



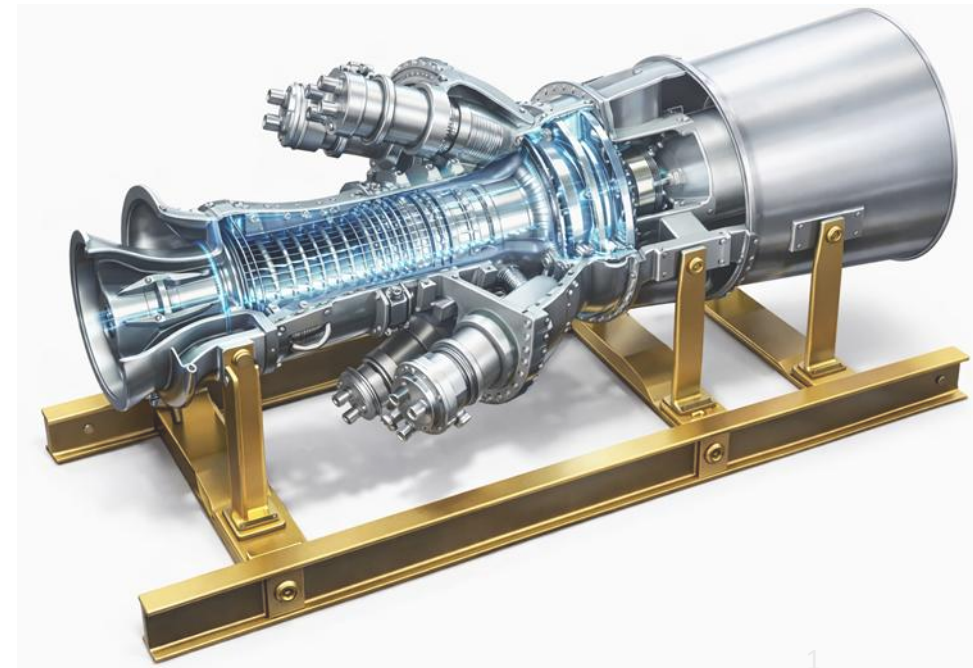
# Análisis de Vibraciones Mecánicas en Turbogeneradores de Potencia.



**MSc, Henry Bello P**

Presentación para el Instituto de Energía de la UASD.

26 de Enero 2026



# Resumen Profesional.

**Mas de 15 años de experiencia en el área de plantas de energía y combustibles enfocado en las siguientes áreas:**

- Operación de terminal de gas natural
- Operación de planta térmica.
- Mantenimiento Predictivo
- Ingeniería, gestión de activos y performance.

**Cursos especializados en Análisis de vibraciones.**

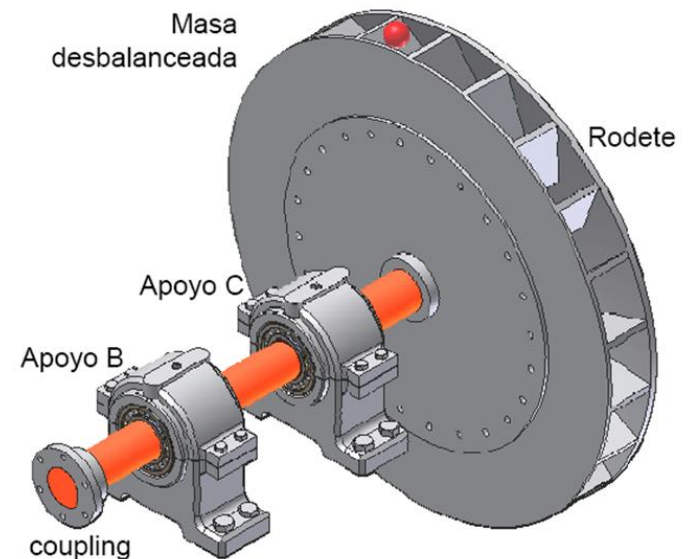
- Machinery Diagnostics Principles and Dynamic Balancing
- Análisis de Vibraciones – Nivel II ASNT, Cat. II ISO 18436-2

# Introducción al Diagnostico de Maquinas.

## ¿Que son sistemas de protección de turbomáquinas?

Son sistemas que detienen una turbo maquina o la colocan en modo de seguro funcionamiento sin necesidad intervención humana. Estos sistemas tienen una lógica definida y variables definidas para realizar una acción.

- Sistemas de control.
- Sistemas de monitoreo de vibraciones.
- Protecciones eléctricas.



# Sistemas de Gestión de la Condición de TM.

Proporcionan datos e información para su interpretación y aplicación por personas, con el fin de garantizar el correcto funcionamiento y mantenimiento de las maquinas con mira a determinar el estado. Para este fin se requiere lo siguiente:

- Formulación de una estrategia de diagnostico.
- Instrumentos de medición de vibraciones para medidas radiales y axiales.
- Uso de medidas de fase en los diagnostico.
- Interpretación del formato de datos en estado estable y transitorio.

# Datos de la Turbomáquina.

## Datos Directos

- Vibraciones y posición.
- Velocidad del Rotor.
- Temperatura de cojinetes.

## Datos Indirectos

- Datos de proceso.
- Datos de rendimiento.

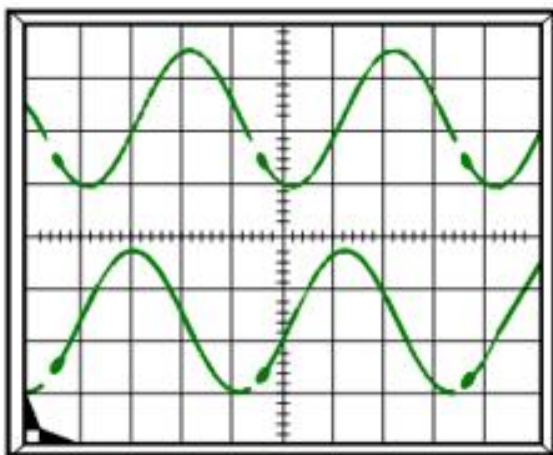


# Modo de Operación.

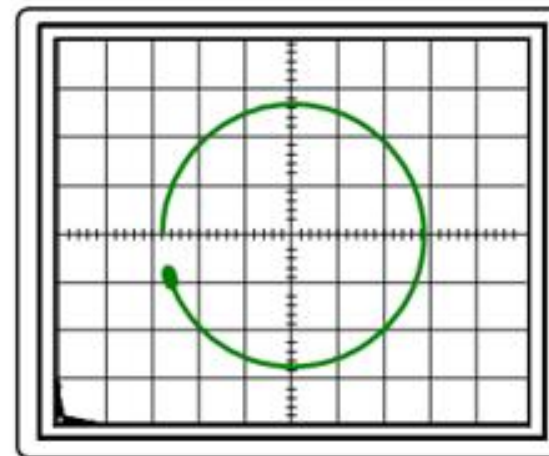
- A. Régimen estable. (Velocidad Constante de la turbomáquina)
- B. Transiente. (Arranque / Parada)
- C. Giro lento.
- D. Maquina detenida.



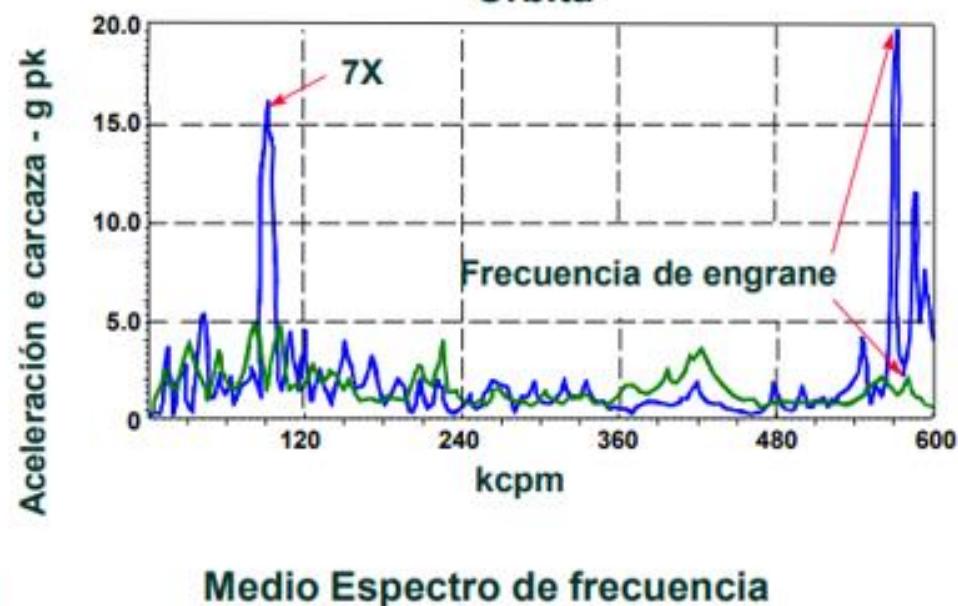
# Gráficas de Estado Estable.



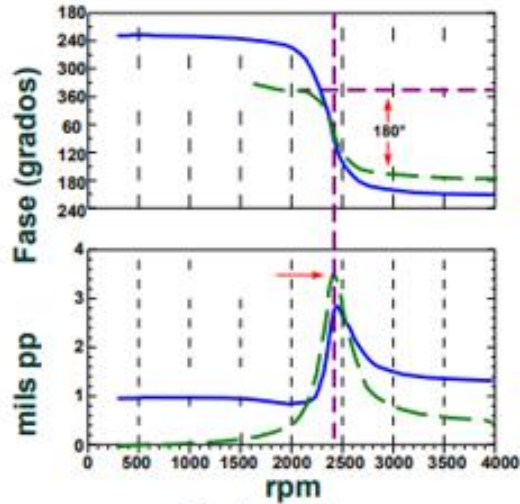
Base de Tiempo



Orbita



# Gráficos de Transientes.



Bode Plot

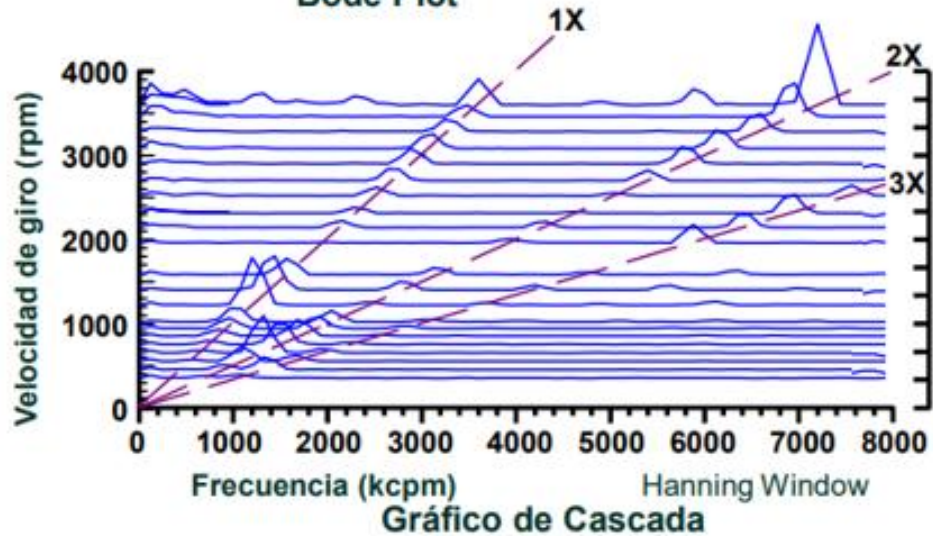
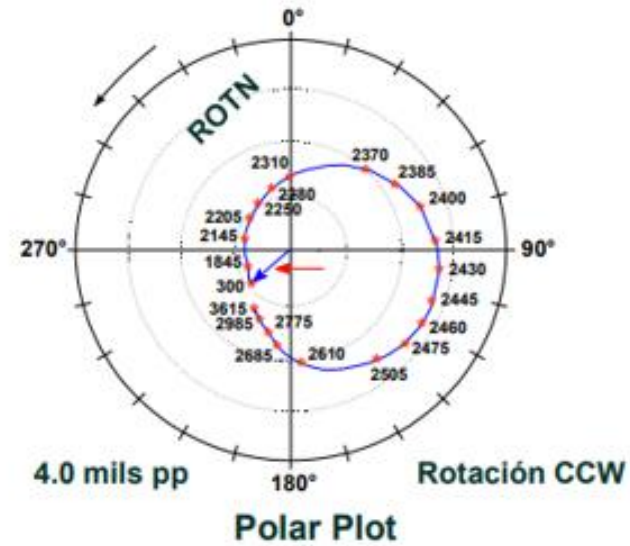
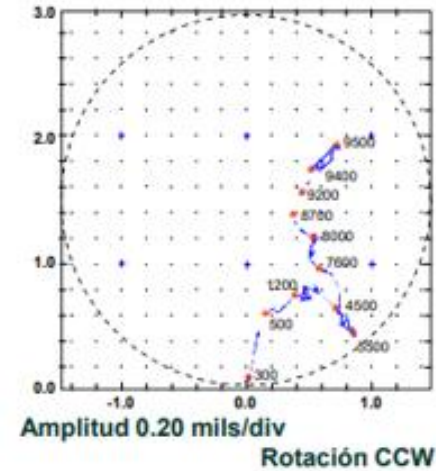


Gráfico de Cascada



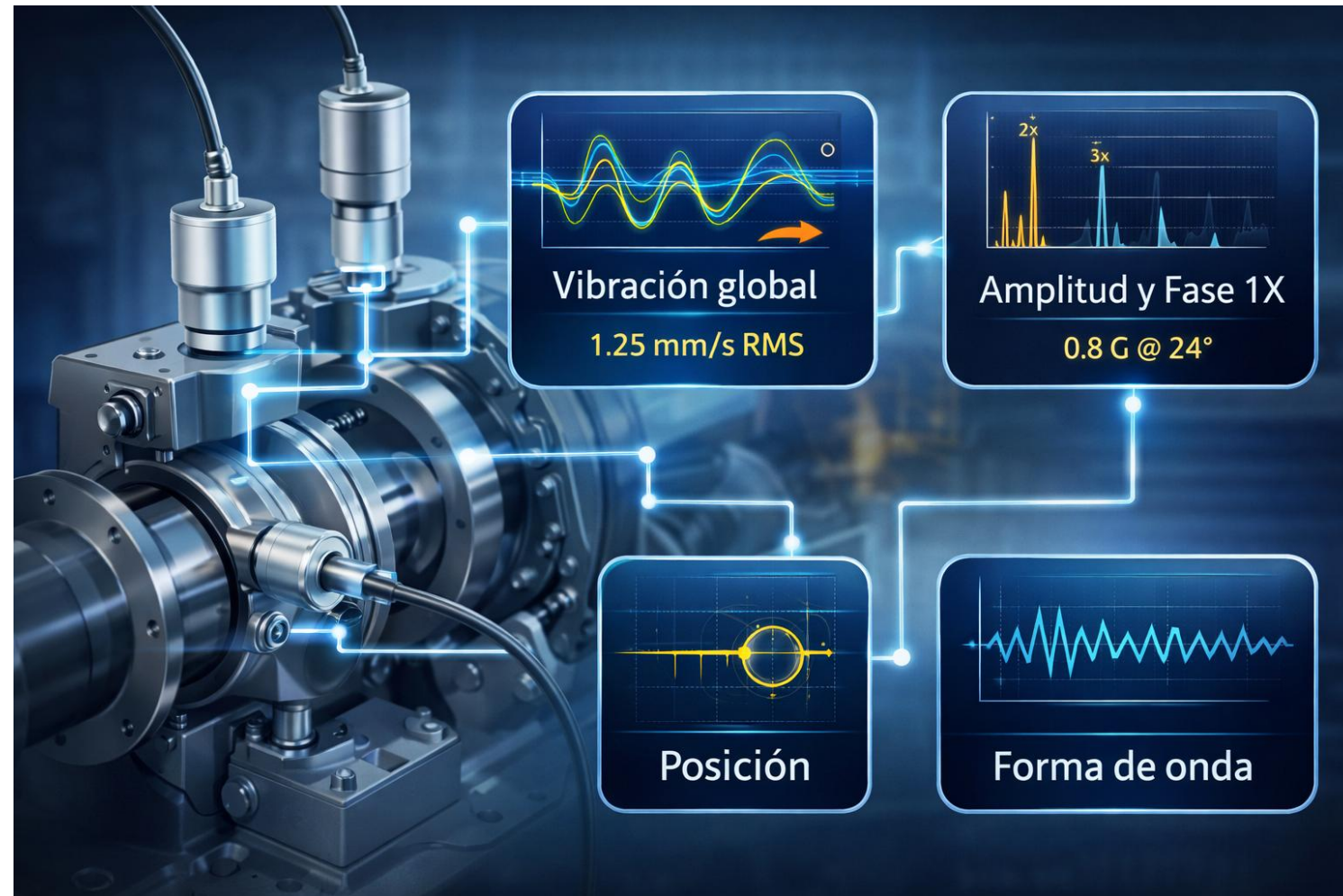
Polar Plot



Posición promedio de centro de eje

# Medición de Vibraciones.

- Vibración global.
- Posición.
- Frecuencia.
- Amplitud y Fase nX.
- Forma de onda.



Integración de parámetros de condición para el diagnóstico de maquinaria rotativa.

- Característica de la máquina**
- Amplitud global
  - Espectro
  - Amplitud 1X, 2X, nX
  - Fase 1X, 2X, nX
  - No 1X
  - Voltaje de Gap
  - Forma de la Vibración
  - Temperatura
  - Presión
  - Carga



¿Cómo mantener la máquina sin una información completa?



El gerenciamiento de Máq. usa todas las herramientas

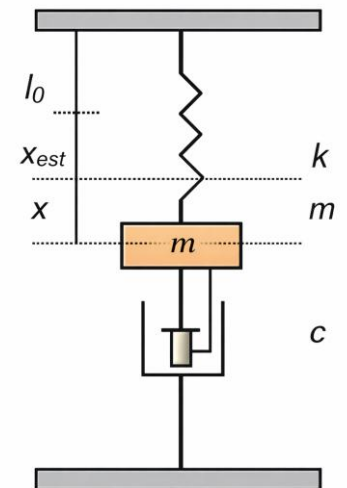
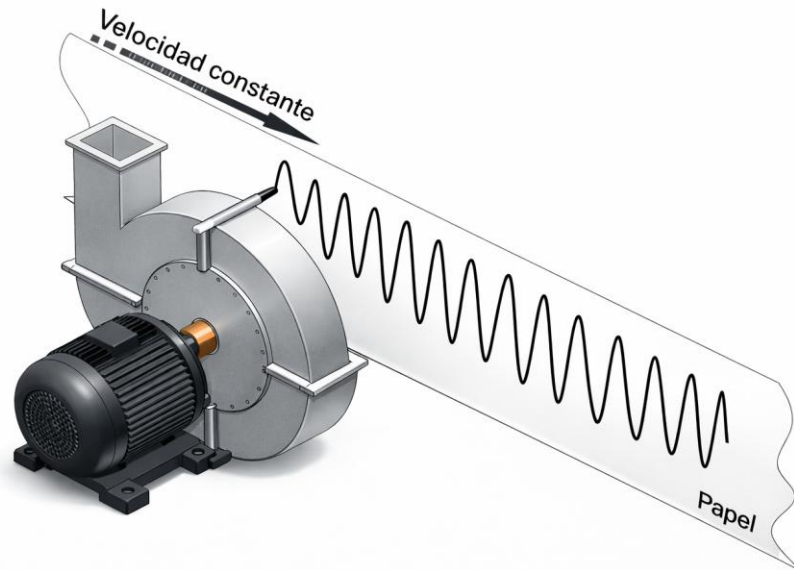
**Información Correlacionada sobre la Máq.**

Otros (Densidad, flujo, Presión, etc...)  
 $n = 0.25, 0.5, 1, 2, 3, \dots$



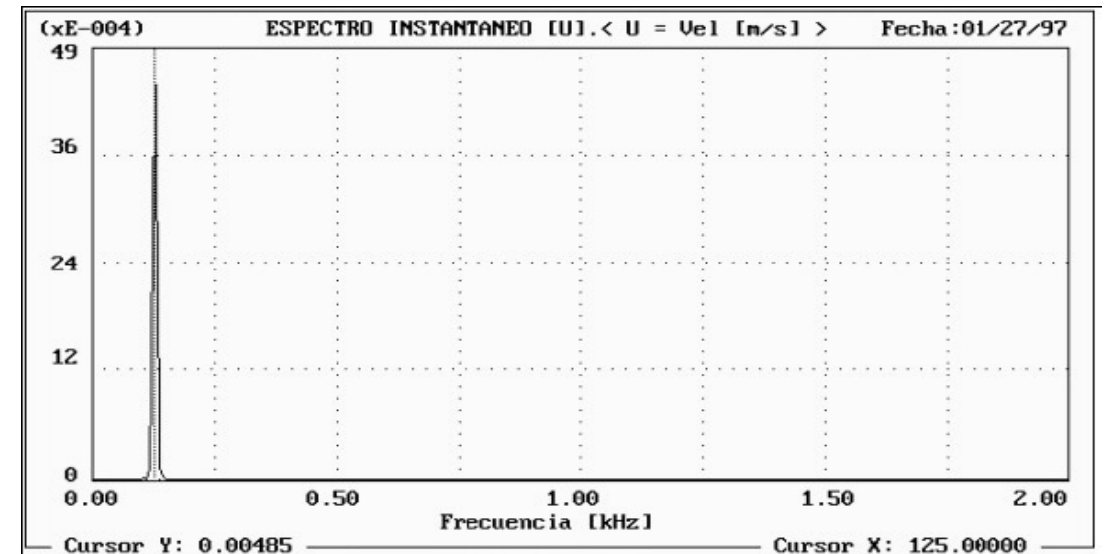
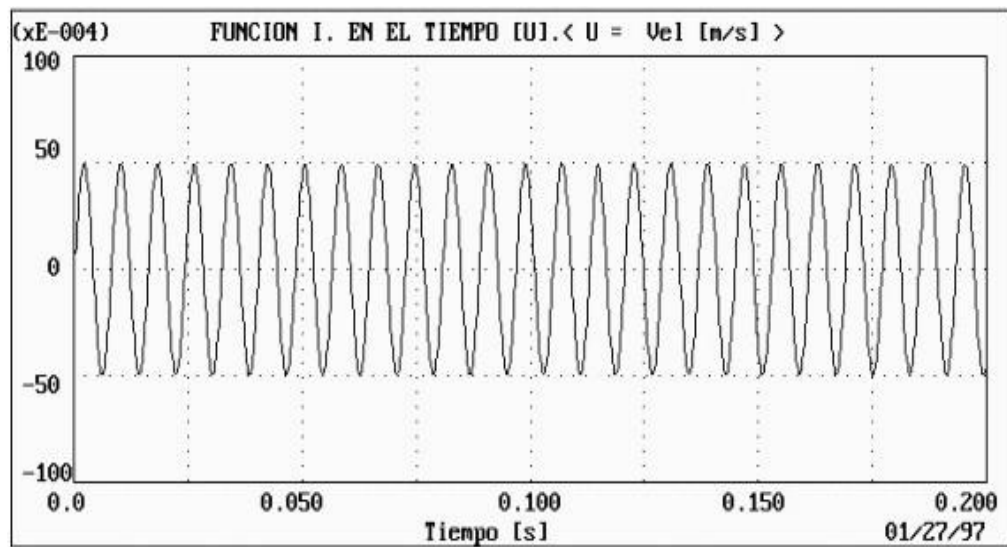
# Vibraciones Mecánicas

Los sistemas de ingeniería que poseen **masa** y **elasticidad** están capacitados (diseñados) para tener movimientos relativos. Cuando el movimiento de estos sistemas se repite después de un intervalo de tiempo se le conoce como **vibración**. Es simplemente el movimiento de vaivén de una pieza o de una maquina desde su posición de descanso.



