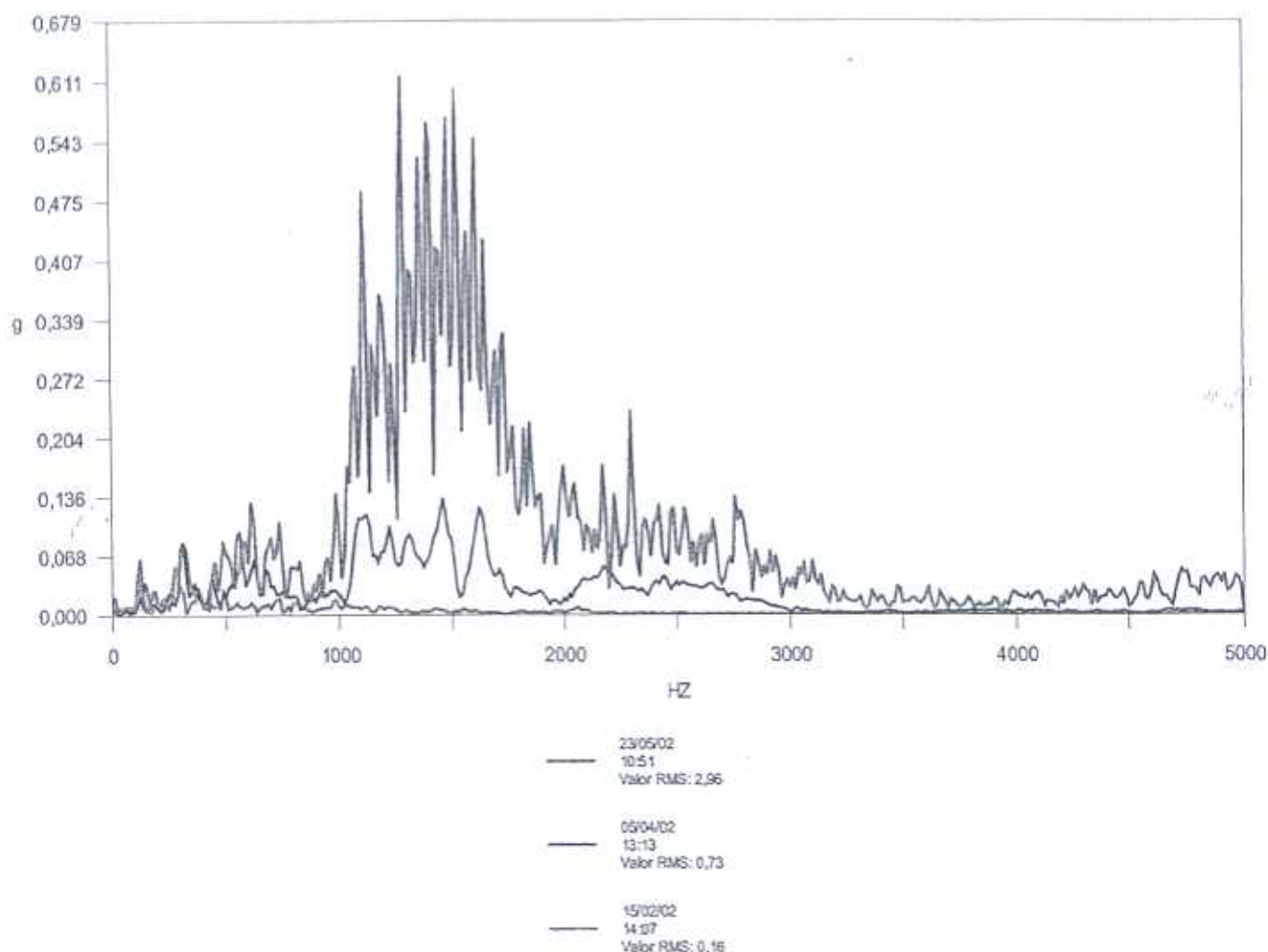
4. Límites y Alarmas

Dentro del primer grupo de herramientas que se utilizan para identificar un fallo, el más importante es el de realizar comparaciones, para ello debemos contar con valores de referencia.

