



## Capítulo 5

# Análisis de fase

---

### *Temas:*

- EI** Entendiendo la fase
- EI** Midiendo fase
  - o Un solo canal con tacómetro y dos canales
- EI** Diagnóstico de fallas con fase
  - o Desbalance
  - o Desalineamiento
  - o Eje doblado
  - o Rodamiento torcido
  - o Excentricidad
  - o Holgura/soltura

## Introducción

Para muchos analistas de vibración, la vida gira en torno al espectro. Si el fallo no es obvio en el espectro entonces el incidente no será detectado. Y en muchos casos, una condición de falla puede confundirse con otra porque se utilizan datos espectrales por sí solos. El análisis de vibración no es fácil, y es importante que diagnostiquemos las fallas correctamente. Si domina el análisis de fase, su capacidad para diagnosticar fallas correctamente se mejorará considerablemente.

El análisis de fase es una herramienta muy poderosa. La percepción puede ser que las mediciones de fase son difíciles de recolectar, o posiblemente que son difíciles de entender. Algunos incluso pueden creer que las mediciones de fase no ofrecen ninguna información útil. Están equivocados.

El objetivo de esta sección es mostrar que las mediciones de fase no son difíciles de recolectar ni difíciles de entender. Y al final de esta sección, espero que entienda los beneficios de la fase en el diagnóstico de fallas de la máquina.

Comenzaremos por revisar la fase y entenderemos los términos fase de adelanto y retraso. Aprenderemos cómo las resonancias del sistema pueden afectar la fase que medimos. Aprenderemos cómo los diferentes tipos de transductores afectan las lecturas de fase. Aprenderemos sobre diferentes maneras de recopilar lecturas de fase.

A continuación, veremos cómo podemos interpretar las lecturas de fase. Podemos usar algunas reglas simples que nos ayudarán a diagnosticar fallas como desbalance, desalineación, ejes de doblados, rodamientos torcidos y soltura.

Entonces iremos aún más lejos. A continuación, estudiaremos cómo podemos utilizar los datos de fase para comprender mejor el movimiento dinámico de una máquina. Comenzaremos con algunos métodos simples, pero luego examinaremos el método de forma de deflexión de funcionamiento “ODS” con mucho más detalle, así como el análisis modal y el análisis de elementos finitos.

Al final de esta sección debe sentirse muy cómodo con los tipos de mediciones que se requieren, y con los diversos métodos que se pueden utilizar para utilizar los datos con el fin de diagnosticar las condiciones de falla y mejorar la confiabilidad de su maquinaria y otros activos de la planta.

## ¿Qué es la fase?

---

Tenemos que dar un paso atrás y asegurarnos de que entendemos la fase. Después de haber realizado balanceo a uno o dos planos, estará familiarizado con la fase, pero si estudia predominantemente los espectros de vibración (e ignora las formas de onda de tiempo), la fase puede ser uno de esos conceptos que podría entender.

## **Lafase tiene que ver con el tiempo**

La fase tiene que ver con el momento relativo de los eventos relacionados. Estos son algunos ejemplos:

Al balancear estamos interesados en la sincronización entre el punto pesado en el rotor y un punto de referencia en el eje. Necesitamos determinar dónde se encuentra ese punto pesado, y la cantidad de peso necesaria para contrarrestar las fuerzas de rotación.

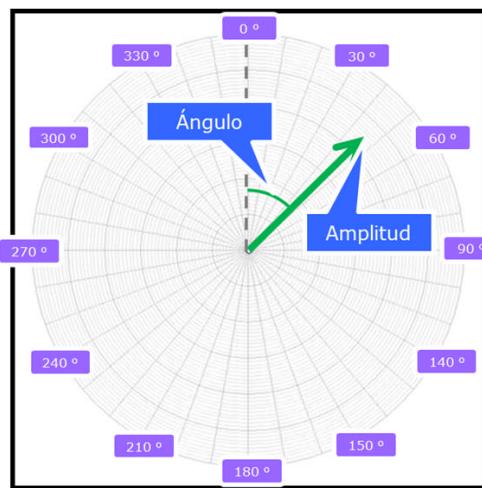


Figura 5-1 Fase utilizada en balanceo

Cuando nos fijamos en las condiciones de falla como el desbalance, la desalineación, la excentricidad y los problemas de cimentación, estamos interesados en las fuerzas dinámicas dentro de la máquina, y como resultado, el movimiento de un punto en relación con otro punto.

Podemos usar la fase para entender el movimiento de la máquina o estructura cuando sospechamos de una máquina con resonancia estructural, donde toda la máquina puede estar balanceándose de lado a lado, torciendo, o rebotando hacia arriba y hacia abajo.

Por lo tanto, la fase es muy útil al balancear (hay otras maneras de realizar un balanceo, pero la mayoría de los recopiladores de datos utilizan la fase), y esencial cuando se trata de entender el movimiento de una máquina o estructura. Pero la fase también es muy útil cuando se intenta diagnosticar las condiciones de falla de la máquina. Si su actitud es “los niveles de vibración son altos – necesita ser revisado”, entonces probablemente no le importa la fase. Pero si desea hacer un diagnóstico preciso, y distinguir correctamente entre fallas como el desbalance, la desalineación y el eje doblado, entonces la fase es una herramienta esencial.

## Fundamentos de la fase

Cuando un eje gira se puede medir la vibración a la frecuencia de rotación y verá una onda sinusoidal. El nivel de vibración estará dictado por una serie de factores, pero vamos a centrarnos en las fuerzas debido al desbalance.

Usemos un ventilador de ocho aspas como nuestra máquina de referencia. Hay una moneda de oro unida a una de las aspas que genera la fuerza de desbalance. Vemos una onda sinusoidal de la siguiente manera:

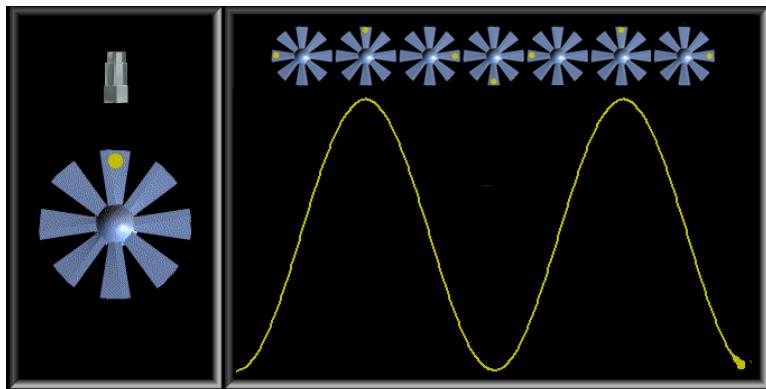


Figura 5.2

Como ya deberías saber, obtienes una rotación del ventilador para cada ciclo (es decir,  $360^\circ$ ) de rotación.

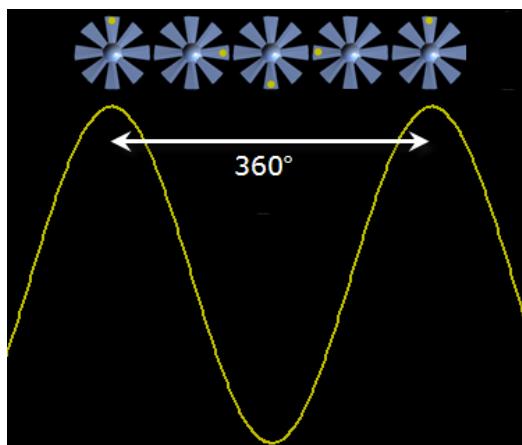


Figura 5.3

Pero esta información por sí sola no nos dice mucho. La fase es una medida relativa, por lo que necesitamos comparar una fuente de vibración con otra fuente de vibración o una referencia de algún tipo.

Primero trataremos de entender la fase comparando dos fuentes de vibración. Si tuviéramos dos ventiladores idénticos, cada uno con monedas en un aspa (para generar una fuerza de desbalance), esperaríamos ver ondas sinusoidales de cada ventilador. Si los ventiladores estuvieran girando en perfecta sincronización de tal manera que las monedas estaban en posición de las 12:00 al mismo tiempo, se diría que están “en fase”.

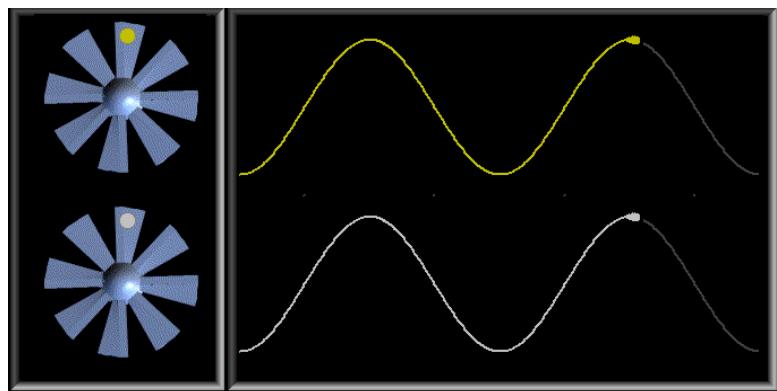


Figura 5-4

Sin embargo, si una moneda estaba en la parte superior (12:00) cuando la otra estaba en la parte inferior (6:00), estarían “180° fuera de fase”. ¿Por qué 180°? Debido a que una rotación es de 360°, por lo que la mitad de una rotación es de 180°.

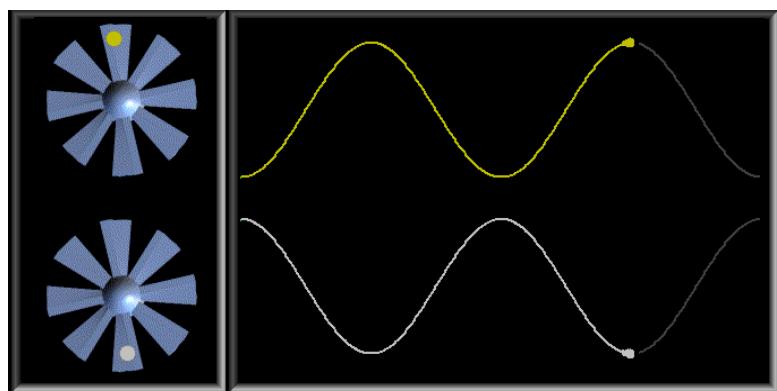


Figura 5-5

Y si una moneda estaba en la parte superior, y la otra fuera un cuarto de rotación, estarían a 90° (o 270° grados fuera de fase).

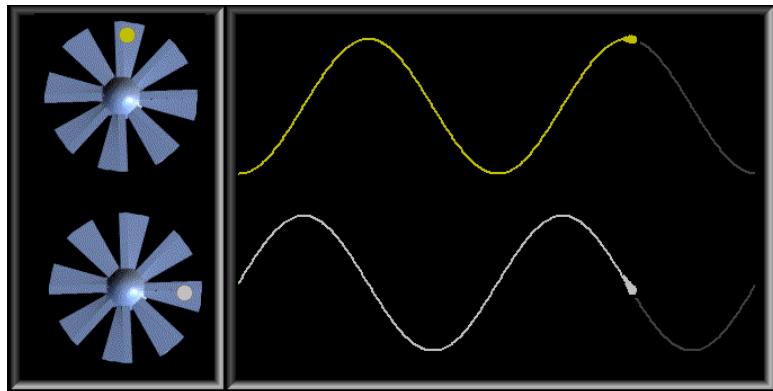


Figura 5-6

En realidad, el ángulo de fase entre los dos ventiladores podría ser de  $0^\circ$  a  $359^\circ$ .

En este ejemplo en particular (de dos ventiladores), realmente no nos importa cuál es el ángulo de fase, pero hay muchas situaciones en las que lo hacemos. Así que tenemos dos maneras diferentes de determinar la diferencia de fase.

### ***Comparación de dos formas de onda***

En primer lugar, si nos fijamos en los ejemplos anteriores se pueden ver dos formas de onda - de la misma frecuencia (los ventiladores se operan exactamente a la misma velocidad). Al comparar dos formas de onda de tiempo podemos ver la diferencia de tiempo entre ellas.

