



Medición sobre bomba centrífuga



Medición sobre motorreductor

## Unidad 11EM: VIBRACIONES Y BALANCEO

# Introducción a la práctica de medición de vibraciones en máquinas rotantes, y su posterior análisis

## a) Repaso de Teoría

- a) Determinación de variables geométricas
- b) Determinación de los cargas sobre el diente

## b) Problema de aplicación

- a) Enunciado
- b) Variables de entrada
- c) Dimensionamiento geométrico
- d) Verificación según LEWIS

## Vibraciones Mecánicas

- ✓ Físicamente las vibraciones mecánicas no son más que las ondas mecánicas las cuales se originan por el desplazamiento de alguna parte de un medio elástico de su posición normal, causando oscilaciones alrededor de una posición de equilibrio.
- ✓ A causa de las fuerzas elásticas sobre capas adyacentes, esta perturbación se transmite de una capa a la próxima.
- ✓ Mediante el movimiento ondulatorio se puede transmitir energía a distancias considerables.
- ✓ La energía en las ondas está en la forma tanto de energía cinética como de energía potencial de la materia.
- ✓ **Pero al mismo tiempo las vibraciones son el mejor indicador de la condición mecánica de una maquinaria y pueden ser una herramienta de predicción muy sensible de la evolución de un defecto**

## Vibraciones Mecánicas

- La vibración en toda maquinaria es causada por una fuerza de excitación o fuerza excitatriz.
- Esta fuerza o perturbación puede ser originada por el contacto entre los componentes internos de la máquina ó externamente a consecuencia de las máquinas que se encuentran a su alrededor.
- De manera inherente, todo mecanismo vibra por la naturaleza de sus componentes, es decir, vibra por naturaleza propia.
- **Las consecuencias de las vibraciones excesivas son el aumento de los esfuerzos y las tensiones, pérdidas de energía, desgaste de materiales, y las más peligrosas: daños por fatiga de los materiales, además de ruidos molestos en el ambiente laboral, etc.**



# Vibraciones Mecánicas

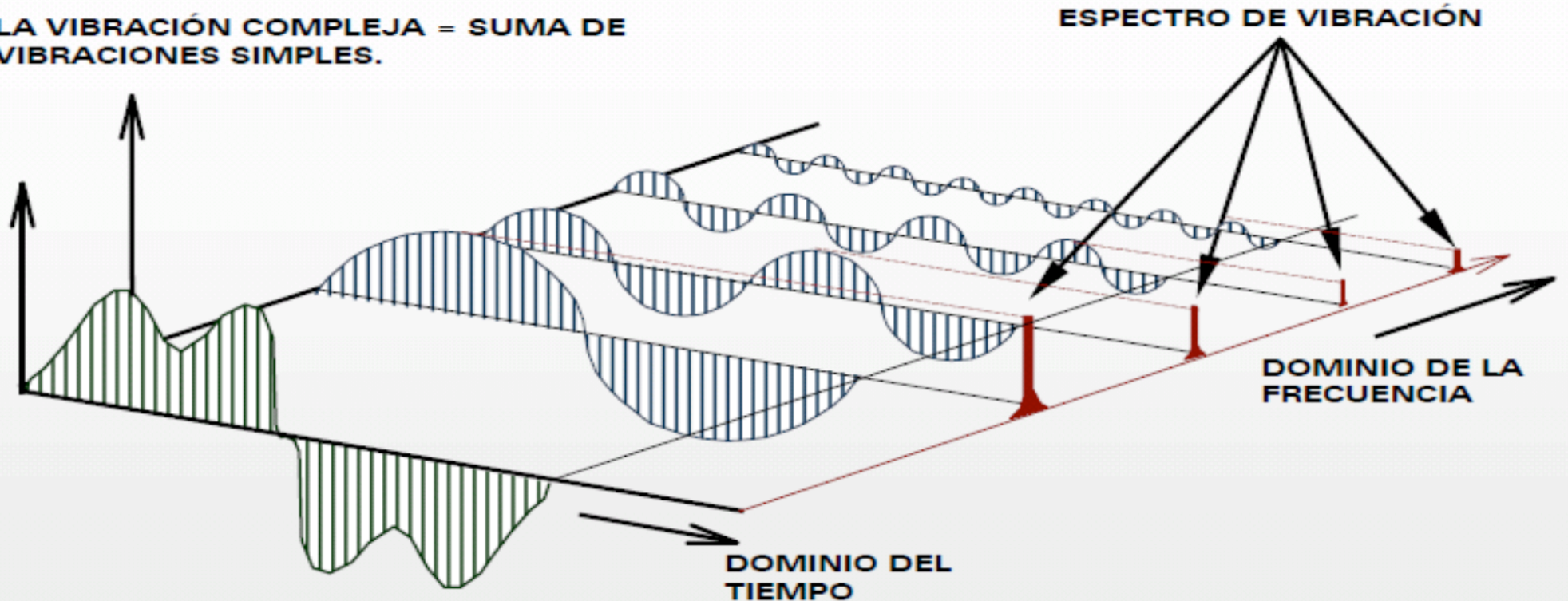
- 📌 El análisis de las señales vibratorias puede indicar el tipo de defecto existente pero en muy pocas ocasiones aparece un único defecto.
- 📌 La experiencia y el conocimiento de la maquina son dos factores fundamentales a la hora de identificar la causa que produce una vibración.
- 📌 **Generalmente, la causa de la vibración reside en problemas mecánicos como son: desequilibrio de elementos rotativos, ejes doblados, desalineación en acoplamientos, engranajes desgastados o dañados, rodamientos deteriorados, fuerzas aerodinámicas o hidráulicas, resonancias, etc.**
- 📌 Usando el análisis frecuencial se pueden identificar fuentes de vibraciones no deseadas, como desalineamiento, desequilibrios, defectos en engranajes o cojinetes, problemas eléctricos, etc.
- 📌 El movimiento de los componentes junto a sus características geométricas ocasiona un aumento de amplitud de frecuencia características cuando existe fallo o deterioro, pudiendo relacionar y como consecuencia identificar el defecto observando el espectro de frecuencias.

## Dominio del tiempo vs. Dominio de la Frecuencia

- El dominio temporal da una perspectiva natural de la vibración, con sentido físico. Es especialmente útil cuando se analizan señales impulsivas de fallos en rodamientos y engranajes. El dominio temporal (señal temporal) también es útil para analizar las relaciones de fase de la vibración.
- El objeto del análisis en frecuencia es descomponer una señal compleja (como las vibraciones mecánicas) en componentes mas elementales que permitan un estudio mas sencillo.

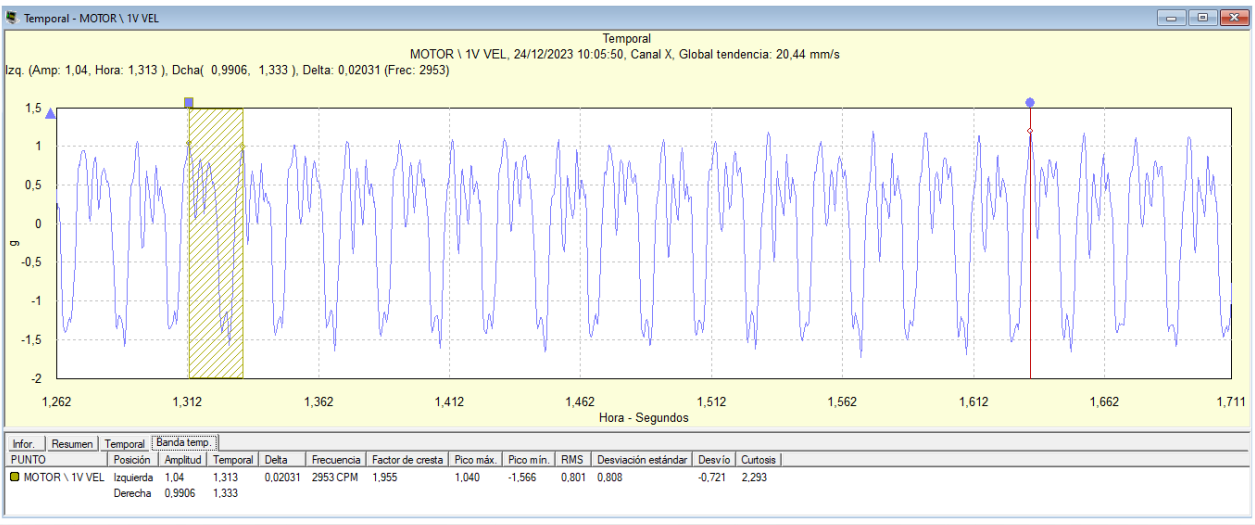
## Dominio del tiempo vs. Dominio de la Frecuencia

LA VIBRACIÓN COMPLEJA = SUMA DE VIBRACIONES SIMPLES.



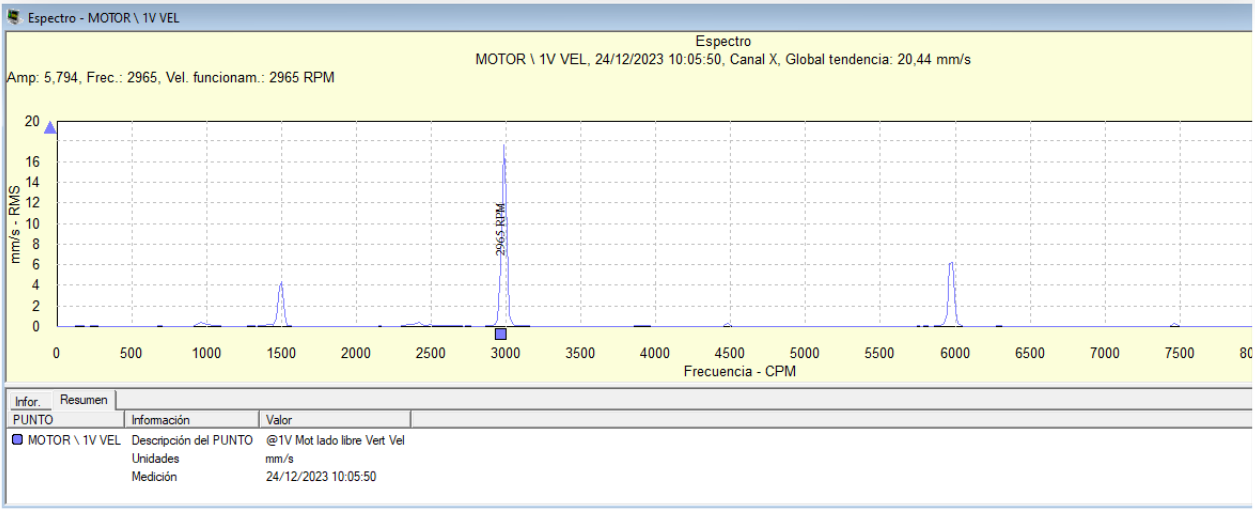
SEÑALES EN EL DOMINIO DEL TIEMPO Y EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA (ESPECTRO)

# Dominio del tiempo vs. Dominio de la Frecuencia: ejemplo



Parámetro graficado: velocidad Vertical

Vibraciones en el dominio del tiempo, o también llamado gráfico temporal de la velocidad



Vibraciones en el dominio de la frecuencia, o también llamado espectro de frecuencias

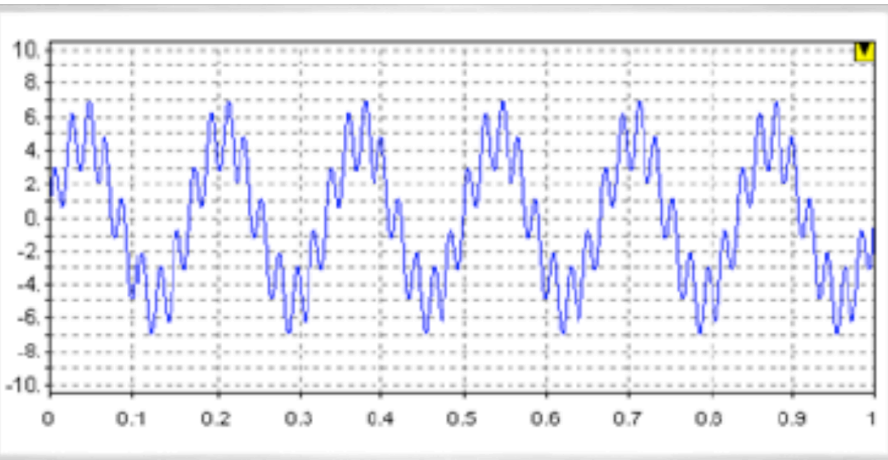
onda 1x: 3000 rpm

onda 0,5x: 1500 rpm

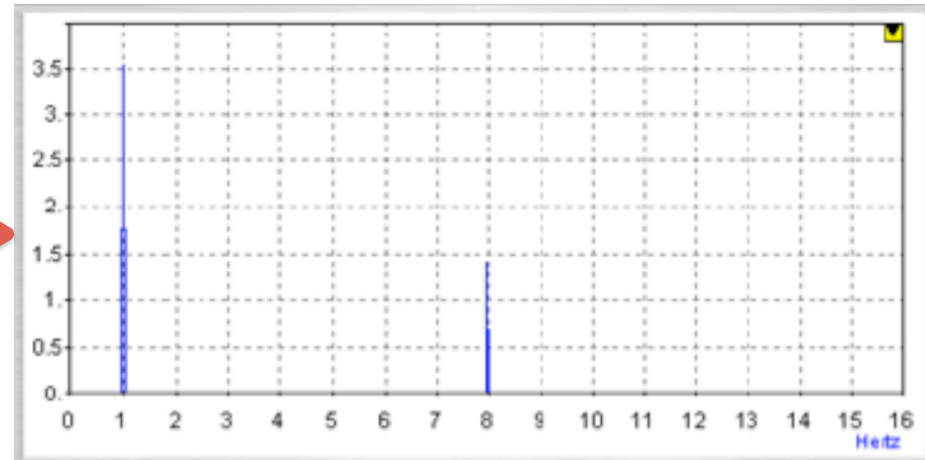
onda 2x: 6000 rpm

# Transformada de Fourier

Es una función matemática que permite obtener a partir de la forma de la vibración u onda en el tiempo, la conexión matemática entre el dominio tiempo y el dominio frecuencia y viceversa. Permite, conocida una **señal en el tiempo** calcular su **espectro** característico.