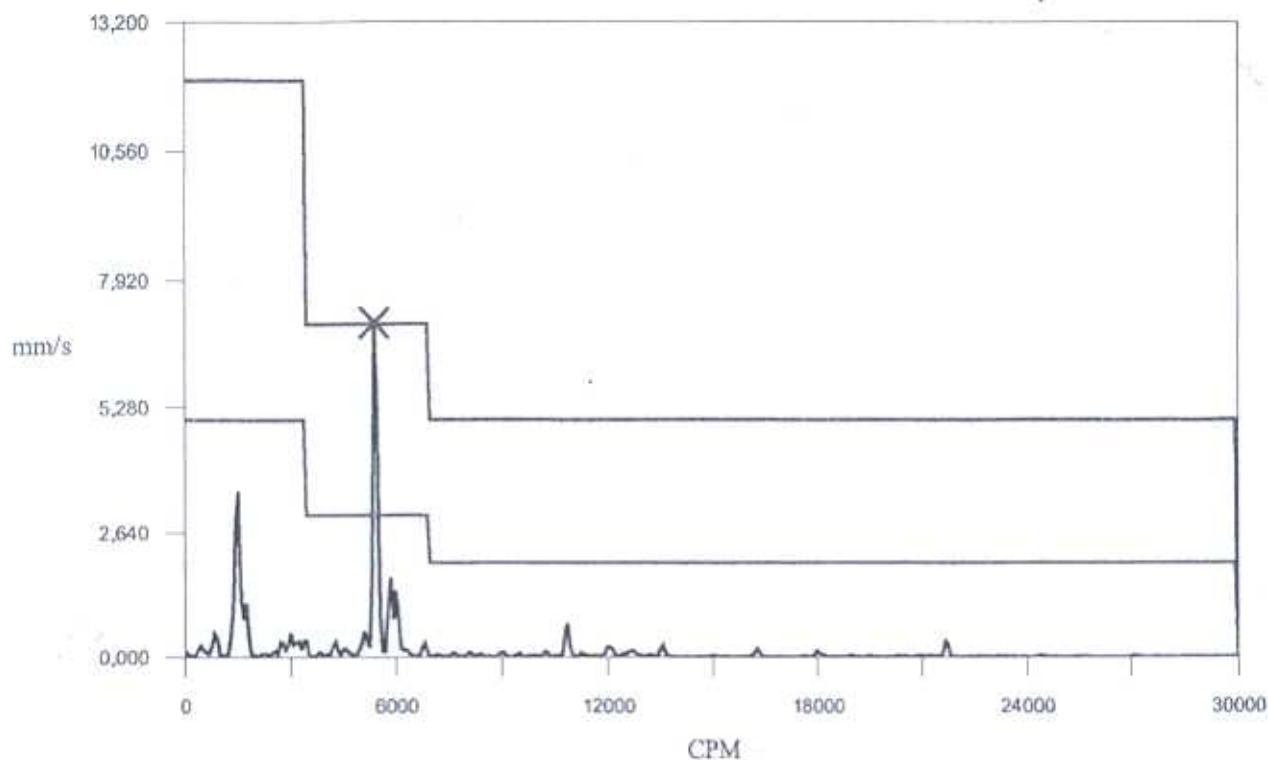
Un método que se utiliza a menudo es la comparación de tendencias. Se trata de comparar la lectura reciente contra valores previos, para el mismo punto de medición y en las mismas condiciones de operación.

De la misma forma se puede proceder con los espectros de velocidad y aceleración, en cuyo caso comparamos valores RMS; es decir que comparamos las diferentes mediciones con el espectro de la máquina en "buen" estado.

Es posible, también, realizar comparaciones con otras máquinas, pero siempre considerando que las mismas deben desempeñarse en contextos operacionales idénticos.



En segundo lugar tenemos las envolventes de espectro que consiste en sobreimprimir sobre el espectro de referencia una línea envolvente. Los típicos espectros permiten una variación en frecuencia del 5% de la velocidad, y 3% en la amplitud de frecuencias discretas. Si alguna componente del espectro traspasa la envolvente establecida, existe un estado de alarma.



Valor RMS: 11,19
Cursor X = 5400,00 Y = 7,04

Siguiendo con los métodos de alarmas tenemos las **bandas espectrales** que permiten aislar frecuencias específicas. Hay dos tipos de alarmas de bandas espectrales:

- **Nivel absoluto:** logra especificar la amplitud máxima permitida de algún pico dentro de la banda designada. Si el pico es igual, o supera el nivel, se activa la alarma.
- **Potencia de banda:** calcula la energía total o potencia, generada en cada banda por todos los picos (utilizando el mismo cálculo que para el valor global). Esto es esencial para monitorear rangos de frecuencias específicas de interés (defectos de rodamientos o engranajes), sobre máquinas de velocidad variable.

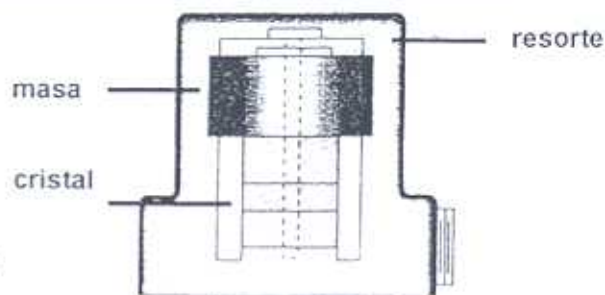
Por último tenemos las que se conocen como **alarmas de fase**. En un diagrama polar se muestra la amplitud y la fase del vector de la vibración y se activa una alarma cuando la punta del vector sale de la región predefinida como de aceptación.

Instrumentos de medición

Dentro de los instrumentos de medición que podemos encontrar, sin dudas uno de los más utilizados son los acelerómetros.