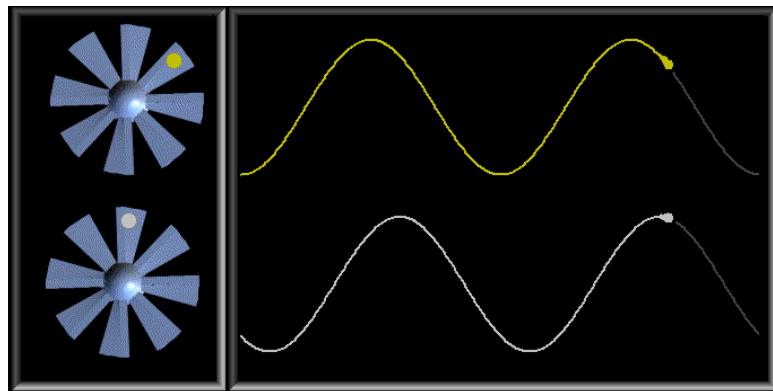


Figura 5-7

Podemos determinar la diferencia de fase midiendo primero el tiempo para un ciclo completo (recuerde, un ciclo es 360 grados) y comparándolo con la diferencia de tiempo entre las ondas.

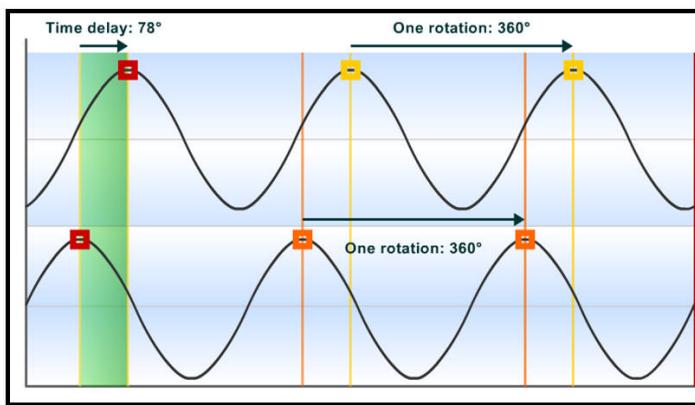


Figura 5-8

Por lo tanto, medimos el tiempo para un ciclo, y lo comparamos con la diferencia de tiempo entre los mismos puntos (en el caso anterior, el punto que la onda está en su pico) en ambas formas de onda.

### ***Uso de una referencia***

Si tuviéramos que caminar hasta el ventilador (con la moneda unida a un aspa) y tomar una medida de vibración podríamos esperar ver un espectro simple con un pico dominante, y una forma de onda de tiempo que parecía una onda sinusoidal, suponiendo que todo lo demás dentro de la máquina está en perfecto estado.

Si la amplitud fuera lo suficientemente alta podríamos suponer que el ventilador estaba desbalanceado. Pero ¿podemos saber dónde colocar el peso de balanceo para contrarrestar la fuerza de desbalance? (en este ejemplo una moneda de oro) No, no podemos. Necesitamos una referencia para poder comparar el punto en la rotación donde la vibración era más alta (el punto pesado) con un punto conocido en el eje. (Por el momento asumiremos que estamos tratando con una máquina rígida y sin retraso de fase, por lo que el punto pesado está en el punto alto).

La respuesta es comparar la señal de vibración con una referencia de la misma máquina. Podemos usar una referencia de tacómetro. Los dos métodos más comunes son colocar un pedazo de cinta reflectiva en el eje y luego usar un sensor o láser para generar un pulso cada vez que el eje gira, o utilizar una sonda de desplazamiento frente a una cuña. Cada vez que la cuña pasa la punta del transductor de desplazamiento, el desplazamiento medido cambia drásticamente por lo que la señal tendrá un cambio de paso.

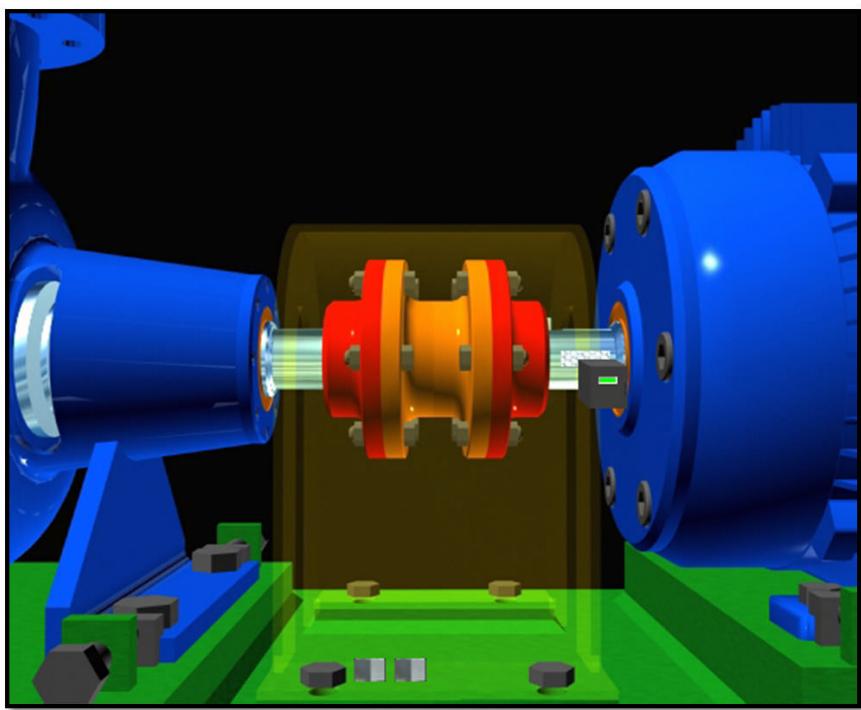


Figura 5-9

El resultado es una señal de voltaje que proporciona un pulso “TTL” una vez por revolución.

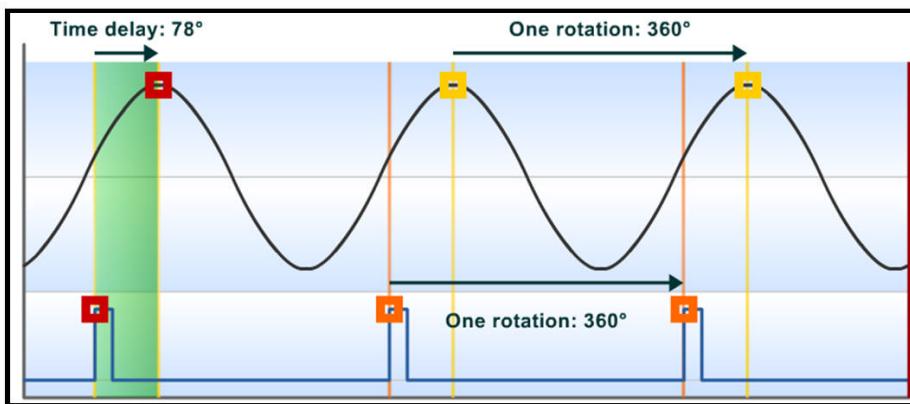


Figura 5-10

El tiempo entre pulsos es el período de la velocidad de la máquina. Si la máquina estuviera girando a 1500 RPM, que es de 25 Hz, el tiempo entre los pulsos sería de 0.04 segundos ( $1/25 = 0.04$ ).

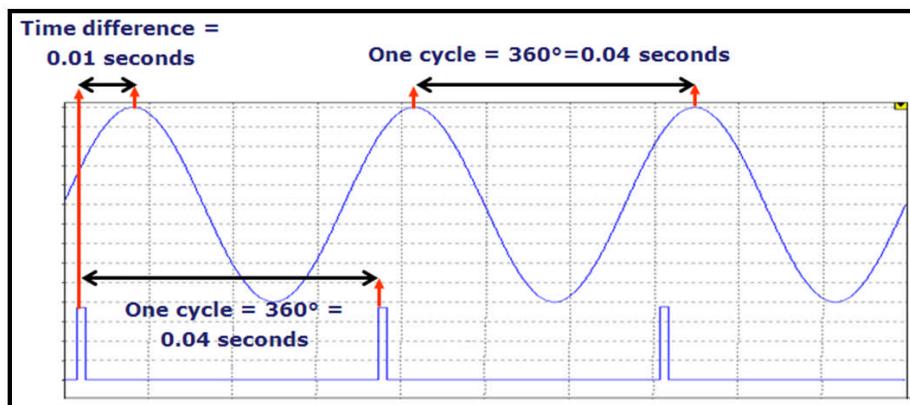


Figura 5-11

Como antes, podemos comparar la vibración de la máquina con la señal de tacómetro de referencia. El tiempo entre pulsos es 0.04 segundos, y el tiempo entre los picos de la onda sería 0.04 segundos. Si hay 0.01 segundos entre el pulso y el pico de la onda, entonces la diferencia de fase sería de  $90^\circ$ .  $\frac{1}{4}$  de 0.04 segundos es 0.01 segundos.  $\frac{1}{4}$  de  $360^\circ$  es  $90^\circ$ .

Afortunadamente, el colector de datos tiene la electrónica y el software necesarios para utilizar señales de tacómetro o señales de acelerómetros con el fin de determinar el ángulo de fase.

### **Fase de adelanto y retraso**

Al discutir la fase hay un par de términos importantes que tenemos que entender: fase de adelanto y fase de retraso. Este término describe la relación de una señal o evento con otra. Si un evento se produce antes de otro evento, entonces “se adelanta”. Mirando esta señal de referencia del tacómetro y la forma de onda, ¿la señal de vibración se adelanta o se retrasa a la señal del tacómetro?

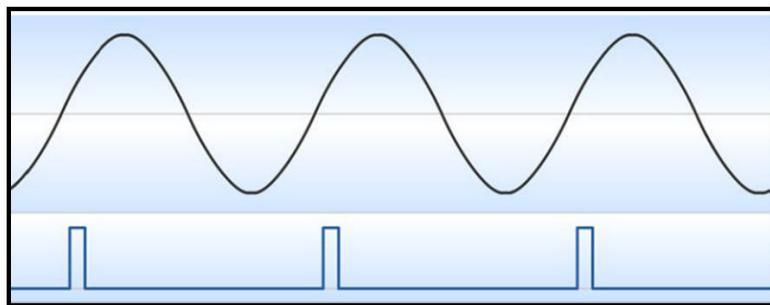


Figura 5-12

La señal de vibración está retrasada respecto a la señal del tacómetro. Puede parecer que está adelantando porque está al frente de la señal del tacómetro. Si fuera una carrera, sería el líder.

Pero si los mira en términos de la sincronización de los eventos, el pulso ocurre un cuarto de rotación antes de que la señal de vibración alcance su pico.

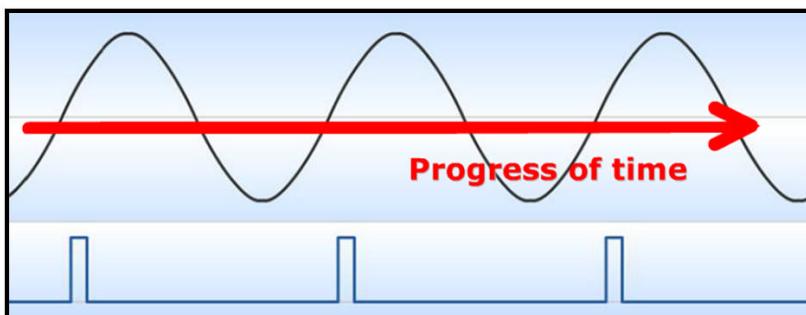


Figura 5-13

Echemos un vistazo más de cerca a la señal del tacómetro y la señal de vibración. Esperaríamos que a medida que se cambia la velocidad de la máquina la relación de fase no cambiaría.

Podemos variar el ángulo de fase entre la señal de tacómetro y el punto pesado en el rotory podemos ver cómo las dos señales se desplazan unas a otras. Podemos ver aquí que la señal de vibración está liderando cuando el pico se produce antes de la señal de tacómetro.

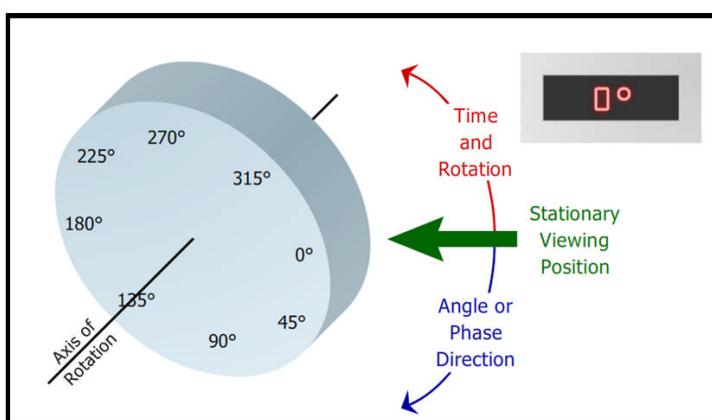


Figura 5-14 Midiendo el retraso de fase

La mayoría de los sistemas modernos miden el retraso de fase, por lo que la situación anterior proporcionaría una lectura de fase positiva. Si está utilizando software de balanceo, asegúrese de comprobar la convención de fase que se está utilizando. Algunos sistemas se miden por defecto el desfase como ángulos positivos (el ángulo aumenta en la dirección opuesta a la rotación), pero muchos sistemas dan al usuario la opción de elegir una convención. El uso de la convención de fase incorrecta es una causa común de error al balancear.