# Descripción de los Niveles de Vibraciones.

Las vibraciones pueden ser observadas en el **TIEMPO** o en **FRECUENCIA**. Al efectuar la medición del nivel de vibraciones es necesario definir qué magnitud física se desea cuantificar para describir la vibración, de aquí que para ello pueda ser empleado, el **DESPLAZAMIENTO**, la **VELOCIDAD** y/o la **ACELERACIÓN**.



**Desplazamiento:** Es una cantidad vectorial que describe el cambio de posición de un cuerpo o partícula con respecto a un sistema de referencia.

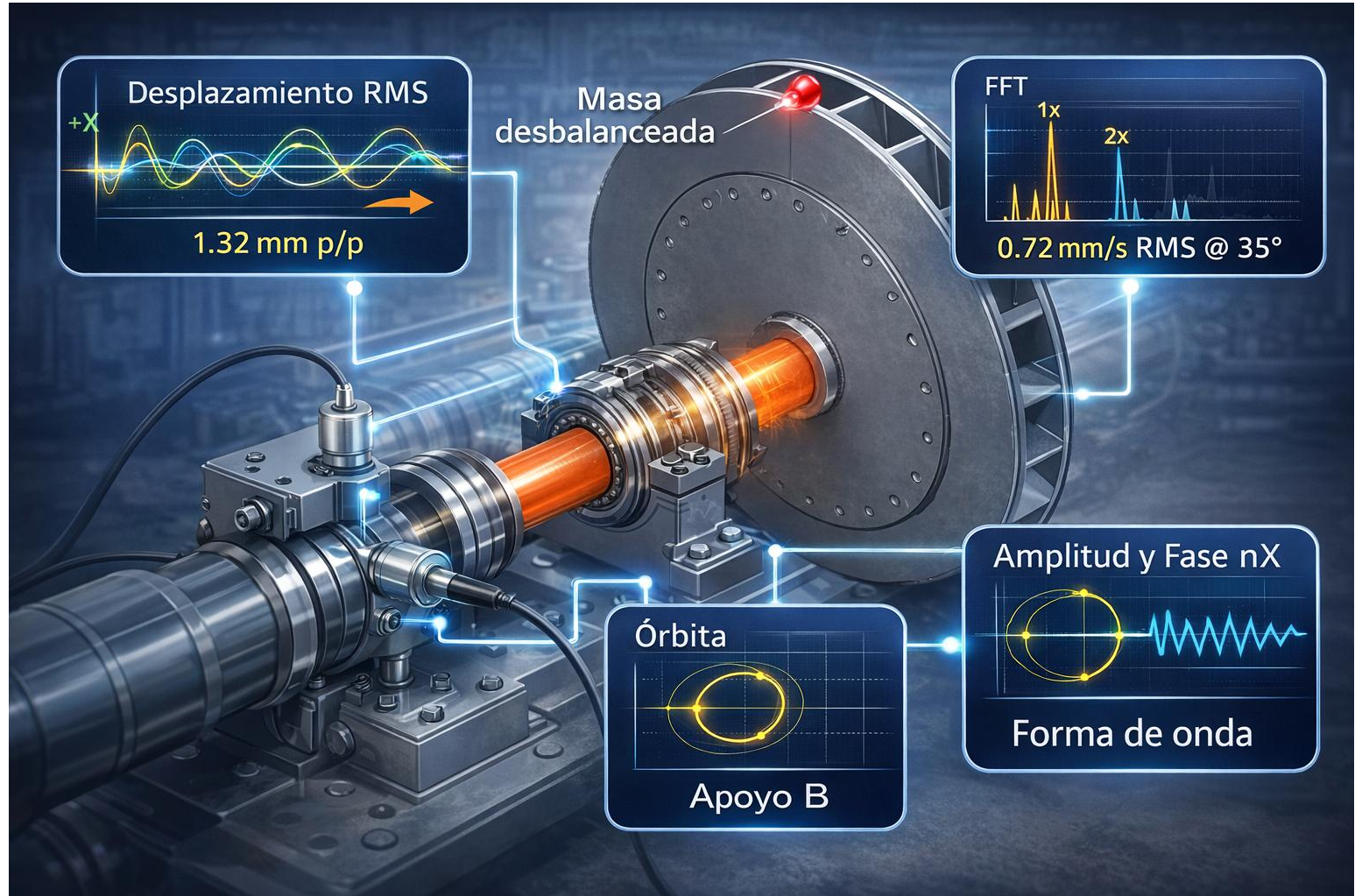
$$d = D \sin(\omega t)$$

**Velocidad:** Es un vector que especifica la derivada del desplazamiento en el tiempo.

$$v = \frac{dd}{dt} = \omega D \cos(\omega t)$$

**Aceleración:** Es un vector que especifica la derivada de la velocidad en el tiempo.

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2d}{dt^2} = -\omega^2 D \sin(\omega t)$$



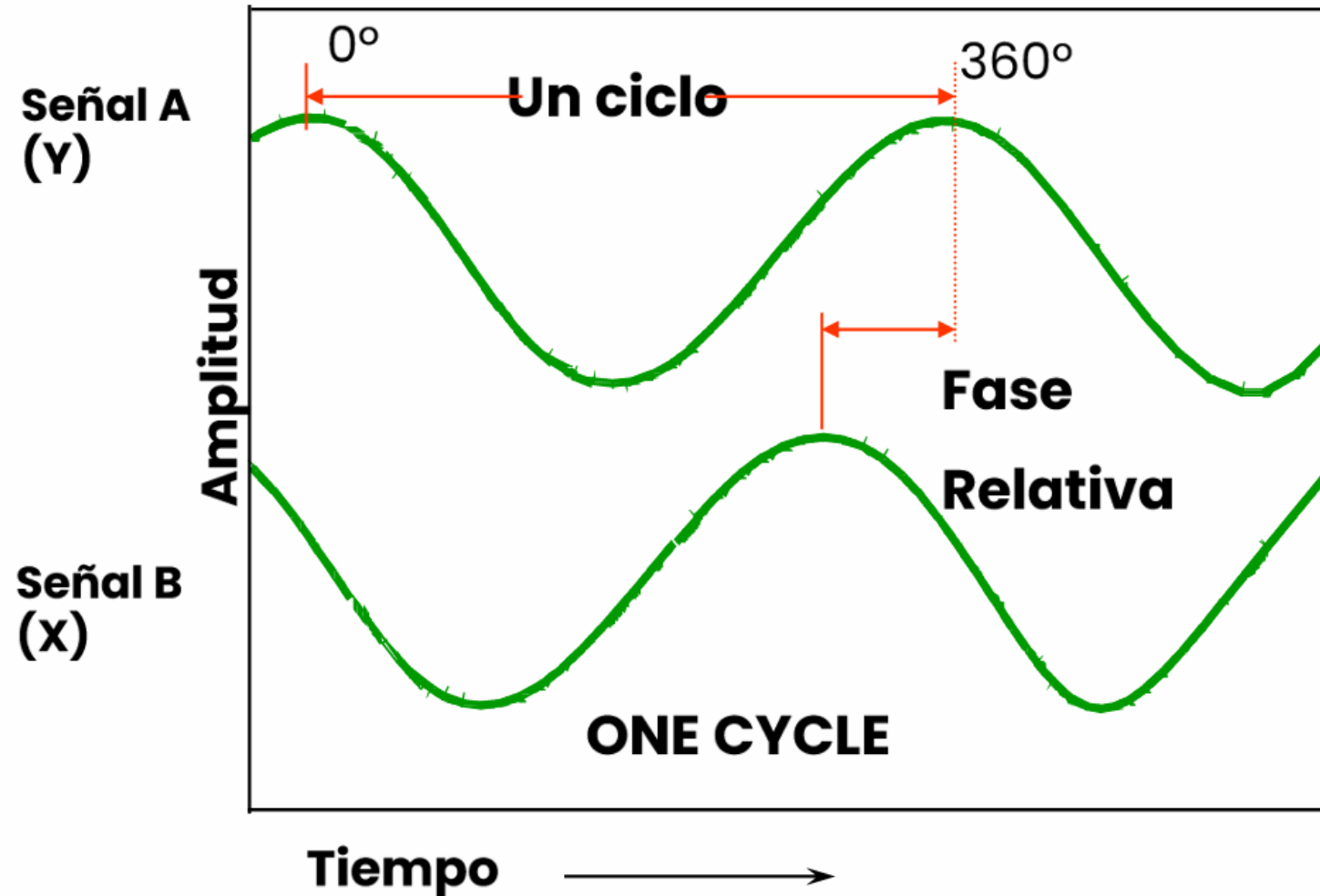
# Concepto de Fase.

Fase es una **medida** de la diferencia de **tiempo** entre dos **ondas sinusoidales**. Aunque la fase es una diferencia verdadera de tiempo, siempre se mide en términos de **ángulo**, en **grados** o **radianes**. Eso es una normalización del tiempo que requiere un ciclo de la onda sin considerar su verdadero periodo de tiempo.

La diferencia en fase entre dos formas de onda se llama a veces el desplazamiento de fase.

# Fase Relativa.

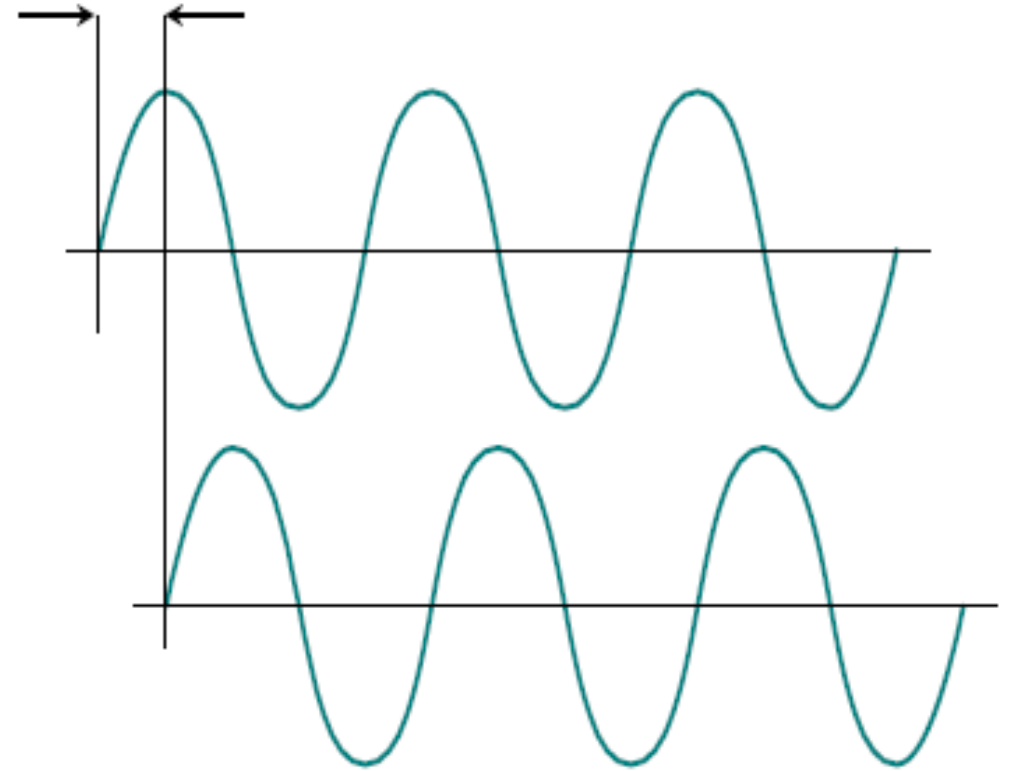
- Dos Señales.
- Iguales frecuencia.
- Mismas unidades.
- Cualquiera puede ser la referencia.
- Fase relativa entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  Adelanto o retraso.



# Fase Relativa.

En este ejemplo, la curva inferior está desplazada de 90 grados con respecto a la curva superior. Eso es un atraso de tiempo de  $1/4$  del período de la onda. También se podría decir que la curva superior tiene un avance de 90 grados.

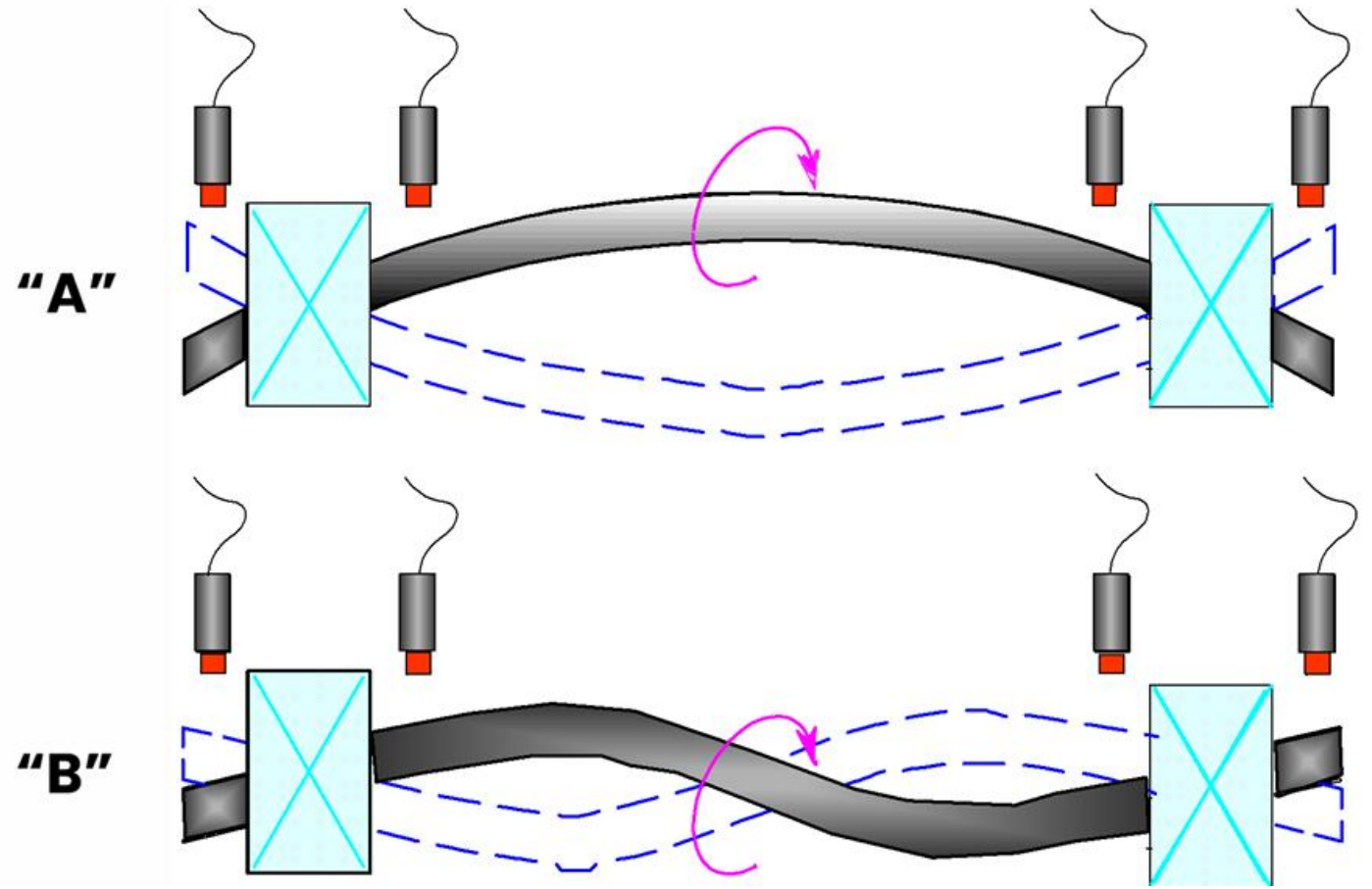
Atraso de tiempo =  $1/4$  de periodo = 90 grados



El Concepto de Fase

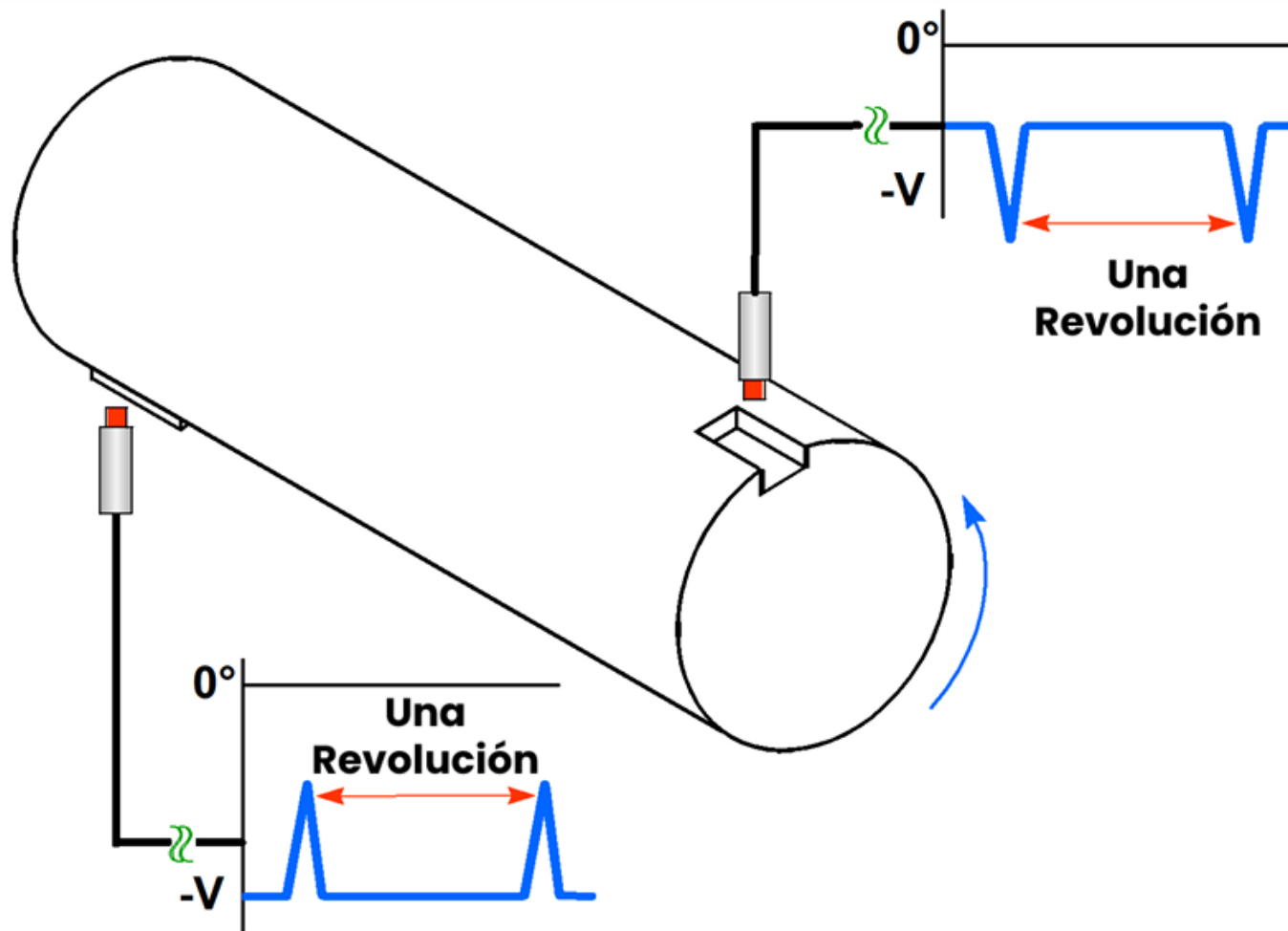
# Formas de Deflexión de Rotor

Medición de fase relativa con sensores de desplazamiento.



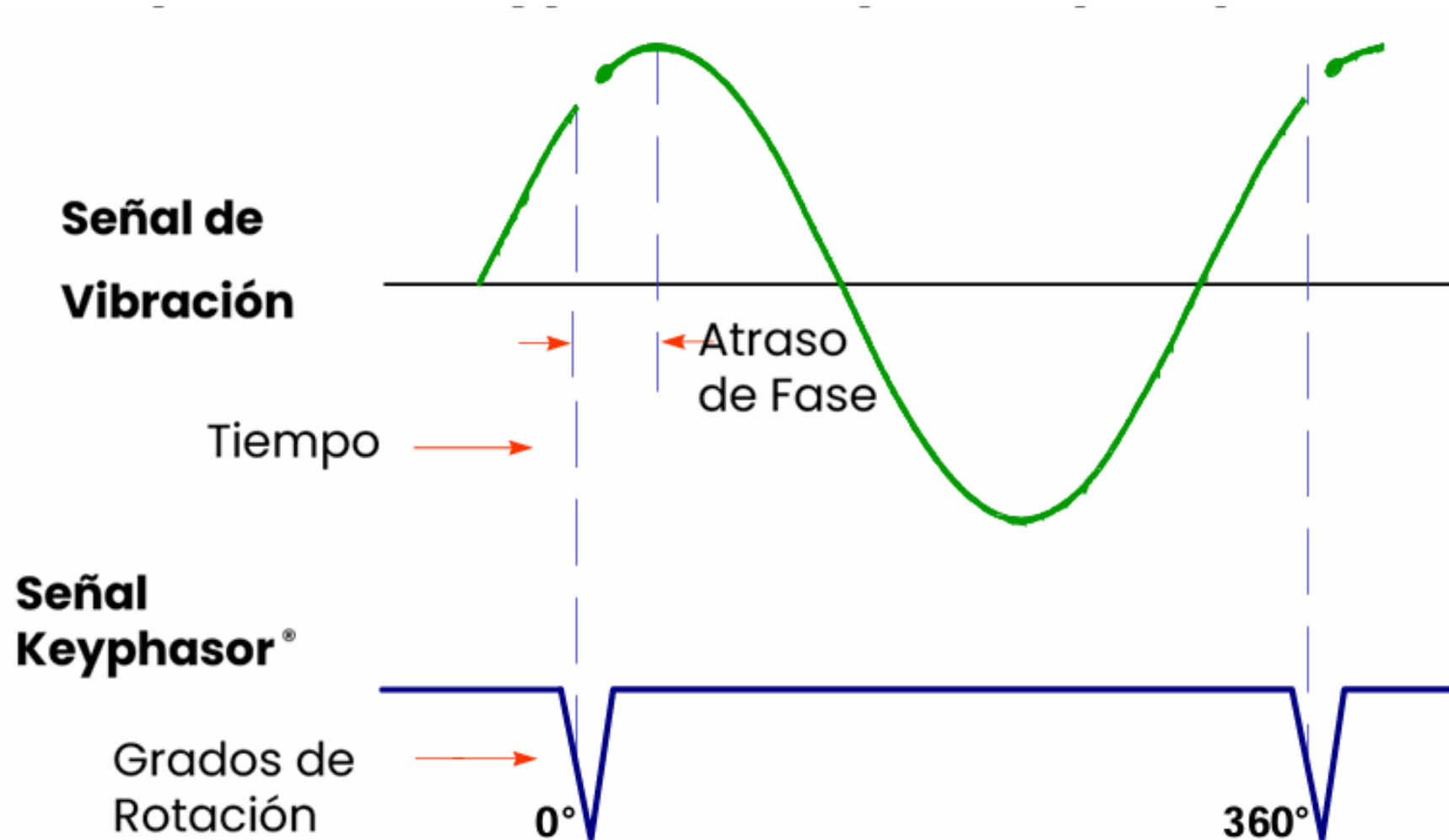
# Pulso para Medición de Fase Absoluta.