Generalmente tienen un rango de respuesta en frecuencia ancho, y el más alto. Están limitados a bajas frecuencias. La sensibilidad esta en el orden de decenas o centenas de milivolts/G, pico ($1\text{ G}=386,1\text{ in/sec}^2 = 9,8\text{ m/sec}^2$).

La construcción consiste en un cristal piezoeléctrico con un sistema de masa resorte de precarga, o circuitos electrónicos internos para preamplificación



El voltaje se genera por los cambios en la fuerza ejercida sobre el cristal piezoeléctrico y es proporcional a la aceleración. Internamente el movimiento es insignificante. Se los utiliza porque tiene una clara respuesta lineal en un amplio rango de frecuencias, son razonablemente

económicos y proveen una señal de salida elevada para los relativamente bajos niveles de energía en rangos de alta frecuencia. Son útiles para controlar rodamientos. Los modernos colectores de datos y analizadores en tiempo real, tienen la capacidad de integrar la señal en velocidad, y la posibilidad de mostrar ambas mediciones para potenciar el análisis.-

Otro sensor muy utilizado es el de velocidad. Estos se los monta en la cabeza de la máquina o cojinete. Algunos son de estado sólido, con integración electrónica interna y salida en velocidad. Son efectivos en bajas e intermedias frecuencias, (en el rango de 10 a 1500 Hz). La velocidad se considera el parámetro más conveniente para evaluar el estado de las máquinas. Deben estar bien montados, con un correcto contacto con la superficie a sensar.-

Sensores de velocidad



- Usualmente para portacojinete o vibración del cuerpo de la máquina.
- Efectivos en el rango de baja a media frecuencia (10 Hz a aprox. 1.500 Hz) .

Los sensores de desplazamiento son comúnmente conocidos como de corrientes parásitas (eddy current). Este sensor no tiene contacto con el eje, y mide la distancia a la superficie de medición. Se los utiliza en equipos con cojinetes de deslizamiento, con una película de aceite. Su tamaño es pequeño, con filetes roscados, con un bobinado de alambre muy fino, protegido con un recubrimiento delgado y no conductivo.

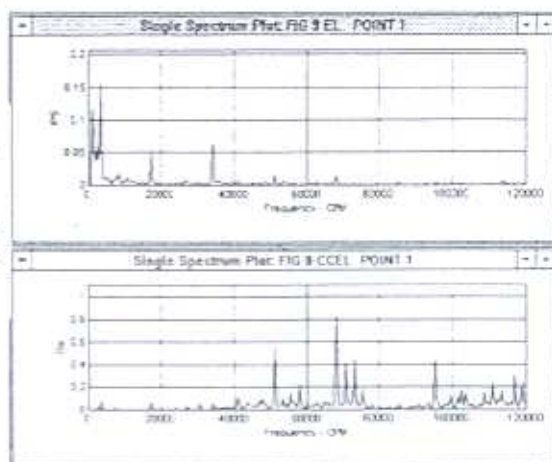
Tiene como ventaja, que tiene respuesta precisa en bajas frecuencias; pero como desventaja es difícil de instalar o reemplazar.

En cuanto al monitoreo de los parámetros que se miden, es importante poder notar la diferencia en los espectros cuando medimos el mismo dato en Velocidad y Aceleración. A continuación vemos un gráfico con esta diferencia.

Espectro en velocidad

Eventos en bajas frecuencias (desbalanceo, desalineación, etc...) se aprecian mejor en el espectro en velocidad. En tanto para las fallas de alta frecuencia de rodamientos o engranajes es mejor el espectro en aceleración.

Espectro en aceleración



Normalmente primero se mide velocidad, luego aceleración, envolvente de aceleración, etc. Los colectores de datos modernos y portátiles, brindan la posibilidad de configurar más de 12 mediciones en un punto. Usando el mismo sensor dual y solo presionando un botón, se colectan las mediciones preconfiguradas. El analista puede montar el sensor horizontalmente sobre la carcasa del cojinete y medir:

- Velocidad (para eventos de baja frecuencia)
- Aceleración (para medias y altas frecuencias)
- Envolvente de aceleración (en bandas múltiples para determinar rodamientos y engranajes)
- SEE (para detectar lubricación y estado de rodamientos)

Con adecuados límites de alarmas, se tiene un alto estado comprensivo, y ayuda al analista a aislar el problema con poco tiempo de esfuerzo en la colección de datos.

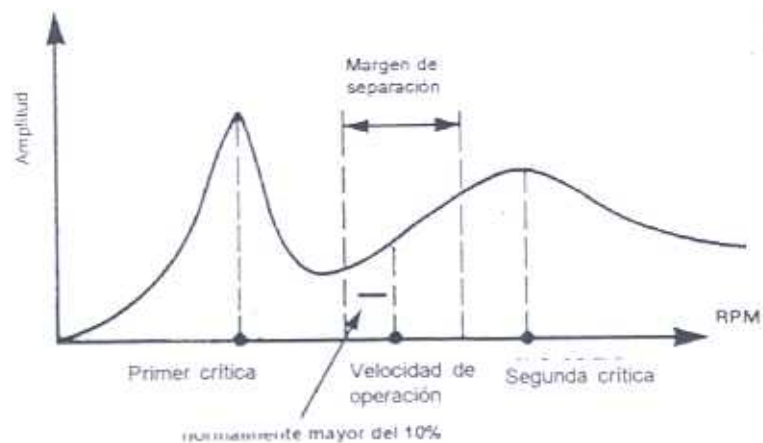
Las r.p.m. del eje determinan la frecuencia fundamental de interés. Generalmente se desea que el transductor provea de información sobre el rango de 0.4 – 1.0 veces la frecuencia de rotación, hasta varias veces (3X a 6X). Las máquinas en buen estado, usualmente, vibran solamente a la frecuencia de rotación.