Señal en el tiempo



Espectro de frecuencias



# **Tipos de Vibraciones Mecánicas**

## **Vibración Libre**

Se conoce como vibración libre a la oscilación del sistema que ocurre sin presencia de una excitación externa. Es el resultado de energía cinética en el sistema o de un desplazamiento de la posición de equilibrio que suministra una energía potencial. Algunos ejemplos son: el péndulo cuando se lleva hacia algún punto y después se suelta; la suspensión de un automóvil después de pasar por un tope o un bache; la vibración en un arma después de haber sido disparada, etc.

## **Vibración Forzada**

La vibración forzada se presenta cuando el sistema vibra debido a una excitación externa. Si la excitación es periódica y continua, la respuesta del sistema podría alcanzar un estado estable; por otro lado, si la fuerza de excitación no es periódica entonces la vibración se denomina transitoria.

## **Vibración Aleatoria**

Es aquel tipo de vibración de la cual no se pueden predecir las magnitudes instantáneas, normalmente contiene componentes no periódicos o no determinísticos.

# Parámetros de las Vibraciones Mecánicas

## Desplazamiento

- Es la distancia recorrida por el objeto vibrante, medida desde su posición de reposo hasta su máximo alejamiento. Es expresada en mils o milipulgadas, o en micras o milésimas de milímetro.
- Es importante para reconocer patrones que están a muy baja frecuencia. Los picos de vibración que están al comienzo del espectro son mejor resaltados.
- Esta es una medida especial para hallar anomalías en turbomaquinaria.

## Velocidad

- Es la rapidez con la que el objeto vibrante cubre el desplazamiento. Se expresa en unidades de pulgada por segundo (pulg/s), o milímetros por segundo (mm/s). Permite reconocer la mayoría de los patrones de fallas primarias y de otros componentes cuando están en un estado evidente.
- **Por ejemplo desbalanceo, desalineación, holgura mecánica, fricciones abrasivas, resonancias, pulsaciones, engranajes de pocos dientes, sistema de poleas, aspas de bombas y ventiladores.**
- Esta variable de velocidad es importante para resaltar picos de bajas y medias frecuencias.

## Aceleración

- Es el cambio de velocidad entre la posición de reposo y el punto máximo de desplazamiento. En ambos puntos la velocidad es cero y la aceleración máxima. Es expresada en G o  $m/s^2$ , medida que indica cuantas fuerzas de gravedad experimenta el elemento vibrante en los procesos de aceleración y desaceleración.
- **La medida en aceleración permite reconocer patrones asociados a contactos metal-metal y fricciones abrasivas, problemas en engranajes, cavitación, entre otros.**
- Esta variable resalta picos de vibración de medias y altas frecuencias, y es muy utilizada para la detección prematura de fallas en soportes, rodamientos, y otros componentes como engranajes.

# Período y frecuencia del movimiento vibratorio

Llamamos período del movimiento al tiempo empleado por el cuerpo en pasar en forma sucesiva por el mismo punto y en la misma dirección. Se lo simboliza con la letra T.

Al número de períodos ejecutados por unidad de tiempo se lo llama frecuencia (f) . Puede expresarse en ciclos por minutos (cpm) o en ciclos por segundos (cps), también llamados Hertz (Hz).

El período y la frecuencia están relacionados a través de la siguiente expresión:

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

## Ejemplo

El ventilador esta girando 5 vueltas completas por segundo, lo cual significa 5 Hz. Si el ventilador completa 5 revoluciones cada segundo, entonces también completa 300 revoluciones por minuto (RPM). Entonces la frecuencia de la vibración asociada al ventilador serian 5 Hz o 300 ciclos por minuto (CPM). Y el período  $T = 1/f = 1/5 = 0,2$  seg

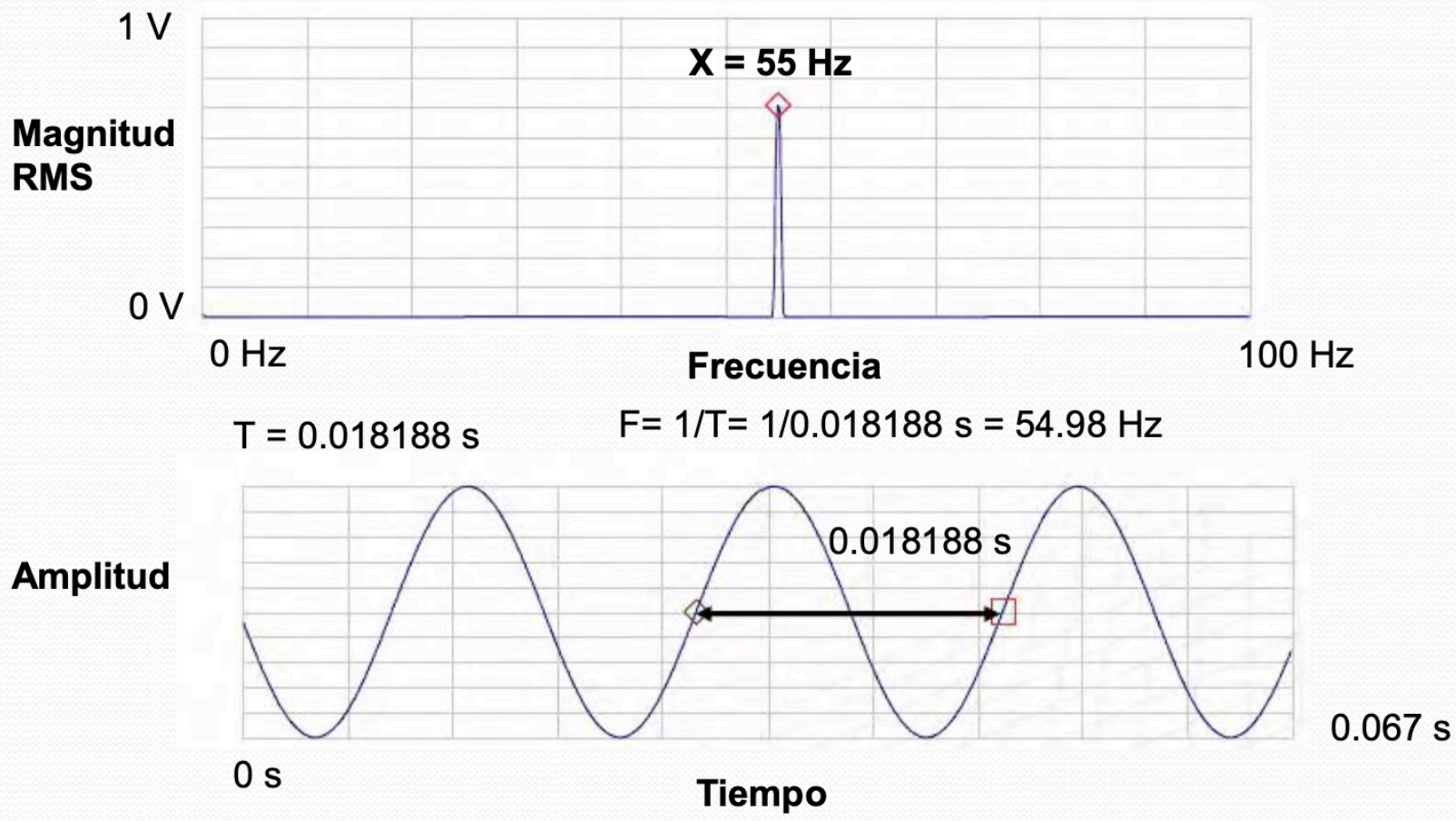
f = Hertz = Hz = Ciclos por segundo

RPM = Revoluciones por minuto

CPM = Ciclos por minuto

CPM = RPM = Hz x 60

T = segundos = 1 / f



# ¿Con qué se mide vibraciones?

## Instrumentos portátiles de medición de vibraciones

¿Qué es el sistema portátil de medición de vibraciones?

Se trata de un sistema que los encargados del mantenimiento de la maquinaria emplean para obtener y analizar datos de las vibraciones de la maquinaria rotante, con el fin de reducir costes de mantenimiento y periodos de inactividad.

Los sistemas de medición de vibraciones mecánicas, en general, están compuestos por:

- Colector de datos
- Módulos de aplicación instalados en el colector de Datos (software)
- Sensores de medición: acelerómetro, base magnética y cable
- Software de análisis en pc: para analizar los datos y curvas obtenidos por el adquisidor de datos



Microlog Analyzer GX (SKF)



Acelerómetros



Base magnética



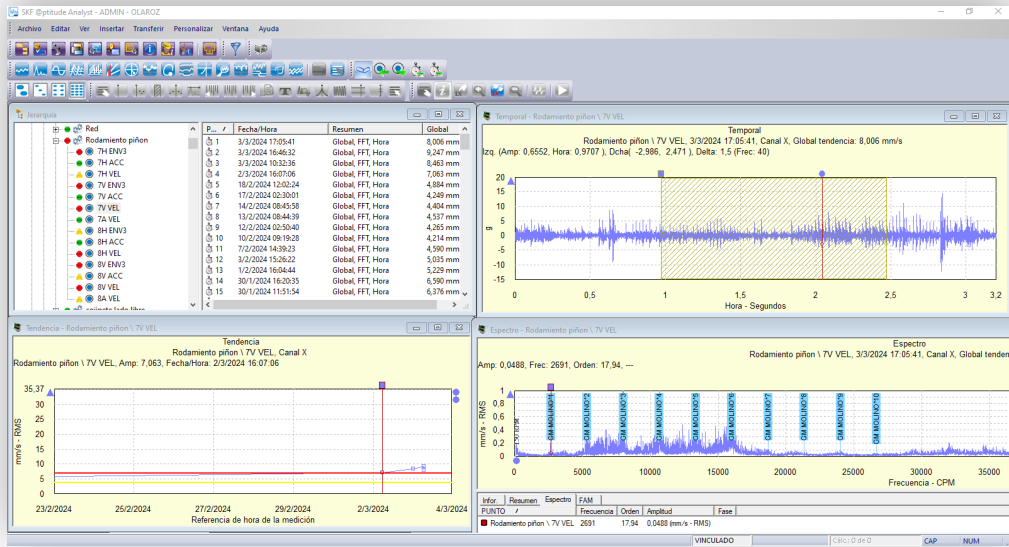
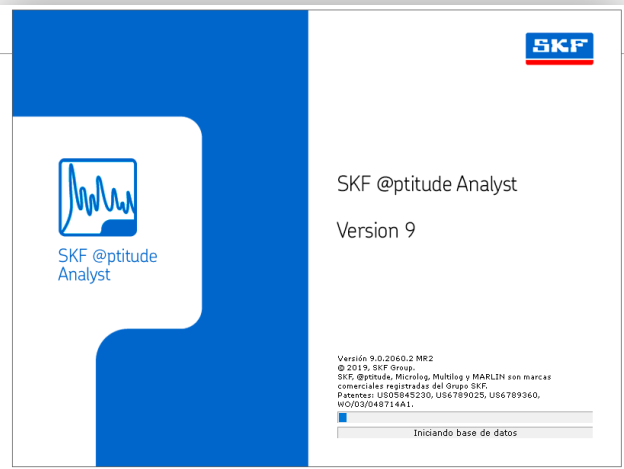
Cable



# ¿Con qué se mide vibraciones?



Equipo Microlog Analyser GX

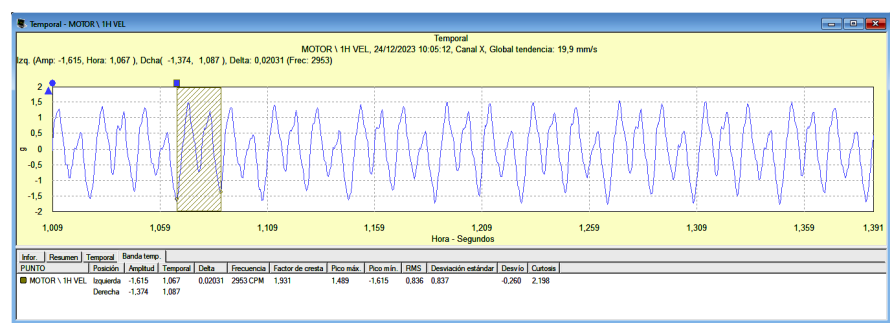


Software Aplitude Analyst SKF

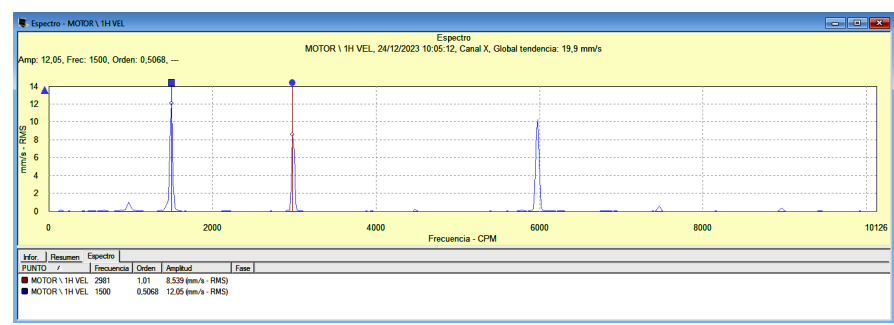
# ¿Que parámetros de miden?

## Velocidad:

Es la rapidez con la que el objeto vibrante cubre el desplazamiento. Se expresa en unidades de pulgada por segundo (pulg/s), o milímetros por segundo (mm/s). Permite reconocer la mayoría de los patrones de fallas primarias y de otros componentes cuando están en un estado evidente.



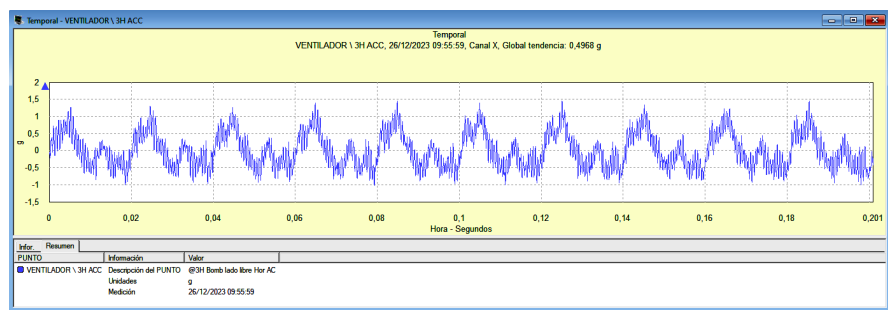
Gráfica temporal de la velocidad



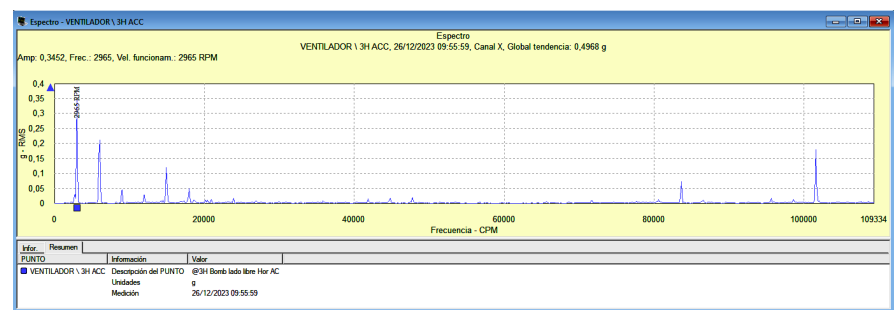
Gráfica de espectro de la velocidad

## Aceleración

Es la tasa de cambio de velocidad entre la posición de reposo y el punto máximo de desplazamiento. En ambos puntos la velocidad es cero y la aceleración máxima. Es expresada en G o m/s<sup>2</sup>, medida que indica cuantas fuerzas de gravedad experimenta el elemento vibrante en los procesos de aceleración y desaceleración.