El sensor mide un **pulso eléctrico** que se genera **una vez por cada revolución del eje**, normalmente mediante un **sensor de proximidad** que detecta una marca física en el rotor (ranura, chaveta, tornillo, muesca, etc.).

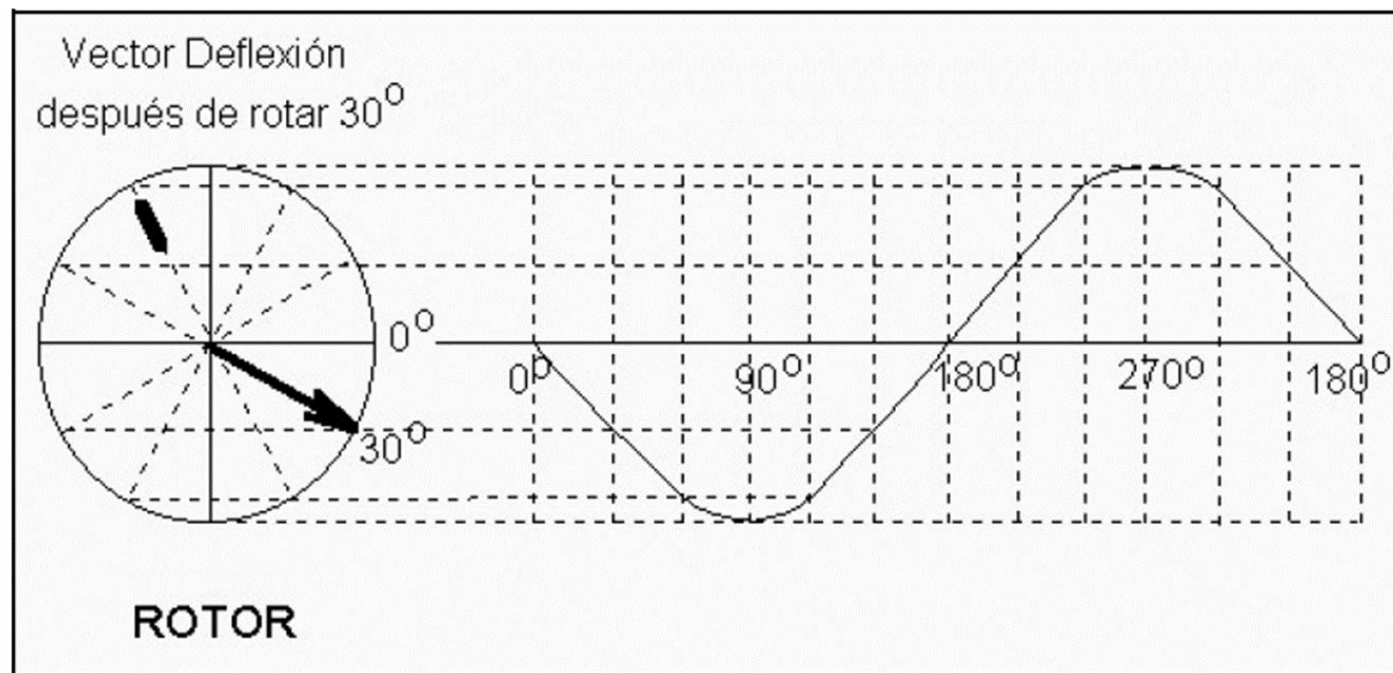
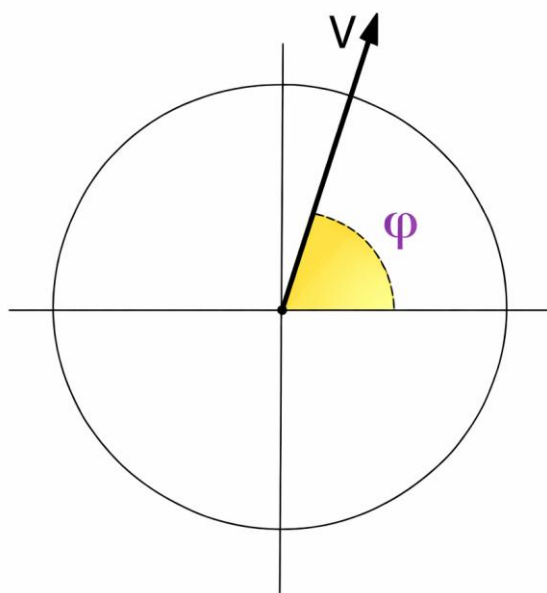


# Medición de Fase Absoluta.

Tiempo entre dos puntos sobre una señal de vibración entre el pulso del Keyphasor® el primer pico positivo de la señal.



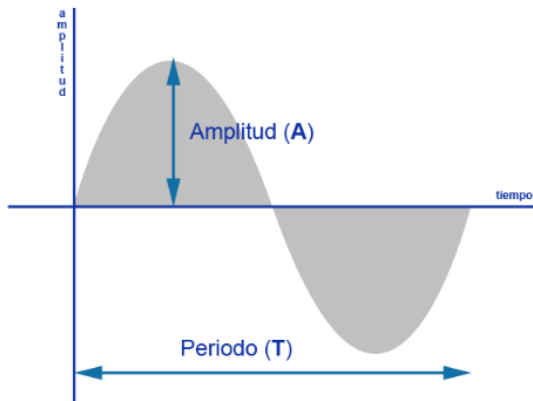
# Medición de Fase Absoluta.



El valor de la fase de vibraciones indica como se mueve el sistema

# Amplitud de vibraciones.

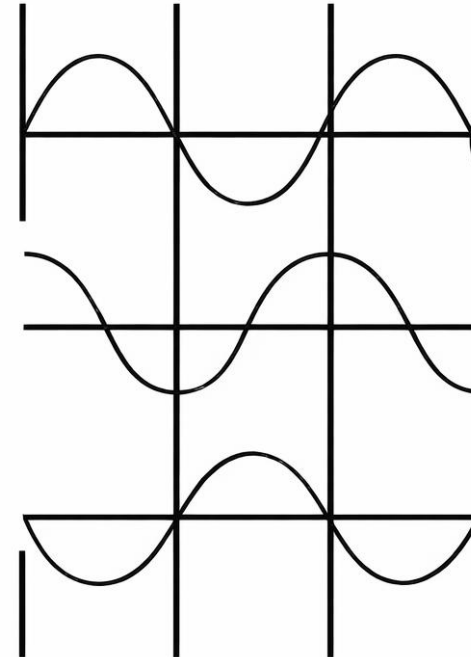
**Amplitud:** Es una medida de la variación máxima del desplazamiento u otra magnitud física que varía periódica o cuasi-periódicamente en el tiempo. Es la distancia máxima entre el punto más alejado de una onda y el punto de equilibrio o medio.



**Desplazamiento**  
mils p-p

**Velocidad**  
pulgados/seg. pico

**Aceleración**  
Gs rpc



La fase de cada una está desplazado por 90 grados!



**Unidades de Amplitud**

# Medición de Amplitud de Vibración.

- Amplitud Pico (Pk)
- Amplitud Pico a Pico (Pk – Pk )
- Amplitud Raíz del Promedio de los Cuadrados (RMS)

TABLA I. FÓRMULAS DE CONVERSIÓN PARA UNIDADES DE AMPLITUD.

INGLESA	MÉTRICA
$D = 19,100 (V)/F$	$D_M = 19,100 (V_M)/F$
$D = 70,471,000 (A)/F^2$	$D_M = 1.79 \times 10^9 (A)/F^2$
$V = DF/19,100$	$V_M = D_M F/19,100$
$V = 1690 (A)/F$	$V_M = 93,580 (A)/F$
$A = DF^2/70,471,000$	$A = D_M F^2/1.79 \times 10^9$
$A = VF/3690$	$A = V_M F/93,580$

A = Aceleración (g PICO)

V = Velocidad (Pulg/seg PICO)

D = Desplazamiento (Mil. de Pulgada PICO-PICO)

A = Aceleración (g PICO)

V = Velocidad (Pulg/seg PICO)

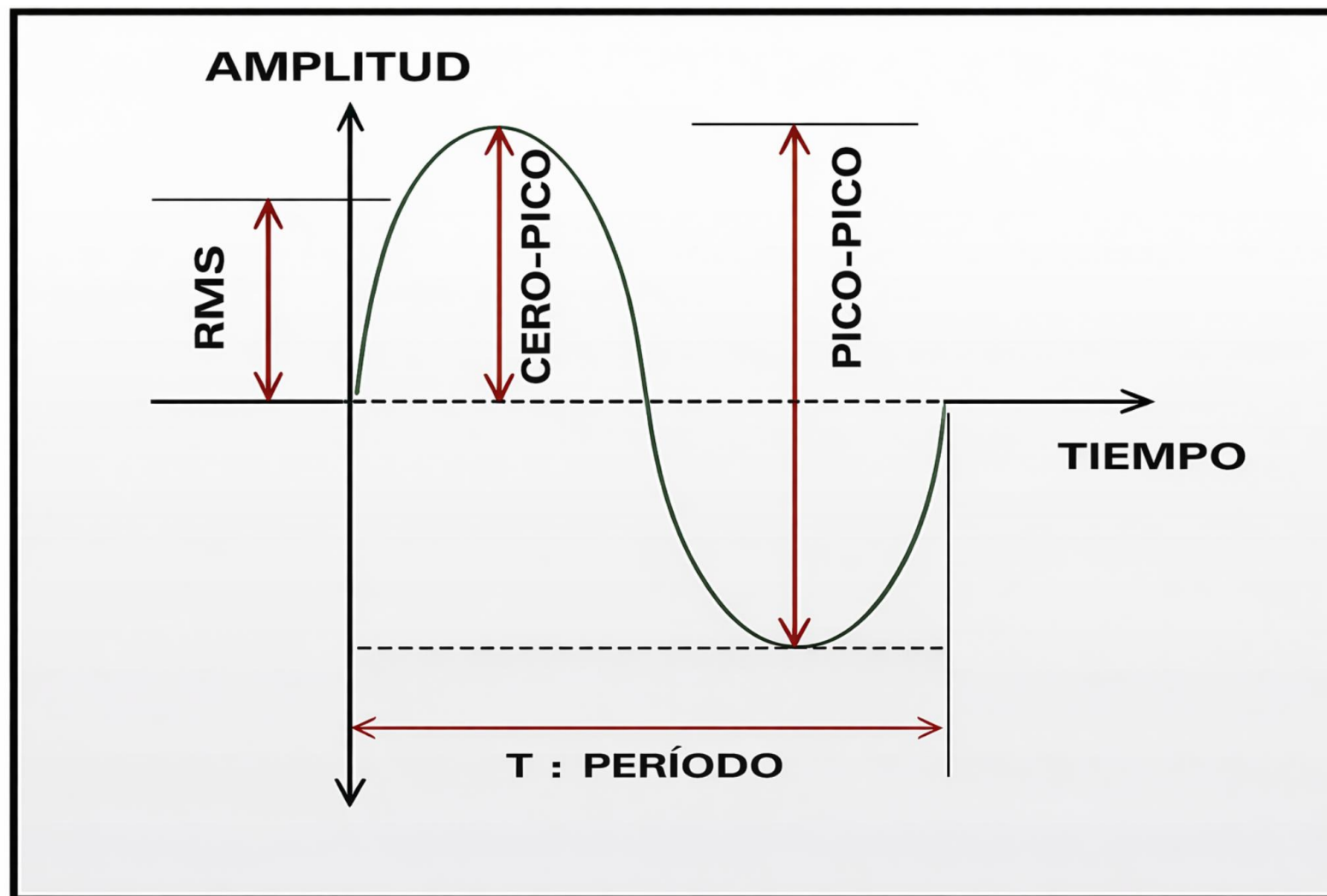
A = Aceleración (g PICO)

$V_M$  Velocidad (mm/seg PICO)

D = Desplazamiento (micrones PICO-PICO)

A = Aceleración (g PICO)

$V_M$  Velocidad (mm/seg PICO)



# Instrumentación de vibraciones.

El propósito de la instrumentación de vibraciones es obtener medidas de vibraciones exactas, ya sea de amplitud, frecuencia y fases, de tal forma que se pueda determinar con confiabilidad la condición de la maquina. Hay una amplia gama de instrumentos de vibración, en función de sus diversas capacidades. Básicamente hay cinco tipos de instrumentos de medida de la vibración:

- Vibrometros.
- Analizador sintonizable o de filtro de barrido.
- Analizadores-colector de data.
- Analizador de tiempo real.
- Grabadora de cinta de alta calidad.

# Medidores mas utilizados.

Analizador colector de datos.



Analizador en tiempo real para monitoreo de vibraciones.

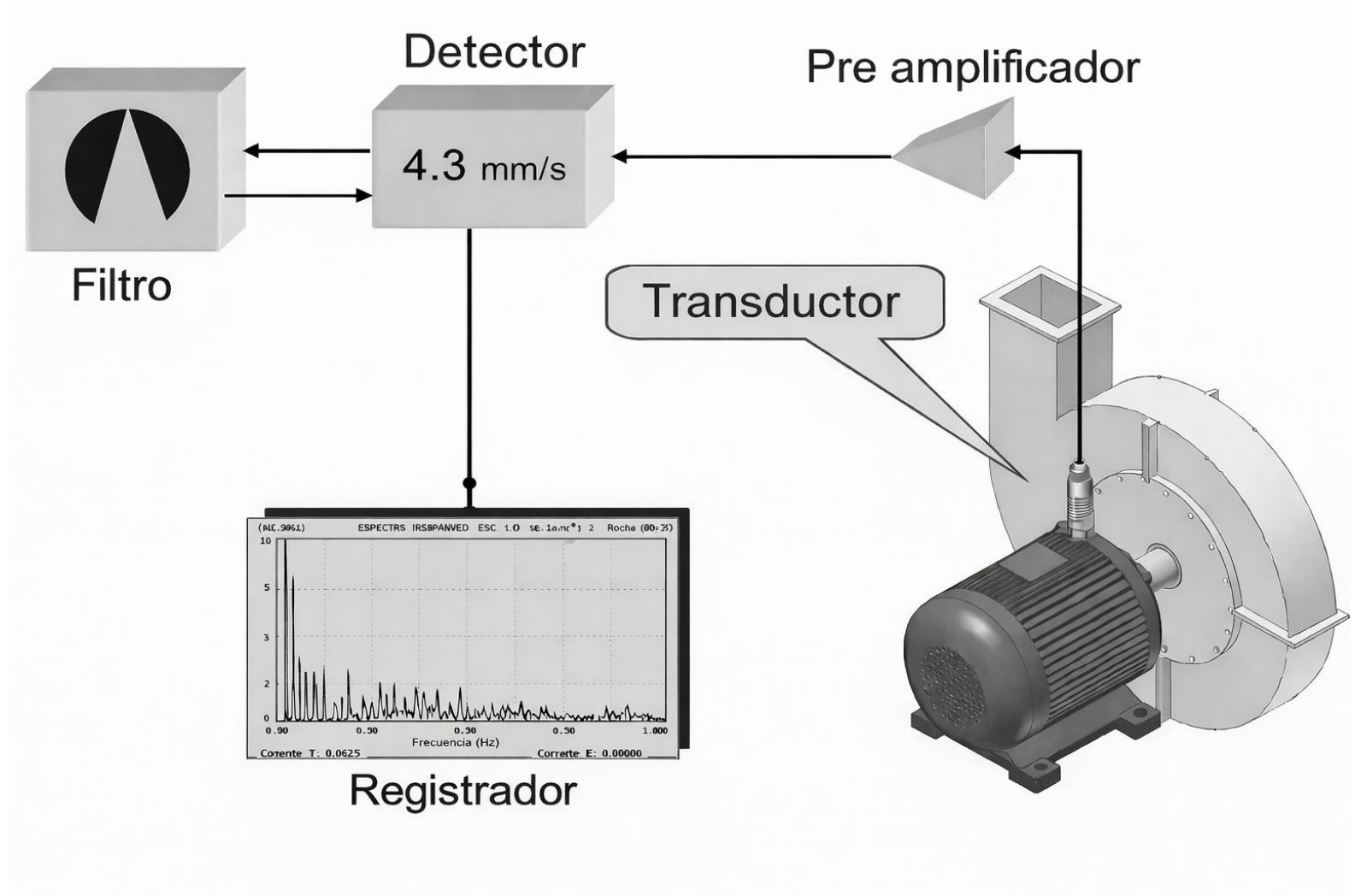


Analizador colector de datos para Turbomáquinas.



# Instrumentación de vibraciones.

**Transductor:** Es un dispositivo diseñado para recibir energía de un sistema y suministrar energía ya sea del mismo tipo o de otra naturaleza, hacia otro sistema, de forma tal que a la salida del transductor aparezca la característica de interés de la energía de entrada.

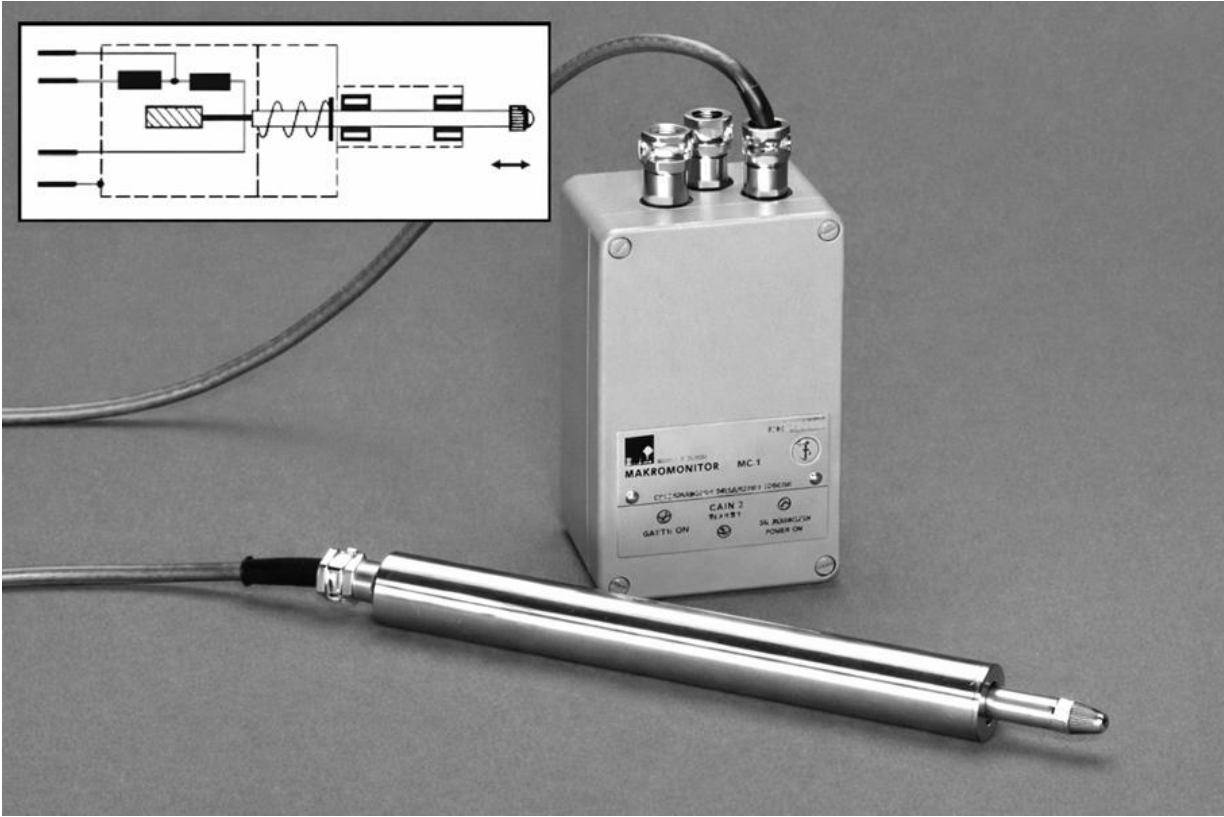


# Transductores de desplazamiento.

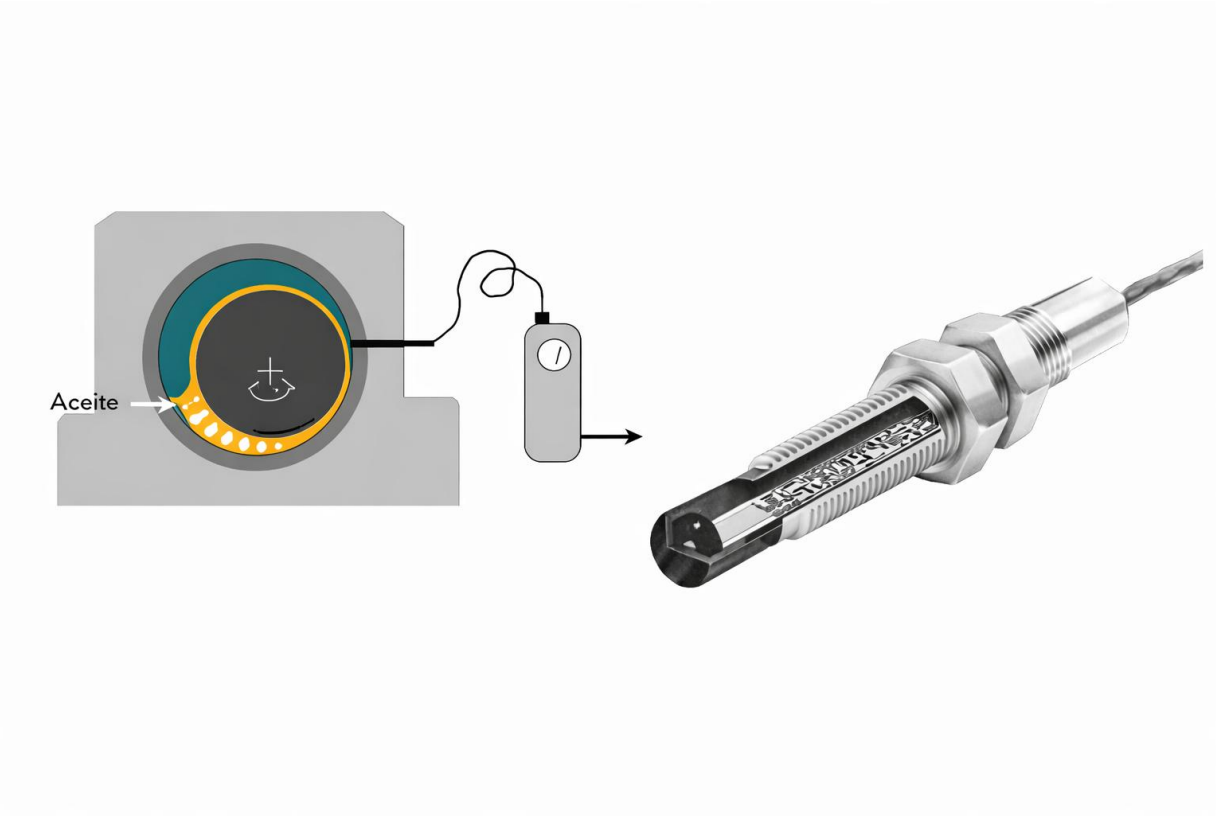
Los transductores de desplazamiento son de gran utilidad industrial, ya sea con el objetivo de medir la expansión de la carcasa de una turbina o el movimiento orbital de un eje en su cojinete de deslizamiento. Existen varios tipos de transductores de desplazamiento, pero pueden ser clasificados en dos grandes grupos, estos son:

- a) Transductores de desplazamiento por contacto
- b) Transductores de desplazamiento sin contacto

Transductores de desplazamiento por contacto  
Transformador Diferencial Lineal Variable (LVDT)

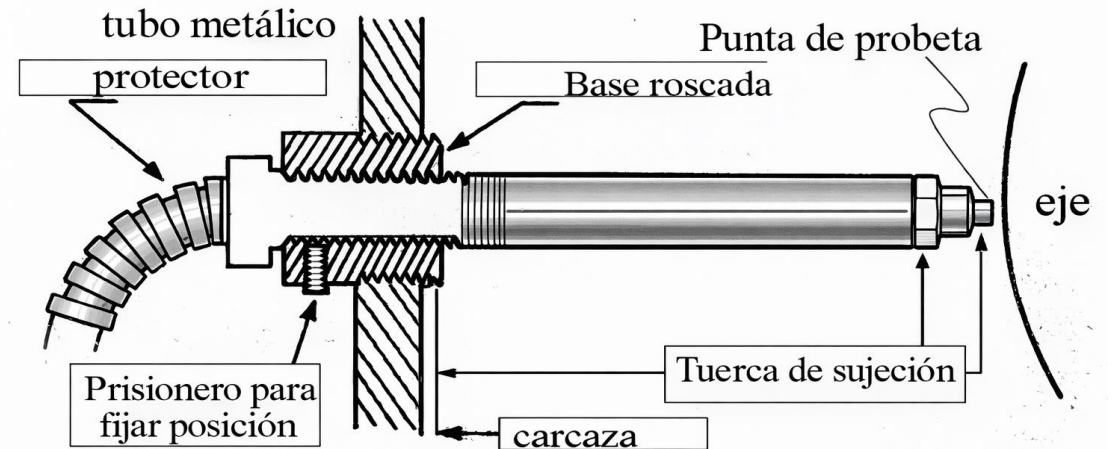
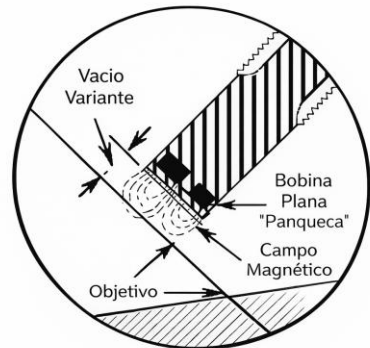
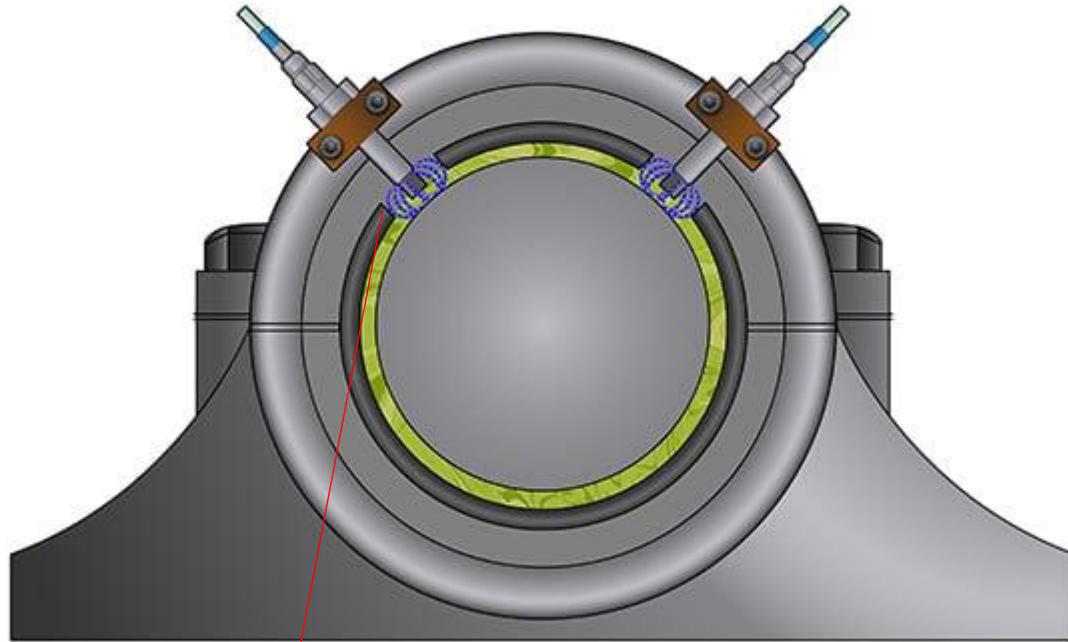


Transductores de desplazamiento sin contacto  
Sonda de proximidad.



# Transductores de desplazamiento sin contacto.

## Sonda de proximidad.



# Transductores de desplazamiento.

## Sin contacto.

### Característica de su uso:

#### Ventajas

- Miden distancias relativas entre dos superficies.
- Respuesta segura a baja frecuencia.
- Pueden medir el movimiento estático y dinámico del eje.
- No se desgastan.
- Son pequeños.
- Fáciles de calibrar.
- Miden directamente el desplazamiento.

#### Desventajas

- Su sensibilidad se ve limitada en alta frecuencia.
- Su instalación o reemplazo es dificultoso.
- Requiere de una fuente de energía externa.
- Presenta sensibilidad en la calibración según el tipo de material del eje.

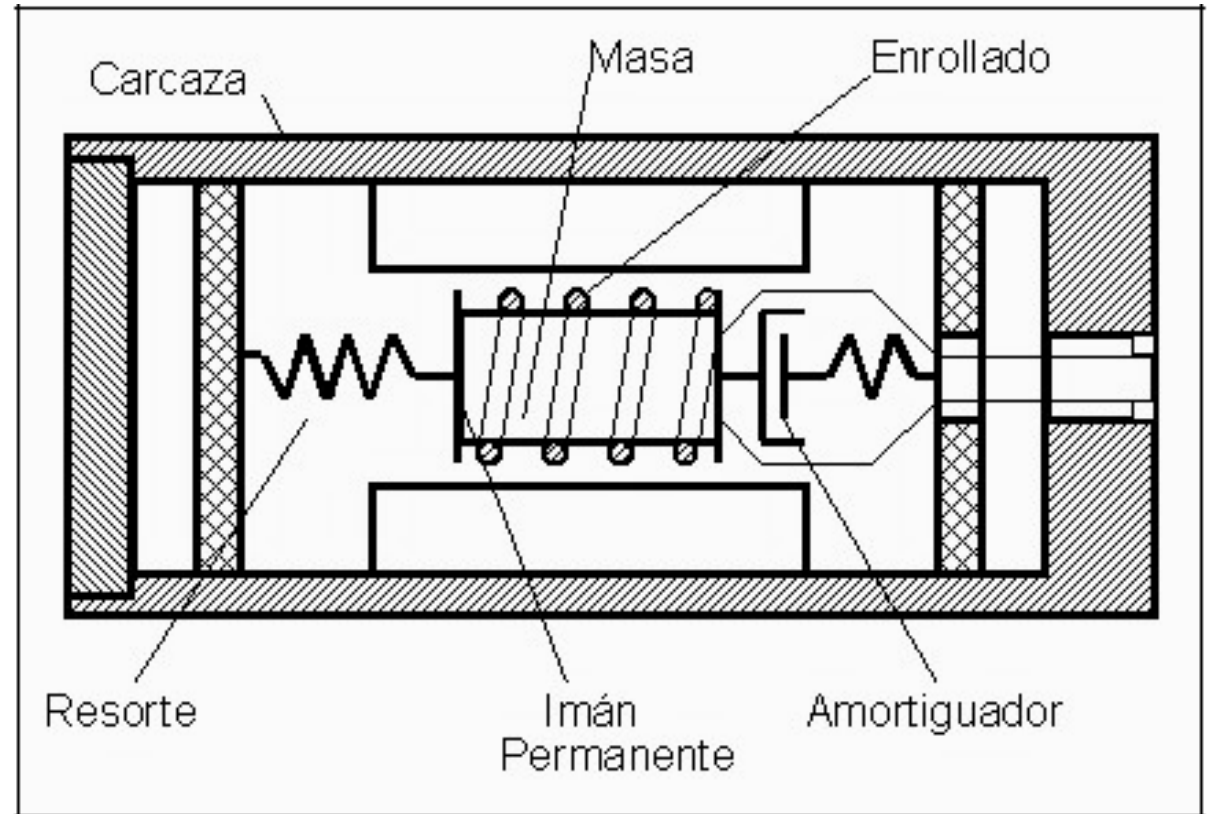
## Con contacto.

### Características de su uso:

- Pertenecen a una tecnología antigua.
- Fueron reemplazada por la probeta de Eddy de no contacto.
- Uso en aplicaciones específicas: balanceo o verificación periódica de vibraciones.
- Son limitados a las respuestas de las frecuencias y no tienen capacidad de medir las vibraciones por encima de los 12000 CPM (200 Hz).
- No deben ser usados en superficies de ejes que excedan una velocidad de (30000 ft/min o 10000 m/min).

# Transductores de velocidad.

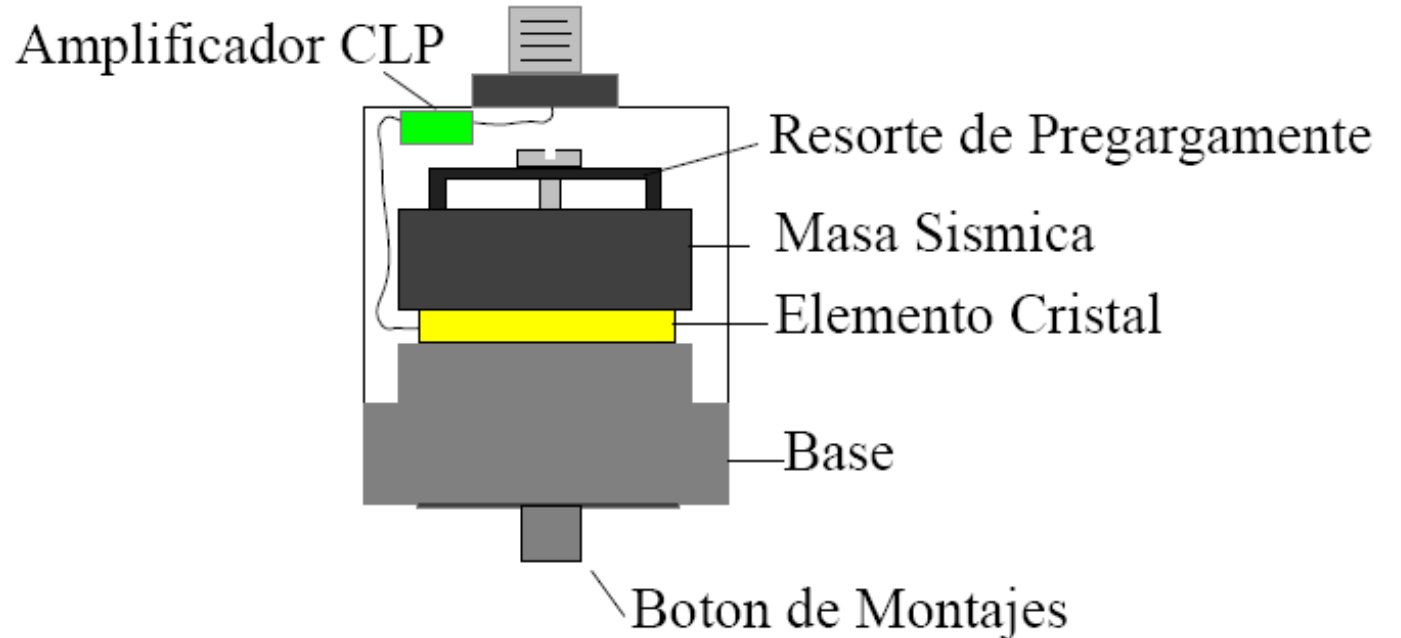
Los transductores de velocidad basados en el movimiento sísmico. Un enrollado soportado por resortes de muy baja rigidez y un imán permanente se fijan a la carcasa del transductor de manera que se cree un campo magnético muy fuerte dentro del cual esté "sumergido" el propio enrollado.



# Transductores acelerómetros.

El acelerómetro de tipo de compresión como se muestra en el diagrama fue el primer tipo a ser desarrollado. Por lo general se prefiere el acelerómetro del tipo de cizallamiento, configurado de tal manera que el elemento activo esta sujeto a fuerzas de cizallamiento.

## El Acelerómetro



Accelerometro Piezo-Electrico

# Transductores de velocidad

## Característica de su uso:

### Ventajas

- Tiene muy buena respuesta en medida de frecuencia.
- Puede ser instalados sobre bases temporales
- Fácil de instalar.
- No requiere de fuentes externa de poder.

### Desventajas

- Su uso se ve limitado en ambientes pesados o donde existan fuentes de campos magnéticos.
- Su comportamiento se ve afectado por el uso.
- Difícil de calibrar.

# Transductores acelerómetros

## Característica de su uso:

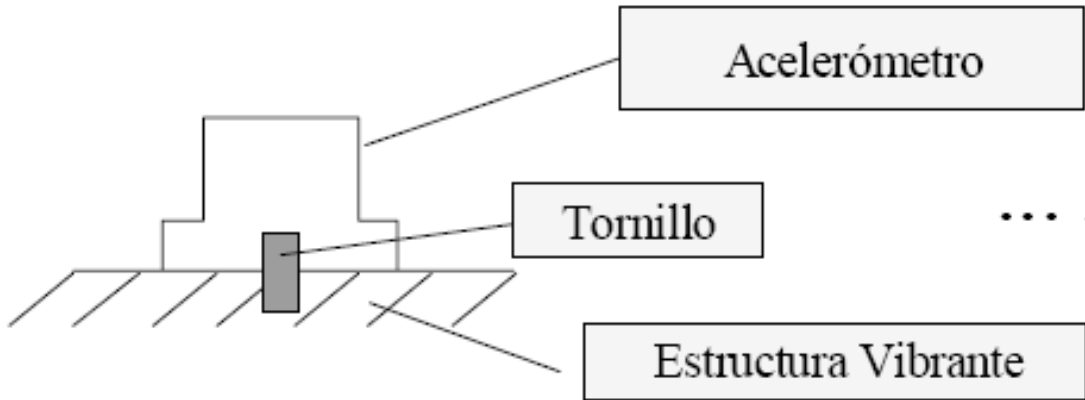
### Ventajas

- Buena respuesta a alta frecuencia.
- Existen algunos modelos para ambiente a alta temperatura.
- Son bastante confiable.
- Simple de instalar.
- Son pequeños.

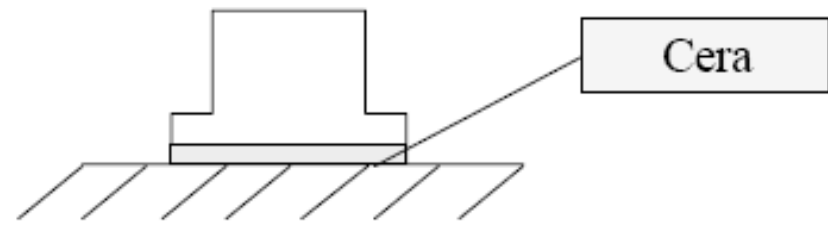
### Desventajas

- Posibilidades de captar ruidos de baja frecuencia (distorsión de señal).
- Requiere de elemento electrónico adicionales para superar los problemas de impedancia en la señal de salida.

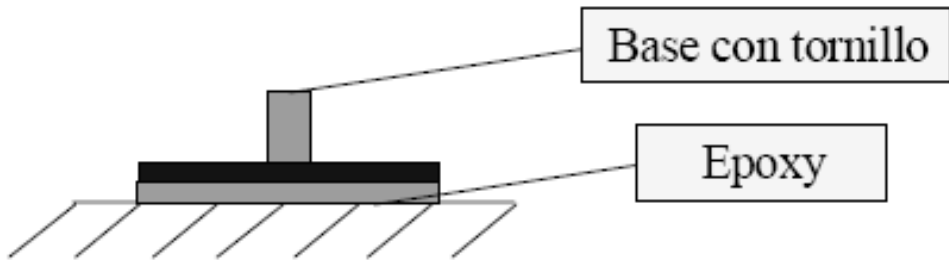
# Montaje de Transductores Sísmicos



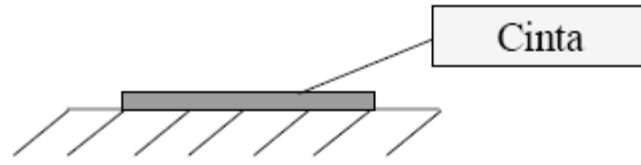
... **Apernado**  
(Hasta  $\approx$  5000 Hz)



... **Cera de abeja**  
(Hasta  $\approx$  2000 Hz)

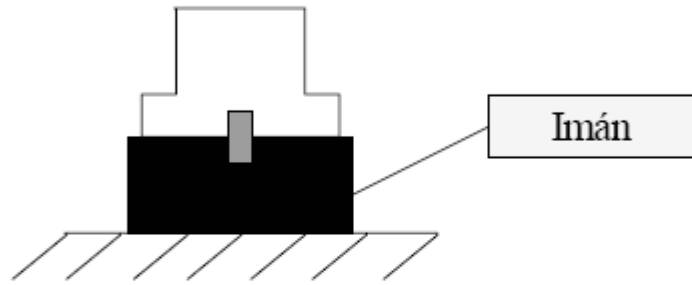


... **Epoxy**  
(Hasta  $\approx$  1500 Hz)



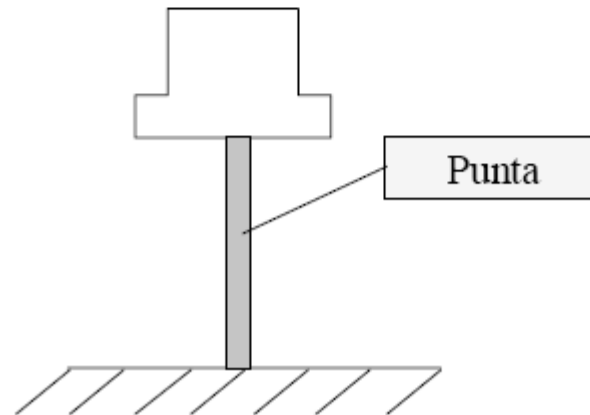
## ... Cinta Adhesiva

(Hasta  $\approx$  1000 Hz)



## ... Base Magnética

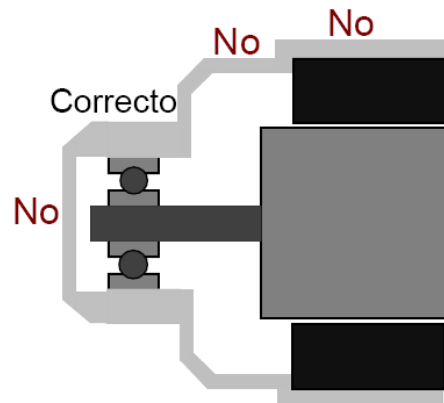
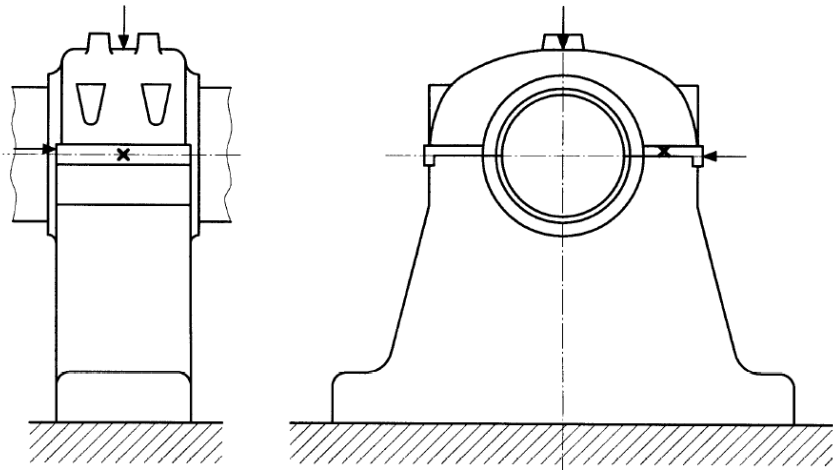
(Hasta  $\approx$  500 Hz)



## ... Jinete

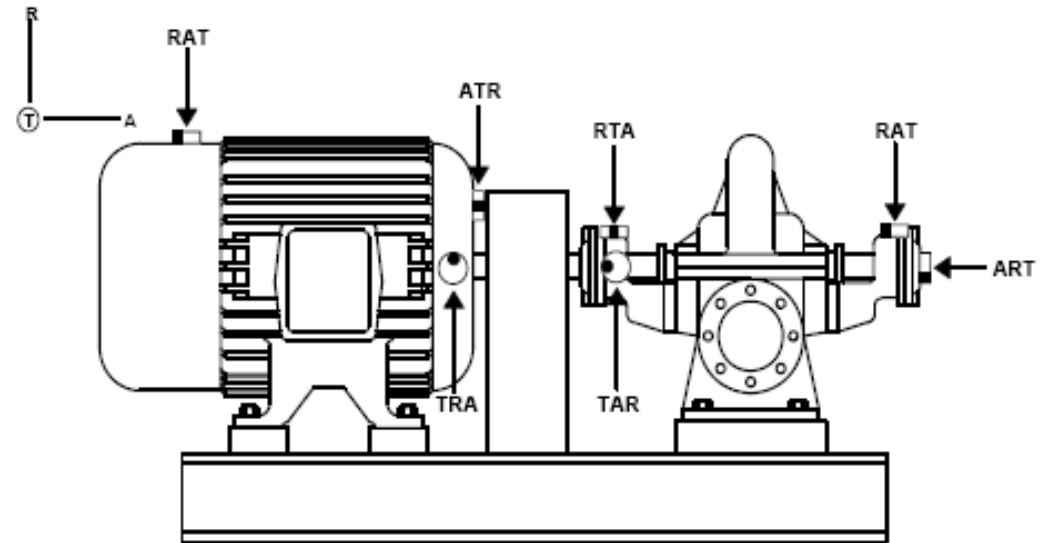
(Hasta  $\approx$  300 Hz)