En la selección del tipo de sensor es muy importante también el tipo de máquina que se analiza. Las máquinas con álabes o vanos (bombas, ventiladores, compresores, turbinas, etc.) pueden generar vibraciones de interés a frecuencias igual al número de álabes/vanos por las r.p.m. Para estos casos se usan los acelerómetros. La amplitud y la aptitud de la medición, es influenciada por la relación de masa entre los álabes/vanos, rotor/eje y carcasa. Por ello, pueden rendir menos datos aquellos ventiladores y bombas con los álabes/vanos con mayor masa respecto del eje/rotor.

Los cojinetes de desplazamientos son excelentes fuentes de señales vibratorias, a pesar de la amortiguación ejercida por algunos elementos entre el eje y el sensor (aceite, metal blanco, carcasa, etc.)

El posible tipo de falla es el mejor factor para seleccionar el tipo de sensor. Los sensores son como ventanas, a través de las cuales, se pueden observar porciones de las señales. Los sensores de desplazamiento tienen un rango máximo de 0 a 1.000 Hz, los de velocidad desde 10 a 1.500 Hz y los de aceleración desde cerca de 0 a aproximadamente 40 kHz.

Otro punto importante de destacar es la resonancia. Muchos problemas de vibraciones de las máquinas, ocurren cerca de su frecuencia natural, que es puesta en resonancia por la excitadora (r.p.m.), y como resultado, puede aumentar su amplitud original hasta 20 veces.



Nota: se denomina velocidad crítica a la velocidad de rotación de la máquina que coincide con la frecuencia natural. Cuando esto ocurre, la magnitud de la amplitud de la vibración se amplifica.

En general los elementos flexibles y livianos pueden generar señales significativas y alterar las vibraciones de otros componentes. Los elementos pesados y rígidos pueden actuar como buenos conductores o transmisores de las señales vibratorias. En las proximidades de la resonancia, si el balanceo o la alineación no están en tolerancia, la vibración de la máquina podrá ser excesiva, o un pequeño aumento en la velocidad resultará en un incremento de la vibración.

Por último debemos destacar que hay una gran diferencia entre detectar un problema y analizar las causas. Cambiando un cojinete con desgaste por una vibración excesiva, se podrá o no resolver el problema de vibraciones, pero para resolver el problema debemos resolver la causa raíz (por ejemplo lubricación inadecuada, desalineación, flojedad, desbalanceo). Si esto no se hace, el nuevo cojinete también tendrá desgaste prematuro.

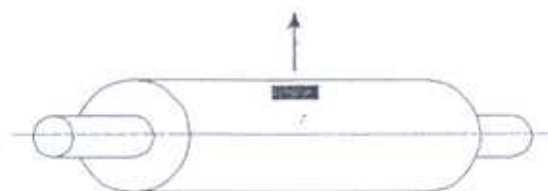
Una vez detectada la falla, tendremos información sobre el problema mismo, y de la raíz de falla. Con la experiencia, seremos capaces de identificar los problemas específicos de las máquinas por su característica vibratoria (dirección, espectro, relación de fases, etc)

5. Problemas Comunes de Máquinas

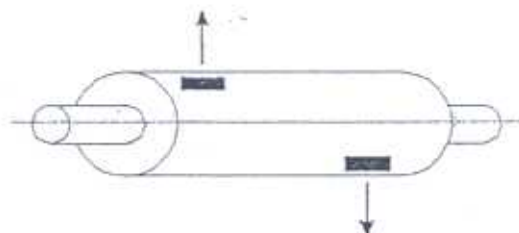
Desbalanceo

Uno de los problemas con mayor frecuencia en las máquinas son los de desbalanceo y alineación. El desbalanceo ocurre cuando el eje central de masa no coincide con la línea central geométrica. Hay tres tipos de desbalanceo: estático, cupla y dinámico; que es la combinación de los dos primeros.

En el desbalanceo estático solo se considera una fuerza. Para poder observarla, se puede colocar el rotor en un soporte antifricción. El rotor girará hasta que la zona pesada quede abajo. El término estático significa que este tipo de desbalanceo, puede observarse en reposo. Se produce generalmente por desgaste radial superficial no uniforme en rotores en los cuales su largo es despreciable en comparación con su diámetro.