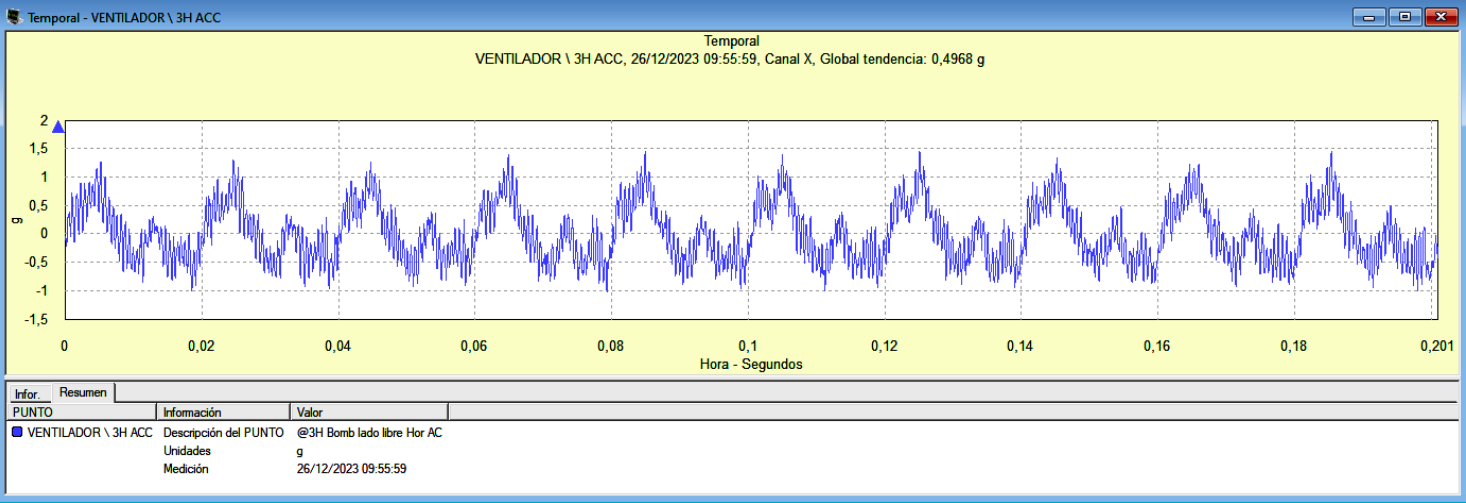


Gráfica temporal de la aceleración

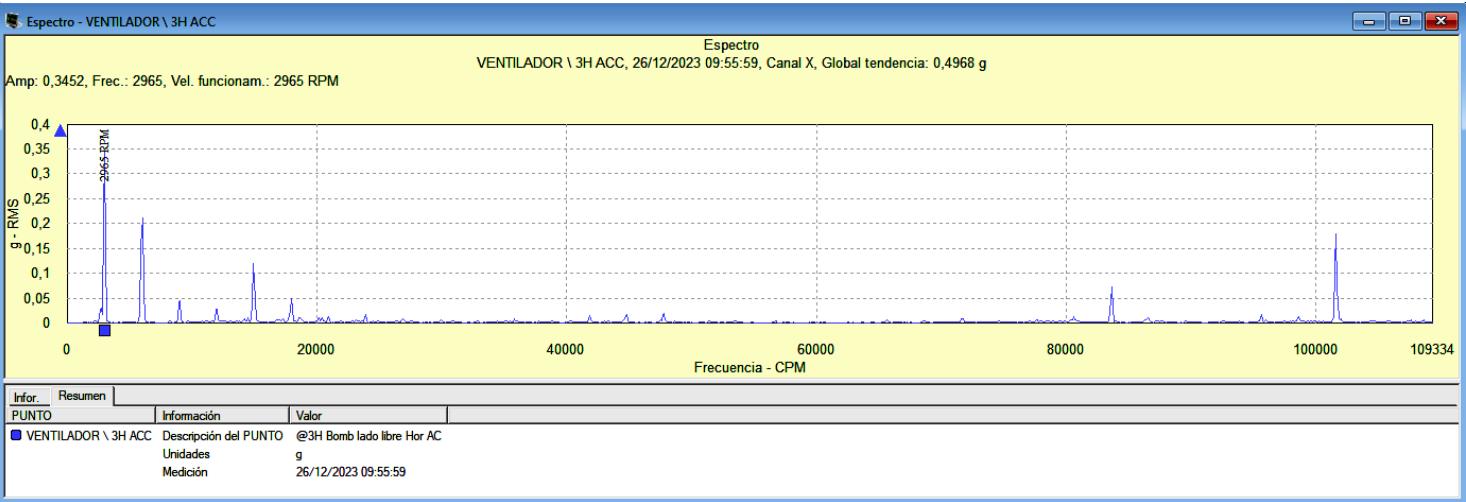


Gráfica de espectro de la aceleración

# ¿Que parámetros de miden?



Gráfica temporal de la aceleración

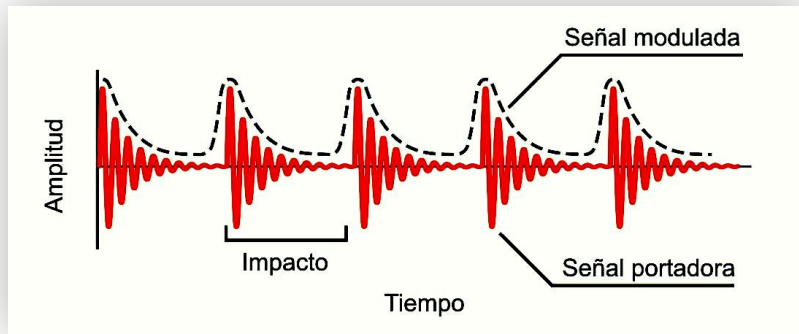


Gráfica de espectro de la aceleración

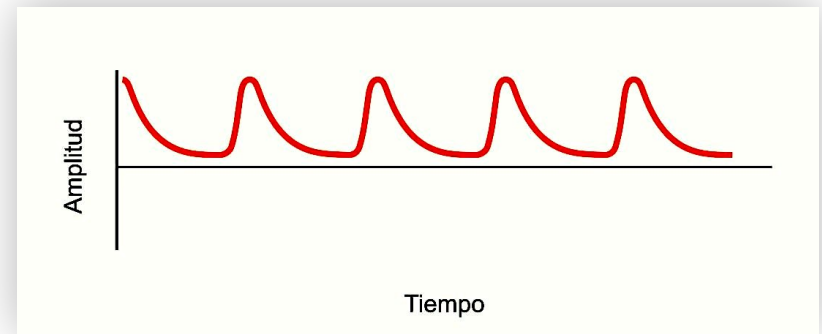
# ¿Que parámetros de miden?

## Envolvente

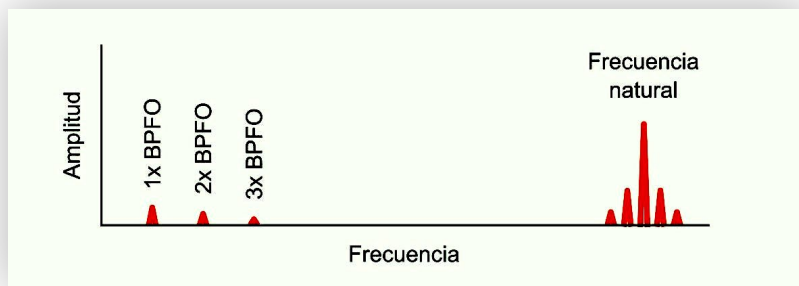
- El proceso de demodulación consiste en obtener a partir de la señal temporal de vibración original (portadora) una nueva señal que contenga únicamente la señal modulada, tal y como se representa en la segunda figura. Esta nueva señal también se conoce como **envolvente de la señal original**. El espectro de la señal demodulada se denomina espectro de demodulación y contiene picos armónicos a la frecuencia de la señal de vibración original.
- La envolvente se mide en gE.



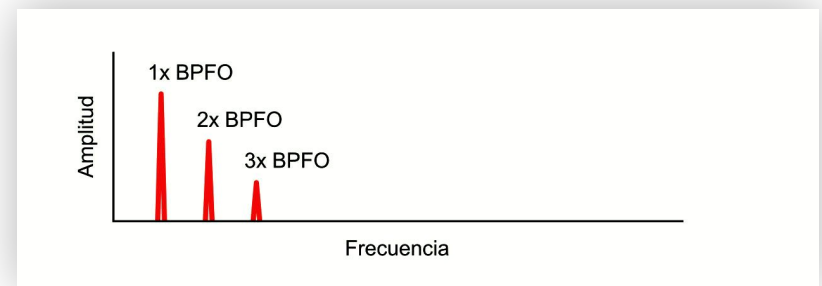
Señal temporal original



Señal Envolvente (modulada)



Espectro de la señal original



Espectro de la señal modulada

# *¿Para que se mide?*

## **Velocidad**

- Con los espectros de velocidad se puede detectar desbalanceo, desalineación, holgura mecánica, fricciones abrasivas, resonancias, pulsaciones, engranajes de pocos dientes, sistema de poleas, álabes de bombas y ventiladores.

## **Aceleración**

- La medida en aceleración permite reconocer patrones asociados a contactos metal-metal y fricciones abrasivas, lubricación deficiente, problemas en engranajes, cavitación, entre otros. Esta variable resalta picos de vibración de medias y altas frecuencias, y es muy utilizada para la detección prematura de fallas en soportes, rodamientos, y otros componentes como engranajes.

## **Envolvente**

- La envolvente permite la detección lo más temprana posible de un fallo de rodamiento, dado que, las frecuencias de fallo del rodamiento que aparecen en el espectro de demodulación constituyen el primer indicador del inicio del deterioro de un rodamiento. La demodulación permite detectar dichas frecuencias de fallo antes de que se vuelvan lo suficientemente fuertes como para aparecer en el espectro estándar.

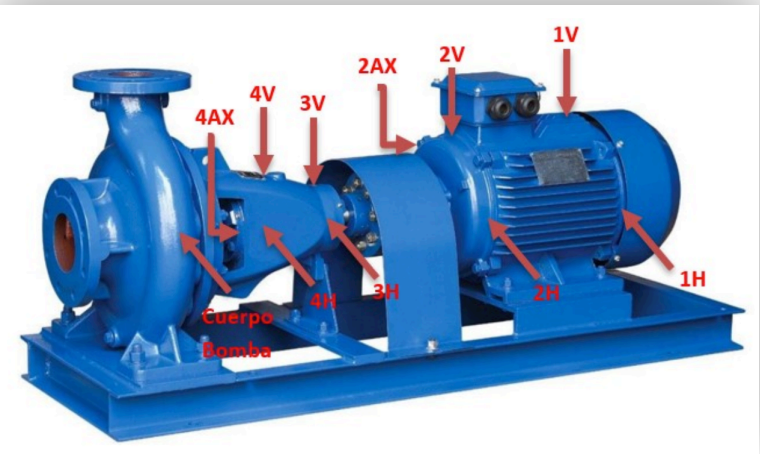


# ¿Donde se mide?

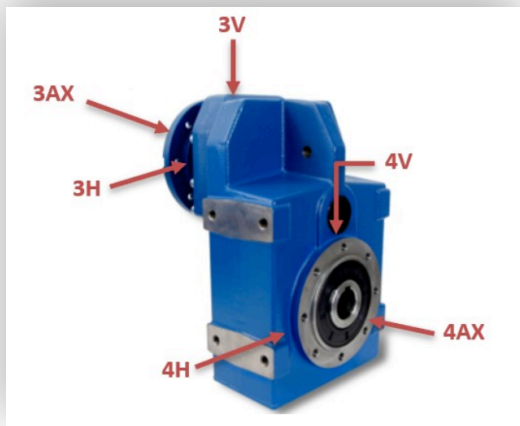
- Antes de medir vibraciones, se debe estudiar cuales son los puntos de medición relevantes para evaluar el comportamiento vibracional de cada equipo o tipos de equipos, estableciendo un criterio de medición que debe ser repetitivo, respetando siempre los **puntos** y **direcciones** a medir.
  - Siempre se debe medir en puntos los cuales posean el camino más corto y una vinculación mecánica directa y rígida con el cojinete o rodamiento. Mientras más nos alejamos de estos puntos, menos confiable es la medición, ya que la misma se propaga desde los apoyos hasta donde se coloca el sensor, pudiendo esta no ser representativa del comportamiento vibracional en dicho punto.
  - En general, es posible encontrar diferentes configuraciones de equipos:
    - 1) Motor eléctrico con acoplamiento directo a la maquina
    - 2) Motor eléctrico con transmisión flexible (correas o cadenas) hacia la máquina
    - 3) Motor eléctrico con reductor de engranajes hacia la máquina
- En cada uno de los casos, se deben estudiar los puntos de medición en los cuales se obtenga información relevante respecto a la operación segura del sistema, de manera de detectar anomalías.

A continuación se muestran algunos ejemplos:

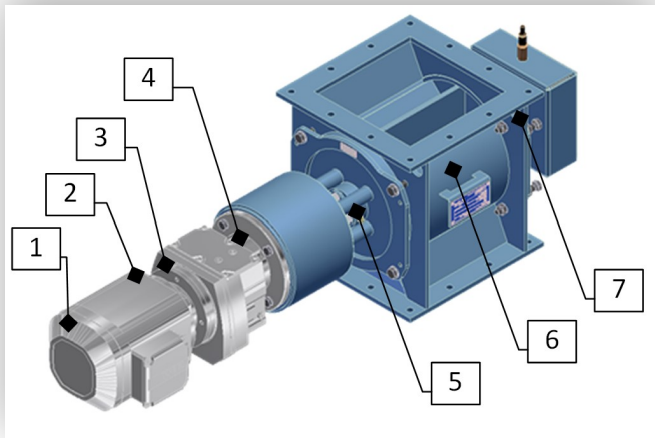
# ¿Donde se mide?