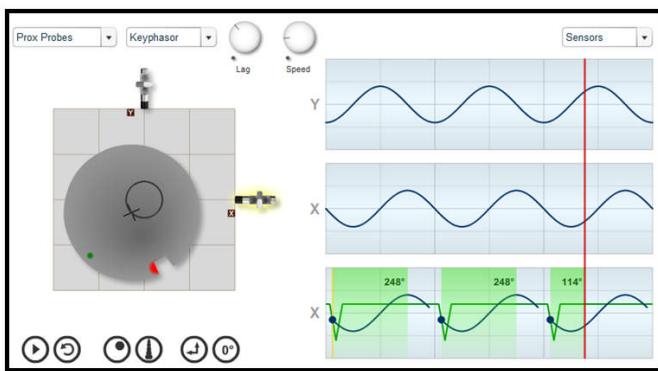


Figura 5-15 Keyphasor como referencia de fase

Una sonda de proximidad apuntando a una cuña también se puede utilizar como una referencia de fase una vez por revolución. Esta configuración es común en máquinas con grandes cojinetes de deslizamiento.

## Puntos clave

- Los estudiantes deben ser conscientes de las diversas aplicaciones para las lecturas de fase.
- Los estudiantes deben entender la definición de fase
  - Un ciclo de vibración es de 360 grados
  - La fase es el tiempo relativo entre dos señales
- Los estudiantes deben entender cómo se mide la fase usando un tacómetro o un keyphasor.
- Los estudiantes deben entender el concepto de fase en adelanto y retraso
  - La convención más común es: cuando la señal del tacómetro se adelanta, el ángulo es positivo.

## Tipo y posición del transductor

Hasta ahora hemos asumido que el sensor era una sonda de desplazamiento, es decir, midió el desplazamiento. La sonda mide la distancia entre la punta de la sonda y el eje. Por lo tanto, es sensible a la posición del “punto alto”, es decir, el punto en el que el eje está más cerca de la sonda.

Antes de explorar el término “punto alto”, veamos primero otros dos problemas: la posición del transductor en relación con la referencia de fase y el tipo de transductor.

En nuestro ejemplo hasta ahora la referencia de tacómetro ha estado en línea con el transductor. En nuestra máquina virtual, se pueden colocar de la siguiente manera:

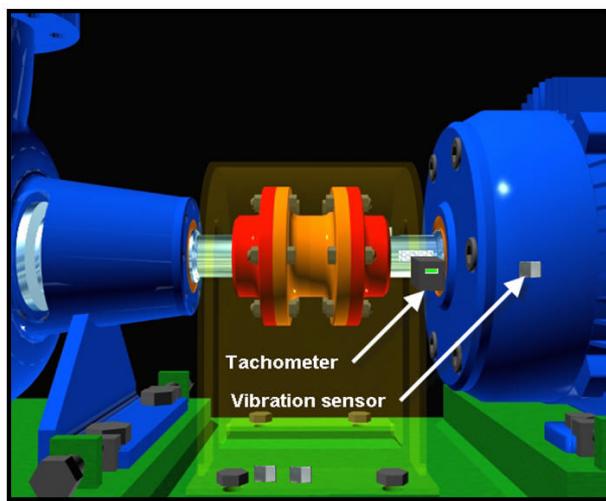


Figura 5-16

Si están en línea entre sí, y el punto alto pasó a estar situado en la misma posición angular que el tacómetro, entonces la lectura del ángulo de fase sería de cero grados. No hay ángulo entre el tacómetro y la señal de vibración. (Este puede ser el caso si la fuente de vibración fuera desbalanceo por una cuña que no se cortó correctamente).

Pero ¿qué pasa si el sensor de vibración no se encuentra en línea con el tacómetro? ¿Qué pasaría si el sensor estuviera ubicado 90 grados (en la dirección de rotación) alrededor del tacómetro?

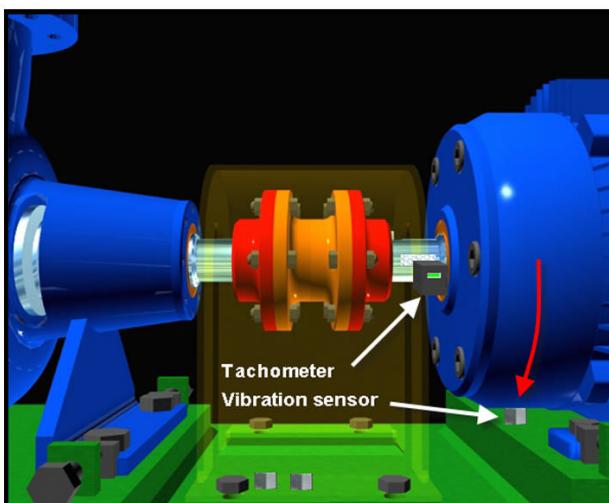


Figura 5-17

El ángulo de fase sería diferente. El ángulo de fase sería de 90 grados. La señal de tacómetro adelantaría la señal de vibración 90 grados porque el punto alto pasaría el tacómetro un cuarto de rotación antes de que llegue al punto donde se encuentra el sensor.

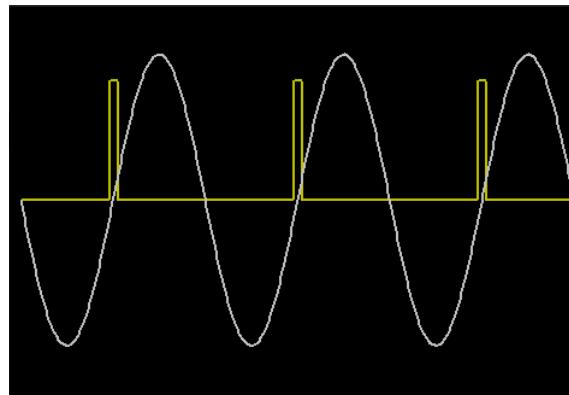


Figura 5-18

Esta es una muy buena razón por la que debe montar el sensor en línea con el tacómetro (o lo que esté utilizando como referencia de fase).

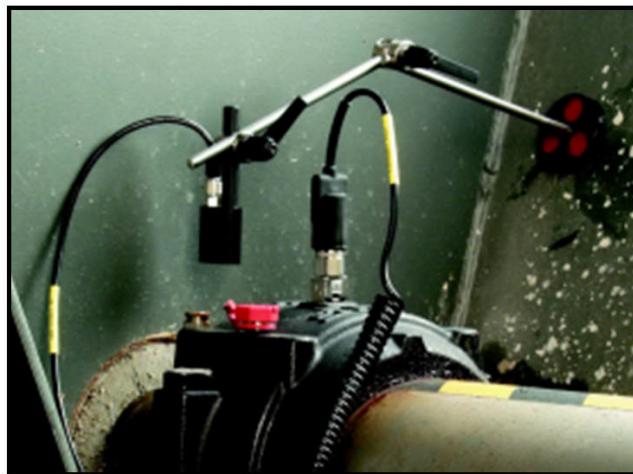


Figura 5-19

### Sensores de vibración

¿Qué pasaría si no usamos una sonda de desplazamiento? ¿Se vería afectada la lectura de fase? Sí, lo haría. Hasta ahora hemos utilizado una sonda de desplazamiento. A medida que el punto alto pasaba la sonda de desplazamiento, el sensor indicaba el aumento en el nivel de vibración. En el caso de un eje fuera de balance, el patrón de vibración sería sinusoidal. Y si el punto alto

estuviera en línea con la referencia del tacómetro (nuestra cinta reflectante), la lectura de fase sería de cero grados.

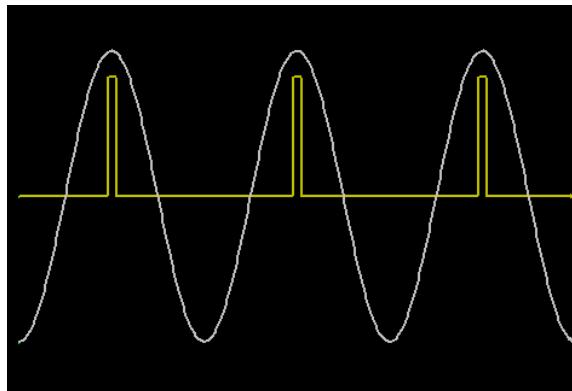


Figura 5-20

Hemos aprendido anteriormente que el punto de desplazamiento máximo se produce en un punto diferente del ciclo a la máxima aceleración y velocidad:

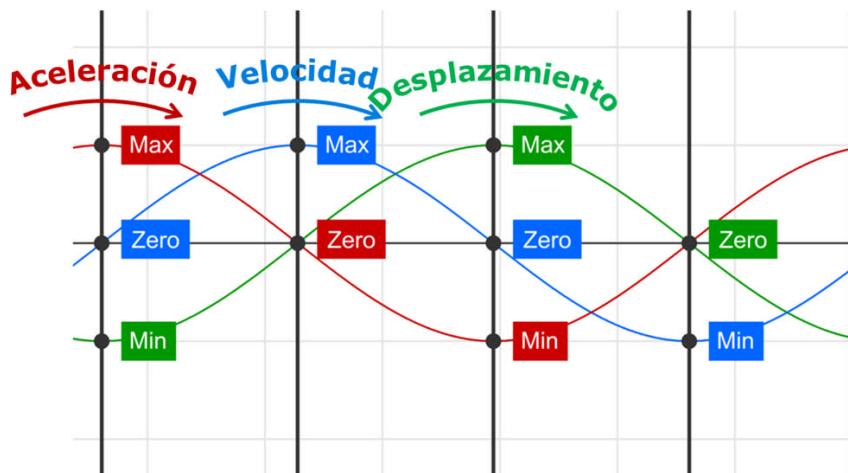


Figura 5-21

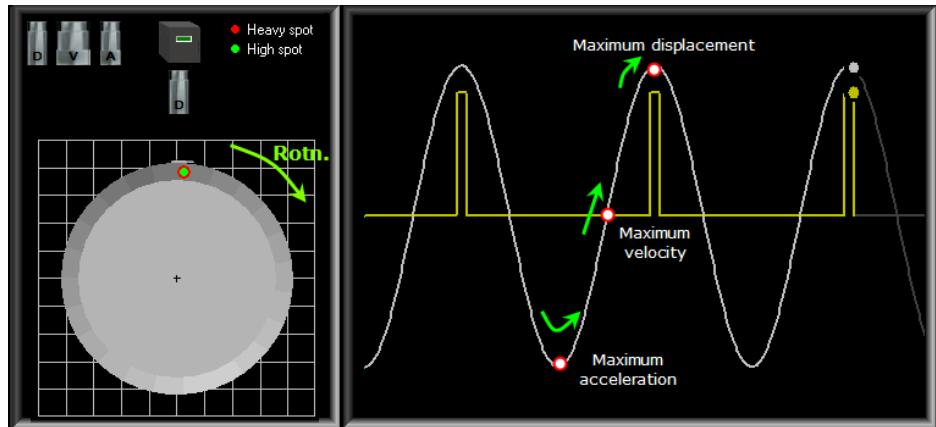


Figura 5-22

Pero ahora reemplazaremos nuestra sonda de desplazamiento con un velocímetro. Por el momento lo mantendremos simple y asumiremos que el sensor mide puramente la velocidad instantánea de la vibración y no introduce ningún cambio de fase.

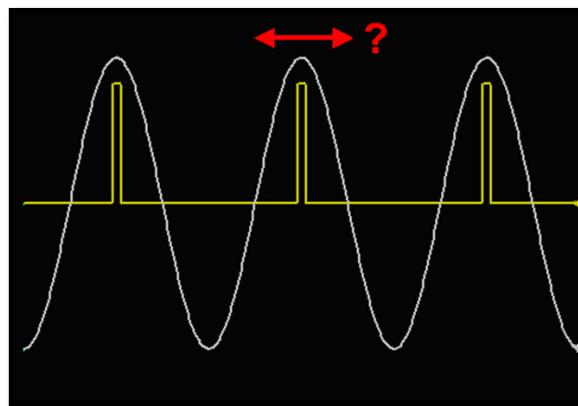


Figura 5-23

Vemos un cambio en la lectura. Ahora dice -90 grados. La forma de onda de vibración adelanta la señal del tacómetro de referencia 90 grados. Aprendimos en los fundamentos que existe una relación de fase entre desplazamiento, velocidad y aceleración. La velocidad lidera el desplazamiento 90 grados, por lo que veremos ese cambio en nuestra lectura.