El desbalanceo en cupla no puede medirse en reposo. Dos fuerzas (pesos) iguales, están dispuestos a 180° entre sí, lo que implica que el rotor está balanceado en reposo. Pero cuando gira, estas fuerzas mueven al rotor en direcciones opuestas, en sus respectivos extremos del eje. Esto causará que el eje se mueva, con una diferencia de fase de 180° entre ambos extremos.



En realidad todos los desbalanceos son dinámicos. Se llama así a la combinación del desbalanceo estático y en cupla. En las máquinas simples (un plano), es usual observar desbalanceo estático más que dinámico (poleas, ventiladores, etc.). En máquinas más complejas, con rotores con varios planos, el más importante es el desbalanceo en cupla. Cuando se monta una máquina, en muchos casos es conveniente verificar primero el desbalanceo estático sobre apoyos, por seguridad, y luego realizar el balanceo de la cupla en todos los planos.

Podemos resumir de acuerdo al tipo de medición, qué debemos observar para diagnosticar los diferentes problemas de máquinas.

Es probable QUE SEA desbalanceo si:

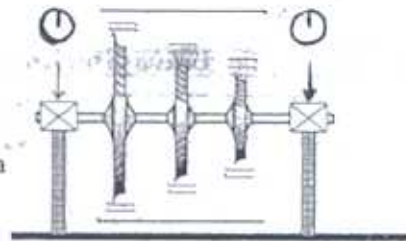
- (Medición de vibración global) – Tiene alta energía, baja frecuencia, vibración radial (en máquinas horizontales la amplitud se incrementa más en el sentido horizontal que vertical).
- (Mediciones espectrales) – Tiene una amplitud en 1 X r.p.m. más alto que lo normal.
- (Mediciones espectrales) – Con 1 X elevada, las armónicas (2X, 3X, 4X, etc.) son bajas o no existen. (< 15 % de 1X)
- (Mediciones espectrales) – la amplitud 1X se incrementa con el aumento de la velocidad (luego de pasar por la velocidad crítica)
- (Medición de fase) – Para desbalanceo que predomina el estático, es normal el mismo ángulo en los cojinetes extremos de la máquina y luego del acoplamiento. (Es decir en fase)
- (Medición de fase) – El sensor mostrará 90° de diferencia de fase entre la posición horizontal y vertical en el mismo cojinete.

Es probable QUE NO SEA desbalanceo si:

- Un incremento pequeño en velocidad produce un gran incremento en la amplitud. (Chequear por resonancia)
- Las amplitudes de las mediciones verticales se incrementan mucho más que las horizontales. (Chequear por flojedades)
- Las mediciones axiales son mayores que las radiales. (Chequear por desalineación)
- Si las armónicas de las r.p.m. en 2X y 3X se incrementan con la velocidad. (Chequear por problemas de alineación, flojedad en cojinetes, eje torcido, etc.)

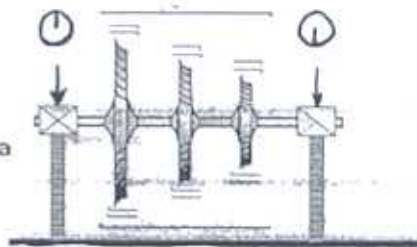
Desbalanceo estático

vibración en toda la máquina
"en fase"



Desbalanceo en cupla

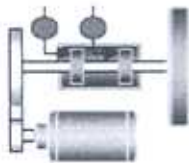
vibración en toda la máquina
"desfasada 180 grados"



Rotor colgante

Ocurre en rotores que se encuentran en el extremo de un eje. Es producido por desgaste en la superficie del rotor y doblamiento del eje. El espectro presenta vibración dominante en la 1X, muy notoria en dirección axial y radial.

Para corregir la falla primero hay que verificar que el rotor no tenga excentricidad ni que el eje este doblado. Luego se debe realizar el balanceo adecuado.



Desalineación

La desalineación, por su parte, ocurre cuando los ejes, acoplamientos y cojinetes no son alineados a lo largo de su línea central.

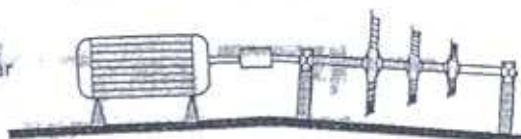
Los tipos de desalineación pueden ser: angular y paralela, en la práctica generalmente se presentan las dos.

La desalineación angular ocurre cuando dos ejes se unen alabeados entre sí de tal manera que se induce una fuerza que tiende a doblar los ejes.

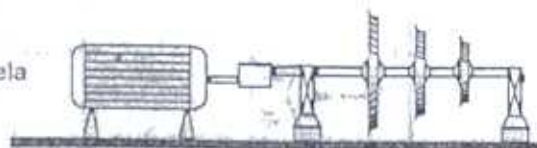
La desalineación paralela se da cuando las líneas centrales de los ejes son paralelas, pero desplazadas una de otra.

Ambas deben medirse en los planos horizontal y vertical.