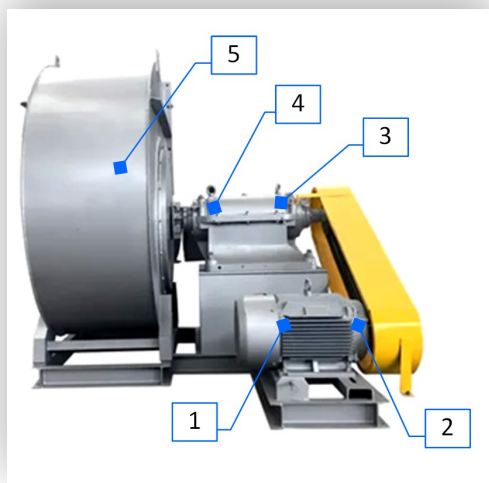
Puntos y dirección de medición en bombas centrífugas (caso 1)



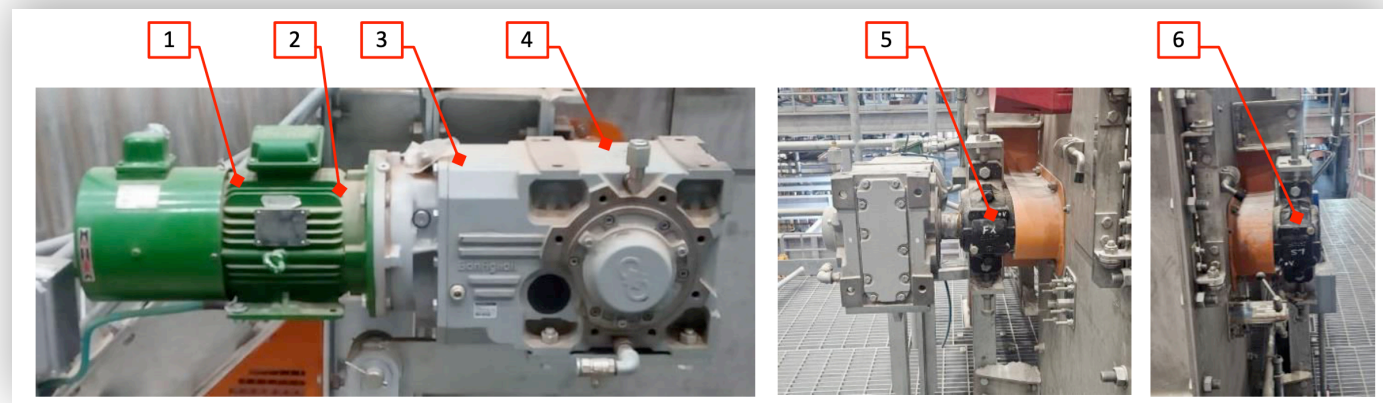
Puntos y dirección de medición en reductor ejes paralelos



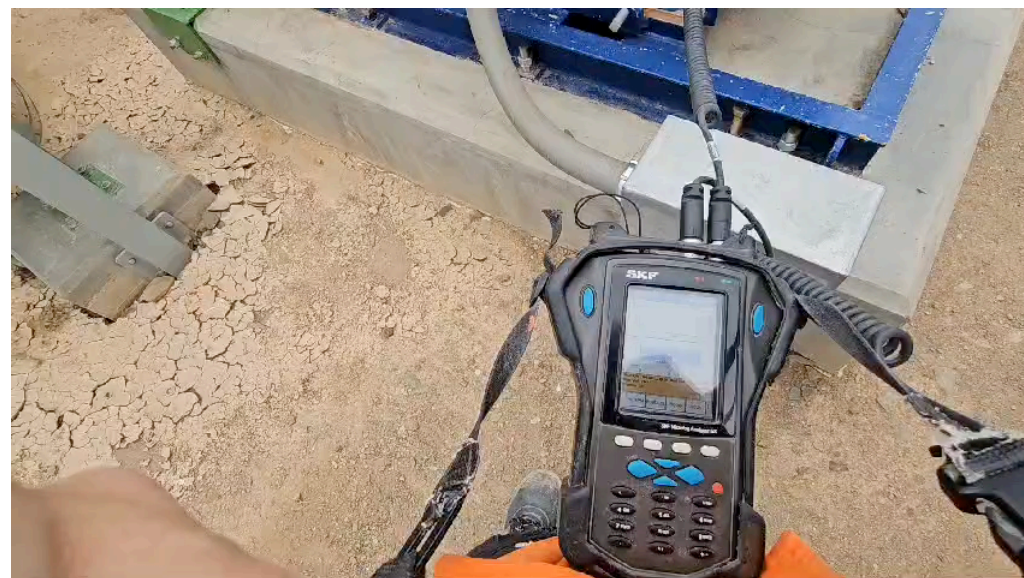
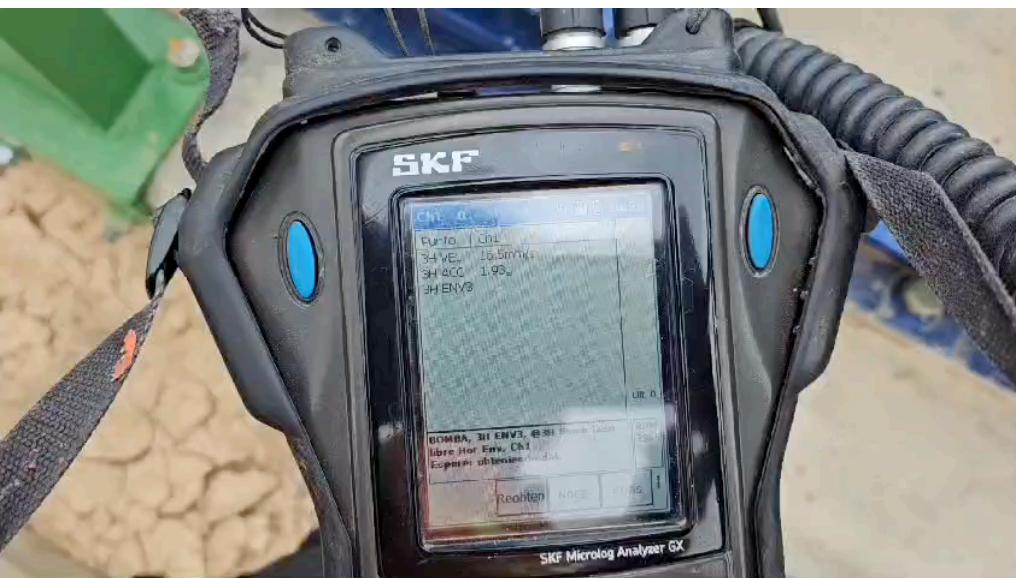
Puntos de medición en válvula rotativa (caso 3)



Puntos de medición en ventilador centrífugas (caso 2)



Puntos de medición en motoreductor cinta transportadora (caso 3)





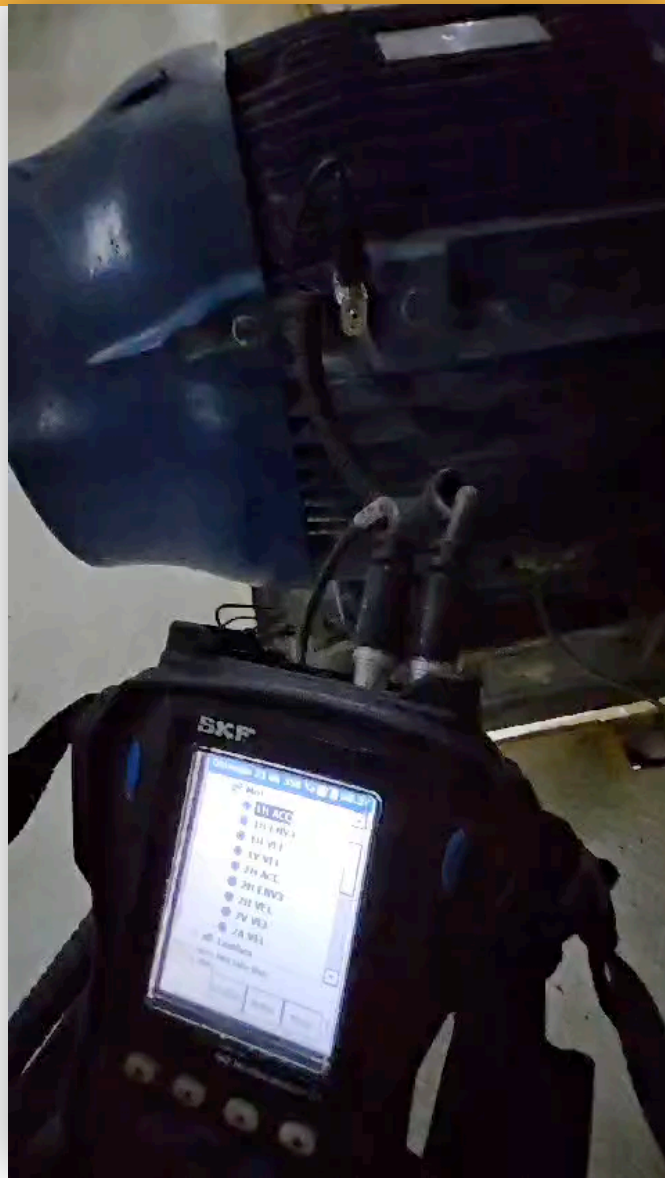


5H CAT POR L RED VEL

SKF Microlog Analyzer 6K

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

*¿Donde se mide?*



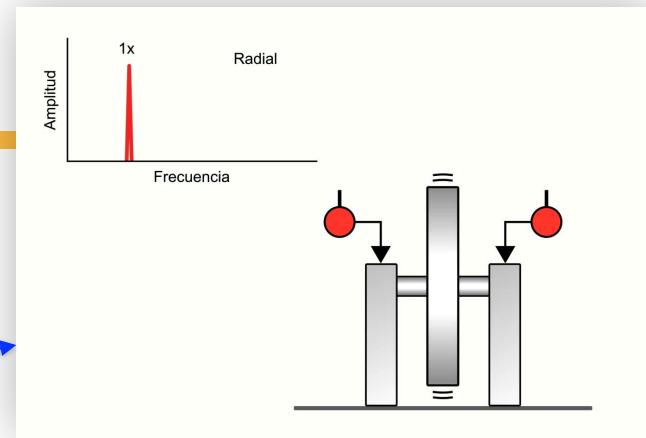


# ¿Que fallas y como se detectan?

## Desbalanceo

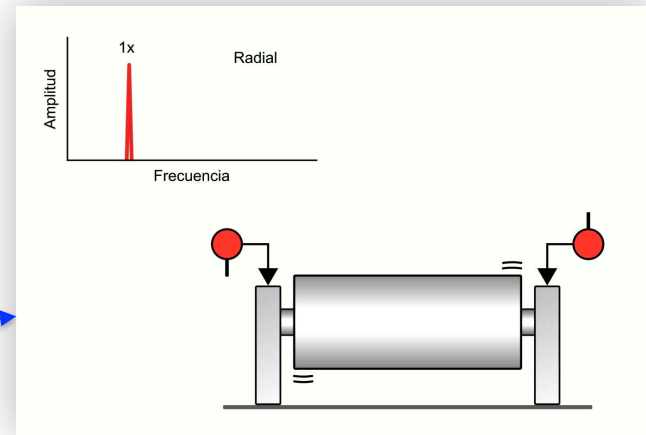
### 1- Desbalanceo estático

Es normalmente el problema más fácil de diagnosticar. Producido generalmente por desgaste radial superficial no uniforme en rotores en los cuales su largo es despreciable en comparación con su diámetro. La causa de la vibración es una fuerza centrífuga que provoca un desplazamiento del eje de giro en la dirección radial. En ausencia de otros problemas el desequilibrio genera una forma de onda sinusoidal pura y por tanto el espectro presenta vibración dominante con una frecuencia igual a 1xRPM del rotor.



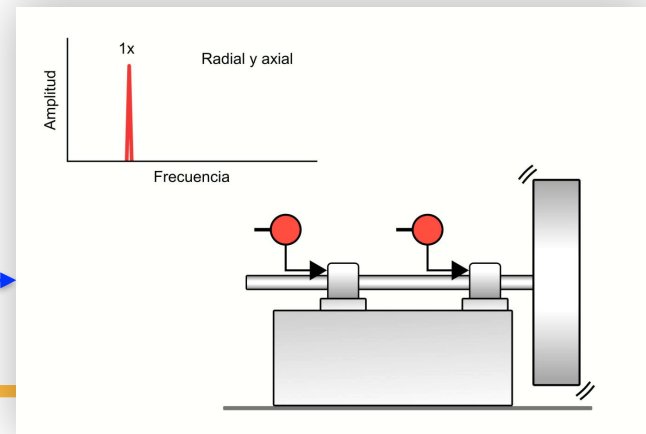
### 2- Desbalanceo en 2 planos

En este caso el origen del desbalanceo no es una fuerza, sino un par de fuerzas. Es decir, dos fuerzas de igual magnitud y de sentidos opuestos. El desequilibrio dinámico se da en rotores medianos y largos y es debido principalmente a desgastes radiales y axiales simultáneos en la superficie del rotor. El espectro presenta vibración dominante y vaivén simultáneo a frecuencia igual a 1xRPM del rotor.



### 3- Desbalanceo rotor en voladizo

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 1xRPM del rotor, muy notoria tanto en dirección axial como radial.