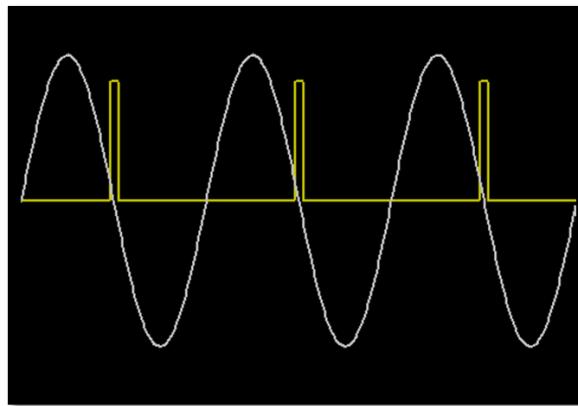


Figura 5-24

Si usamos un sensor de velocidad para medir la vibración podríamos pensar fácilmente que el punto pesado adelanta el punto de referencia en  $90^\circ$ . En este gráfico se puede ver la posición real del punto pesado (en línea con la cinta reflectante) y la posición aparente del punto alto. Vemos esto porque en ese punto en la rotación del eje la velocidad está en su pico más alto.

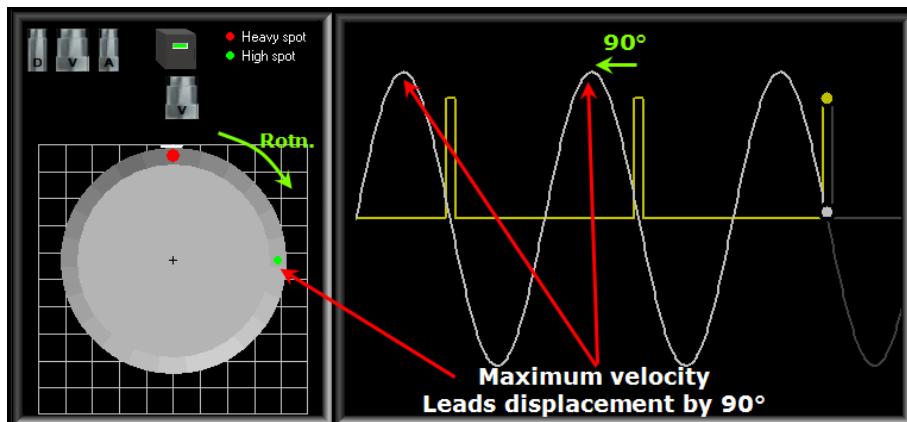


Figura 5-25

¿Y si ahora usamos un acelerómetro? La fase se desplaza 90 grados más. Ahora dice  $-180$  grados. La aceleración adelanta al desplazamiento en 180 grados.

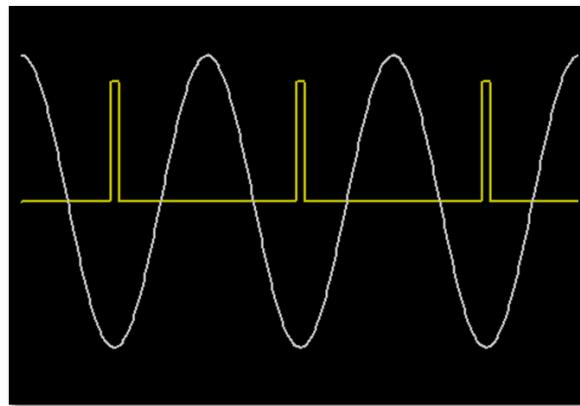


Figura 5-26

Si usamos un acelerómetro para medir la vibración podríamos pensar fácilmente que el punto pesado está en el lado opuesto del eje a la referencia de fase (adelanta por  $180^\circ$ ). En este gráfico se puede ver la posición real del punto pesado (en línea con la cinta reflectante) y la posición aparente del punto alto. Vemos esto porque en ese punto en la rotación del eje la aceleración está en su pico más alto.

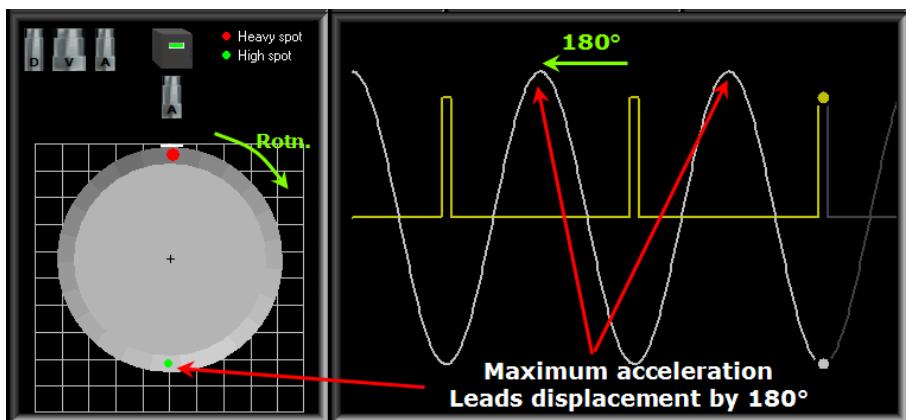


Figura 5-27

Por lo tanto, el transductor de vibración utilizado afecta la lectura de fase. Pero ¿nos importa? Si estamos realizando análisis de vibración o estamos estudiando resonancias, y todo lo que estamos tratando de entender es cómo una parte de la máquina está cambiando en relación con otra parte de la máquina, entonces realmente no nos importa. Aprenderemos más sobre esto más adelante, pero en resumen, no nos importa porque todos estos cambios de fase no cambian mientras la velocidad de la máquina y la instrumentación no cambien. No nos interesa la fase absoluta, sólo la fase relativa.

Sin embargo, si estamos realizando el balanceo de la máquina, entonces nos preocupamos por el sensor; por dos razones. La primera razón, que está un poco fuera del tema, se relaciona con la sensibilidad. Una sonda de desplazamiento mide la cantidad de desplazamiento, que puede ser bastante pequeña. Un acelerómetro mide la vibración que es proporcional a la fuerza (recuerde Fuerza = masa x aceleración).

La razón más relevante en este momento se refiere a la selección de la posición del peso de prueba. Verá, si tuviéramos que tomar una lectura de vibración (la “corrida original”) y obtener una lectura de fase de 30 grados, entonces podríamos potencialmente usar esa información para seleccionar la posición adecuada para el peso de corrección de balanceo. Si el ángulo era de 30 grados (y estamos usando una sonda de desplazamiento (proximidad), entonces podríamos colocar el peso de corrección opuesto a ese punto; a 210 grados. Si usamos una sonda de velocidad, entonces tenemos que ajustar la lectura 90 grados primero. Y si usamos un acelerómetro entonces tenemos que ajustar la lectura por 180. ¿Es eso correcto?

Desafortunadamente, no es necesariamente correcto. Hemos hecho una suposición sobre nuestras lecturas que no es necesariamente válida. Asumimos que la lectura de la sonda de desplazamiento del “punto alto” es la misma que la del “punto pesado”. Cuando estamos balanceando un rotor estamos tratando de contrarrestar el efecto del punto pesado, no el punto alto. Desafortunadamente, puede que no sean iguales.

### ***Representación vectorial***

Los datos de fase se pueden utilizar de varias maneras. Una forma común de representar las lecturas de fase y amplitud es a través de un diagrama vectorial. Hay numerosas aplicaciones para diagramas vectoriales, pero son muy populares cuando se balancea una máquina sin software de balanceo.

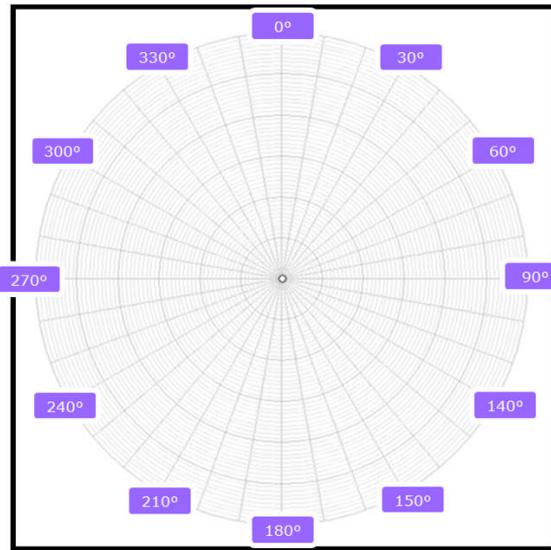


Figura 5-28

La distancia desde el centro es la amplitud, y el ángulo es el ángulo de fase. En el ejemplo, hemos especificado que cada anillo es 1 mil de vibración, y la lectura fue de 5.5 mils a  $45^\circ$ .

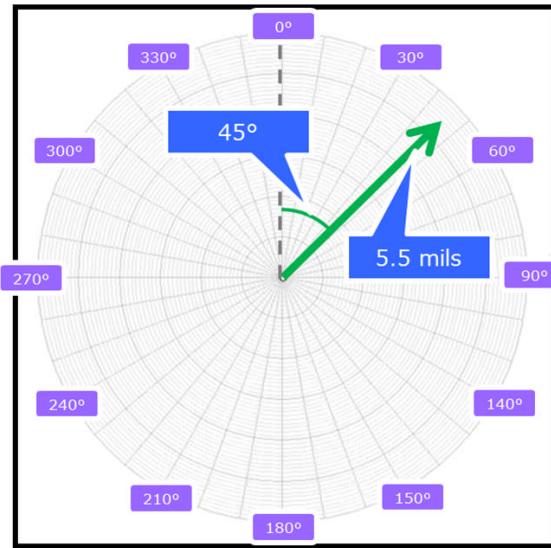


Figura 5-29

Discutiremos vectores y trazados polares con mayor detalle en la sección de balanceo.

### **Representando la fase**

Hasta ahora siempre hemos discutido las lecturas de fase como números simples:  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $360^\circ$ , etc. También hemos visto cómo podemos representar la amplitud y la fase en una gráfica vectorial. En muchos casos no nos preocupa el número de fase absoluta, nos interesa la fase relativa: cómo se compara la fase en un punto con la fase en otro. En un momento aprenderemos más sobre las aplicaciones de fase; sin embargo, no importa cómo lo usemos, tenemos la opción del propio valor numérico, o una representación visual.

En esta ilustración puede ver lo conveniente que es representar visualmente el ángulo de fase. Al dibujar un círculo y una cola en el ángulo deseado, es fácil determinar rápidamente el ángulo y el movimiento relativo, con un vistazo rápido.

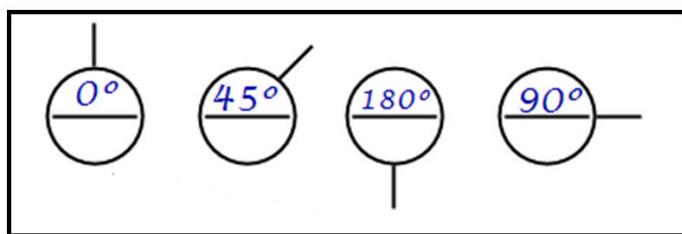


Figura 5-30

Ni siquiera es necesario anotar el ángulo de fase - sólo se puede dibujar las colas; ya sea dentro o fuera del círculo. Usted puede ver fácilmente que estas dos lecturas están  $180^\circ$  fuera de fase.

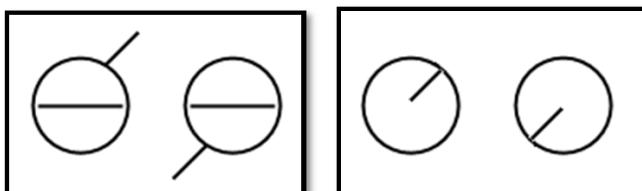


Figura 5-31

Estos datos se pueden utilizar de varias maneras, pero un método común se llama diagrama de burbujas (desarrollado por Ralph T. Buscarello). Puede tomar lecturas alrededor de la máquina e introducirlas en el diagrama, añadiendo las colas de acuerdo con el ángulo. Discutiremos el uso de este diagrama con mayor detalle en la sección de análisis de fase.