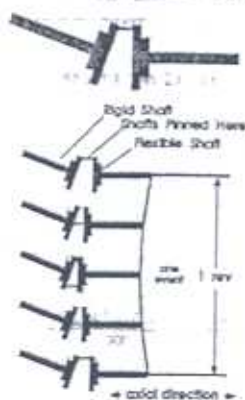
Desalineación angular
o axial



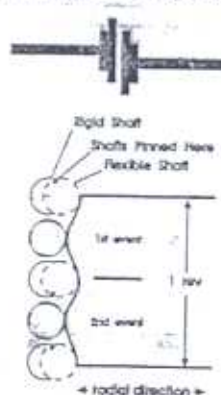
Desalineación paralela
o radial



Desalineación angular



Desalineación paralela



Una desalineación angular pura causa una vibración axial a la frecuencia de rotación (1X)

Una desalineación radial pura produce una vibración radial a dos veces las r.p.m. (2X)

Una desalineación excesiva, u otras fallas, además producen vibraciones en 3X

Es probable QUE SEA desalineación si:

- (Medición del valor global) – Es de alta energía, baja frecuencia, vibraciones radiales y axiales (la desalineación típicamente presenta un valor axial alto respecto del radial).
- (Medición del valor global) – Las fuerzas de desbalanceo son iguales en los planos horizontal y vertical, en cambio las de desalineación no son así. Si la vibración vertical supera a la horizontal, es probable una desalineación que un desbalanceo.
- (Medición del valor global) – La amplitud de la vibración en el plano horizontal se incrementa 2 o 3 veces.
- (Medición espectral) – Amplitudes más altas que lo normal en 1X/2X/3X, en sentidos radiales y axiales. La amplitud 2X no siempre está presente pero sí puede variar desde un 30% de 1X hasta 100% - 200% de 1X.
Las amplitudes de 2X < 50% de 1X son aceptables usualmente y pueden operar por un largo periodo de tiempo. Cuando 2X está entre un 50% a 150% de 1X es probable que ocurra un daño en el acoplamiento. La máquina con 2X mayor de 150% de 1X tiene una severa desalineación, el problema se debe corregir lo antes posible.

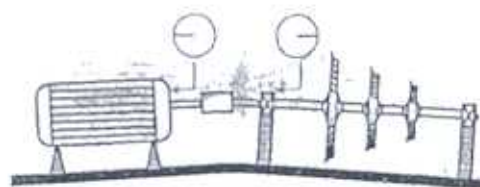
- (Mediciones espectrales) – Cuando hay una severa desalineación, el espectro puede contener armónicas de 3X a 10X.
- (Medición de fase) – **Desalineación angular** – En la posición axial, la fase difiere 180° a través del acoplamiento.
- (Medición de fase) – **Desalineación paralela** – En la posición radial, hay una diferencia de fase de 180° a través del acoplamiento. Una diferencia de 0° a 180° puede ocurrir si el sensor se mueve desde el plano horizontal al vertical, en el mismo cojinete.
- (Medición de fase) – Combinación de desalineación angular o paralela – En la posición radial y axial, hay una diferencia de fase de 180° a través del acoplamiento.

Es probable QUE NO SEA desalineación si:

- Las mediciones de amplitud axial son bajas. (Controlar flojidades)
- Las amplitudes de las armónicas 4X-10X son altas, o si está presente ½ armónica. (Controlar flojidades)

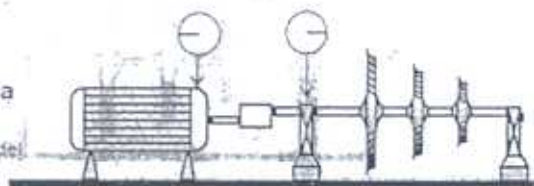
Desalineación angular

Mediciones axiales en los cojinetes, a ambos lados del acoplamiento, desfasadas 180 grados



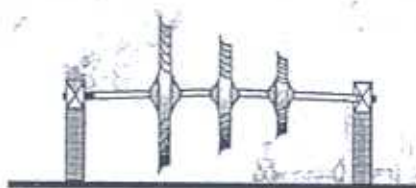
Desalineación paralela

Mediciones radiales en los cojinetes, en ambos lados del acoplamiento, desfasadas 180 grados



Eje torcido

Otro problema que suele aparecer es el de eje torcido y se presenta de la misma forma que el problema de desalineación. Lo que permite distinguir una de otra es la medición de fase.



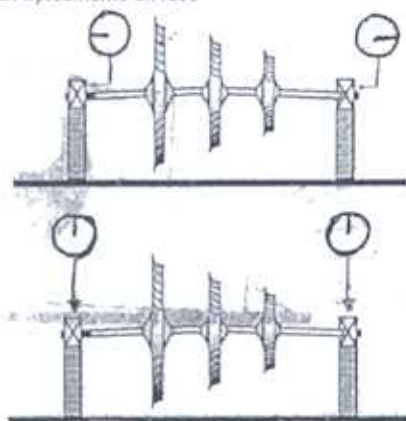
Los síntomas de fase del eje doblado aparecen a lo largo del eje estando desacoplado. La desalineación ocurre con los ejes acoplados.