# ¿Que fallas y como se detectan?

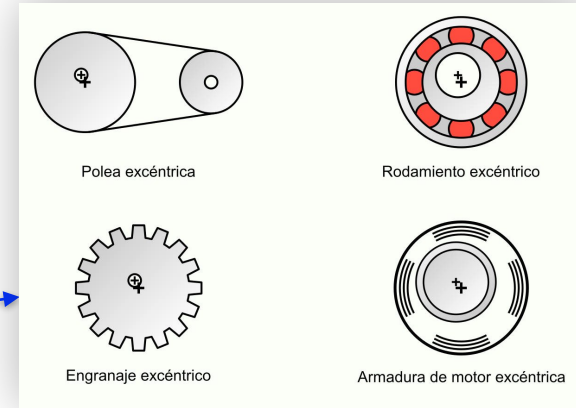
## Resumen de Desbalanceo

Descripción	<b>El desequilibrio se produce en los ejes rotativos cuando el centro de giro y el centro de masas no coinciden. La fuerza centrífuga excitadora que se genera es proporcional al cuadrado de la velocidad de giro del eje. Por lo tanto, a mayor velocidad de giro, mejor deberá ser el equilibrado del rotor.</b>	
Síntomas	Valor global	Aumento de la vibración en su valor global.
	Espectro	Pico en 1xRPM con nivel de ruido espectral bajo.
	Fase	Valor de fase estable, cambio de fase de 90° cuando se desplaza la posición del sensor 90° en dirección radial.
	Forma de onda	Se llega a apreciar una onda sinusoidal.
Severidad	<b>Depende de la máquina, pero en general los valores de alarma oscilan entre 3 y 8 mm/s.</b>	
Medición	<b>En una máquina en la que aparece un problema de desequilibrio encontraremos un aumento de la amplitud de vibración en las medidas radiales, mientras que las medidas de vibración axial pueden permanecer bajas. En máquinas con rotor en voladizo también encontraremos un aumento de la amplitud de la vibración en las medidas axiales.</b>	
Detección	La detección del desequilibrio se realiza mediante la configuración de una banda frecuencial de 0,8x a 1,2x RPM. El seguimiento de los valores medidos en esta banda nos da el primer síntoma de que la máquina puede sufrir un desequilibrio.	
Corrección	<b>El desequilibrio se corrige con una compensación de masa en el punto adecuado. Con un analizador de vibraciones se puede localizar el peso y el ángulo para colocar esta masa de compensación.</b>	

# ¿Que fallas y como se detectan?

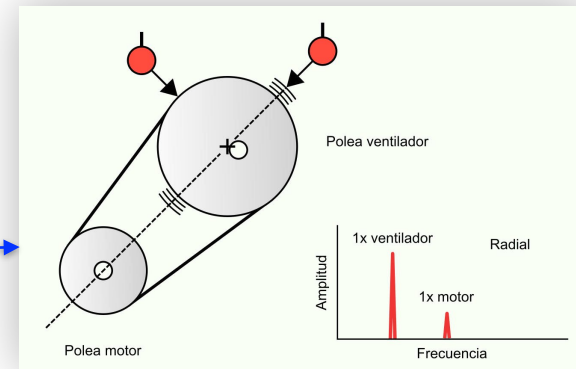
## Excentricidad

- La excentricidad se define como la no coincidencia entre el eje de rotación y el eje de simetría. La excentricidad puede tener lugar en diferentes tipos de elementos mecánicos, como son las poleas, las ruedas dentadas y en el posicionamiento relativo entre dos piezas concéntricas, como en el caso del rotor y el estátor de un motor eléctrico.
- Debido a una mejora en los procesos de fabricación la excentricidad no es un fenómeno muy extendido, teniendo su origen fundamentalmente en un desgaste desigual de una superficie. Este es el caso del desgaste en las gargantas de las poleas. En los motores eléctricos la excentricidad originada por el incorrecto posicionamiento relativo entre el rotor y el estátor se pone de manifiesto debido a una disminución progresiva del entrehierro por parte de los fabricantes con el objetivo de incrementar la eficiencia del motor.



## Excentricidad en una polea

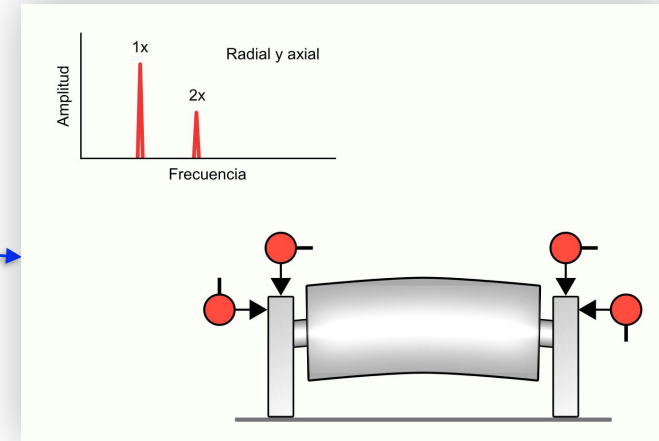
- La excentricidad se manifiesta de la misma forma que en el caso del desbalanceo, con una fuerte vibración a la frecuencia de giro de la polea en dirección radial. Si se diagnostica como desequilibrio puede que se corrija el problema, pero la excentricidad suele depender de la carga, por lo que al variar las condiciones de carga bajo las que se realizó el equilibrado, los niveles de vibración pueden incrementarse



# ¿Que fallas y como se detectan?

## Eje Doblado

Se dice que un rotor está deformado cuando pierde su simetría con respecto a su eje de giro. La deformación puede tener su origen en dilataciones térmicas o sobrecargas radiales y axiales. Un eje deformado se manifiesta en el espectro a la frecuencia de giro del eje. Sin embargo a diferencia del desequilibrio se detectará una vibración axial significativa, cuyo espectro de frecuencias asociado presentará, acompañando al primer armónico de la velocidad de giro, un segundo armónico. Si se intenta su equilibrado, normalmente es necesario un gran peso de corrección



# ¿Que fallas y como se detectan?

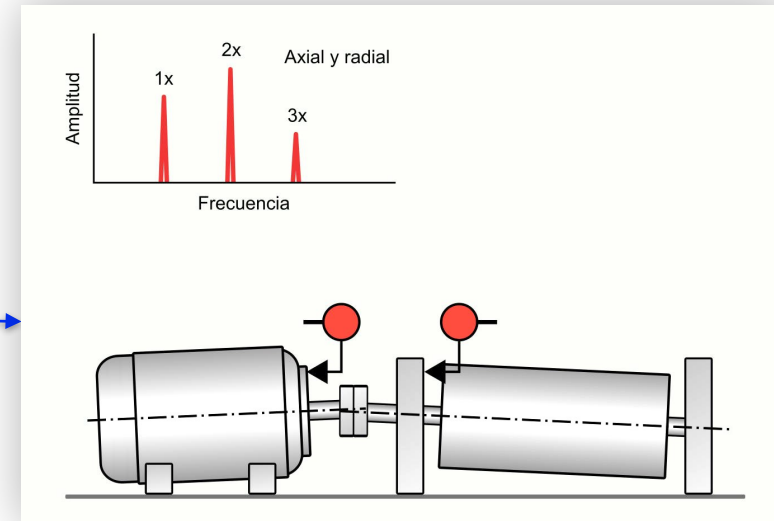
## Desalineación de árboles

La desalineación es uno de los problemas de vibraciones más frecuentes en máquinas rotativas y se debe a la dificultad que presenta la alineación de dos rotores con sus respectivos apoyos. La desalineación puede tener su origen en causas muy diversas como: excesiva confianza en la utilización de acoplamientos elásticos y rodamientos autoalineables, distorsiones en la máquina durante su operación que producen desplazamientos del sistema conductor o conducido, etc. La desalineación producirá unos niveles de vibración muy elevados en las proximidades del acoplamiento que pueden llegar a precipitar la degradación de los rodamientos, el desgaste de los tacos del acoplamiento, la rotura de pernos, el sobrecalentamiento excesivo del sistema conductor por un aumento del consumo eléctrico, etc., por lo que es conveniente corregirla antes de que produzca daños más considerables que pueden llegar a producir paros en la máquina. Se describen a continuación dos tipos de desalineación, la desalineación angular y la desalineación paralela. En la mayoría de los casos la desalineación presente es una combinación de ambas.

### 1- Desalineación angular

Hay desalineación angular cuando las líneas centrales de dos ejes se cortan formando un ángulo. La presencia de fuerte vibración axial a  $1x$  RPM caracteriza este tipo de desalineación, que puede estar acompañado de armónicos de la velocidad de giro del eje con bajas amplitudes.

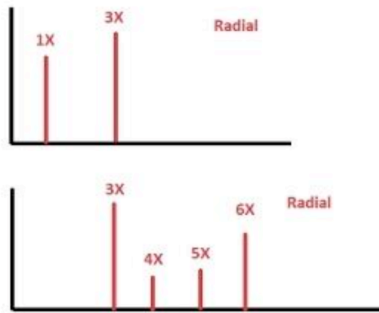
- ✓ Fuerte vibración axial en  $1x$  RPM posiblemente con armónicos en  $2x$  y  $3x$ .
- ✓ El armónico  $2x$  RPM en dirección axial puede alcanzar un valor igual o incluso superior a  $1x$ .
- ✓ Vibración en dirección radial, probablemente de menor amplitud que en dirección axial, en  $1x$ ,  $2x$  y  $3x$ .
- ✓ Las medidas de fase axial a ambos lados del acoplamiento se encuentran desfasadas  $180^\circ$ .



# ¿Que fallas y como se detectan?

## Ejemplos de espectros de vibración radial (H y V ) de desalineamiento en diferentes acoplamientos flexibles

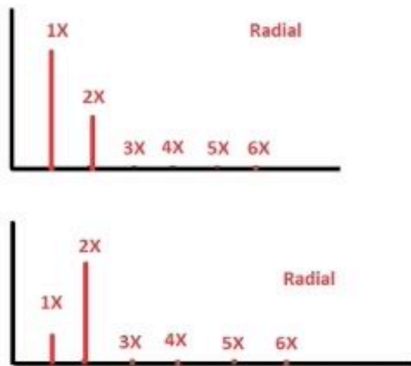
Various vibration responses to misalignment



Jaw coupling



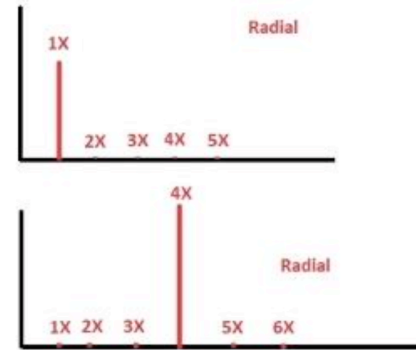
Various vibration responses to misalignment



Rubber coupling



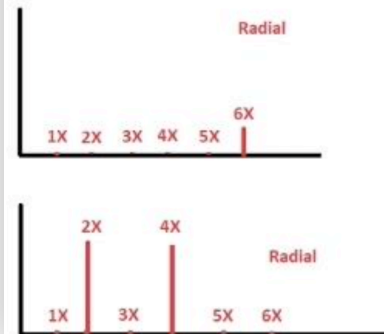
Various vibration responses to misalignment



Metallic Grid Coupling



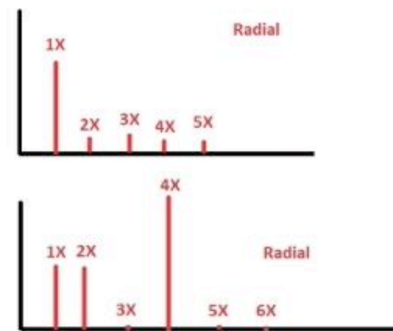
Various vibration responses to misalignment



Flexible disk-type coupling



Various vibration responses to misalignment



Gear coupling



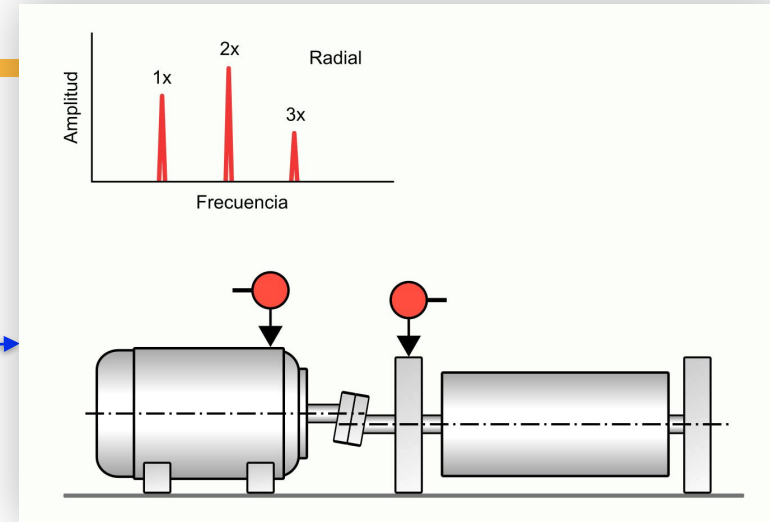


# ¿Que fallas y como se detectan?

## 2- Desalineación paralela

☛ Dos ejes están desalineados paralelamente cuando los ejes son paralelos y están separados una determinada distancia. La desalineación puede ser vertical u horizontal y se manifiesta espectralmente con una fuerte vibración radial a 1x y 2x RPM del eje, pudiendo presentar armónicos superiores de menor amplitud.

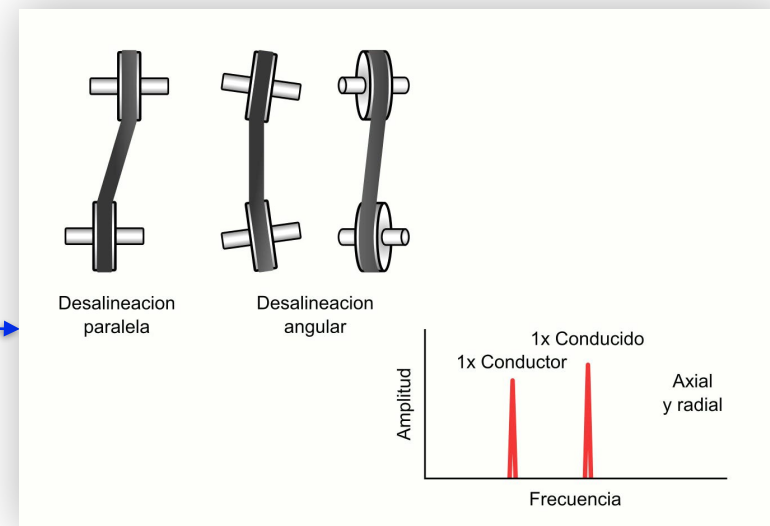
- ✓ Fuerte vibración radial en 1x RPM con armónicos en 2x y 3x.
- ✓ El armónico 2x RPM en dirección radial puede alcanzar un valor igual o incluso superior a 1x.
- ✓ Las medidas de fase radial a ambos lados del acoplamiento se encuentran desfasadas 180°.