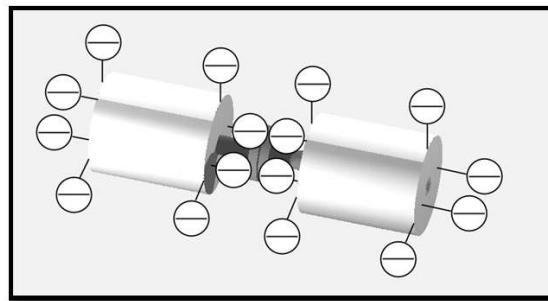


Figura 5-32

O para un solo componente:

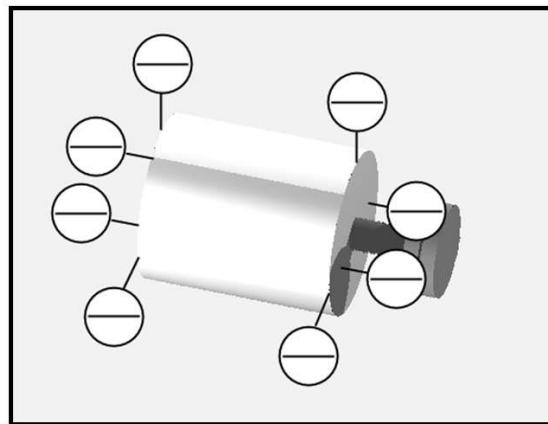


Figura 5-33

A continuación, puede visualizar cómo se mueven los diferentes puntos de la máquina en relación entre sí.

## Puntos clave

---

- F0** Los estudiantes deben entender que el ángulo de fase medido cambiará si cambia la posición de la referencia de fase.
- F1** Las lecturas de fase cambian dependiendo de las unidades.
  - o La aceleración adelanta la velocidad en 90 grados y la velocidad adelanta al desplazamiento en 90 grados.
  - o En la mayoría de los casos las unidades no importan mientras no las cambiemos porque estamos interesados en la fase relativa
- E1** Al balancear un rotor es importante saber dónde está el “punto pesado” para determinar dónde colocar un peso de prueba.
  - o En este caso es importante entender la relación entre fase y unidades.
- F1** Los estudiantes deben entender cómo representar datos de fase como vectores y en diagramas de burbujas

## Midiendo fase

---

Echemos un vistazo más de cerca a cómo medimos la fase. En la sección anterior describimos dos métodos básicos: usar una referencia de tacómetro y usar la vibración de otro sensor. También hay una variación en esos métodos que utilizan un estroboscopio, pero llegaremos a eso más adelante.

### ***Uso de un tacómetro***

Hay varias maneras de obtener una señal de tacómetro una vez por revolución. El más común implica el uso de cinta reflectante y un foto-tacómetro óptico.



Figura 5-34

Hay una serie de productos disponibles que pueden utilizar luz reflejada, incluida la luz láser, para generar las señales de tacómetro. Muchos trabajarán sin cinta reflectante, siempre y cuando haya un área de alto contraste, por ejemplo, un punto de pintura.

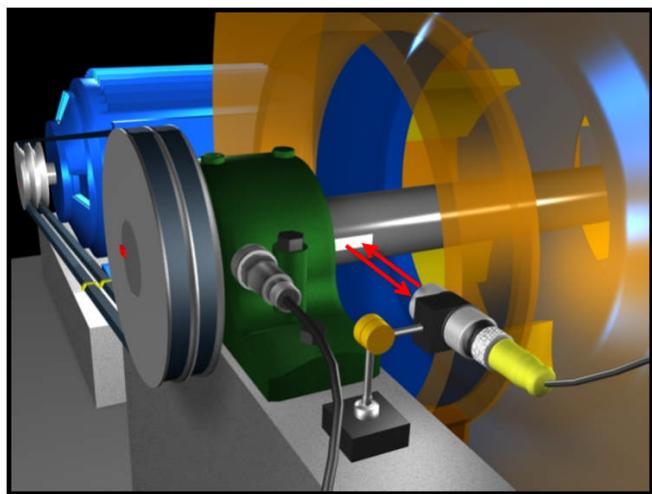


Figura 5-35

La fotocélula ilumina el eje. Debido a la textura y el color de la superficie, la luz no se refleja. Cuando la cinta pasa por debajo, la luz se refleja. El tacómetro genera una señal TTL que se introduce en el recopilador de datos.

La salida del tacómetro se introduce en la entrada del tacómetro del colector de datos. Tendrá que consultar su recopilador de datos para comprender dónde conectar la señal del tacómetro y cómo utilizarla para recopilar lecturas de fase.



Figura 5-36

El colector de datos puede utilizar la señal del tacómetro para determinar la velocidad de la máquina y comparar la vibración a la velocidad de funcionamiento de un sensor de vibración a la señal del tacómetro. A continuación, proporcionará un ángulo de fase de entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$  (en algunos casos, el recopilador de datos puede proporcionar una lectura de  $-180^\circ$  a  $+180^\circ$ ).

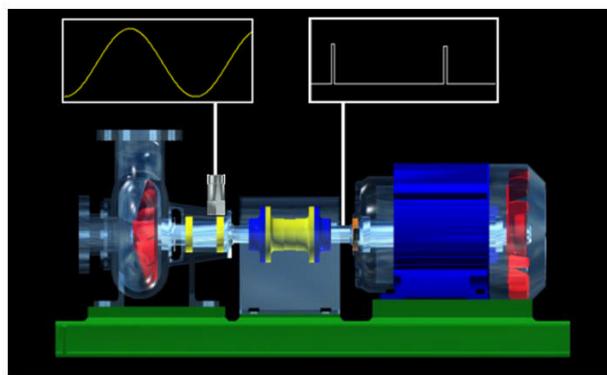


Figura 5-37

El recopilador de datos puede determinar el ángulo de fase de varias maneras diferentes. Puede aplicar el método de dos canales que se discutirá a continuación, o puede utilizar el tacómetro

para desencadenar el proceso de adquisición de datos y adquirir el ángulo de fase del proceso FFT. La activación y la adquisición de datos se describen en otros lugares.

Como se mencionó, otra manera es utilizar una sonda de desplazamiento que está dirigida a una cuña o tornillo. El cambio en el desplazamiento proporciona el paso en la tensión utilizada como referencia. Esto a menudo se llama un keyphasor.

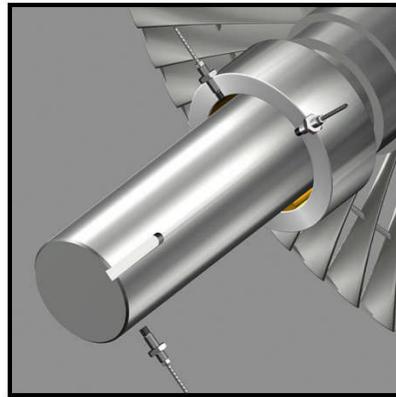


Figura 5-38 Keyphasor como referencia de fase

### **Fase de dos canales**

¿Sabía que cuando su recopilador de datos toma una medida en una máquina y crea el FFT (espectro), en realidad calcula el espectro de magnitud (amplitud) y el espectro de fase? Pero debido a que no tiene una señal de referencia (el recopilador de datos comienza a tomar muestras al pulsar el botón, no de acuerdo con ninguna referencia predefinida en el eje), los datos de fase no tienen mucho valor. Así que se descarta y sólo mantenemos el espectro de magnitud.

Sin embargo, hay dos posibilidades disponibles para nosotros. Si la recopilación de datos se sincronizó con la referencia de tacómetro, los datos de fase serían relevantes. Podríamos ver la fase a la velocidad de operación y usar esa información. Esta es una de las formas en que los recopiladores de datos miden la fase cuando se utiliza el tacómetro. Pero hay otra manera.



Figura 5-39

Si conectamos un acelerómetro a un canal de un recopilador de datos de dos canales, y conectamos otro sensor al segundo canal, el recopilador de datos puede muestrearlos simultáneamente (esto es esencial) y comparar los espectros de fase. Colocaríamos un sensor en un lugar de referencia, y el segundo sensor en el punto de interés. También podemos mover ese sensor para ver cómo cambia el ángulo de fase (dejando el sensor de referencia en la misma ubicación todo el tiempo).

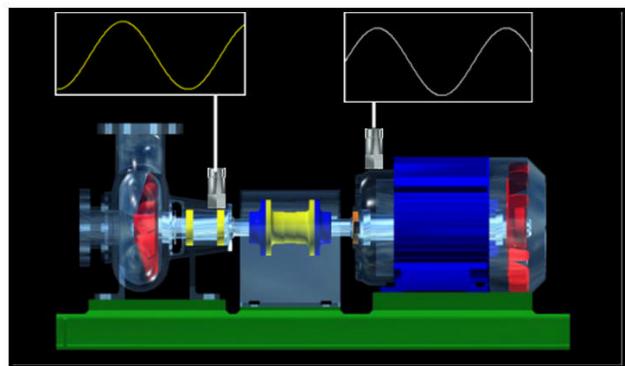


Figura 5-40

Podríamos ver que el valor de fase del canal uno a la velocidad de operación era de  $33^\circ$ , pero ¿qué nos diría eso? Nada. Pero si la lectura de fase a velocidad de operación del segundo canal fue de  $113^\circ$ , podemos comparar los dos valores para ver que hay una diferencia de fase de  $180^\circ$  entre ellos. Podemos ver que la vibración entre los dos puntos está  $180^\circ$  fuera de fase. Eso significa que un punto se mueve hacia arriba y el otro punto se mueve hacia abajo. Y eso nos abre todo tipo de posibilidades.

### ***Uso de un estroboscopio***

#### **Estroboscopio como tacómetro**

Hay dos maneras de usar un estroboscopio. Si ajustamos el estroboscopio a la velocidad de operación para que el eje o acoplamiento parezca haber dejado de girar, la salida del

estroboscopio se puede introducir en la entrada del tacómetro del colector de datos. El recopilador de datos trataría la señal como si fuera una entrada de tacómetro normal.

Sin embargo, si la velocidad de la máquina varía ligeramente, la señal del estroboscopio ya no representará la velocidad exacta de la máquina – la lectura de fase será inexacta. Si configura el estroboscopio para congelar una cuña, un tornillo o algún otro punto en el eje o acoplamiento, debe usarlo como referencia antes de registrar la amplitud y la lectura de fase. Si la velocidad varía, verá que la cuña/tornillo comienza a girar hacia adelante o hacia atrás.

#### **Colector de datos controlando el estroboscopio o viceversa**

Hay otra manera de utilizar un estroboscopio que es muy eficaz, sin embargo no todos los estroboscópicos o colectores de datos tienen esta capacidad.

El sensor de vibración está conectado al estroboscopio y se coloca en modo “EXT”. Usted controla la velocidad de flash del estroboscopio hasta que congele el movimiento del eje. Cambie a “LOCK/TRACK” y el estroboscopio utilizará ahora su circuito interno para filtrar la señal de vibración y extraer la vibración a la velocidad de operación. El estroboscopio ahora puede rastrear cualquier ligero cambio en la velocidad. El estroboscopio normalmente tendrá una señal de salida TTL que se puede utilizar para controlar un recopilador de datos con fines de balanceo o recopilación de datos con disparador.



Figura 5-41

Alternativamente, algunos colectores de datos se pueden utilizar para rastrear la vibración dominante de velocidad de giro y conducir el estroboscopio. El recopilador de datos puede realizar un seguimiento de la velocidad 1X, o el usuario puede mover el cursor sobre un espectro para establecer la velocidad. Se conecta un cable desde la salida del colector de datos a la entrada del estroboscopio. La velocidad de flash del estroboscopio está ahora bajo el control del recopilador de datos.

Cuando el estroboscopio o el recopilador de datos se establece para realizar un seguimiento de la velocidad de operación, puede realizar mediciones visuales de fase. El estroboscopio

parpadeará a la velocidad de funcionamiento de la máquina, por lo que el eje (o acoplamiento) parecerá congelarse. (Por supuesto, usted debe tener mucho cuidado - el eje no se ha detenido y debe tener cuidado de no tocarlo). A continuación, debe establecer una referencia visual, como una cuña o un tornillo de ajuste, y utilizar la perilla "Fase relativa" en el estroboscopio para ajustar la cuña/tornillo de ajuste de modo que esté en la posición de las 12:00.

Si observa el eje/acoplamiento mientras mueve el acelerómetro, aparecerá como si el eje/acoplamiento girara. La cantidad de rotación viene dictada por la diferencia de fase entre la posición original del sensor y la nueva posición. Por ejemplo, si la máquina estaba desbalanceada y mueve el acelerómetro 90°, el eje/acoplamiento parecerá girar 90° (un cuarto de vuelta).

Este es un método de análisis de fase muy eficaz. A medida que mueve el sensor, puede ver cómo cambia la fase sin siquiera mirar los valores de fase reales. Es mejor si puede utilizar un tornillo de ajuste, una cuña o una cinta reflectante como referencia visual. Debe comenzar ajustando el estroboscopio para que la referencia esté en la parte superior del eje. A medida que mueve el sensor es muy fácil notar el cambio en la fase.