Es probable que el eje esté doblado si:

- Si está desacoplado y además:
- (Valor global y espectro) – Similar a la desalineación.
- (Medición de fase) – En la posición axial: 180° de diferencia de fase.
- (Medición de fase) – En la posición radial: no hay diferencia de fase entre los cojinetes en los extremos del eje.
- El plano primario de vibración es en el sentido axial, dominante en 1X, no se presenta una cupla, hay una diferencia de 180° en sentido axial y no hay diferencia de fase en sentido radial. Estas características corresponden a síntomas de eje doblado.

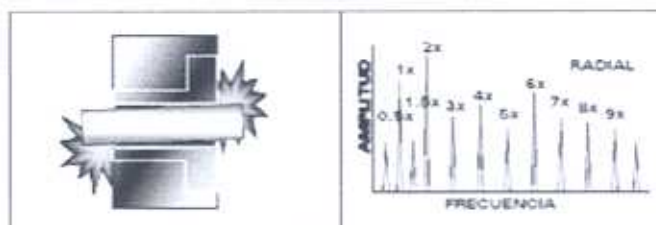
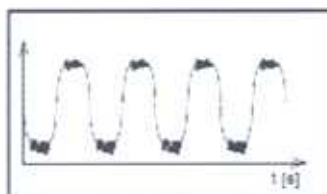
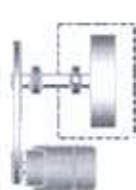
1 - mediciones axiales en los extremos de la máquina, tienen típicamente 180° de desfase

2 - Las mediciones radiales están típicamente en fase



Holgura mecánica eje – agujero

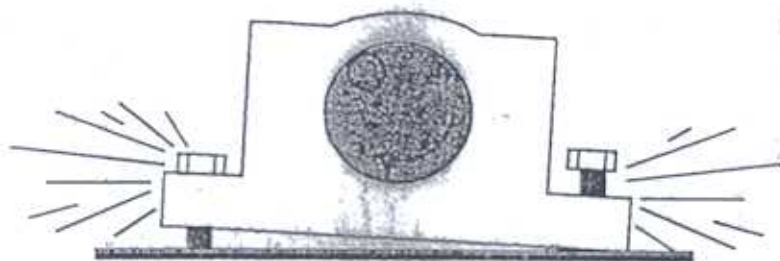
Se trata por ejemplo de aflojamiento de manguitos, tolerancias de fabricación inadecuadas, y holgura entre el impulsor y su eje en bombas. Causa un truncamiento en la forma de onda en el dominio del tiempo.



La falla genera múltiples armónicas y subarmónicas de 1X, destacándose las armónicas fraccionarias $1/2X$, $1/3X$, $1,5X$, $2,5X$, etc. Frecuentemente la fase es inestable y el nivel máximo tiende a una dirección notable realizando lecturas radiales espaciadas 30° entre sí.

Flojedades mecánicas

Por último, las flojedades mecánicas o montajes incorrectos se caracterizan generalmente por una larga sucesión de armónicas de las r.p.m. o $\frac{1}{2}$ de las r.p.m. con amplitudes anormalmente elevadas.



Es probable una flojedad mecánica si:

- (Medición global) – Posee una alta energía vibratoria radial, especialmente en el plano vertical.
- (Medición global) – En el plano axial las vibraciones son bajas.
- (Medición espectral) – Hay una amplitud en frecuencia de rotación anormal, seguida por armónicas altas, posiblemente $\frac{1}{2}$ de las r.p.m. también (de 2X a 10X). Los picos de las armónicas decrecen en amplitud a medida que crece la frecuencia (excepto a 2X, en el plano vertical puede ser mayor).
- Si hay una serie de tres o más múltiplos sincrónicos o $\frac{1}{2}$ de las r.p.m. (en el rango 2X a 10X), y su magnitud es mayor de 20% de 1X)
- Si la máquina es de acoplamiento rígido (sin acople flexible o correa) y la componente radial 2X es alta, también es síntoma de flojedades.

Problemas en Rodamientos

Los rodamientos pueden fallar por problemas de lubricación, contaminación del lubricante, cargas elevadas (desbalanceo, desalineación, eje doblado, etc.), mal manipuleo o montaje inadecuado, vejez (fatiga superficial), etc.

La fatiga inicial aparece inmediatamente debajo de la zona de rodadura con carga. Luego de un tiempo este esfuerzo provoca picaduras que se extienden gradualmente sobre la superficie. Al pasar los elementos rodantes sobre la falla, se fragmenta nuevamente. Esto se conoce como spalling o flaking. El spalling se incrementa progresivamente hasta inutilizar el rodamiento. Este tipo de daño es de progresión lenta.

Otro tipo de falla se inicia por distress de la superficie. Se forman cráteres en la superficie y penetran en el material. También lo puede causar la carga excesiva o la lubricación inadecuada.

Muchos rodamientos continúan operando con pequeñas fallas pero en el transcurso del tiempo, comienzan a incrementarse y progresan llegando a roturas catastróficas.