## Desalineación de poleas

☛ Se dice que dos poleas están desalineadas cuando no se encuentran en un mismo plano. Este problema produce alta vibración axial a 1x RPM del conductor o el conducido, generalmente el conducido. La buena medida de las amplitudes de las vibraciones depende fuertemente de donde sean tomados los datos. Este tipo de problemas también se manifiestan con la presencia de la frecuencia de paso de correa y sus armónicos. Hay que tener en cuenta que las frecuencias de correas también suelen aparecer cuando existe un desgaste de las mismas, por lo que a veces es conveniente verificar su estado.

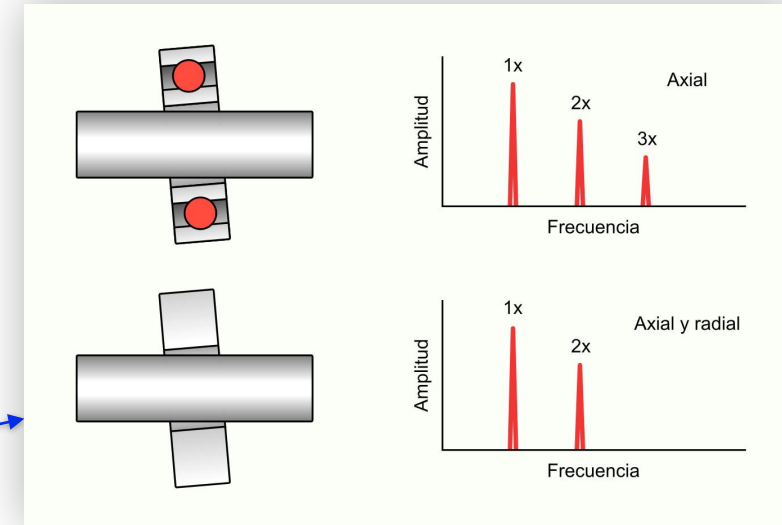
- ✓ Alta vibración axial y radial a 1x RPM del conductor o el conducido.
- ✓ La vibración es más importante en dirección axial que radial (este hecho permite descartar el desequilibrio).
- ✓ Desgaste desigual en dirección axial en poleas y correas.



# ¿Que fallas y como se detectan?

## Desalineación en cojinetes (rodantes y deslizantes)

- Independientemente de que exista una buena alineación en el acoplamiento, puede existir una desalineación entre el eje y el rodamiento.
- La desalineación puede tener su origen en una deformación en la máquina o en un montaje inadecuado. Si una de las patas de la máquina no está en el mismo plano que las otras o si la bancada no es plana, al apretar los pernos de anclaje se generará una deformación y como consecuencia una desalineación.
- Otro ejemplo de desalineación en rodamientos tiene lugar en ventiladores de gran tamaño donde están montadas las cajas de los rodamientos sobre la estructura metálica del ventilador. Si la estructura metálica no tiene la rigidez suficiente, se deformará bajo condiciones de carga y originará una desalineación. Generalmente, la mayor deformación se suele producir en el rodamiento próximo al rodete, originando una desalineación axial.
- Los rodamientos de bolas o rodillos desalineados se caracterizan por presentar vibración axial independientemente del estado de equilibrado. La vibración puede aparecer a  $1x$ ,  $2x$ ,  $3x$  RPM o al número de bolas o rodillos del rodamiento por la velocidad de giro.
- La desalineación de cojinetes de deslizamiento presenta vibración radial y axial, normalmente a  $1x$  y  $2x$  RPM de la velocidad de giro. La desalineación de cojinetes suele venir acompañada por desequilibrios del rotor, por lo que un equilibrado del rotor disminuirá la vibración radial y axial.



# ¿Que fallas y como se detectan?

## Holguras

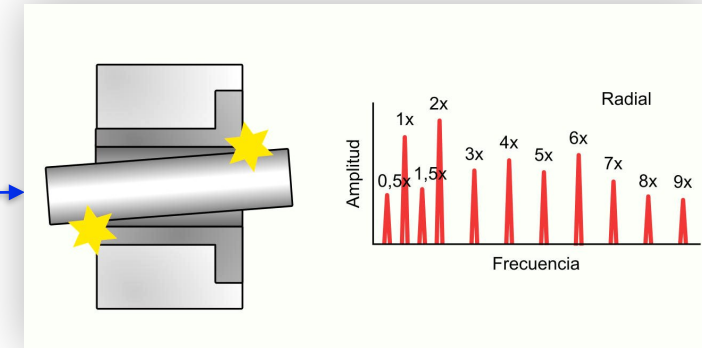
Las holguras mecánicas pueden tener naturaleza muy distinta: falta de apriete entre distintos elementos mecánicos (aflojamiento de pernos, rotura de anclajes, etc.), aumento de tolerancias producidas por desgastes (holguras en cojinetes, rodamientos, engranajes, etc.), etc. Las holguras se manifiestan en las medidas de vibración siempre y cuando exista una fuente de excitación debida a un problema ajeno a la propia holgura, como pueden ser desequilibrio, desalineación, etc., de forma que pequeñas fuerzas de excitación exterior pueden producir elevadas amplitudes de vibración, en presencia de holguras. La desalineación puede tener su origen en una deformación en la máquina o en un montaje inadecuado. Si una de las patas de la máquina no está en el mismo plano que las otras o si la bancada no es plana, al apretar los pernos de anclaje se generará una deformación y como consecuencia una desalineación.

### 1- Holguras de elementos rotativos

Este tipo de holguras se caracterizan por presentar un espectro con una gran cantidad de frecuencias relacionadas con la frecuencia de giro del rotor, pudiendo distinguirse: armónicos ( $1x$ ,  $2x$ ,  $3x$ , etc.), subarmónicos ( $0,5x$ ) y medios armónicos ( $1,5x$ ,  $2,5x$ ,  $3,5x$ , etc.). Generalmente se manifiestan más claramente en las direcciones radiales de medida (horizontales y verticales) que en las direcciones axiales.

A medida que el desgaste aumenta se generan cambios en el espectro de frecuencias, lo que permite hacer una clasificación de la severidad de la holgura en cuatro grupos:

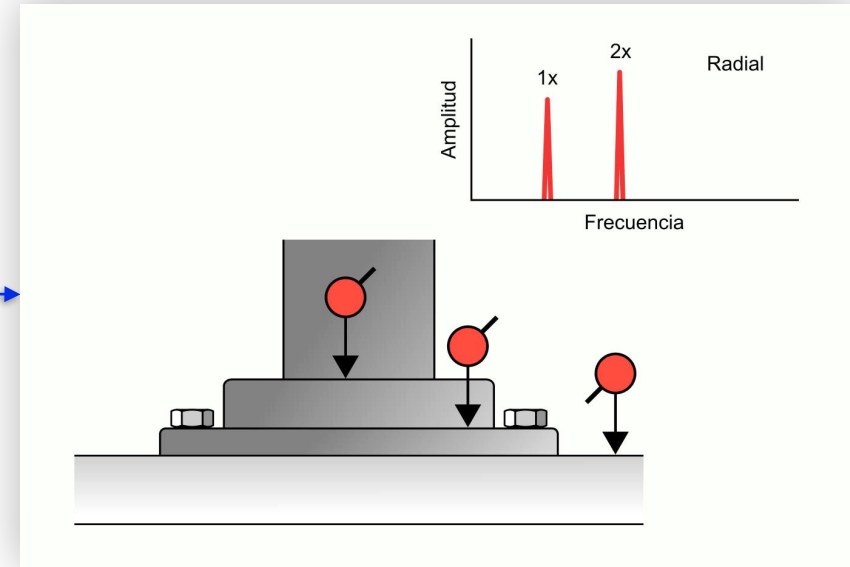
1. **Holgura incipiente:** presencia de los primeros cuatro o cinco armónicos de la velocidad de giro, con armónicos superiores de menor amplitud.
2. **Holgura potencialmente seria:** incremento de la amplitud del primer armónico de la velocidad de giro y aparición de medios armónicos de muy baja amplitud.
3. **Holgura seria:** aumento de la amplitud de los armónicos y medios armónicos de la velocidad de giro.
4. **Holgura severa:** se caracteriza por presentar medios armónicos, armónicos y subarmónicos de la frecuencia de giro del rotor, de forma que en el espectro se observa una banda ancha de energía.



# ¿Que fallas y como se detectan?

## 2- Holguras estructurales

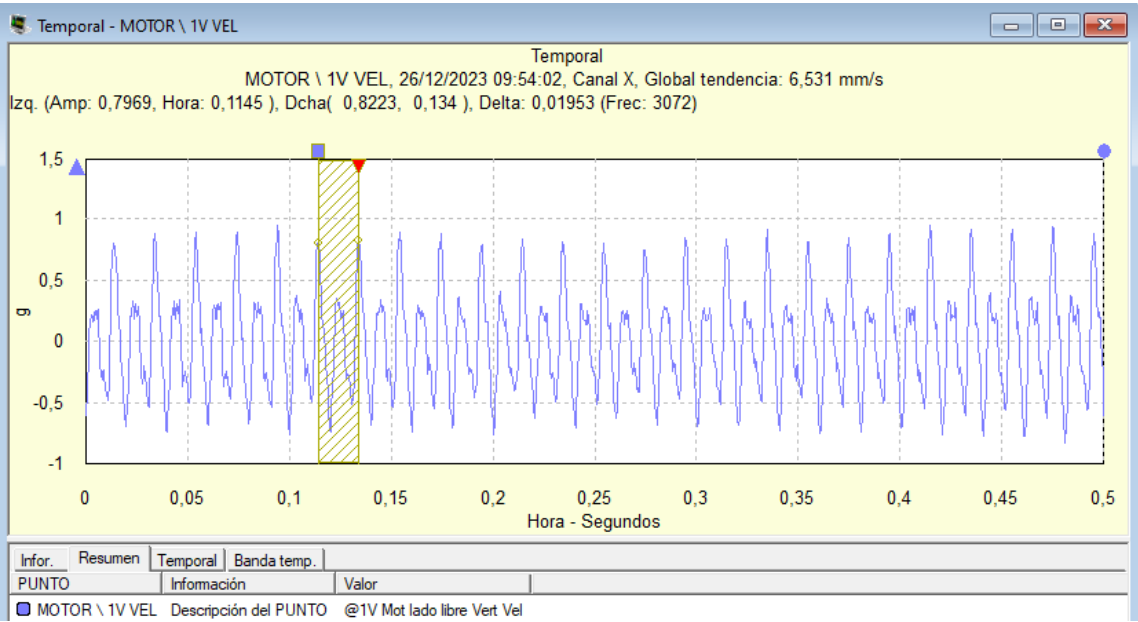
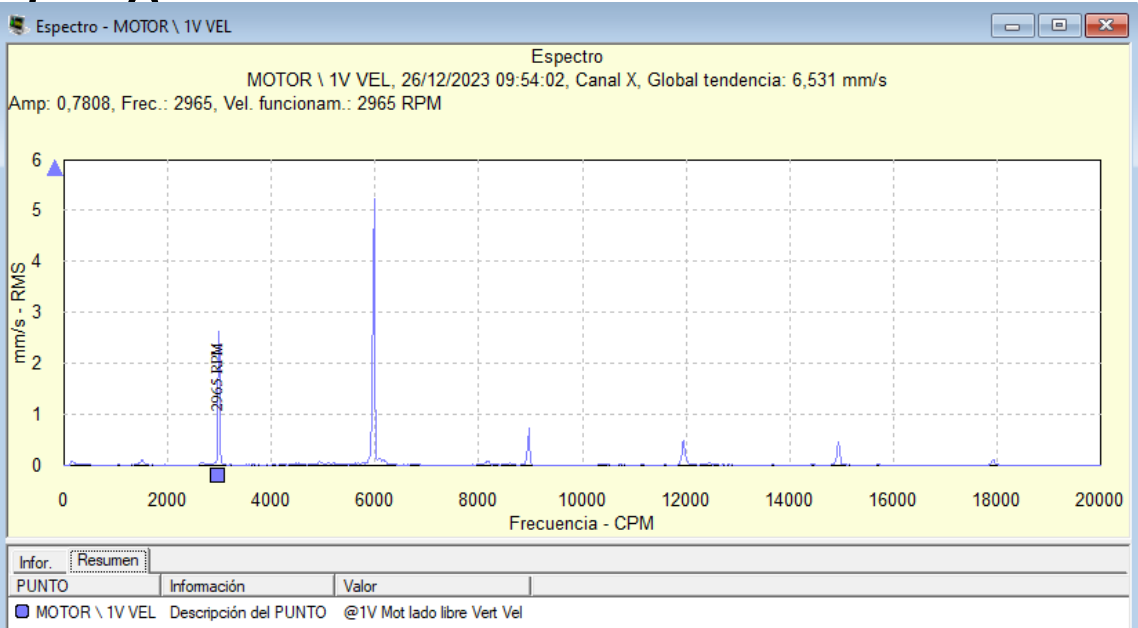
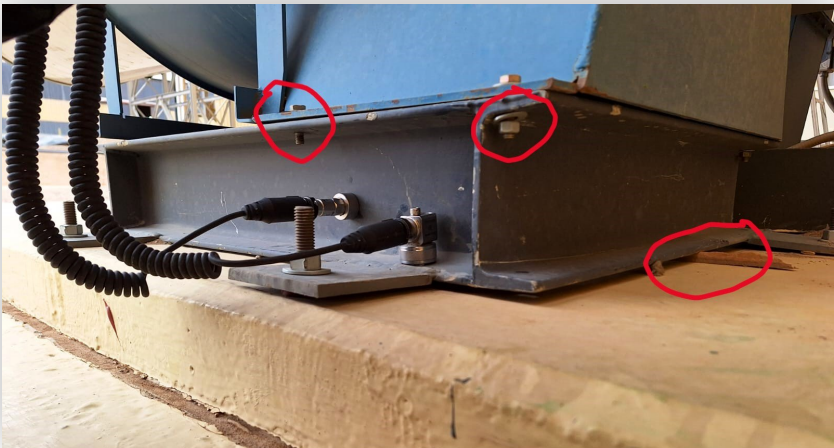
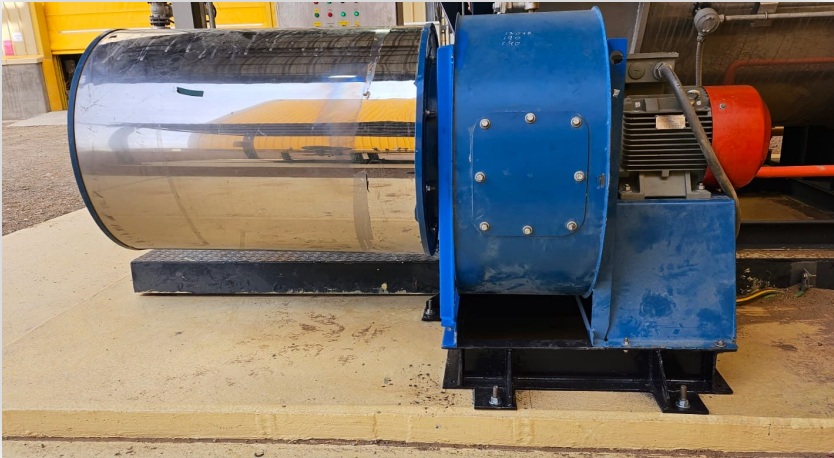
• Son las holguras asociadas a los elementos mecánicos no rotativos de la máquina: anclajes de fijación a la bancada, uniones entre tuberías, cajas de rodamientos, etc. Normalmente, se manifiestan más claramente en las direcciones radiales de medida que en las axiales, con la presencia en el espectro de frecuencias de varios armónicos de la velocidad de giro del eje. Un indicador de la severidad de la holgura es la comparación de la amplitud de los armónicos a  $2x$  y  $3x$  con respecto a la frecuencia  $1x$ , de forma que cuando la amplitud de dichos armónicos está por encima del 50% de la amplitud del pico  $1x$ , nos indicará una mayor severidad de la holgura.