# Recolección de vibraciones en equipos.



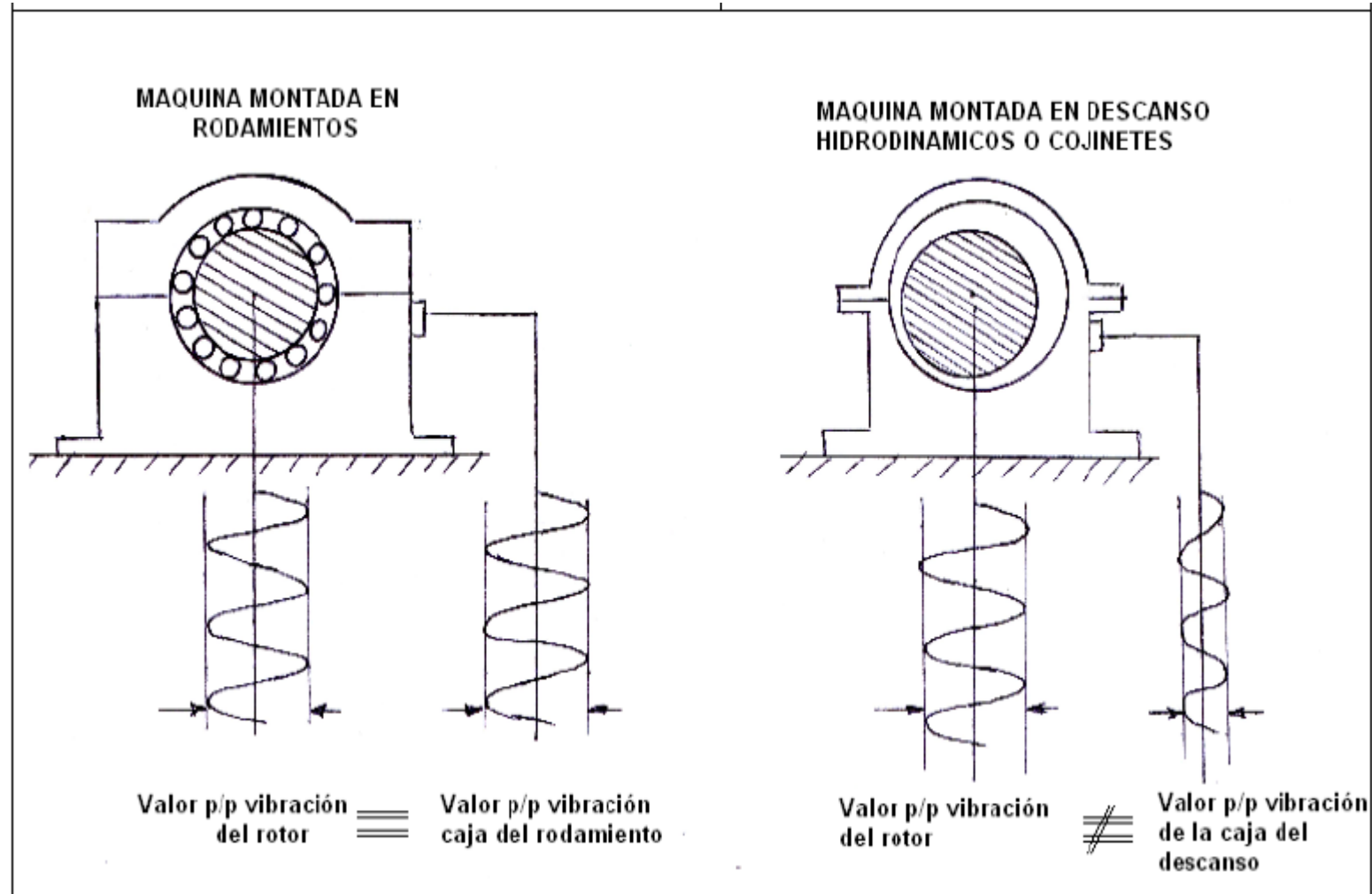
Ubicaciones de Acelerómetros

El diagrama siguiente enseña las seis orientaciones del sensor para una máquina original.



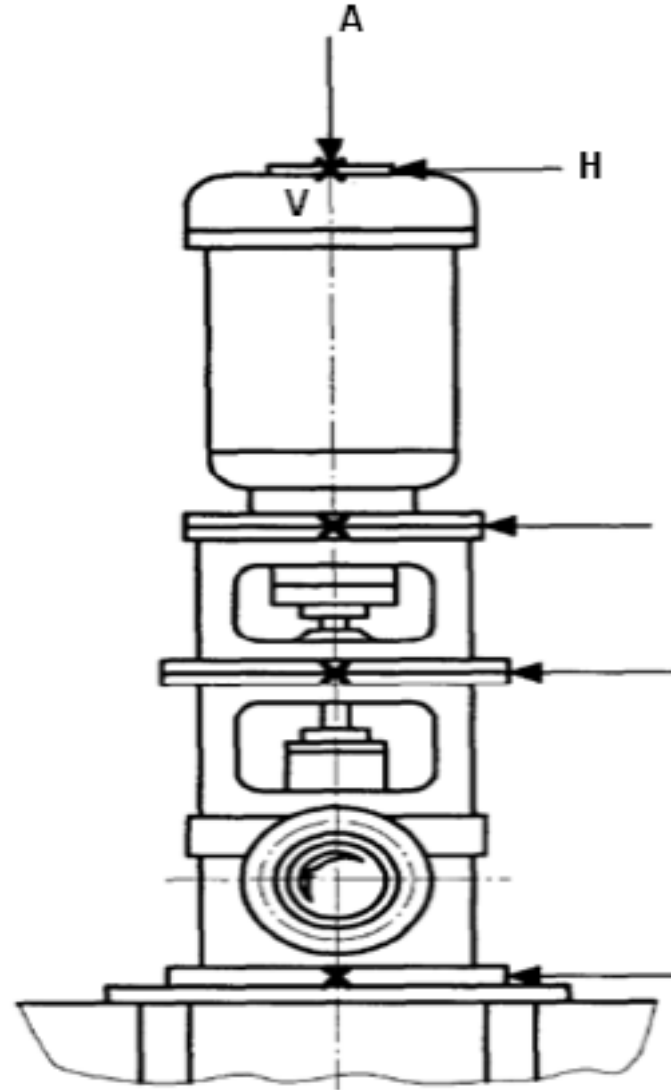
Para máquinas verticales R es Radial, T es tangencial y A es vertical.

# Medición de vibración en cojinete de deslizamiento y rodamientos de elementos rodantes.



## MAQUINAS DE EJE VERTICAL

Medir en dos direcciones perpendiculares, una de ella en la dirección del eje elástico



# Medición correcta en un motor eléctrico

- 1) por un análisis del espectro, o
- 2) eliminando la fuente externa que genera la vibración de fondo

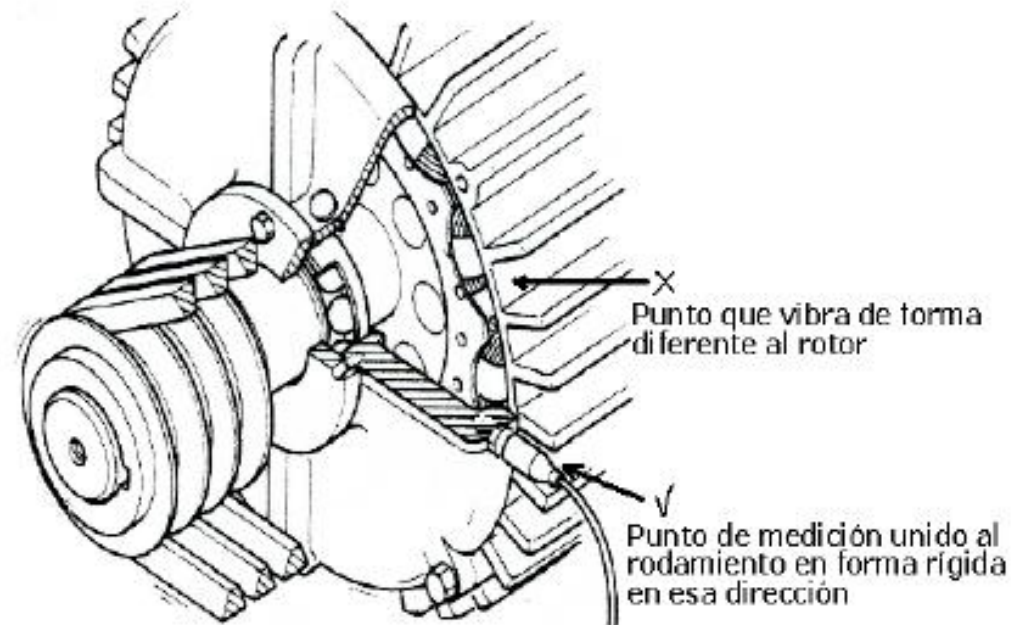
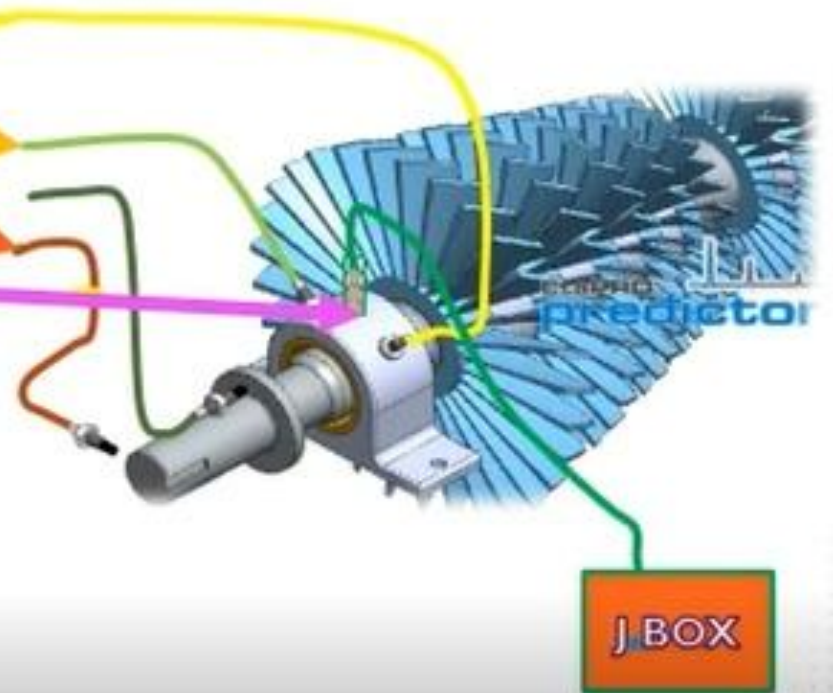


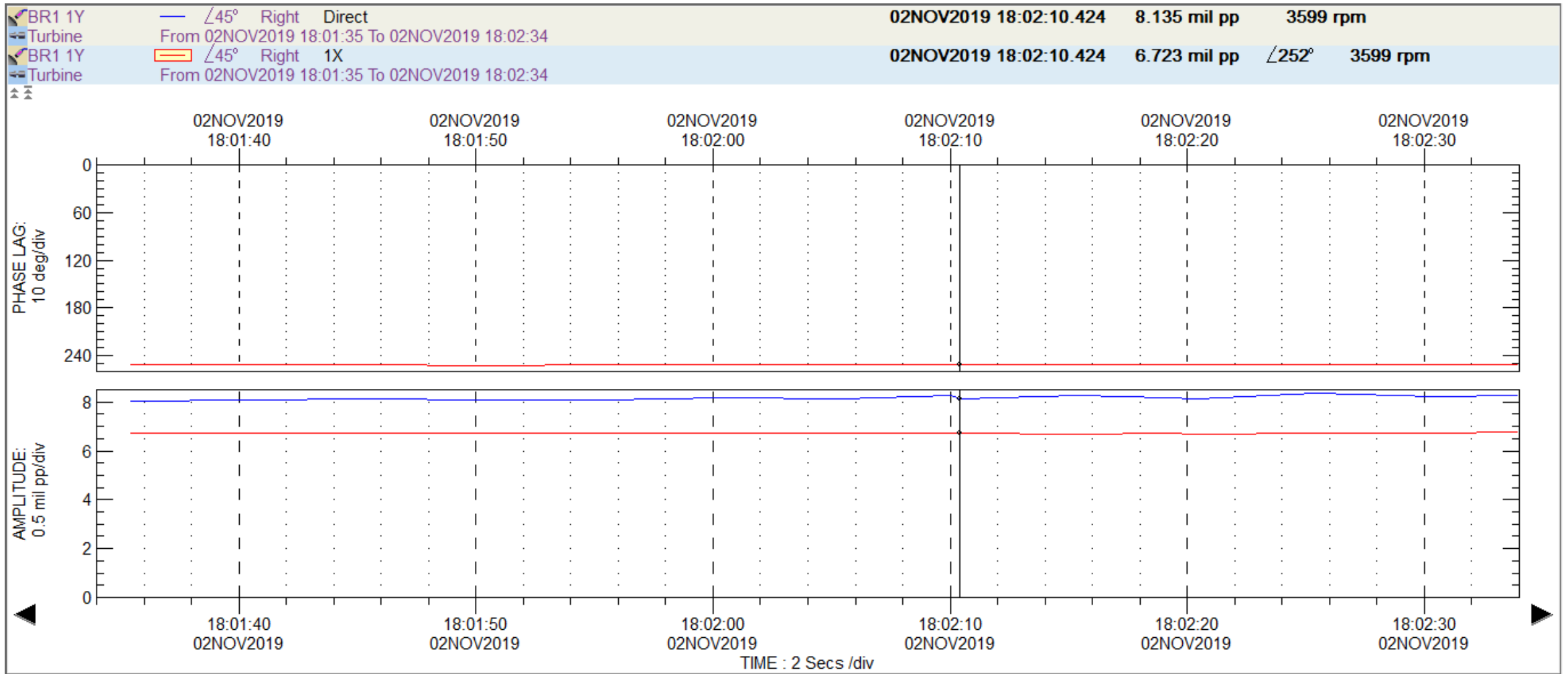
FIG.11. Puntos de medición cuando no se tiene acceso a la caja del rodamiento  
√: Ubicación correcta, X: Ubicación incorrecta

# Instrumentación de vibraciones en turbomáquinas.

- 1- Keyphasor (Tacho)
- 2- Displacement probes (Proximimeters)
- 3- Accelerometers
- 4- Velocity probes (Velometers)

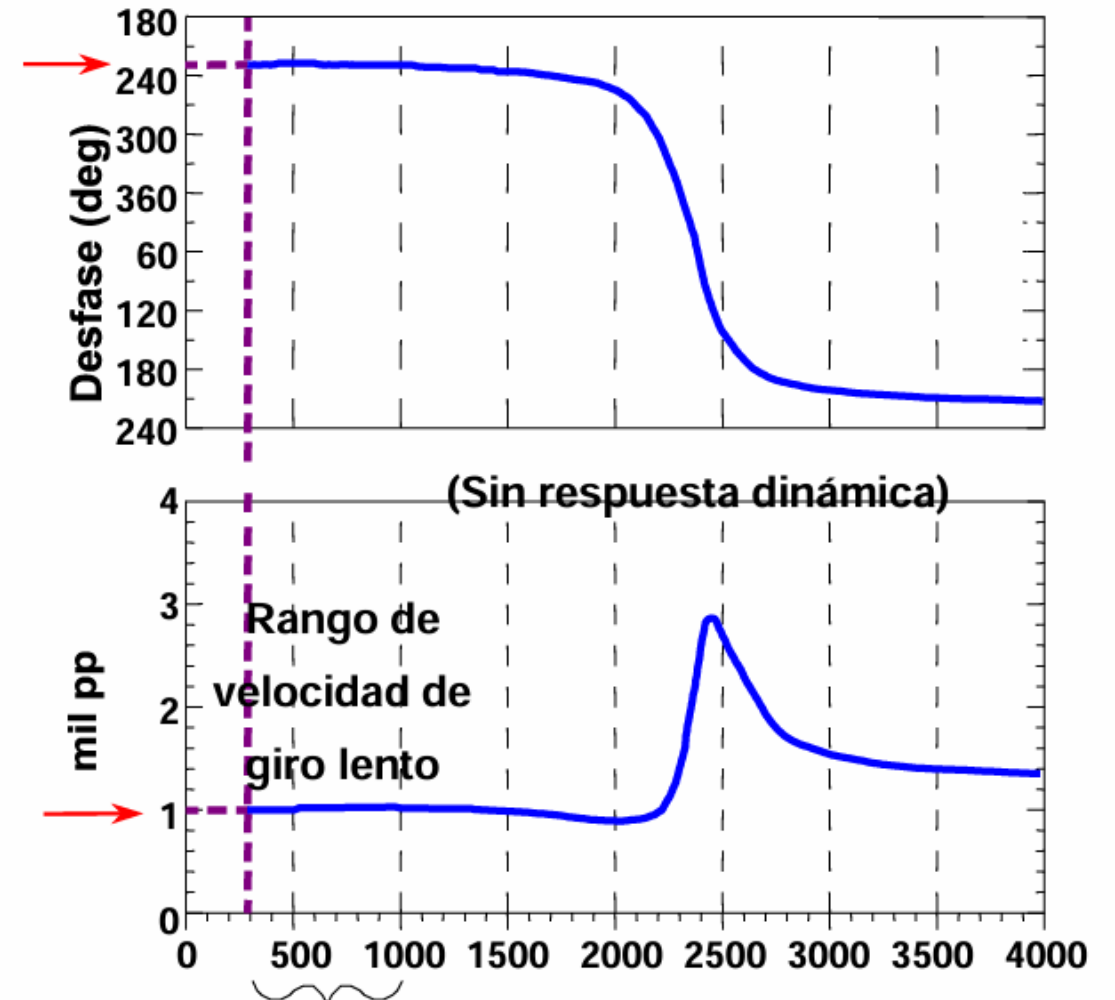


# Tendencia (Trend)

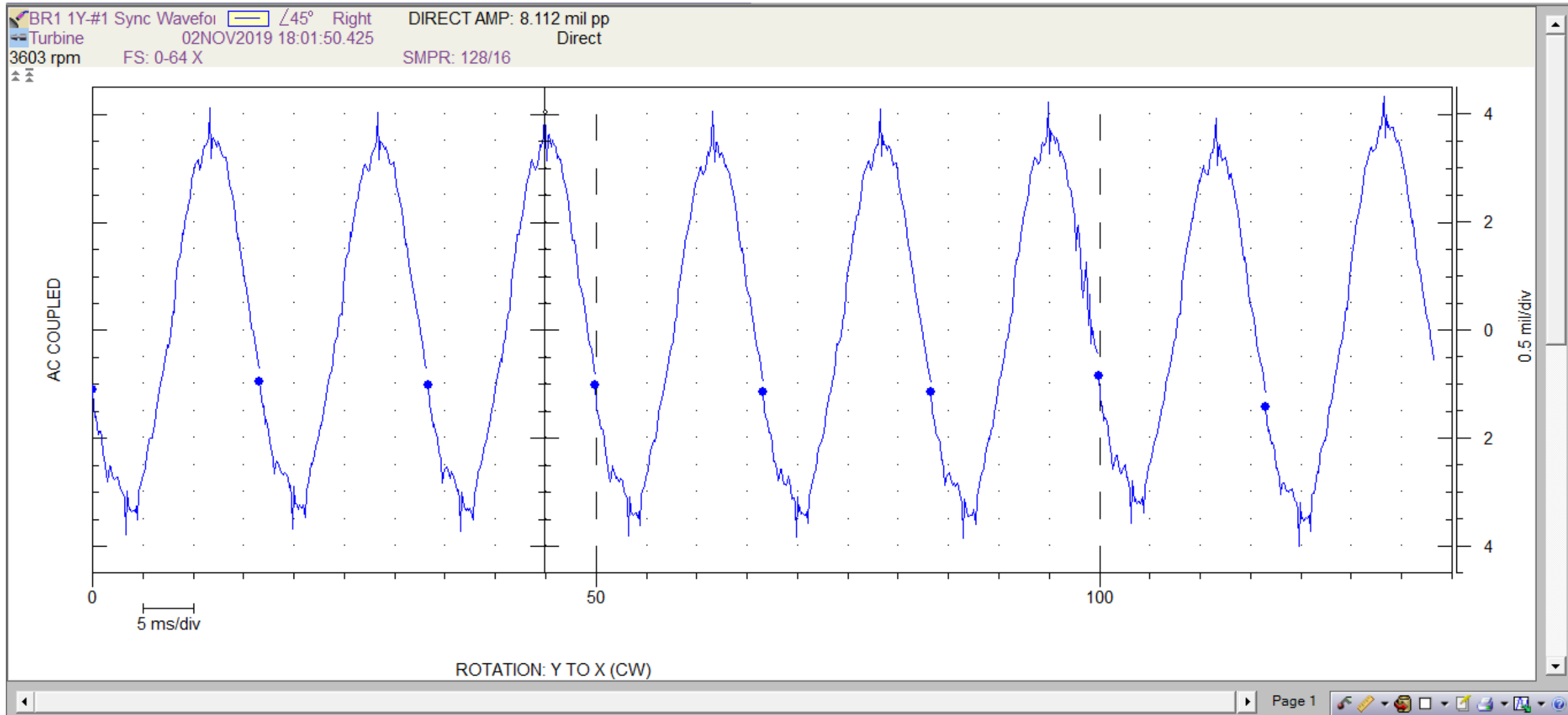


# Diagrama de Bode.

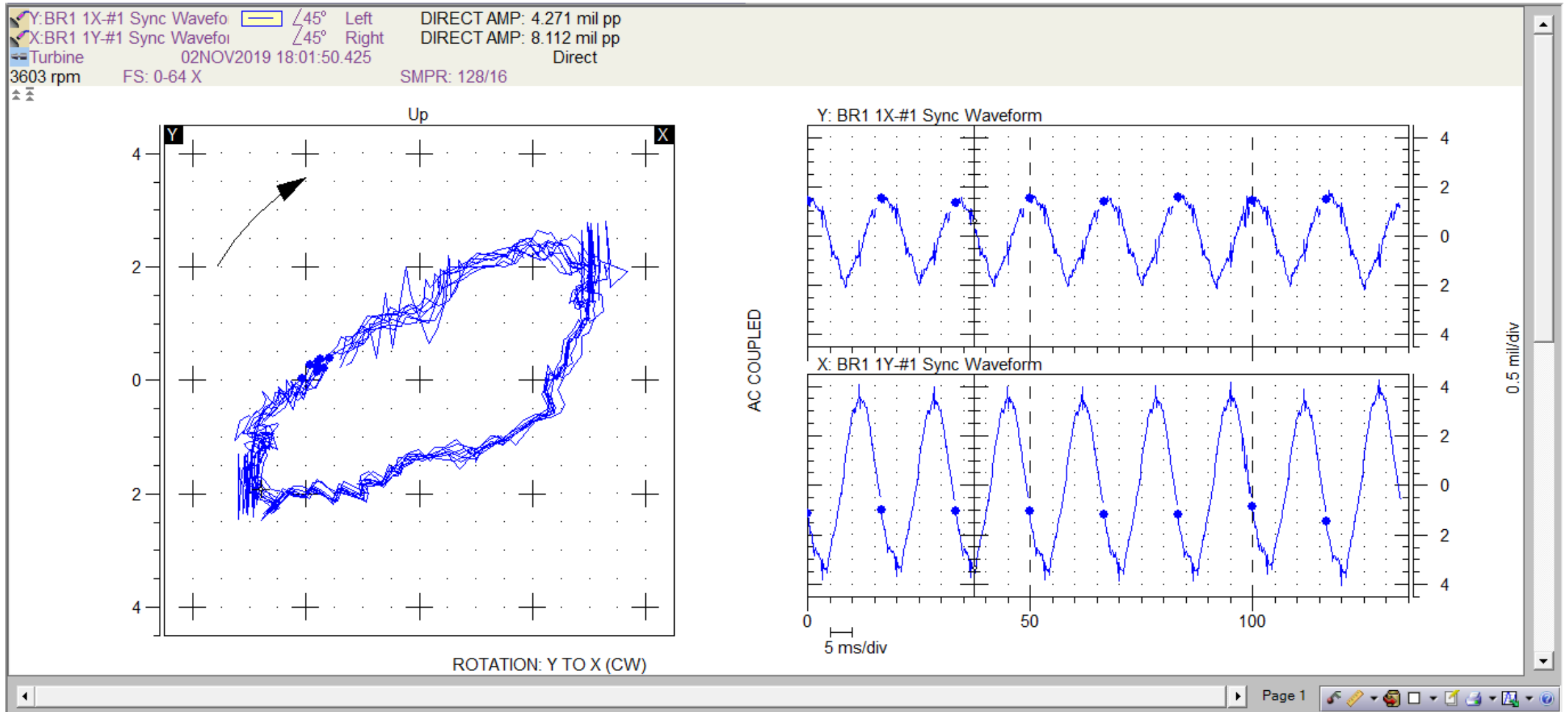
Un diagrama de Bode representa los valores de los vectores de vibración (por lo general, 1X) como función de la velocidad de rotación del eje en un sistema de coordenadas cartesianas. Se utilizan dos juegos de ejes de coordenadas: en uno de ellos se representa el vector de amplitud de vibración frente a la velocidad de rotación del eje y, en el otro, el desfase del vector de vibración frente a la velocidad de rotación del eje.