Así mismo pueden ocurrir fallas en la jaula del rodamiento, la frecuencia a la que generalmente se manifiestan estos fallos se la denomina "**frecuencia de falla de jaula**".

La recolección de datos debe incrementarse cuando el rodamiento comienza a demostrar una tendencia de falla.

Por otra parte existe una relación física entre la geometría de los rodamientos y la señal vibratoria emitida por los defectos de cada componente del rodamiento.

Si se conocen las dimensiones geométricas (diámetro de las bolillas, diámetro medio, número de bolillas, y ángulo de contacto), podemos calcular las frecuencias de falla de cada componente del rodamiento. Estos datos generalmente los suministra el fabricante del rodamiento a los especialistas en mantenimiento predictivo. Luego que se conocen las frecuencias de falla, analizamos el espectro para identificar los picos de esas frecuencias (o sus armónicas). Un pico en la frecuencia de falla, indica que el rodamiento tiene problemas, y cuál es la ubicación del mismo en el rodamiento.

Las frecuencias de falla de rodamiento se calculan individualmente para cada rodamiento:

Las denominaciones de cada frecuencia de falla se conocen como:

Pista exterior:	outer race	= BPFO (ball Pass Frequency Outer Race)
Pista interior:	inner race	= BPFI (Ball Pass Frequency Inner Race)
Canasto:	cage	= FTF (Cage Frequency or Fundamental Train Frec)
Bolillas:	rolling elements	= BSF (Ball Spin Frequency)

Estas cuatro frecuencias de defectos se calculan usando ecuaciones relativas a su geometría. A título de ejemplo, la ecuación para calcular BPFO es:

$$BPFO = \frac{(n) \times (r.p.m.)}{2} \times \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \times \cos A\right)$$

donde:

n = número de bolillas

Bd = diámetro de bolilla

Pd = diámetro pitch

A = ángulo de contacto

TABLAS DE DIAGNOSTICO DE VIBRACIONES

Según la norma ISO 2372, podemos resumir lo visto hasta el momento de la siguiente manera:

(Eje Horizontal)

	Excesiva vibración horizontal Indica:	Excesiva vibración vertical Indica:	Excesiva vibración axial Indica:	Excesiva vibración estructural Indica:	
Desbalanceo	Si	No	No	No	HORIZONTAL > AXIAL
Desalineación	No	Si	Si	No	AXIAL > HORIZONTAL
Flojedades	Si	Si	No	Si	VERTICAL = HORIZONTAL
Fallas eléctricas	---	---	---	---	Cortar la alimentación eléctrica. Si la vibración cesa el origen es eléctrico.

Si: ISO 2372: No admisible

No: ISO 2372 normal

(Voladizo – Eje horizontal)

	Excesiva vibración horizontal Indica:	Excesiva vibración vertical Indica:	Excesiva vibración axial Indica:	Excesiva vibración estructural Indica:	
Desbalanceo	Si	No	Si	No	HORIZ. Y AXIAL > VERTICAL
Desalineación	Si	No	Si	No	HORIZ. Y AXIAL > VERTICAL
Flojedades	Si	Si	No	Si	VERTICAL = HORIZONTAL
Fallas eléctricas	---	---	---	---	Cortar la alimentación eléctrica. Si la vibración cesa el origen es eléctrico.

Usar fase para diferenciar desbalanceo de desalineación

(Eje Vertical)

	Excesiva vibración radial 1 Indica:	Excesiva vibración radial 2 Indica:	Excesiva vibración axial Indica:	Excesiva vibración estructural Indica:	
Desbalanceo	Si	No	No	No	RADIAL > AXIAL
Desalineación	Si	No	Si	No	RADIAL > AXIAL
Flojedades	Si	No	No	Si	
Fallas eléctricas	---	---	---	---	Cortar la alimentación eléctrica. Si la vibración cesa el origen es eléctrico.

Radial 1 y radial 2 difieren en 90°

TABLA DE ANALISIS DE FASE

	Plano primario	Frecuencia dominante	Relación de fase
DESBALANCEO			
Masa	Radial	1X	90° cuando el sensor se mueve de la posición horizontal a la vertical.
Masa voladizo	Axial y radial	1X	Lectura axial en fase.
Eje torcido	Axial y radial	1X	180° de cambio en el sentido axial, radial en fase.
DESALINEACION			
Angular	Axial	1X, 2X	180° de diferencia en el sentido axial y entre ambos equipos.
Paralela	Radial	1X, 2X	180° de diferencia en el sentido radial, en ambos lados del acople. De vertical a horizontal, en el mismo cojinete mostrará 0° a 180°.
Combinación	Axial y radial	1X, 2X	Diferencia de 180° radial y axial a ambos lados del acoplamiento.
FLOJEDADES MECANICAS			
Estructural	Radial	1X	Cambio de fase de 180° entre la pata de la máquina, fundación, base.
Pata floja	Radial	1X, 2X	La fase cambia cuando se aprietan los bulones.
Roce	Axial y radial	1X, 2X, ...10X	La fase es inestable entre una lectura y otra.