• El motivo por el que este tipo de holguras se manifiestan en los espectros de frecuencia con varios armónicos de la frecuencia de giro ( $1x$ ,  $2x$ ,  $3x$ ,  $4x$ , etc.) se ilustran en la figura. El rotor presenta un ligero desequilibrio que actúa como fuerza de excitación de las holguras debidas al aflojamiento de los anclajes entre el soporte del rodamiento y la bancada. En las cuatro etapas de la figura podemos ver como a medida que el punto pesado de desequilibrio va girando hasta completar una vuelta completa, se producen cuatro fuerzas o impulsos, indicadas en las cuatro etapas, dos de las cuales son debidas al desequilibrio y las otras dos al retorno de cada uno de los lados del soporte a la bancada. Esto nos originará varios armónicos de la frecuencia de giro en el espectro de vibración.

# ¿Que fallas y como se detectan?

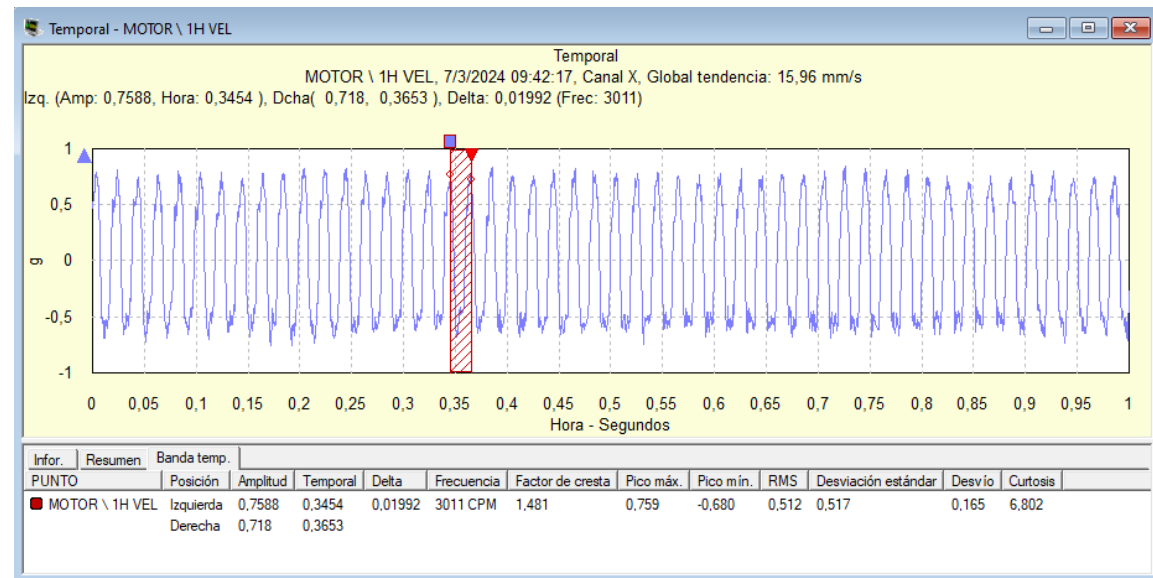
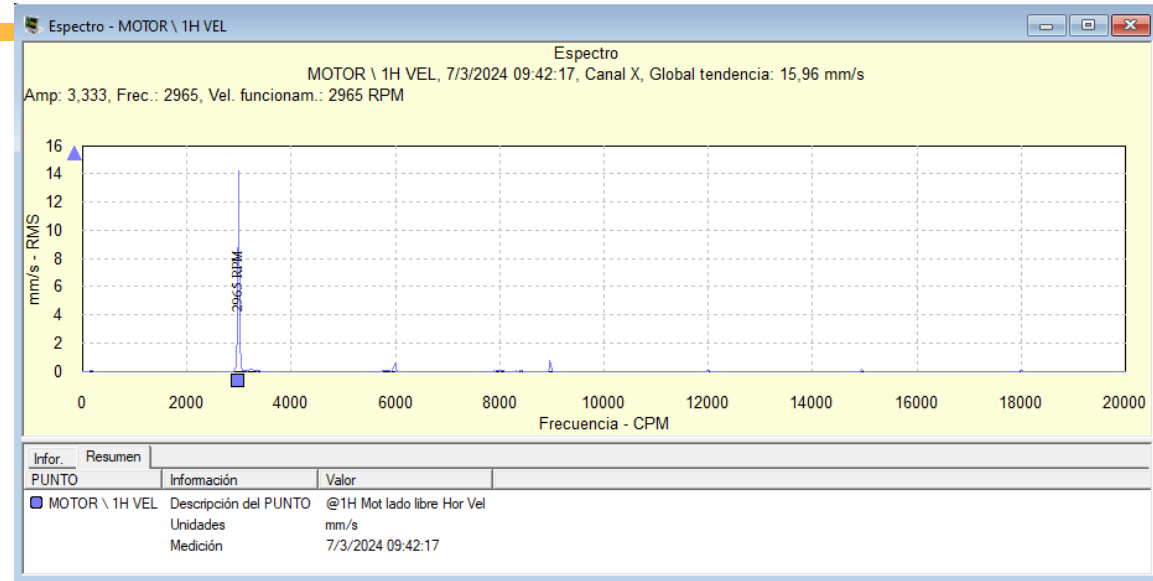
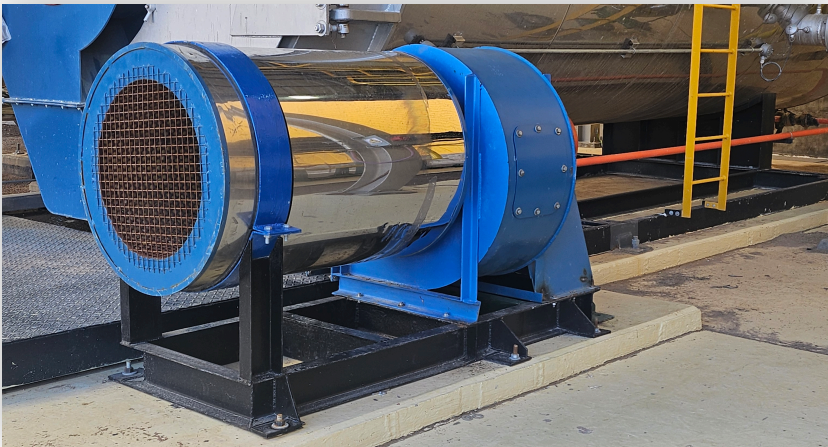
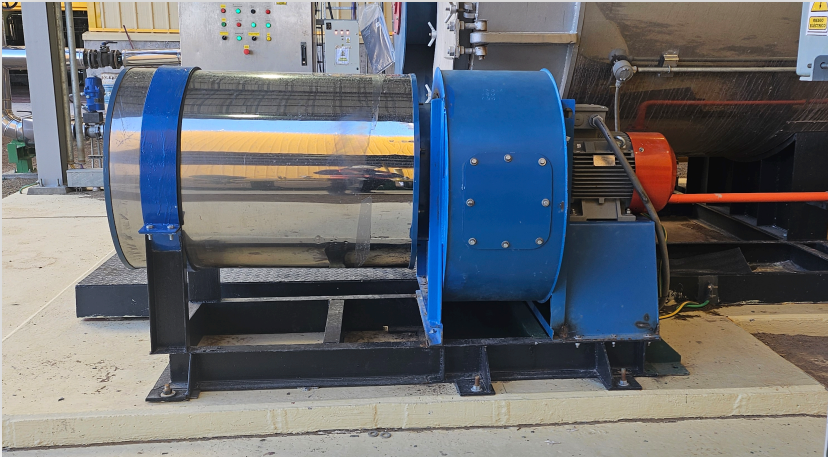
Ejemplo de holgura estructural:  
ventilador centrífugo de caldera - 3000 rpm





## ¿Que fallas y como se detectan?

Luego de dar solución a la holgura estructural, y reforzar el bastidor, el ventilador presenta problemas de balanceo





# ¿Que fallas y como se detectan?

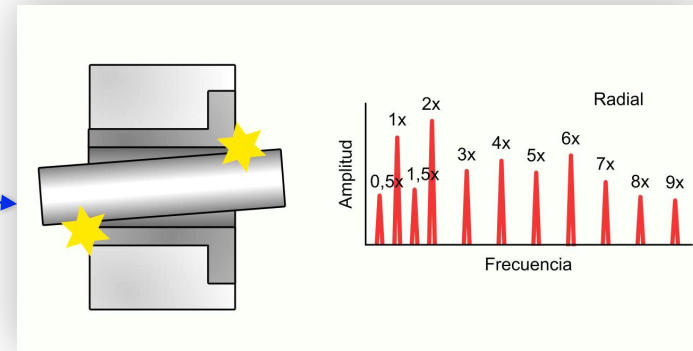
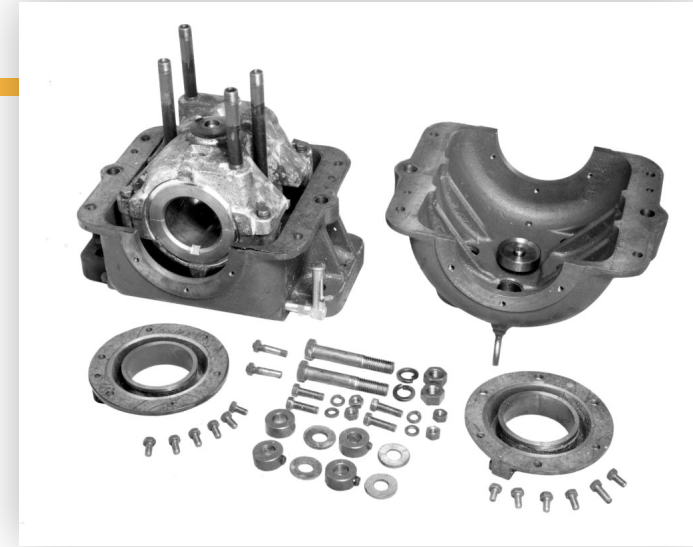
## Cojinetes de deslizamiento

- Además de los problemas mecánicos propios de las máquinas rotativas, existen algunos problemas o defectos propios de los cojinetes de deslizamiento como son: excesivas holguras, remolino de aceite e inadecuada lubricación.

### 1- Holgura excesiva

- Para que un problema de holguras se manifieste es necesario que existan fuerzas de excitación exteriores que pueden ser debidas a desequilibrios, desalineaciones, etc. que exciten el problema, pudiendo originarse elevados niveles de vibración. Un cojinete con excesiva holgura es menos capaz de absorber las fuerzas debidas a problemas mecánicos y da lugar a altos niveles de vibración a 1x, 2x RPM y armónicos superiores. También pueden aparecer medios armónicos (1.5x, 2.5x, 3.5x RPM, etc.) y subarmónicos (0.5x RPM), como se ha comentado en el capítulo de holguras (punto 1).

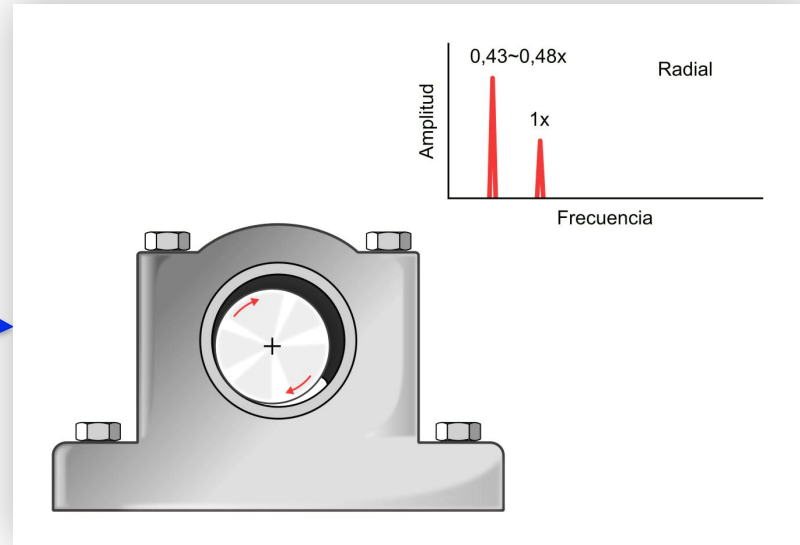
La holgura condiciona la posición del eje dentro del cojinete, de forma que un huelgo excesivo, puede dar lugar a un posicionamiento incorrecto, y en consecuencia, a un fenómeno de desalineación, con la aparición de las vibraciones y frecuencias características de este problema.



# ¿Que fallas y como se detectan?

## 2- Remolino de aceite

- El remolino de aceite es un problema típico de cojinetes de fricción. Este problema ocurre principalmente en máquinas con cojinetes de lubricación hidrodinámica a presión y operando a velocidades de giro elevadas, normalmente por encima de la velocidad crítica del rotor.
- La vibración típica asociada al remolino de aceite es subsíncrona, presentando en el espectro una frecuencia en un rango entre 0,43 y 0,48x RPM, pudiendo producir daños catastróficos si la velocidad de giro del rotor es el doble de la velocidad crítica, debido a la excitación de la frecuencia natural del rotor. A este fenómeno se le conoce con el nombre de.