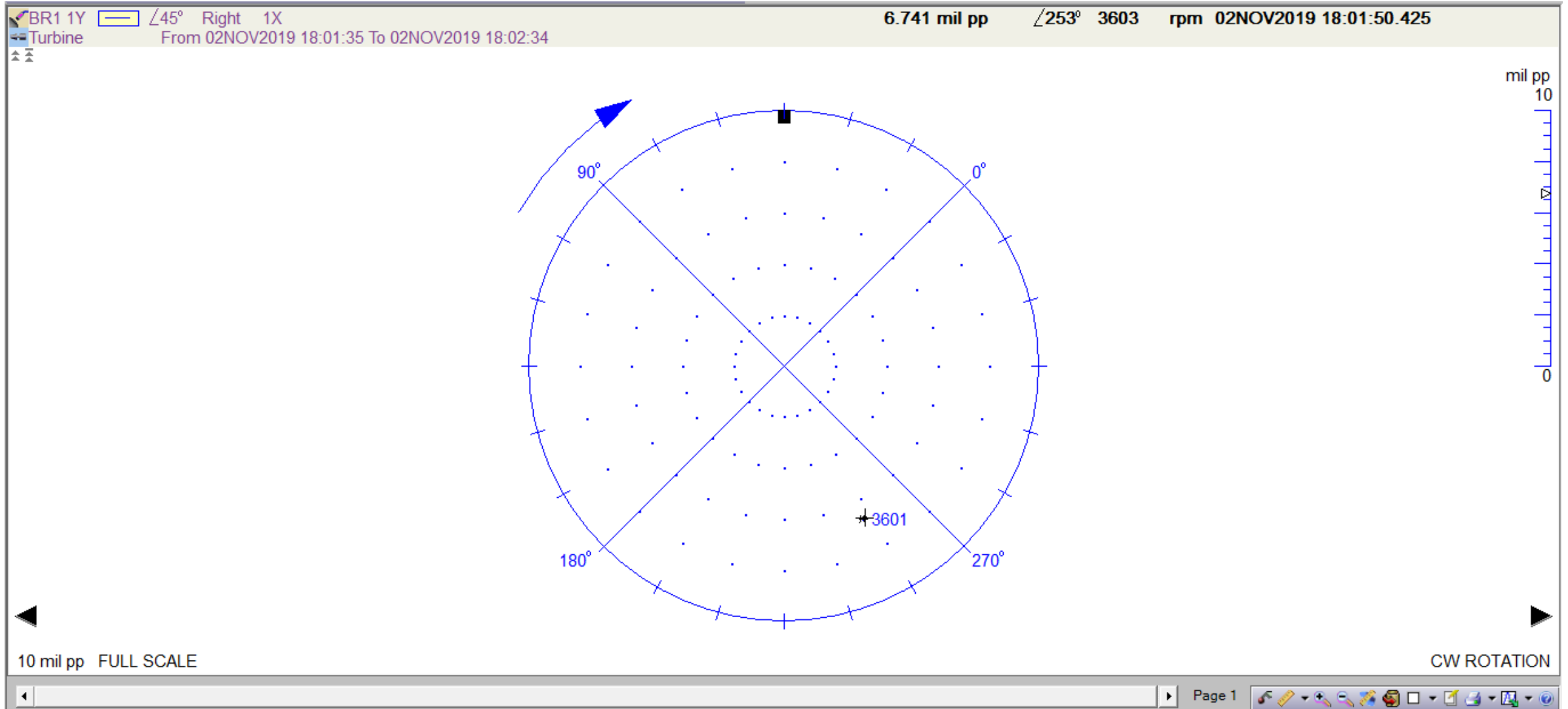
# Onda de tiempo



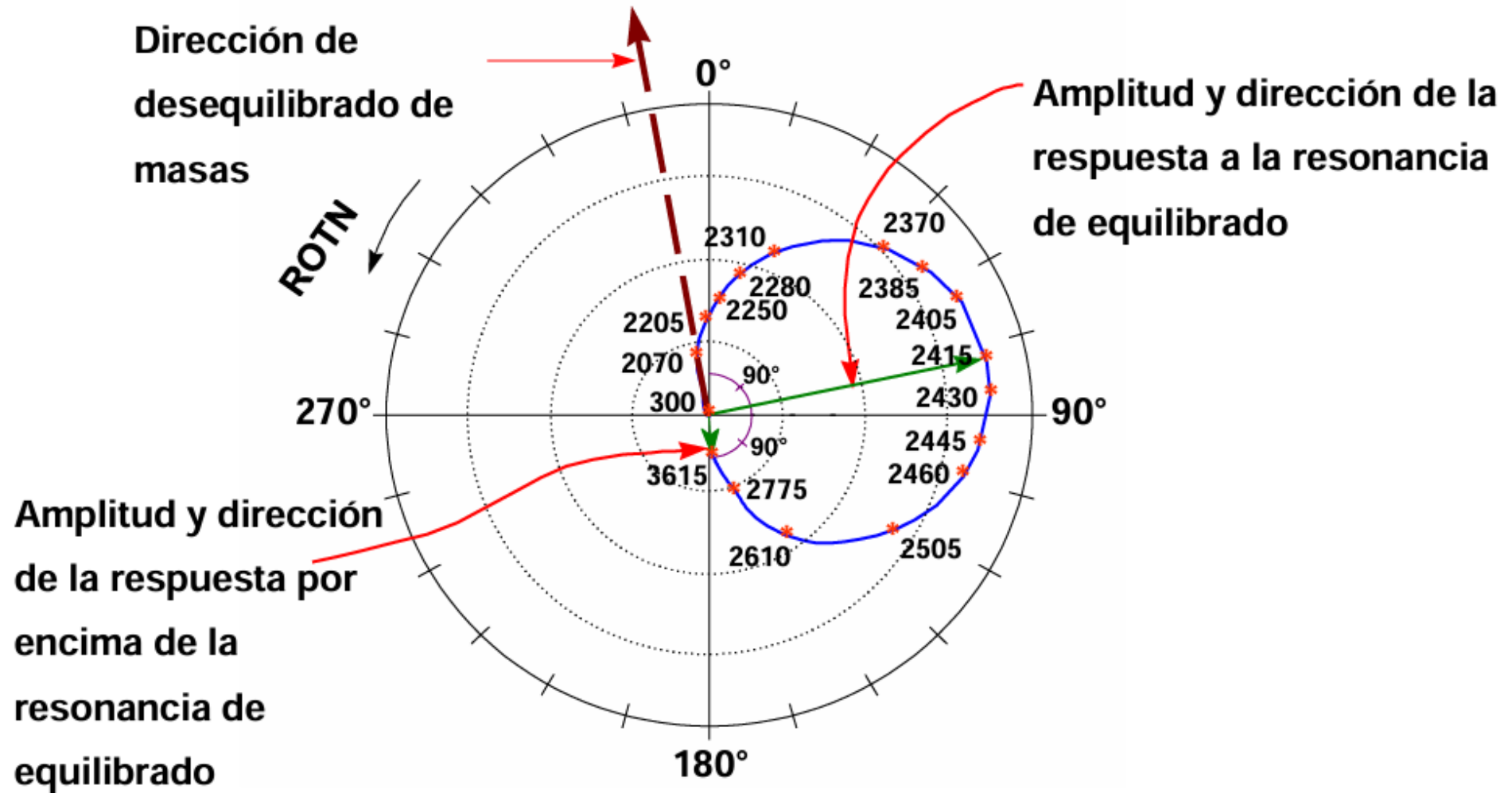
# Orbita y onda de tiempo



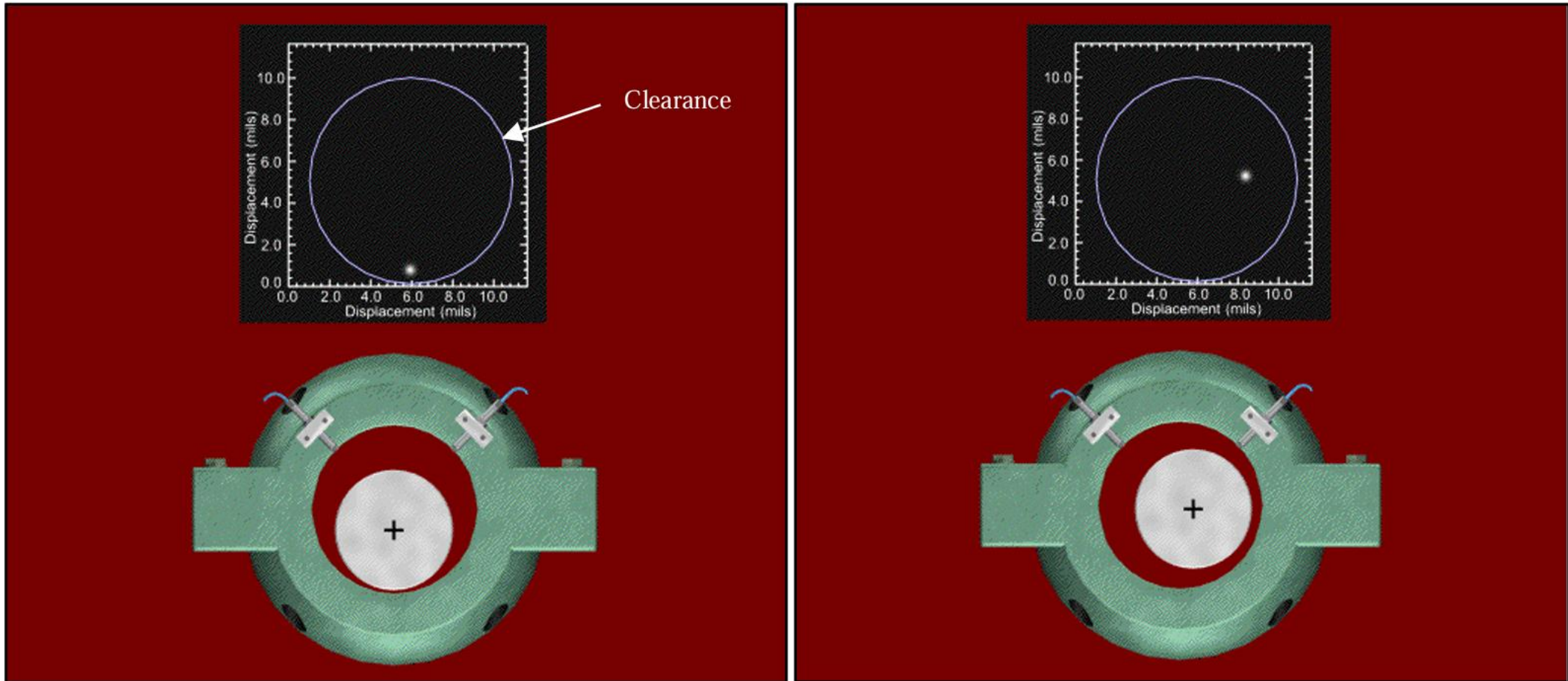
# Diagrama Polar



# Diagrama Polar

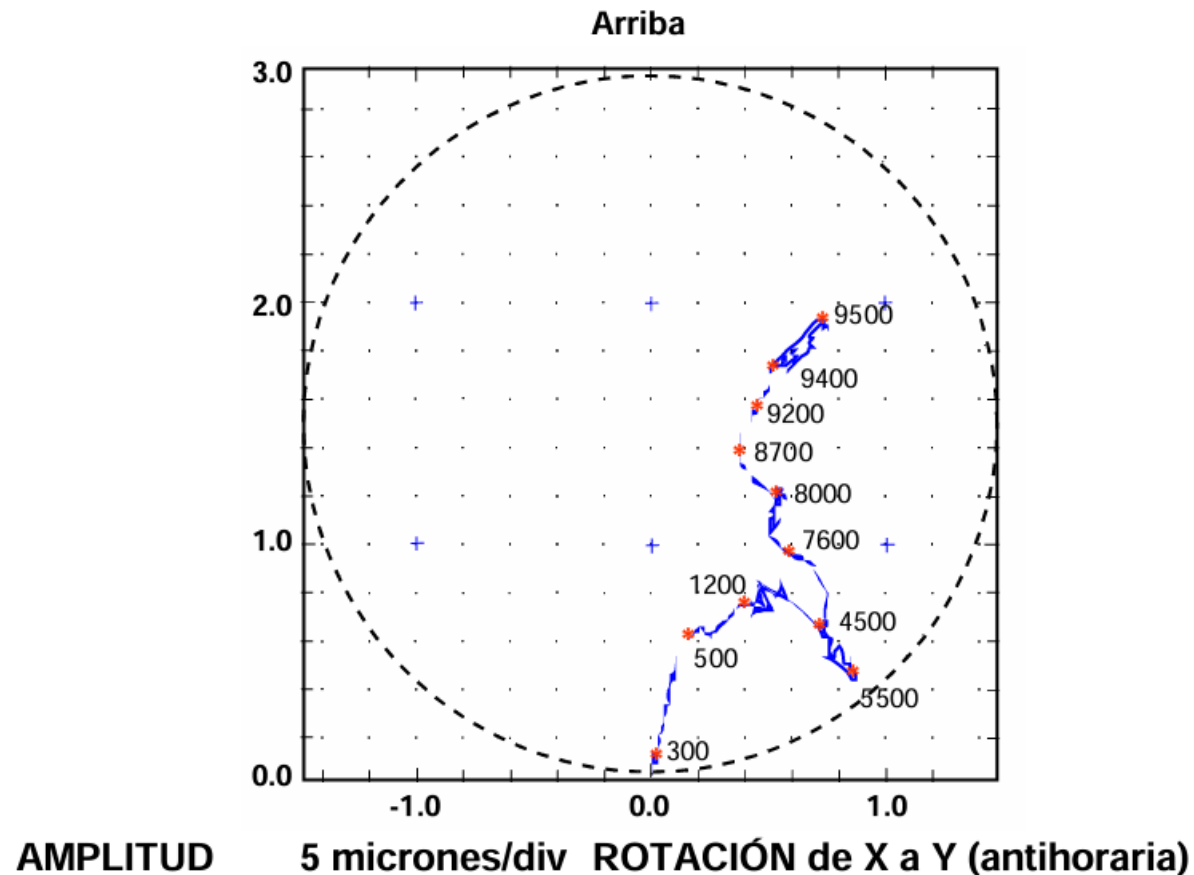


# Diagrama de posición de la línea Central de eje.



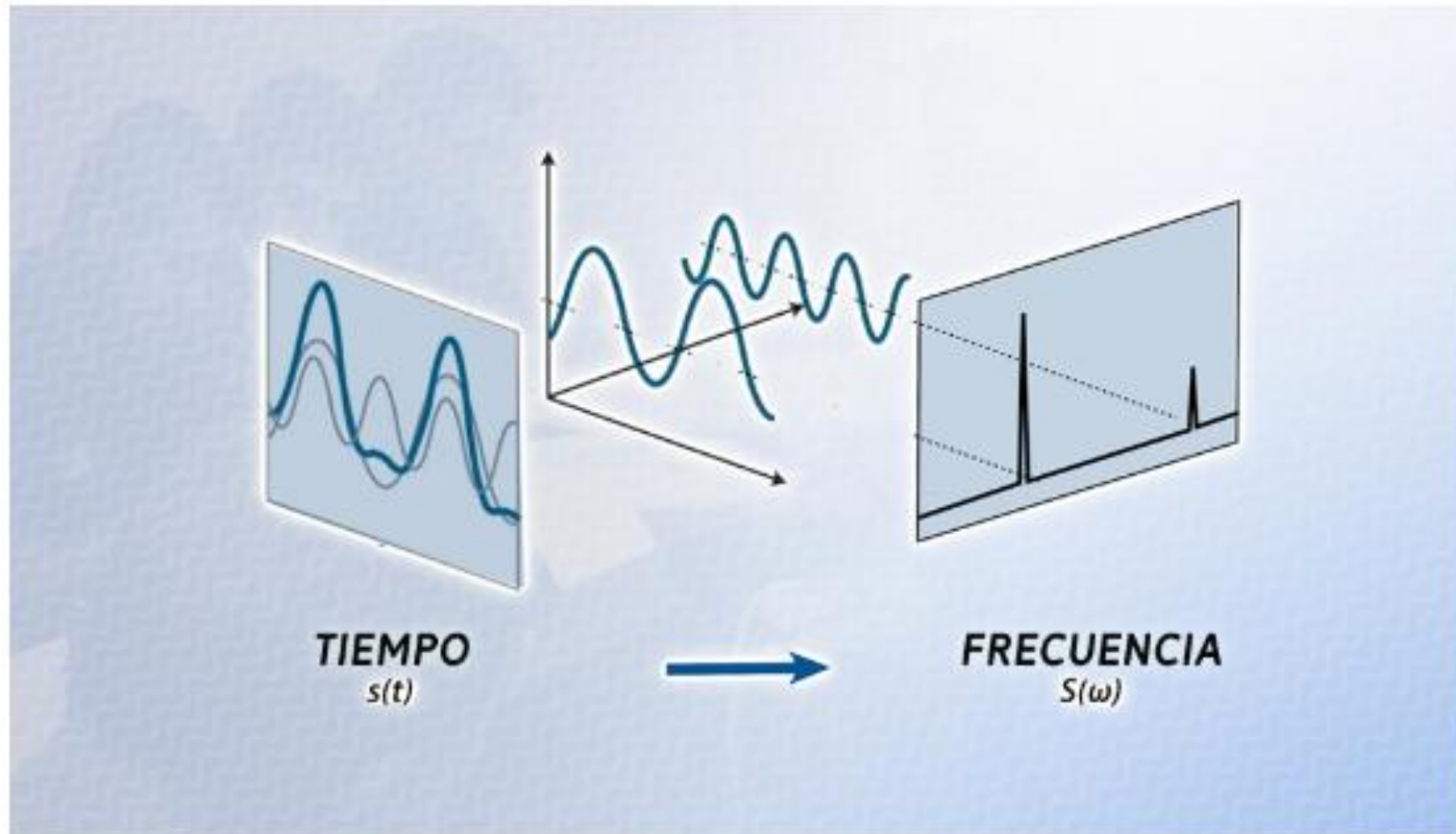
# Diagrama de posición de la línea Central de eje.

Representa la posición media de la línea central del eje dentro del cojinete, en función de la velocidad de rotación del eje.

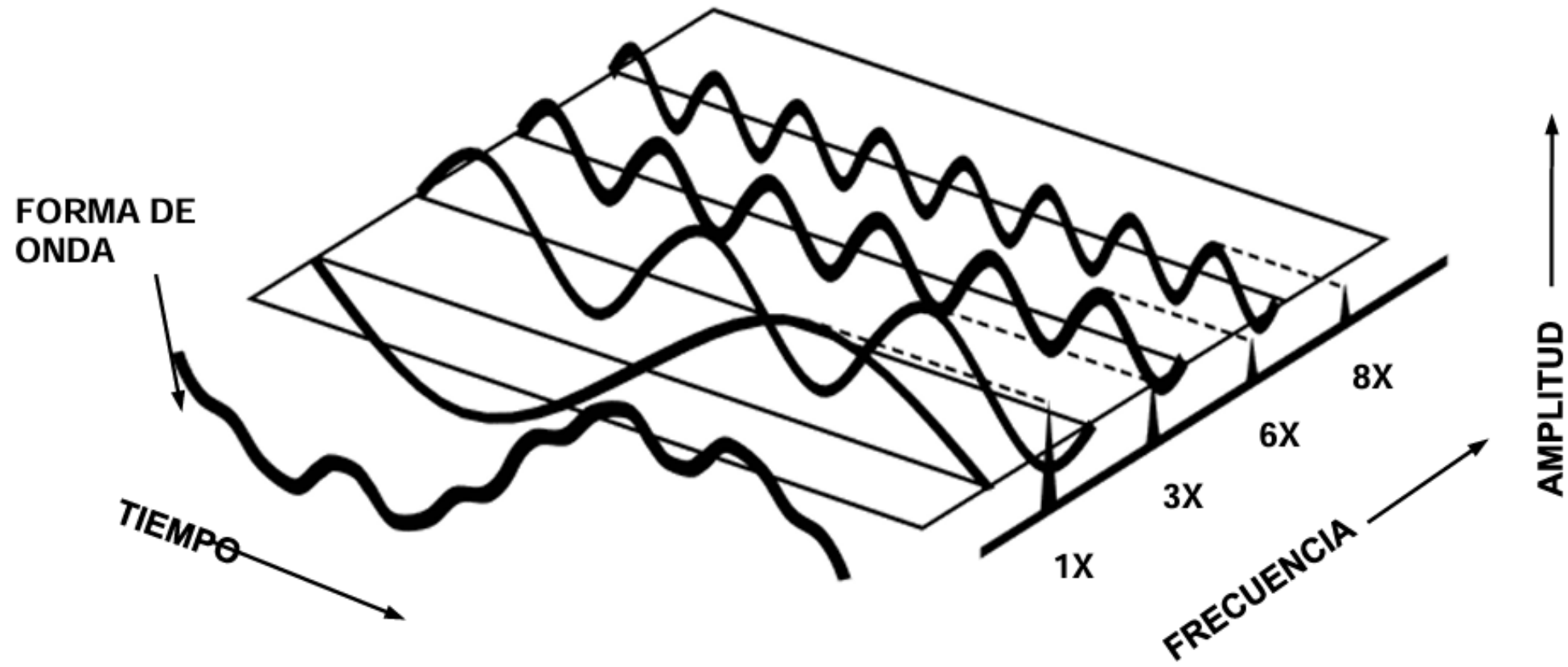


Para aprovechar al máximo los diagramas de línea central del eje es necesario conocer la respuesta normal de la máquina.