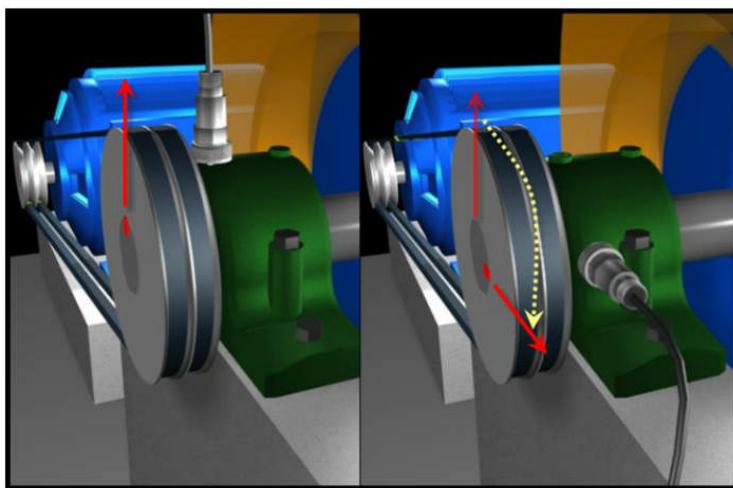


Figura 5-42

## Aplicaciones de análisis de fase

Hay varias maneras de usar los datos de fase. Hay básicamente tres aplicaciones principales de vibración: balanceo, análisis de resonancia estructural y diagnóstico de fallas. Discutiremos el balanceo y el análisis de resonancia por separado. Por ahora nos centraremos en el diagnóstico de fallas.

## ***Diagnóstico de fallas de la máquina***

La fase se puede utilizar para diagnosticar las condiciones de falla. Hay una serie de condiciones de falla que desarrollan patrones similares, lo que dificulta el diagnóstico preciso de una falla. Si bien los espectros y las formas de onda de tiempo colectadas en múltiples direcciones pueden ayudarle a diagnosticar con precisión las fallas, si comprende las fuerzas subyacentes involucradas, el análisis de fase puede proporcionar evidencia concluyente sobre la naturaleza exacta de la falla: desbalance, desalineación, eje doblado, excentricidad, flexibilidad de cimentación, rodamiento torcido e incluso holgura.

Podemos tomar una serie de medidas para entender el movimiento de la máquina. Podemos tomar lecturas vertical y horizontalmente en cada extremo de la máquina. Podemos comparar la amplitud y la fase de vertical frente a horizontal; podemos comparar las lecturas verticales en ambos extremos de la máquina, y podemos comparar las lecturas horizontales en ambos extremos de la máquina. También podemos tomar lecturas de fase a ambos lados del acoplamiento y comparar las lecturas en las direcciones radiales.

Las lecturas axiales también son muy importantes. En lugar de una sola lectura, podemos tomar lecturas a cada lado del eje; para comparar el lado izquierdo con el lado derecho, y comparar la parte superior con la lectura inferior. Y de nuevo podemos comparar las lecturas axiales tomadas a ambos lados del acoplamiento (es decir, en el motor y la bomba).

Es posible que recopile rutinariamente una sola lectura de vibración axial, pero cuando está recopilando lecturas de fase es importante recopilar dos lecturas axiales, y en ciertos casos que discutiremos más adelante, incluso puede recopilar cuatro lecturas. Debido al acceso restringido, problemas de seguridad y construcción de la máquina, quizás solo pueda tomar mediciones axiales en un extremo de la máquina.

## ***Precauciones al recopilar datos de fase***

También vale la pena revisar el hecho de que debe tener cuidado al comparar las lecturas de fase tomadas en los extremos opuestos de una máquina, o al comparar las lecturas de fase tomadas a través de un acoplamiento. Las lecturas de fase son sensibles a la dirección. Por ejemplo, si usted fuera a medir la fase en un bloque sólido de acero, entonces la lectura de fase en un lado del bloque será 180° diferente a la lectura tomada en el lado opuesto del bloque.

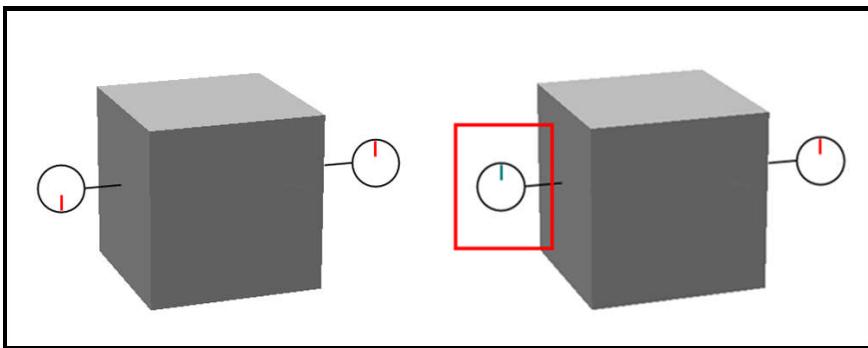


Figura 5-43

Por lo tanto, debe decidir una dirección de referencia y apgarse a ella. Si decide que la dirección de referencia es hacia el extremo accionado de la máquina, debe añadir 180 a las lecturas tomadas con el sensor frente al conductor de la máquina.

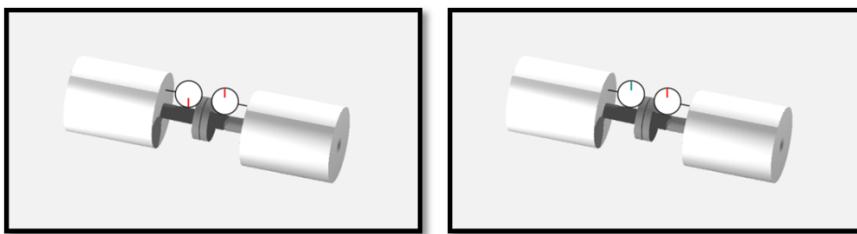


Figura 5-44

Esto es especialmente importante si está utilizando un estroboscopio para medir la fase y está observando cómo se mueve la llave, el tornillo de fijación o algún otro objeto físico atado al eje cuando se mueve el sensor. En una situación, usted puede estar mirando hacia el este al hacer esa observación y hacia el oeste cuando está haciendo una medición diferente. Una vez más, usted debe decidir sobre una dirección de referencia y ajustar las otras lecturas por 180°.

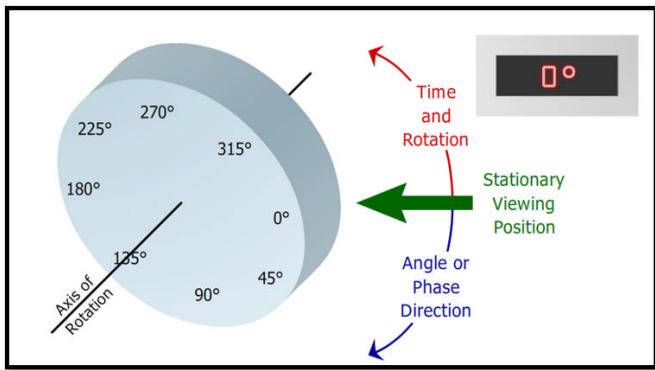


Figura 5-45

En las secciones siguientes hablaremos sobre las relaciones de fase entre ciertos puntos y ejes de la máquina. Es posible que deba observar si las lecturas están en fase (diferencia de 0°, 180° fuera de fase o 90° fuera de fase. Sin embargo, no se espera que la diferencia sea exactamente de 0°, 180° o 90°. Por lo general, se considera que si las lecturas varían en 30° o menos, entonces la regla se mantiene. Por ejemplo, si la diferencia entre dos lecturas era de entre 150° y 210°, entonces puede considerar que las lecturas están fuera de fase.

## Puntos clave

- Los estudiantes deben entender las diversas maneras de medir la fase usando una referencia de una vez por revolución, como un tacómetro, un keyphasor o una luz estroboscópica
- Los estudiantes deben entender la fase relativa
- Los estudiantes deben ser conscientes de cómo la orientación del sensor afecta la fase
- Los estudiantes deben entender cuándo usar la fase relativa y cuándo usar mediciones de fase absoluta

## Diagnóstico del desbalance

Aunque algunos consideran que es la falla más común y simple de diagnosticar, en realidad es bastante fácil confundir el desbalance con otras condiciones de falla. Si encuentra un pico 1X alto y asume que necesita ser balanceado, puede estar bastante equivocado - y generar una gran cantidad de trabajo innecesario - y todavía no corregir la falla.

Tenemos que volver atrás y estudiar el movimiento de un rotor cuando no está balanceado correctamente. Si entiende el movimiento subyacente, podrá utilizar los datos de fase para demostrar que el rotor está hecho desbalanceado y descartar otras posibilidades.

Ahora revisaremos rápidamente las diferentes formas de desbalance, y luego veremos cómo podemos ver las lecturas de fase de extremo a extremo, y las lecturas de fase vertical a horizontal y los niveles de amplitud relativa para diagnosticar el desbalance.

### **Desbalance estático**

El tipo más simple de desbalance es equivalente a un punto pesado en un solo punto del rotor. Esto se denomina desbalance estático porque aparecerá incluso si el rotor no gira - si se coloca en cojinetes sin fricción, el rotor girará para que el punto pesado esté en la posición más baja.

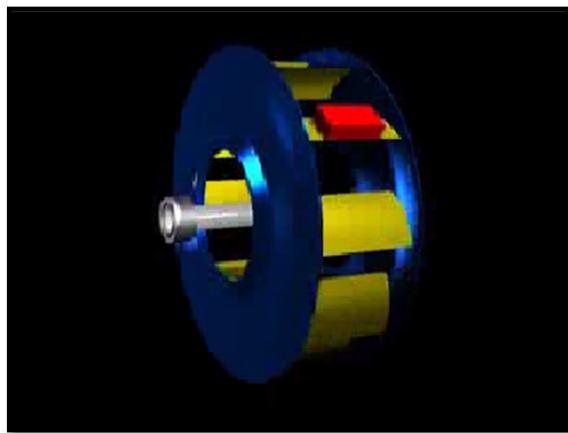


Figura 5-46

El desbalance estático da como resultado fuerzas de rotación de velocidad de funcionamiento (1X) en ambos rodamientos del rotor, y las fuerzas en ambos rodamientos siempre están en la misma dirección. Las señales de vibración de ellos están “en fase” entre sí

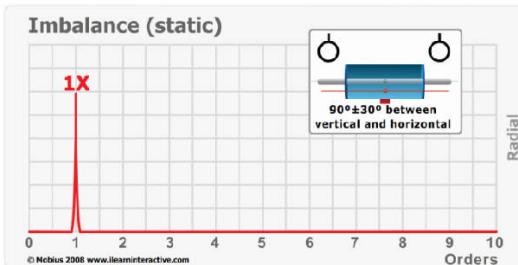


Figura 5-47

Un desbalance estático puro producirá un pico fuerte 1X en el espectro de vibración, cuya amplitud es proporcional a la severidad del desbalance y el cuadrado de las RPM. Los niveles relativos de la vibración 1X en los rodamientos dependen de la ubicación del punto pesado a lo largo del rotor.

Podemos ver el movimiento del eje y aprender cinco hechos importantes:

- 1 Ambos extremos de la máquina deben estar en fase (en el caso de desbalance estático puro), tanto en las direcciones horizontal como vertical. La diferencia de fase entre las dos lecturas verticales debe ser muy similar a la diferencia de fase entre las dos lecturas horizontales, es decir, deben ser en fase vertical y en fase horizontalmente.

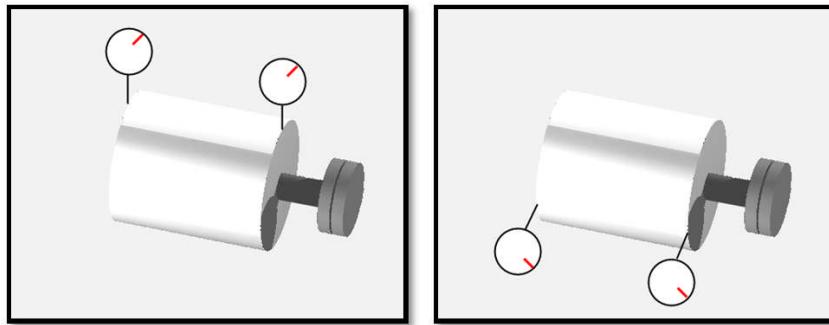


Figura 5-48

- 2 Debe haber aproximadamente 90° entre las lecturas de vibración tomadas en las direcciones vertical y horizontal. Dependiendo de la dirección de rotación, la medición horizontal se adelantará o se retrasará 90° (por lo tanto, medirá aproximadamente 90° o 270°). Esto será cierto en ambos extremos de la máquina.