## 3- Lubricación deficiente

- Cuando falla el sistema de lubricación o el aceite empleado no es el adecuado, puede llegar al rozamiento seco entre rotor y cojinete, originándose una vibración tangencial como en el caso anterior, pero conceptualmente distinta y de alta frecuencia, y no relacionada con las RPM de la máquina.



# ¿Que fallas y como se detectan?

## Engranajes

Las transmisiones mediante engranajes también son susceptibles de ser diagnosticadas en cuanto a su estado técnico se refiere, estudiando e interpretando adecuadamente su comportamiento vibratorio. Midiendo vibraciones en la transmisión se pueden identificar problemas tales como, una inapropiada relación entre el número de dientes, excentricidad, montaje en árboles deformados, holguras, desalineación, sobrecarga y la fractura o deterioro de los dientes.

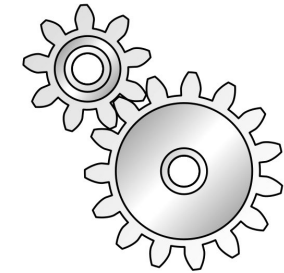
### 1- Frecuencias propias del engranaje

La localización de todas las frecuencias espectrales de un engrane pasa por conocer unos datos mínimos de la caja de engranajes. Estos datos son la velocidad de giro del eje de entrada o el de salida y el número de dientes de las diferentes ruedas dentadas. Las frecuencias asociadas directamente con un engranaje son las siguientes:

- Frecuencia de engrane (GMF): es propia de cada engranaje y aparece en el espectro de frecuencia independientemente del estado del engranaje. Su amplitud depende significativamente de la carga en el momento de la lectura:

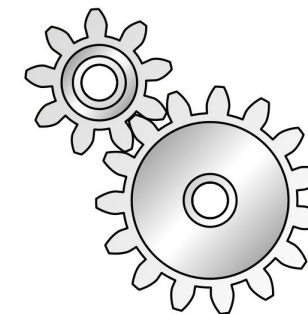
$$GMF = Z_1 \cdot n_1 = Z_2 \cdot n_2$$

Piñón

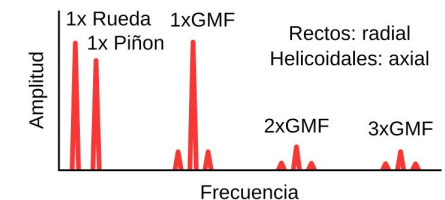


Rueda

Piñón



Rueda



Espectro característico de un engranaje en buen estado

# ¿Que fallas y como se detectan?

## Rodamientos

- Los rodamientos son elementos mecánicos presentes en la mayoría de las máquinas rotativas. Su vida útil depende de una serie de factores: la carga, la velocidad de trabajo, la lubricación, el montaje, la temperatura, las fuerzas exteriores causadas por desalineaciones, desequilibrios, etc. La importancia y criticidad de estos elementos hace necesaria la utilización de técnicas modernas de mantenimiento predictivo (basadas en el análisis de vibraciones) que contribuyan a un mejor reconocimiento de su estado y, por lo tanto, de la disponibilidad de las máquinas rotativas en las que están instalados.



### 1- Frecuencias de fallo de un rodamiento

- Los rodamientos están formados por varios componentes claramente diferenciados: anillo interior, elementos rodantes, jaula y anillo exterior.
- El deterioro de cada uno de estos elementos generará una o varias frecuencias características en los espectros de frecuencia que nos permitirán una rápida y fácil identificación. Las cuatro posibles frecuencias de deterioro de un rodamiento son:
  - BPFO** (Ball Pass Frequency Outer) o frecuencia de deterioro de la pista exterior. Se corresponde físicamente con el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista exterior cada vez que el eje realiza un giro completo.
  - BPFI** (Ball Pass Frequency Inner) o frecuencia de deterioro de la pista interior. Se corresponde físicamente con el número de bolas o rodillos que pasan por un punto de la pista interior cada vez que el eje realiza un giro completo.
  - BSF** (Ball Spin Frequency) o frecuencia de deterioro de los elementos rodantes. Se corresponde físicamente con el número de giros que realiza una bola o rodillo del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo.
  - FTF** (Fundamental Train Frequency) o frecuencia de deterioro de la jaula. Se corresponde físicamente con el número de giros que realiza la jaula del rodamiento cada vez que el eje realiza un giro completo.

# ¿Que fallas y como se detectan?

La nombradas frecuencias de fallo de un rodamiento dependen de varias características geométricas propias del rodamiento, y pueden ser calculadas. Sin embargo, la aplicación SKFBEARINGSELECT hace el cálculo de estos parámetros.

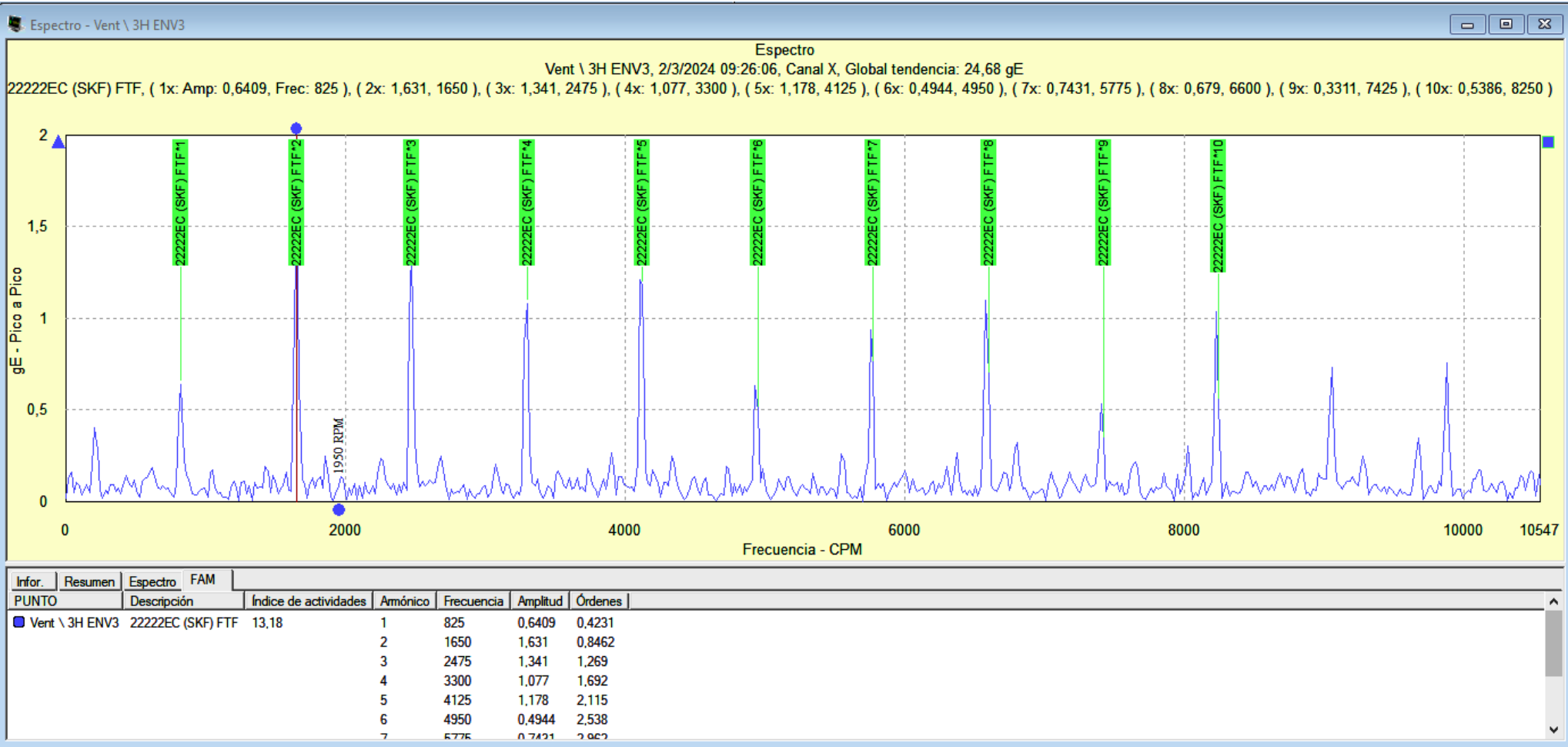
Frecuencias							
Designación	Frecuencia rotacional				Frecuencia de over-rolling		
			FTF		BPMI	BPFO	BSF
	Aro interior	Aro exterior	Conjunto de elementos rodantes y jaula	Elemento rodante sobre su eje	Punto en el aro interior	Punto en el aro exterior	Elemento rodante
	$f_i$ (Hz)	$f_e$ (Hz)	$f_c$ (Hz)	$f_r$ (Hz)	$f_{ip}$ (Hz)	$f_{ep}$ (Hz)	$f_{rp}$ (Hz)
■ 6022	1	0	0.435	3.769	7.913	6.087	7.538

## Defectos típicos en rodamientos y su identificación espectral

- Defectos en la pista exterior: los espectros se caracterizan por presentar picos armónicos de la frecuencia de deterioro de la pista exterior (entre 8 y 10 armónicos de la **BPFO**)
- Defectos en la pista interior: los espectros presentan varios picos armónicos de la frecuencia de deterioro de la pista interior (normalmente entre 8 y 10 armónicos de la **BPMI**) modulados por bandas laterales a 1x RPM.
- Defectos en bolas o rodillos: Se caracterizan por presentar en los espectros las frecuencias de deterioro de los elementos rodantes (**BSF**). En la mayoría de las ocasiones, el armónico de mayor amplitud nos suele indicar el número de bolas o rodillos deteriorados. Normalmente van acompañadas por defectos en pista.
- Deterioro de jaula: se caracteriza por presentar en los espectros la frecuencia de deterioro de jaula (**FTF**) y sus armónicos. Generalmente un defecto en la jaula va acompañado por defectos en pistas y la FTF generalmente modula a una de estas frecuencias de deterioro de pista dando lugar a sumas y/o diferencias de frecuencias.

# ¿Que fallas y como se detectan?

Ejemplo de espectro de un rodamiento con daño en la jaula





# ¿Que normas se aplican?

Para evaluar el comportamiento vibracional del equipo, es necesario basarse sobre las normas de aplicación internacionales vigentes para tales casos. La normas mas difundidas para el análisis de vibraciones en equipos generales son las normas ISO 10816-1y 10816-3, las cuales se describen brevemente a continuación.

La norma **ISO 10816-1** divide en Clases de equipos según sus características, y luego establece los parámetros admisibles de velocidad de la vibración:

- Clase I: máquinas que puede estar separadas el conductor y el conducido, o en unidades acopladas hasta aproximadamente 15 kW (aprox. 20 HP).
- Clase II: máquinas (motores eléctricos de 15 kW (20 HP) a 75 kW (100 HP) sin fundaciones especiales o máquinas o motores hasta 300 kW (400 hp) rígidamente montados sobre fundaciones especiales.
- Clase III: Motores y otros grandes conjuntos de máquinas rotativos montados sobre fundaciones pesadas y razonablemente rígidos en la dirección de la vibración.
- Clase IV: Motores y otros grandes conjuntos de máquinas rotativos montados sobre fundaciones relativamente flexibles en la dirección de la vibración. Por ejemplo, grupo de turbina-generator mayores de 10 MW.

Velocity Severity		Velocity Range Limits and Machine Classes ISO Standard 10816-1			
mm/s RMS	in/s PEAK	Small Machines Class I	Medium Machines Class II	Large Machines	
				Rigid Supports Class III	Less Rigid Supports Class IV
0.28	0.02	Good	Good	Good	Good
0.45	0.03				
0.71	0.04				
1.12	0.06	Satisfactory	Satisfactory	Satisfactory	Satisfactory
1.80	0.10				
2.80	0.16				
4.50	0.25	Unsatisfactory (Alert)	Unsatisfactory (Alert)	Unsatisfactory (Alert)	Unsatisfactory (Alert)
7.10	0.40	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Unacceptable (Danger)	Satisfactory
11.20	0.62				Unsatisfactory (Alert)
18.00	1.00				Unsatisfactory (Alert)
28.00	1.56				Unsatisfactory (Alert)
45.00	2.51				Unacceptable (Danger)

PRIORIDAD CONDICIÓN	DESCRIPCIÓN
ADMISIBLES	Valores admisibles de funcionamiento, no existen defectos evidentes en los espectros de vibraciones.
SEGUIMIENTO	Valores admisibles de funcionamiento, pero se identificó la presencia de una posible falla incipiente, por lo que se sugiere realizar un seguimiento.
OPERACIÓN CONTROLADA	Operación controlada debido a la identificación de una falla evidente en el equipo. Se aconseja la planificación de mantenimiento en el corto plazo y se requiere seguimiento.
NO ADMISIBLE	La condición de la maquina rotante es crítica. La condición de funcionamiento no es confiable. Se requiere la intervención inmediata de mantenimiento.

# ¿Que normas se aplican?

La norma **10816-3** divide en Clases de equipos según sus características, y luego establece los parámetros admisibles de velocidad de la vibración:

- **Grupo I:** grandes máquinas con potencia nominal superior a 300 kW, máquinas eléctricas con ejes de altura  $H \geq 315$  mm.
- **Grupo II:** máquinas medianas con potencia nominal entre 15 kW y 300 kW, máquinas eléctricas con ejes de altura entre  $160 \leq H \leq 315$  mm.
- **Grupo III:** bombas con rotor multialabes sin motor integrado (centrifugas, de flujo mixto y de flujo axial) con potencia nominal superior a 15 kW.
- **Grupo IV:** bombas con rotor multi alabes con motor integrado (centrifugas, de flujo mixto y de flujo axial) con potencia nominal superior a 15 kW.

ISO 10816-3 vibration standard		Machine group 4		Machine group 3		Machine group 2		Machine group 1	
		Integral driver		External driver		Motors 160 mm ≤ H ≤ 315 mm		Motors 315 mm ≤ H	
Velocity		Pumps > 15 kW Radial, axial, mixed flow				Medium sized machines 15 kW < P ≤ 300 kW		Large machines 300 kW < P < 50 MW	
mm/s rms	in/sec rms								
11	0.44				D				
7.1	0.28				C				
4.5	0.18								
3.5	0.11				B				
2.8	0.07								
2.3	0.04								
1.4	0.03								
0.71	0.02				A				
Foundation		Rigid	Flexible	Rigid	Flexible	Rigid	Flexible	Rigid	Flexible

A

B

C

D

New machine condition

Unlimited long-term operation allowable

Short-term operation allowable

Vibration causes damage