# Onda de tiempo y frecuencia

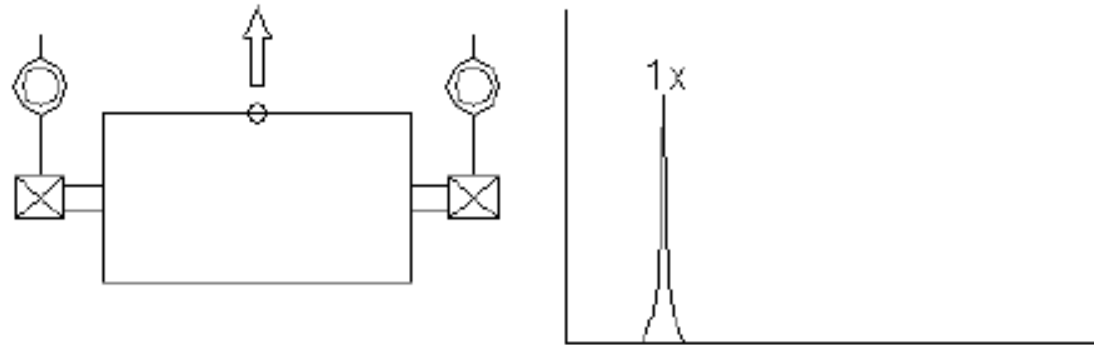


# Onda de tiempo y frecuencia.



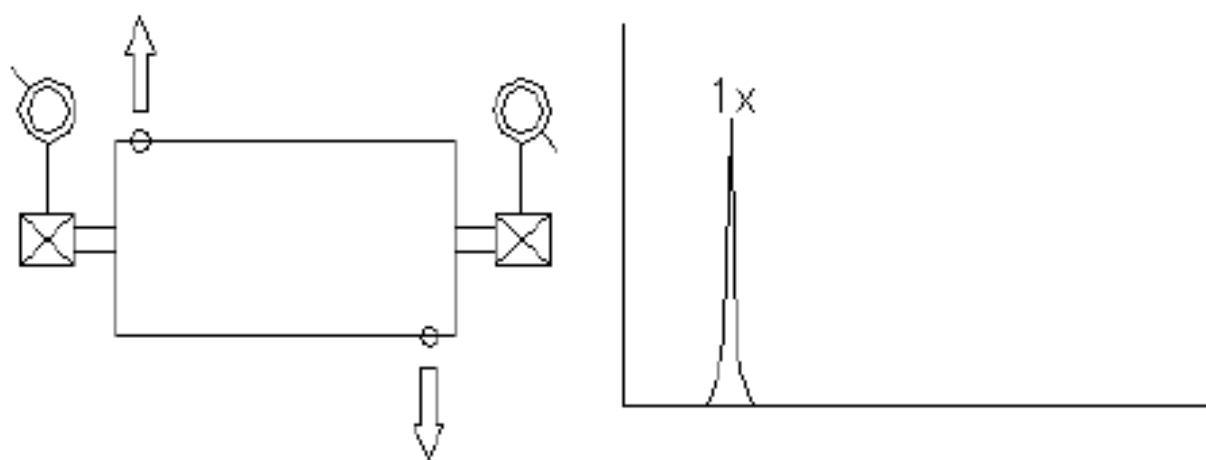
# Análisis espectral FFT

## DESBALANCEO DE FUERZA



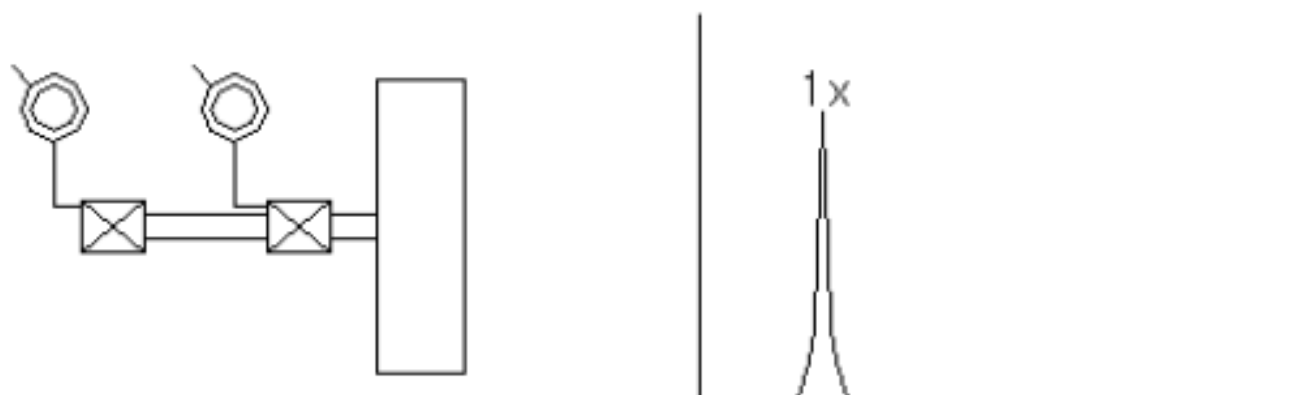
- Su amplitud aumenta con el cuadrado de la velocidad
- Se presenta en fase y constante
- La 1X siempre presente y domina el espectro, radial
- Se corrige con un solo peso central

# DESBALANCEO DE CUPLA



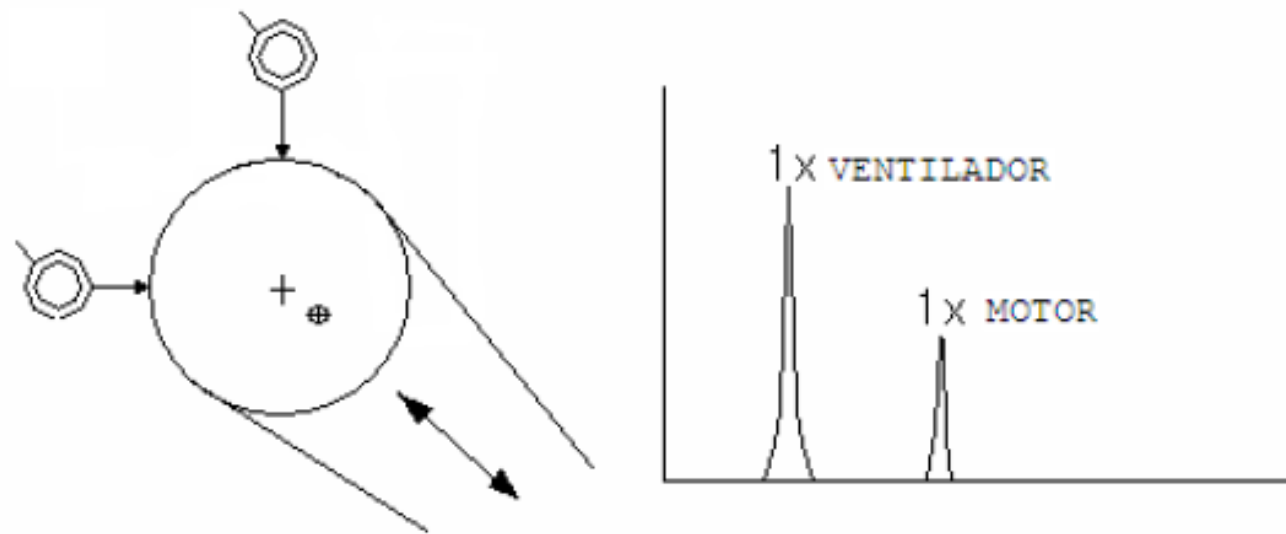
- Su amplitud aumenta con el cuadrado de la velocidad
- Se presenta desfasado en  $180^\circ$  y constante
- La 1X siempre presente y domina el espectro, radial y axial
- Se corrige con dos pesos en planos separados

## DESBALANCEO DE ROTOR EN VOLADIZO



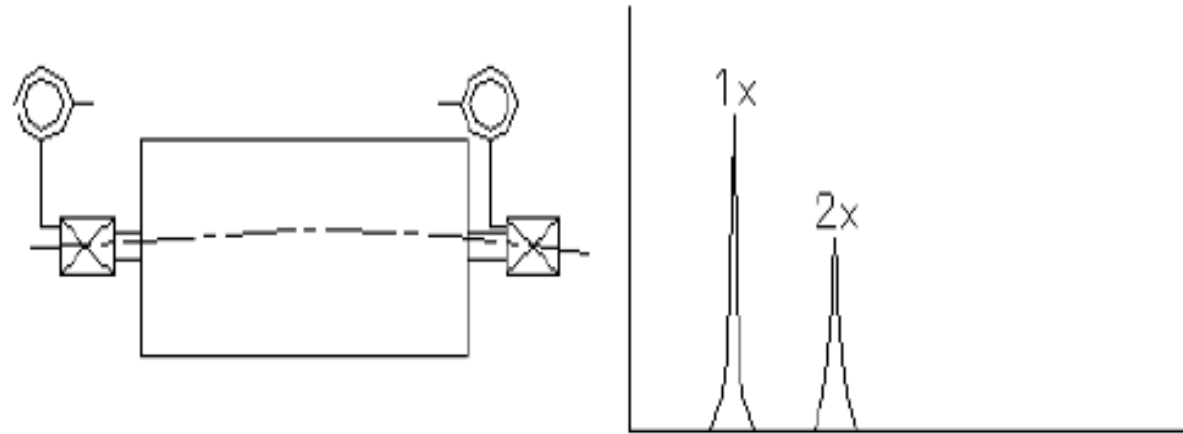
- Su amplitud aumenta con el cuadrado de la velocidad
- Se presenta en fase axial, radial puede no ser constante
- La 1X siempre presente y domina el espectro
- Suele predominar en sentido axial
- Puede necesitar corrección en uno o dos planos

# ROTOR EXCENTRICO



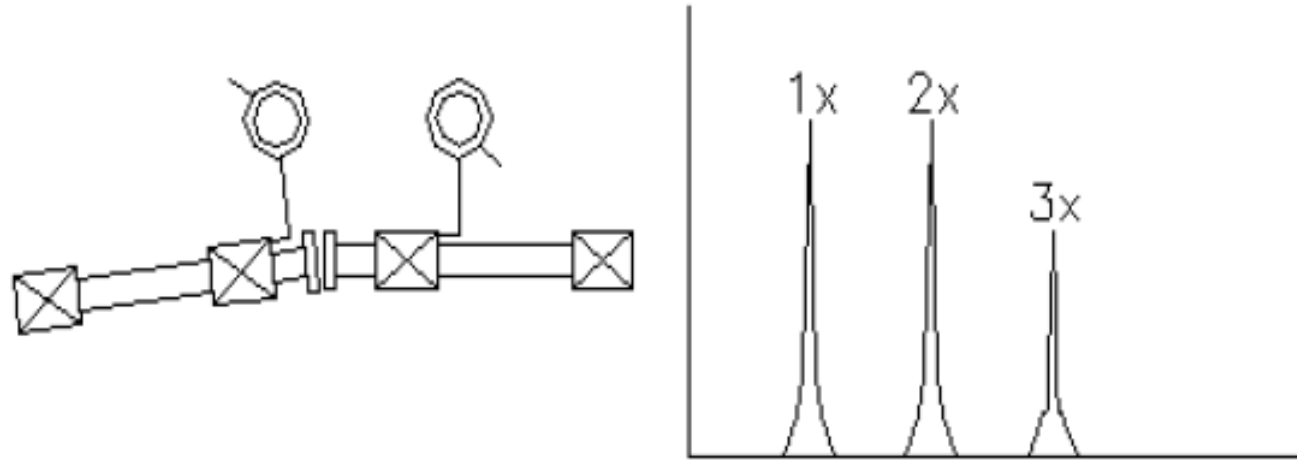
- Mayores vibraciones en 1X del componente excéntrico
- Lecturas ortogonales en fase u opuestas.
- Amplitud predominante en dirección hacia los centros
- No se corrige con balanceo

# EJE CURVADO



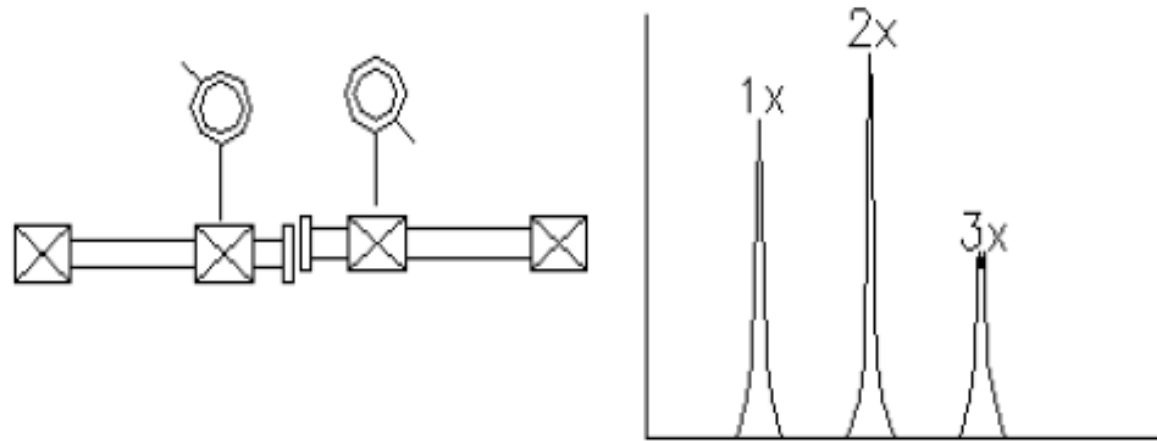
- Predomina la 1X si esta curvado hacia el centro, tiende hacia la 2X si esta curvado hacia las uniones
- Lecturas axiales desfasadas 180° en cada componente
- Mayores amplitudes en dirección axial

# DESALINEACION ANGULAR



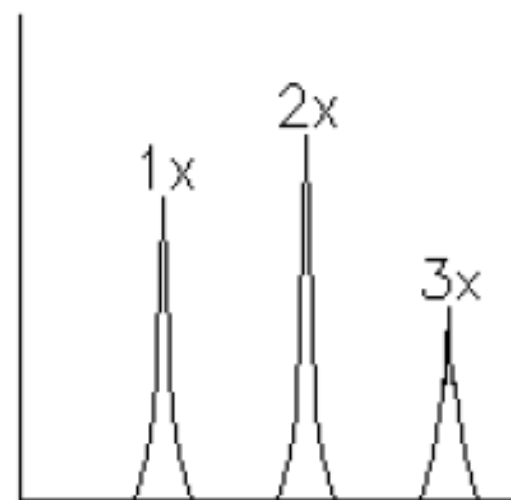
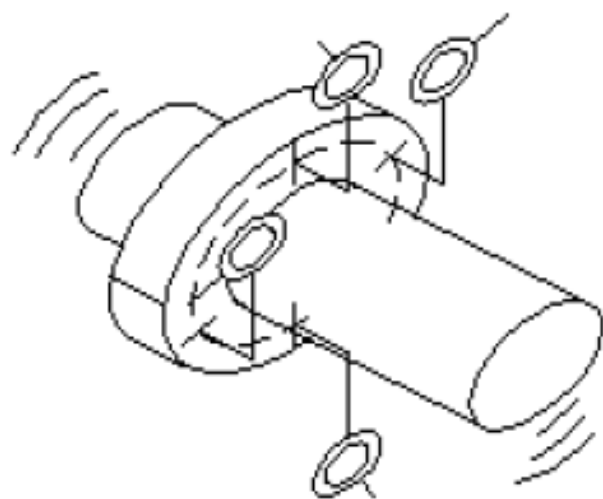
- Se caracteriza por amplitudes axiales elevadas
- En el espectro pueden predominar la 1X, 2X ó 3X dependiendo del tipo de acople, rigidez etc.
- Lecturas axiales desfasadas  $180^\circ$  a través del acople

# DESALINEACION PARALELA



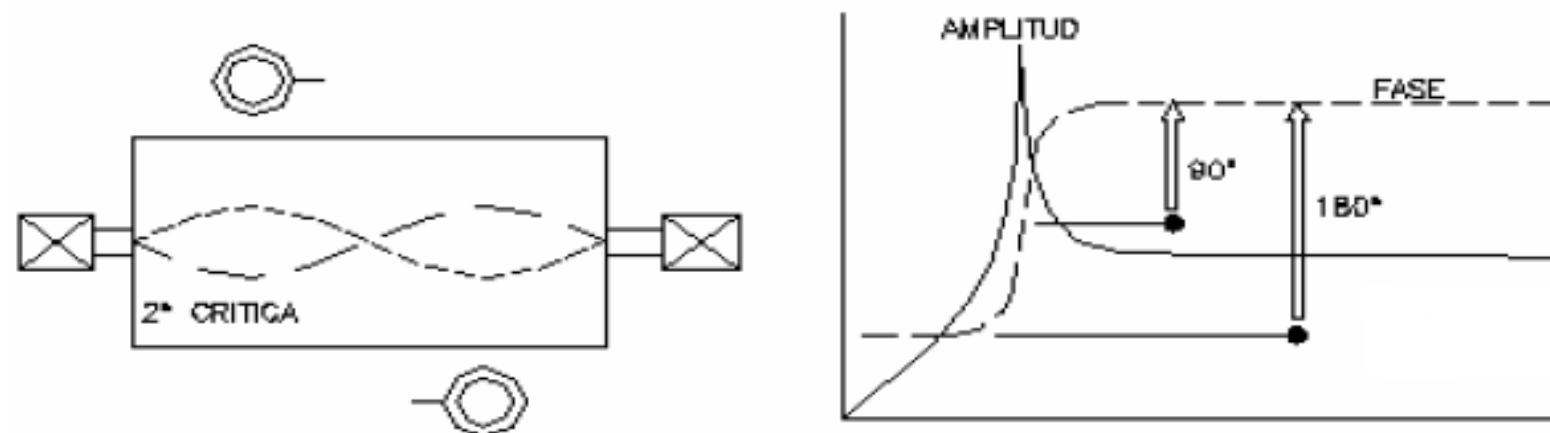
- Se caracteriza por amplitudes radiales (vertical) elevadas
- En el espectro suele predominar la 2X
- Depende en gran medida del tipo de acople
- Lecturas radiales desfasadas 180° a través del acople

## RODAMIENTO ATRAVEZADO EN EL EJE



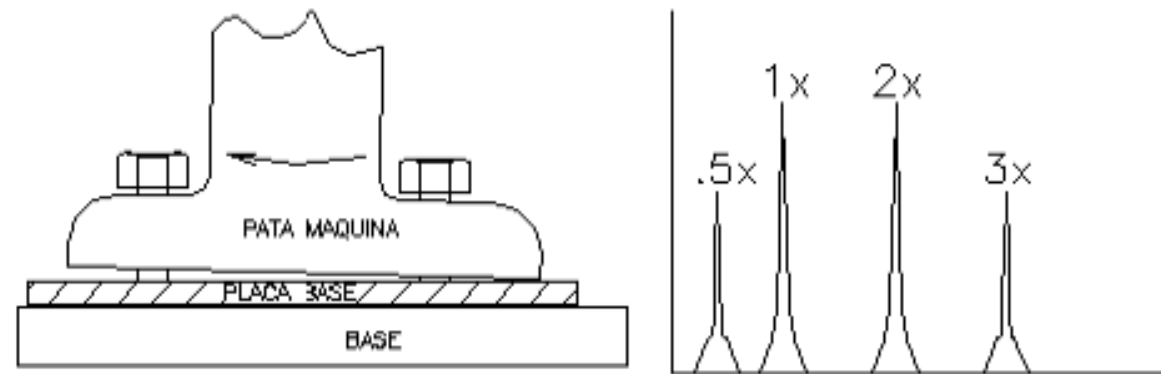
- Se caracteriza por amplitudes axiales elevadas
- En el espectro suele predominar la 2X
- Lecturas axiales a cada lado (horizontal o vertical) desfasadas 180°

# RESONANCIA



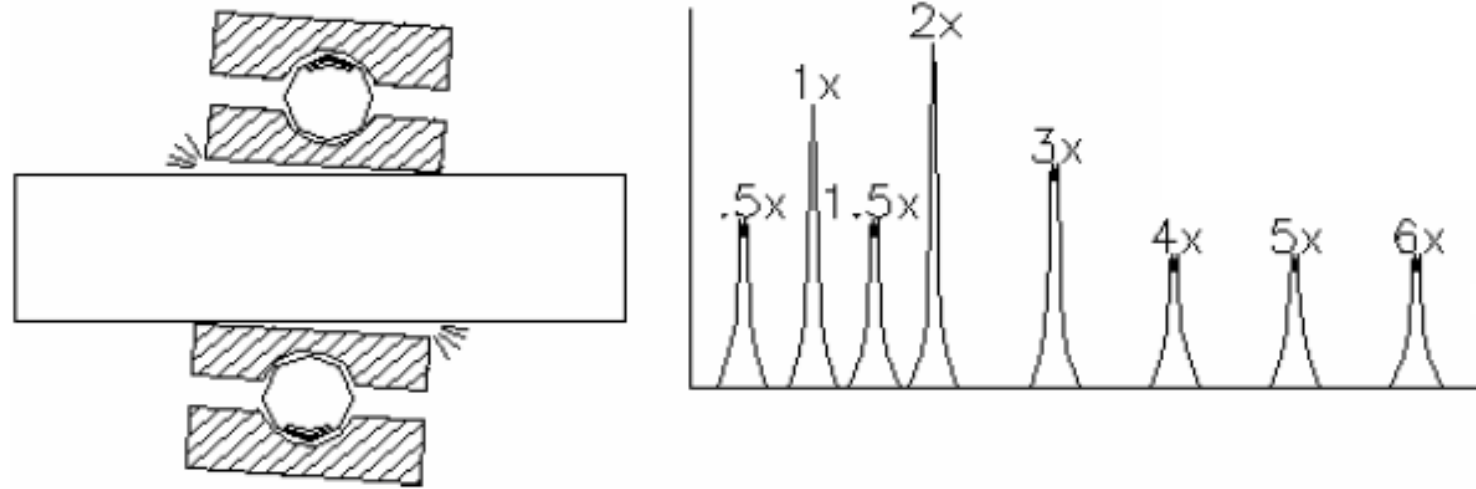
- Sucede cuando una frecuencia forzada coincide con la frecuencia natural de algún componente.
- En el espectro predomina la componente que coincide con la frecuencia natural
- Lecturas de fase a  $90^\circ$  en la resonancia y de  $180^\circ$  al pasar por ella

## SOLTURA MECANICA (BASE SUELTA)



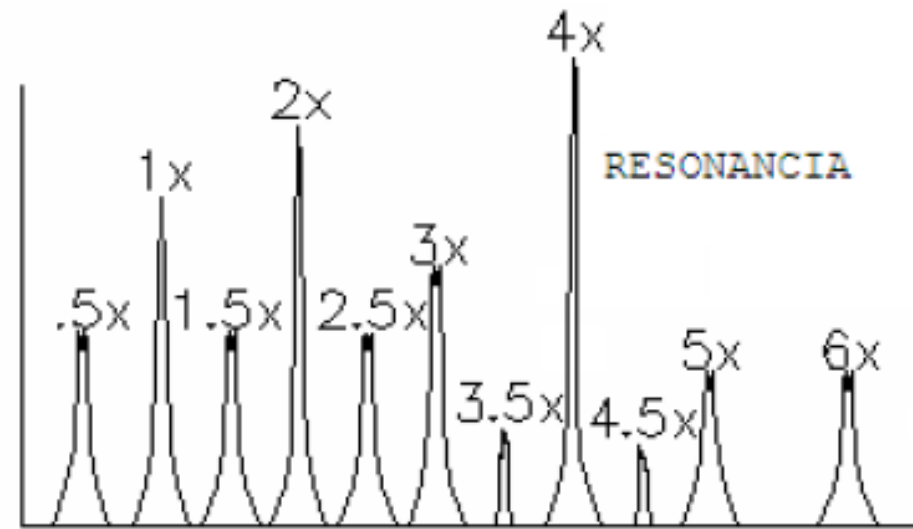
- En el espectro predomina la 2X y puede aparecer un 0.5X si la soltura es importante
- Es altamente direccional
- Lectura desfasada 180° entre pata y base