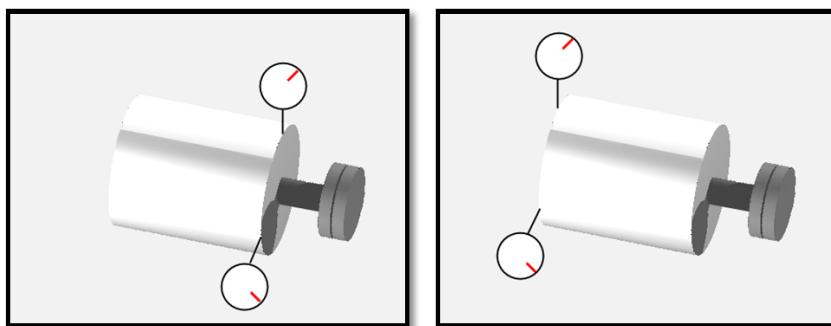


Figura 5-49

- 3 En teoría, los niveles de vibración vertical y horizontal deben ser iguales. Sin embargo, debido a que la máquina será menos rígida en el eje horizontal, es más probable que la medida tomada en la dirección horizontal sea mayor que la medición vertical. Sin embargo, si la lectura horizontal fue mayor que el doble de la amplitud de la vertical, entonces usted podría sospechar que la máquina tenía un problema de soltura/fundación.

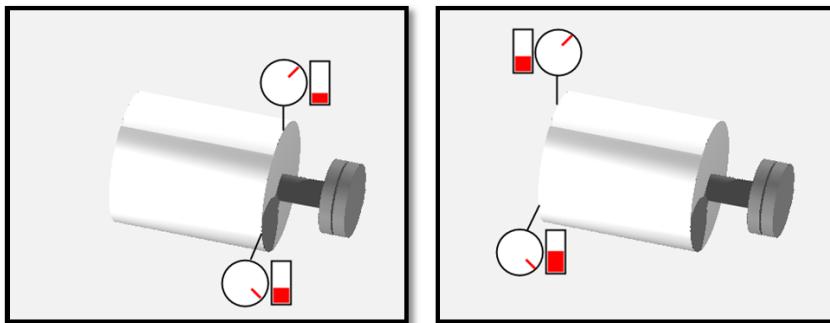


Figura 5-50

4. Como se indicó anteriormente, el nivel de vibración en un extremo de la máquina será superior a la vibración medida en el otro extremo. Sin embargo, la relación entre el extremo conductor y el extremo conducido debe ser aproximadamente la misma en las direcciones vertical y horizontal. Por ejemplo, si el extremo conductor era el doble de la amplitud en la dirección vertical, también esperaría que la vibración en el extremo conducido fuera aproximadamente dos veces más alta en la dirección vertical.

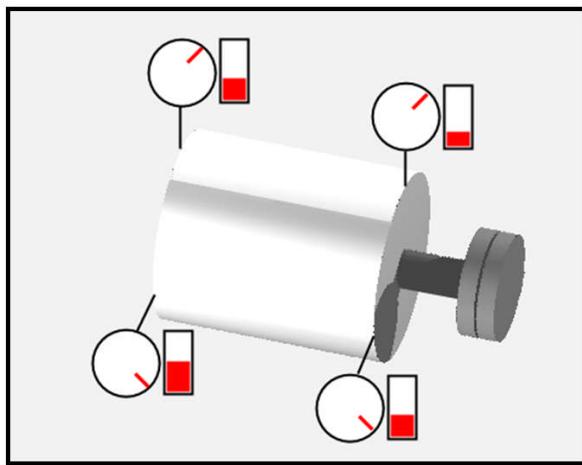


Figura 5-51

5. La amplitud axial y las lecturas de fase también son muy importantes. Si considera el movimiento del rotor/máquina con un desbalance estático puro, los extremos de la máquina se están moviendo hacia arriba y hacia abajo en fase. No hay cabeceo, por lo que las lecturas de fase a través del eje están en fase, y los niveles de amplitud deben ser muy bajos; posiblemente menos de un tercio de las lecturas horizontales.

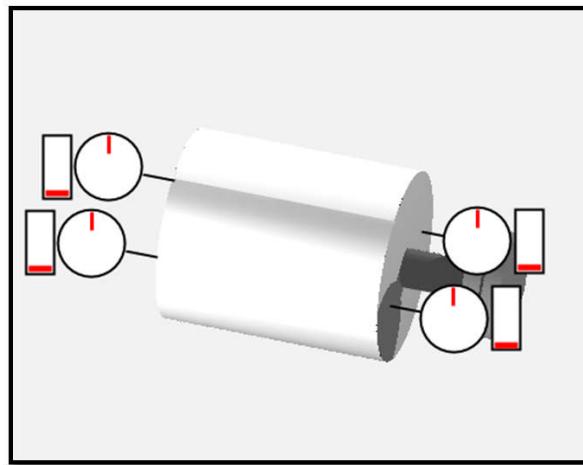


Figura 5-52

Cuando se junta todo eso, se tiene una imagen completa del movimiento del componente de la máquina.

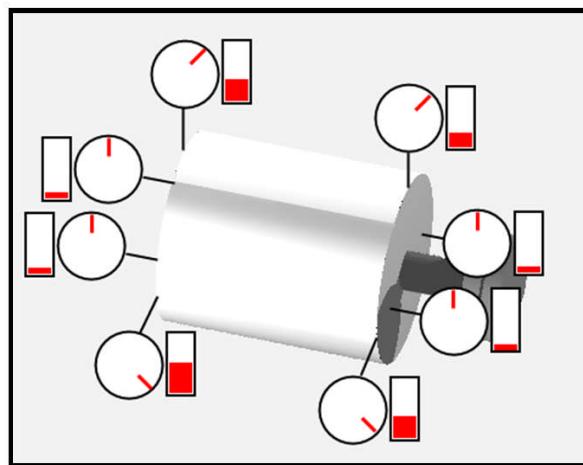


Figura 5-53

### ***Desbalance tipo culpa***

Un rotor con un desbalance de culpa puede estar balanceado estáticamente (puede parecer perfectamente balanceado si se coloca en rodamientos sin fricción). Pero cuando se gira, producirá fuerzas centrifugas en los rodamientos, y serán de fase opuesta.

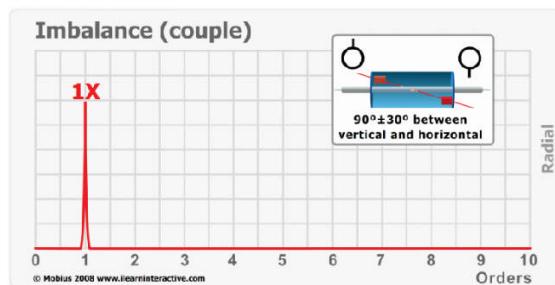
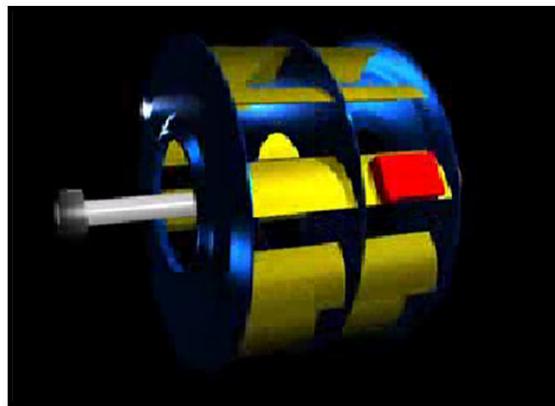


Figura 5-54

Volvamos a los cinco temas que hemos examinado anteriormente:

- 1 La relación de fase ha cambiado. Ambos extremos de la máquina deben estar  $180^\circ$  fuera de fase (en el caso de desbalance de cupla puro). Por lo tanto, debe medir la fase entre ambos extremos de la máquina en la dirección vertical y horizontal. La diferencia de fase entre las dos lecturas verticales debe ser muy similar a la diferencia de fase entre las dos lecturas horizontales.

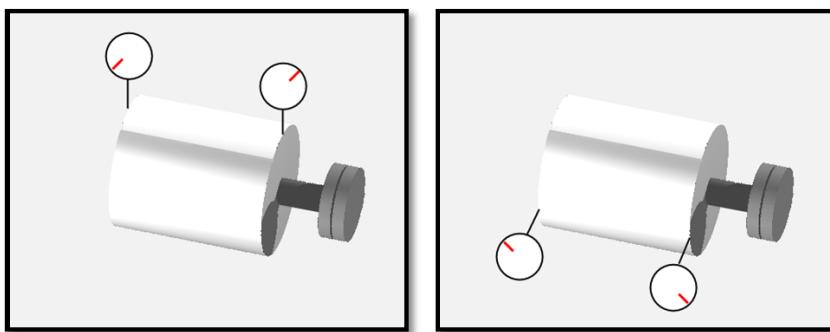


Figura 5-55

2. Como encontramos anteriormente, debe haber aproximadamente  $90^\circ$  entre las lecturas de vibración tomadas en las direcciones vertical y horizontal. Dependiendo de la dirección de rotación, la medición horizontal se adelantará o se retrasará  $90^\circ$  (por lo tanto, medirá aproximadamente  $90^\circ$  o  $270^\circ$ ). Esto será cierto en ambos extremos de la máquina.

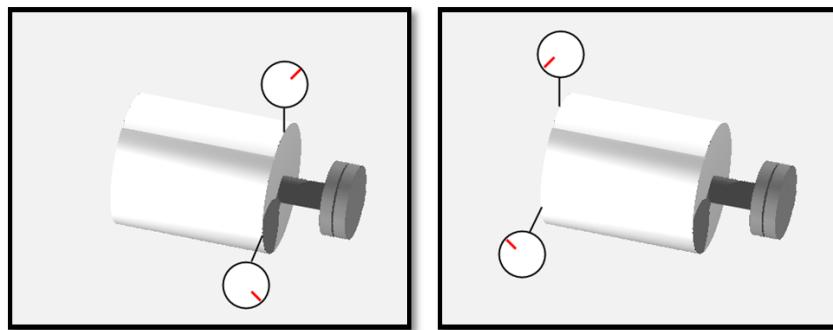


Figura 5-56

3. Una vez más, habrá una diferencia en la amplitud de vibración en las direcciones vertical y horizontal, siendo horizontal normalmente más alta debido a una menor rigidez. Si la lectura horizontal fue mayor que el doble de la lectura vertical podría considerar revisar los cimientos/base.

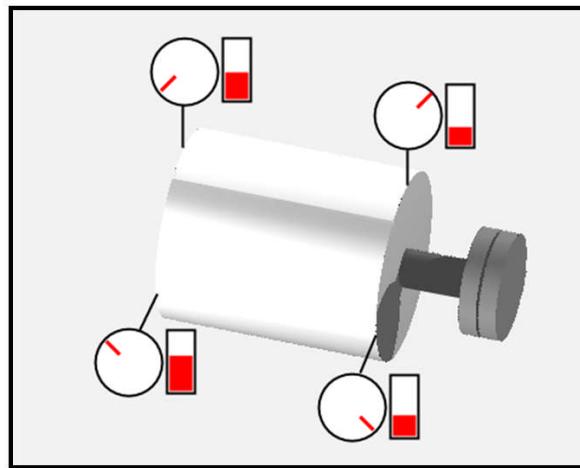


Figura 5-57

4. Una vez más, el nivel de vibración en un extremo de la máquina será superior a la vibración medida en el otro extremo. Sin embargo, la relación entre el extremo conductor y el extremo conducido debe ser aproximadamente la misma en las direcciones vertical y horizontal. Por ejemplo, si el extremo conductor era el doble de la amplitud en la dirección

vertical, también esperaría que la vibración en el extremo conducido fuera aproximadamente dos veces más alta en la dirección vertical.

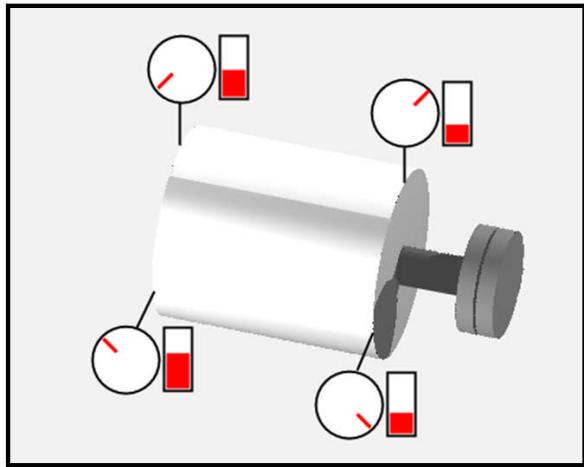


Figura 5-58

5. Las lecturas de amplitud axial volverán a ser bajas en comparación con las lecturas radiales – las fuerzas están predominantemente en la dirección radial. Sin embargo, debido a que ahora tenemos un movimiento de cabeceo, con  $180^\circ$  de diferencia de fase de un extremo de la máquina al otro, las lecturas de fase tomadas a través del eje también estarán fuera de fase.