## SOLTURA MECANICA (ENTRE EJE Y APOYO)



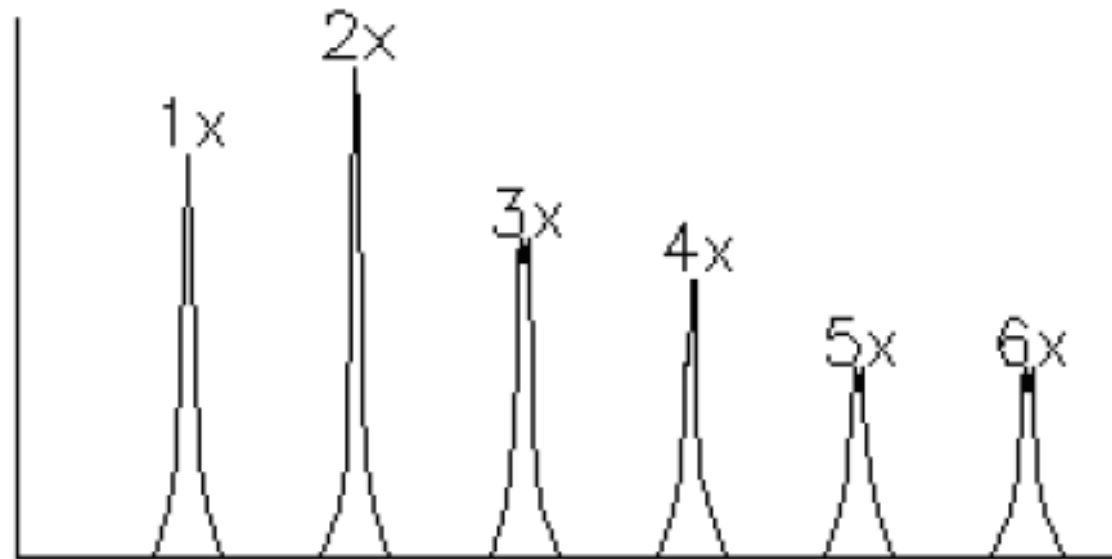
- En el espectro predomina la 2X con múltiples armónicas y puede aparecer un 0.5X y armónicos
- Es altamente direccional
- Lecturas de fase inestables

# ROZAMIENTO DEL ROTOR



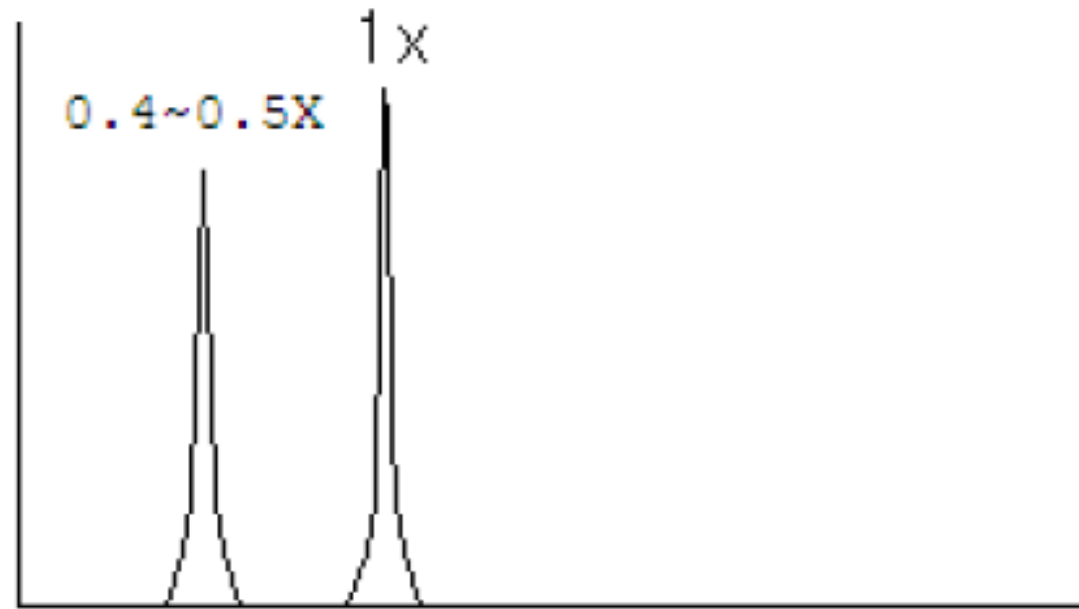
- En el espectro se observan varias armónicas con componentes intermedios
- Suele presentarse alguna condición de resonancia
- Predomina en dirección radial

## COJINETE DE FRICCIÓN (HOLGURA)



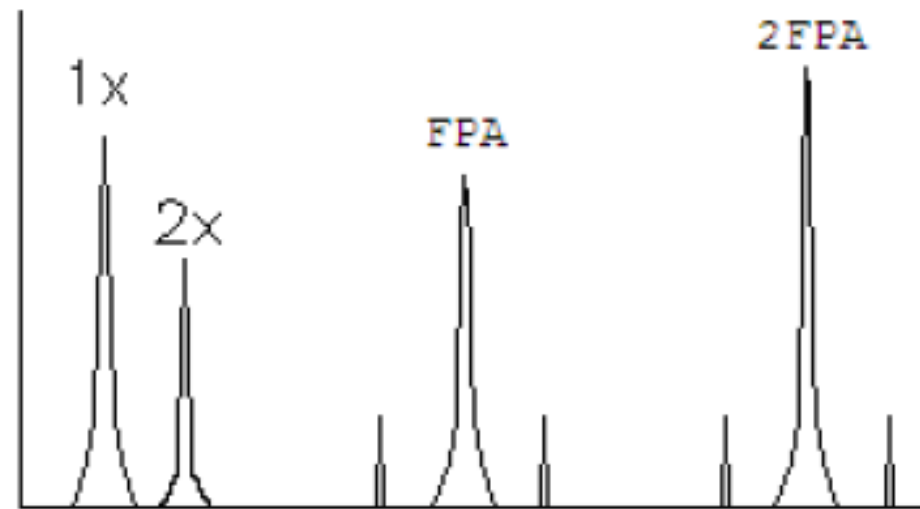
- En el espectro se observan varias armónicas
- Suelen amplificarse leves problemas de desbalanceo y/o desalineación
- Predomina en dirección radial

## COJINETE DE FRICCION (OIL WHIRL)



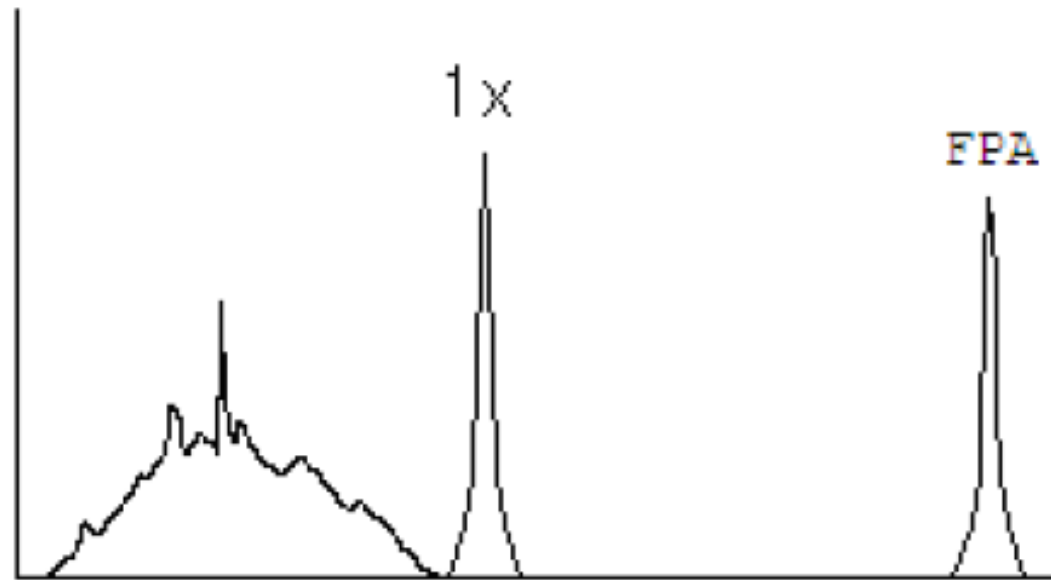
- El espectro se presenta una componente subarmónica
- Causado por condiciones inadecuadas de operación
- Predomina en dirección radial

## FUERZAS HIDRAULICAS (PASO DE PALETAS)



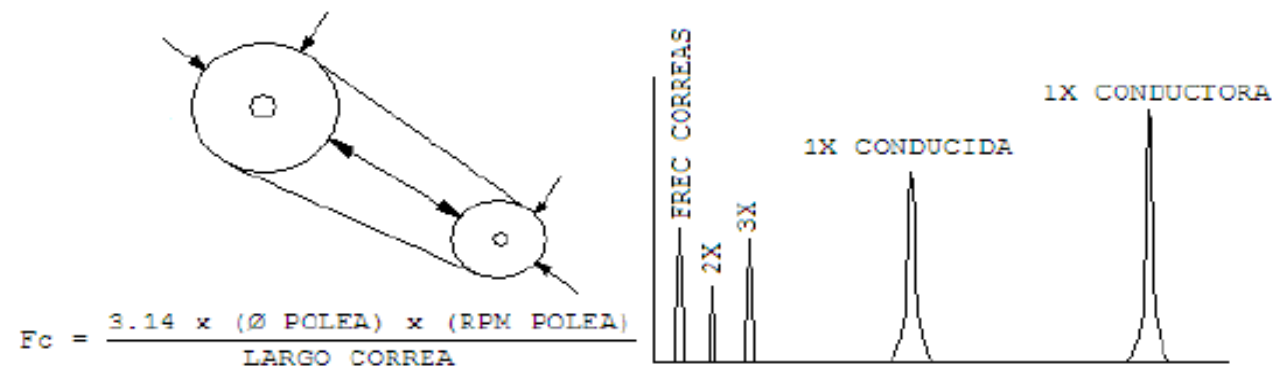
- Se observa en espectro componente de paso de alabes
- Puede presentarse una 2X de FPA
- Causas: obstrucciones en cañerías, fallas en difusores, aspas con ángulos distintos

## FUERZAS HIDRAULICAS (FLUJO TURBULENTO)



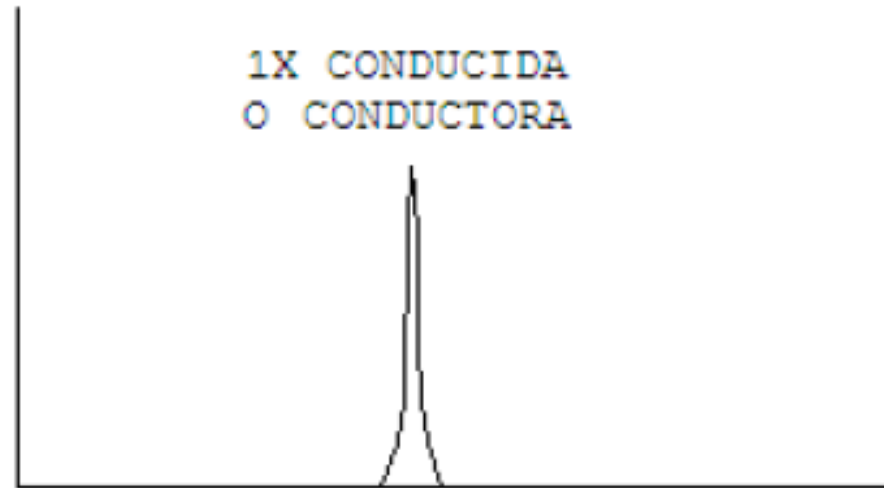
- Espectro con presencia de FPA y componentes aleatorias de baja frecuencia ( $< 2000$  cpm)
- Causa: variaciones de presión o de velocidad de aire que pasa a través de un ventilador

## CORREAS FLOJAS



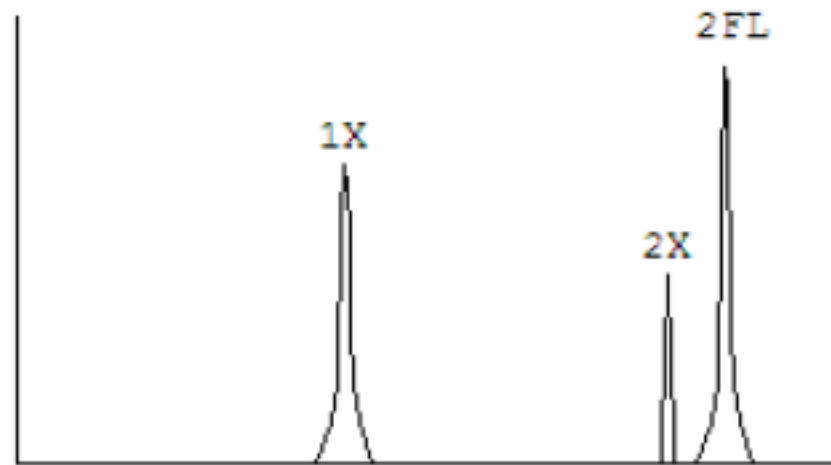
- $F_c$  siempre menor que rpm de poleas
- No predomina en el espectro, suele presentar 2 o 3 armónicas

## DESALINEACION DE POLEAS



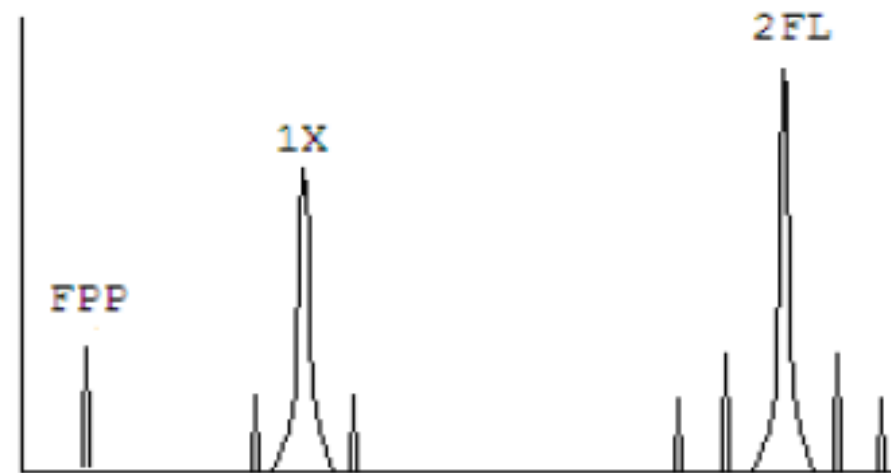
- En el espectro domina la 1X de la polea
- Dirección axial de mayor amplitud
- Puede aparecer una 2X

## EXCENTRICIDAD DEL ESTATOR



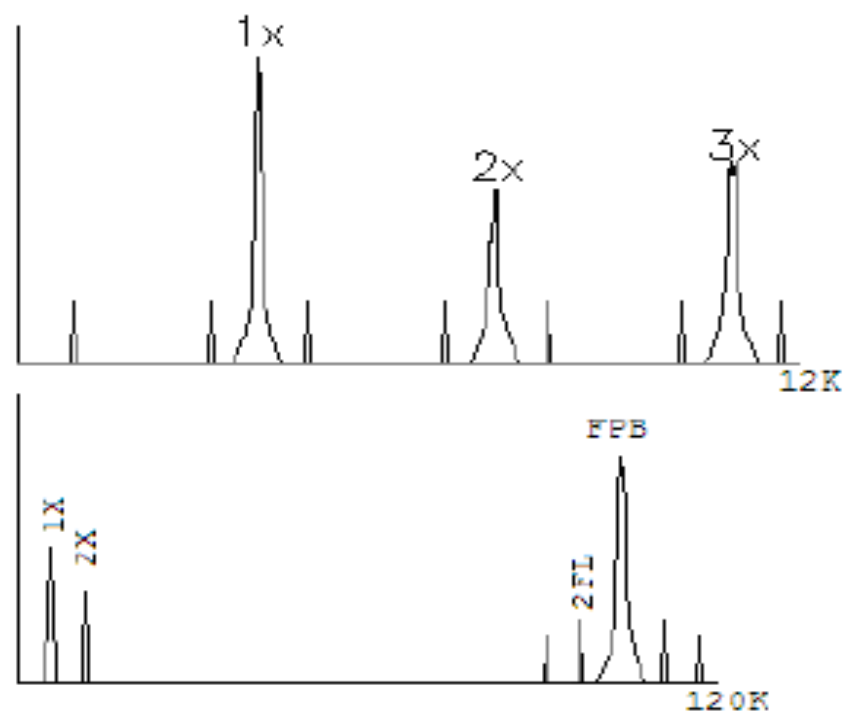
- El espectro presenta una componente importante en 2X de la frecuencia de línea
- Predomina la dirección radial
- No se debe confundir con la 2X de un motor de 2 polos

## ROTOR EXCENTRICO



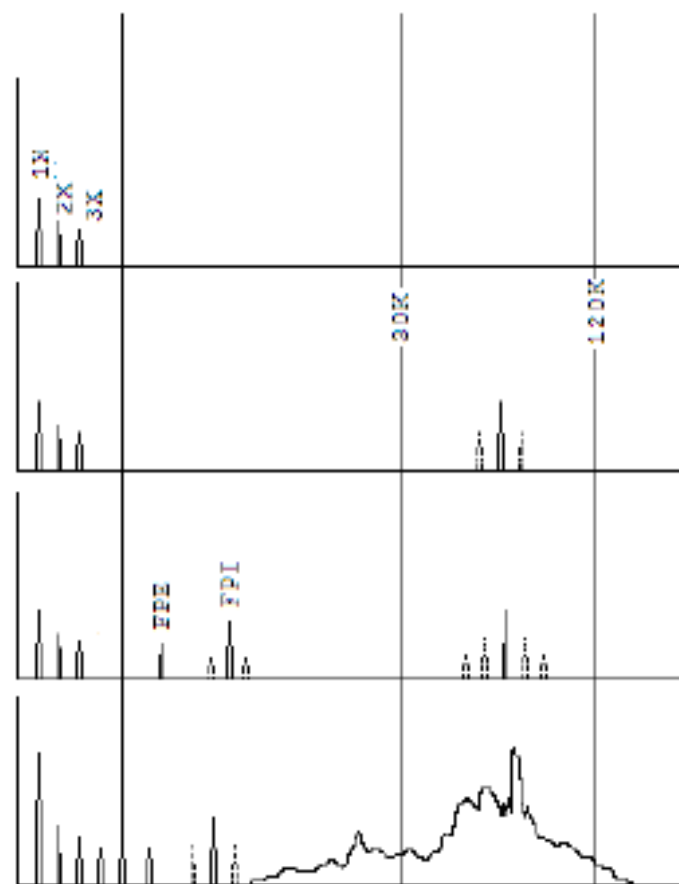
- En espectro aparece dominante la 2FL con bandas laterales de FFP
- Pueden aparecer BL alrededor de la 1X

## PROBLEMAS DEL ROTOR



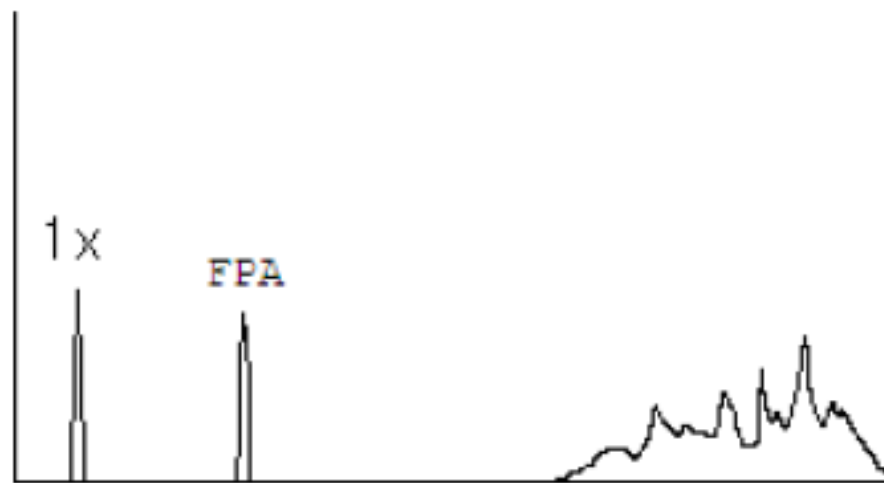
- En espectro de baja frecuencia se observan BL alrededor de la 1X y sus armónicas
- En alta frecuencia domina la FPB rodeada de BL con frecuencia = 2FL
- Mayores amplitudes en dirección radial

## FALLAS EN RODAMIENTOS



- 1° etapa: señales ultrasónicas (sin indicaciones)
- 2° etapa: pequeñas fallas excitan frecuencias naturales del rodamiento
- 3° etapa: aparecen frecuencias de defecto del rodamiento, crece nro de bandas laterales
- 4° etapa: se afecta la 1X, comienzan a desaparecer defectos del rod. Aumenta piso de ruido

## FUERZAS HIDRAULICAS (CAVITACION)



- Espectro con presencia de FPA y componentes aleatorias de alta frecuencia ( $> 30 \text{ Kcpm}$ )
- Causa: normalmente indica presión de succión insuficiente

## CUADRO DE TOLERANCIA PARA RODAMIENTOS

<b>Aceleración (g) [rms]</b>	<b>G (se)</b>	<b>Severidad</b>
<b>5.0+</b>	<b>3.0+</b>	<b>Peligroso</b>
<b>3.0~5.0</b>	<b>1.5~3.0</b>	<b>Muy malo</b>
<b>1.5~3.0</b>	<b>0.8~1.5</b>	<b>Malo</b>
<b>0.75~1.5</b>	<b>0.4~0.8</b>	<b>Aceptable</b>
<b>0.2~0.75</b>	<b>0.2~0.4</b>	<b>Bueno</b>
<b>0.01~0.2</b>	<b>0.01~0.2</b>	<b>Muy Bueno</b>

# Criteria de vibración para grupos específicos de máquinas Basado en la ISO 10816-1

Velocity Severity		Velocity Range Limits and Machine Classes			
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	Good	Good
1.80	0.10				
2.80	0.16	Unsatisfactory (alert)	Unsatisfactory (alert)	Satisfactory	Satisfactory
4.50	0.25				
7.10	0.40	Unacceptable (danger)	Unacceptable (danger)	Unsatisfactory (alert)	Unsatisfactory (alert)
11.20	0.62				
18.00	1.00			Unacceptable (danger)	Unacceptable (danger)
28.00	1.56				
45.00	2.51				