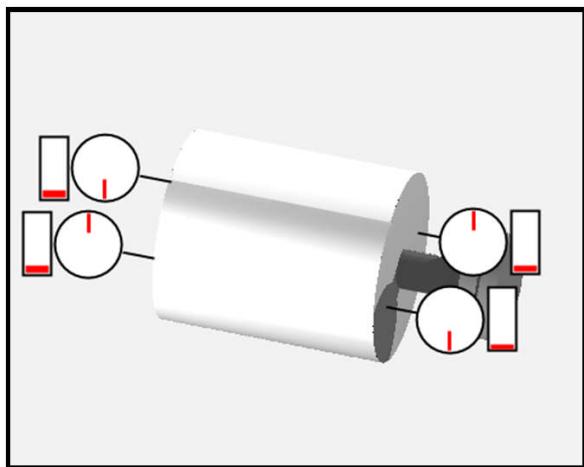


Figura 5-59

## Desbalance dinámico

En realidad, la cantidad de desbalance no se distribuirá uniformemente a lo largo del rotor (a menos que sea un rotor muy estrecho o un ventilador axial, en cuyo caso se aproximarán al desbalance estático). Es probable que tengamos una combinación de desbalance estático y de cupla. La combinación se denomina desbalance dinámico.

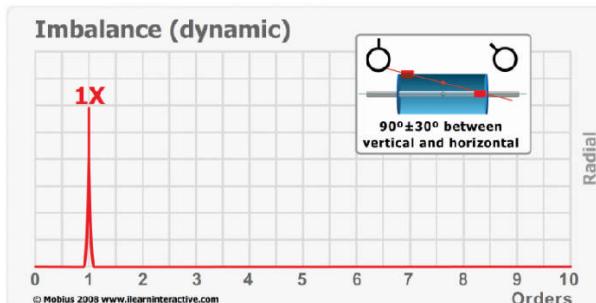
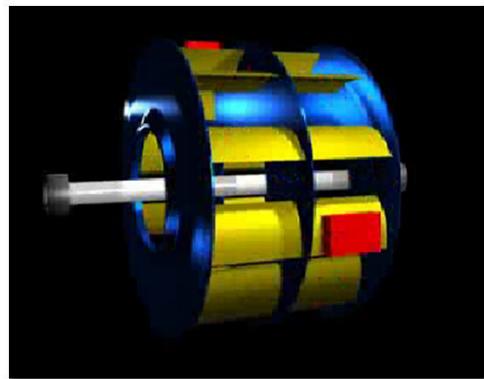


Figura 5-60

Esta es la situación más común que se encuentra con la maquinaria rotativa (excepto con ventiladores, amoladoras y poleas donde la relación de longitud a radio ( $L/R$ ) es menor que 1) y debe realizar un balanceo a “dos planos” para corregir la situación.

Volvamos a los cinco temas que hemos examinado anteriormente:

- 1 La relación de fase entre los extremos de la máquina no será ni en fase ni  $180^\circ$  fuera de fase. Las lecturas deben estar en algún lugar entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ . La diferencia de fase entre las dos lecturas verticales debe ser similar a la diferencia de fase entre las dos lecturas horizontales. Por ejemplo, si la diferencia de fase entre las lecturas verticales fue de  $163^\circ$ , se espera que la lectura de fase entre las lecturas horizontales sea de  $163^\circ, \pm 20^\circ$ .

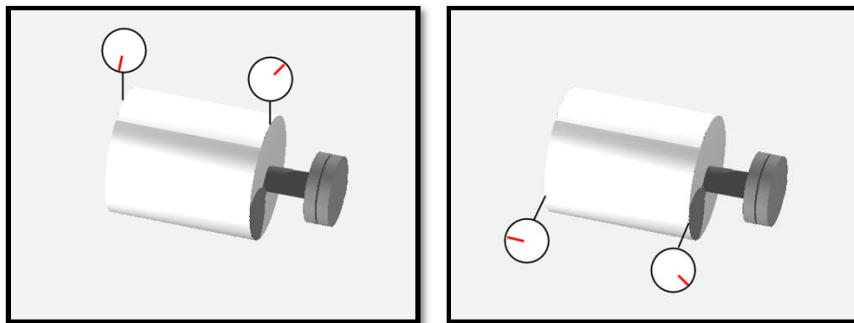


Figura 5-61

- Como encontramos anteriormente, debe haber aproximadamente  $90^\circ$  entre las lecturas de vibración tomadas en las direcciones vertical y horizontal. Dependiendo de la dirección de rotación, la medición horizontal se adelantará o se retrasará  $90^\circ$  (por lo tanto, medirá aproximadamente  $90^\circ$  o  $270^\circ$ ). Esto será cierto en ambos extremos de la máquina.

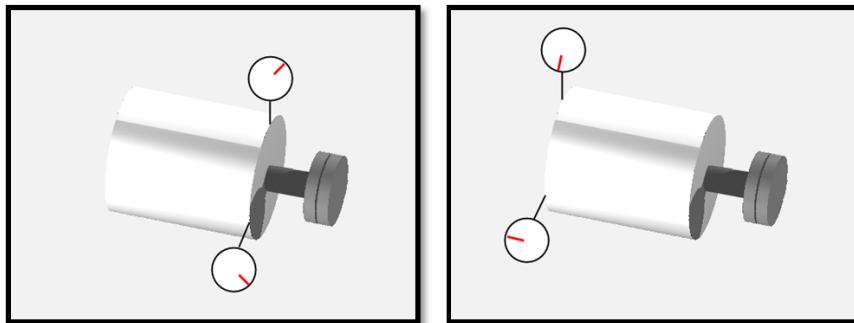


Figura 5-62

- Una vez más, habrá una diferencia en la amplitud de vibración en las direcciones vertical y horizontal, siendo horizontal normalmente más alta debido a una menor rigidez. Si la lectura horizontal fue mayor que el doble de la lectura vertical, podría considerar revisar los cimientos/base.

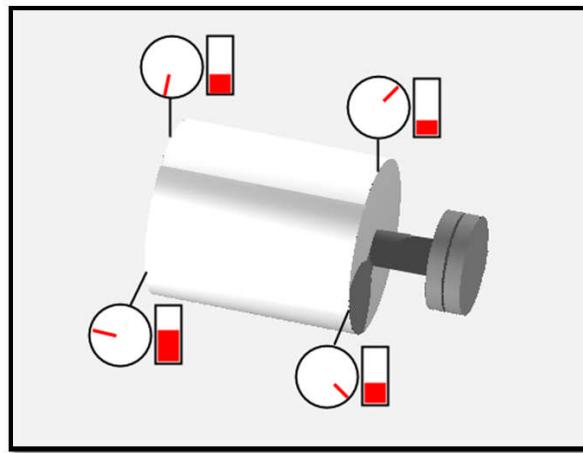


Figura 5-63

4. Una vez más, el nivel de vibración en un extremo de la máquina será superior a la vibración medida en el otro extremo. Sin embargo, la relación entre el extremo conductor y el extremo conducido debe ser aproximadamente la misma en las direcciones vertical y horizontal. Por ejemplo, si el extremo conductor era el doble de la amplitud en la dirección vertical, también esperaría que la vibración en el extremo conducido fuera aproximadamente dos veces más alta en la dirección vertical.

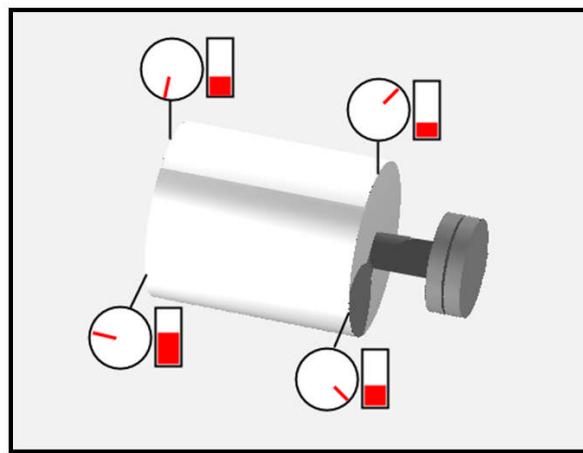


Figura 5-64

5. Una vez más, la amplitud axial y las lecturas de fase son muy reveladoras. Las lecturas de amplitud serán significativamente más bajas que las lecturas radiales. Las lecturas de fase tomadas a través del eje tienden a seguir uno de los dos patrones. Si hay un movimiento de cabeceo significativo (en cuyo caso las lecturas de fase vertical se aproximarán a 180° fuera de fase), entonces las lecturas axiales también se aproximarán a 180° fuera de fase. Sin

embargo, en ausencia de un movimiento de cabeceo, las lecturas de fase axial tendrán una diferencia de fase más pequeña: estarán cerca de estar en fase.

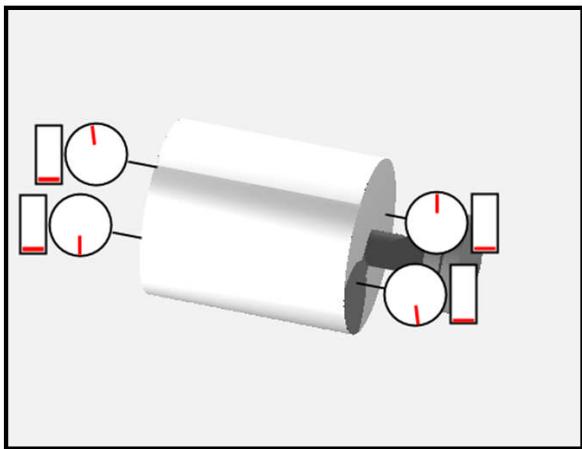


Figura 5-65

Teniendo en cuenta todas las lecturas, podemos construir una imagen de cómo se mueve la máquina: qué fuerzas están en juego.

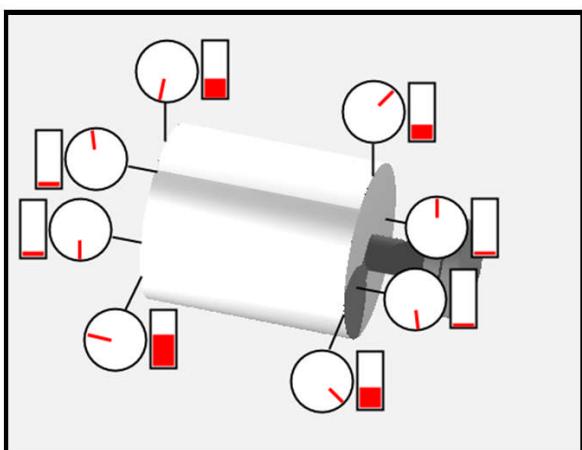


Figura 5-66

### ***Desbalance en máquina vertical***

Las máquinas verticales, como las bombas verticales, suelen ser voladizos desde su cimentación, y por lo general muestran niveles máximos de 1X en el extremo libre del motor, independientemente del componente que realmente esté fuera de balance.

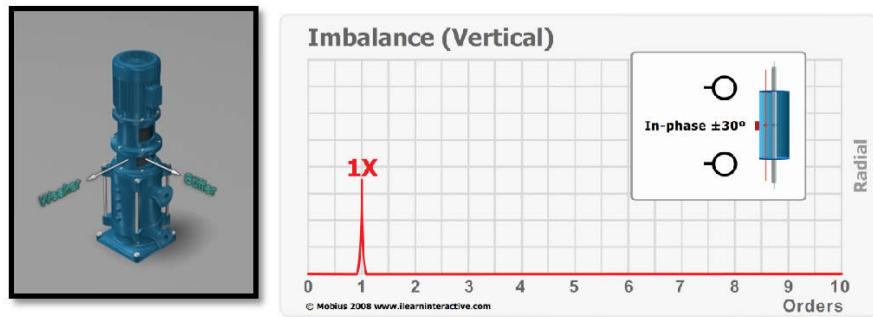


Figura 5-67

El espectro mostrará de nuevo un pico 1X fuerte cuando se mide en la dirección radial (horizontal o tangencial), y las lecturas de fase colectadas a lo largo de la máquina deben estar básicamente en fase. Debido al movimiento circular que resulta del desbalance, las lecturas de fase tomadas 90° alrededor de las mediciones de referencia deben ser 90° mayores o inferiores; dependiendo de la dirección de rotación.

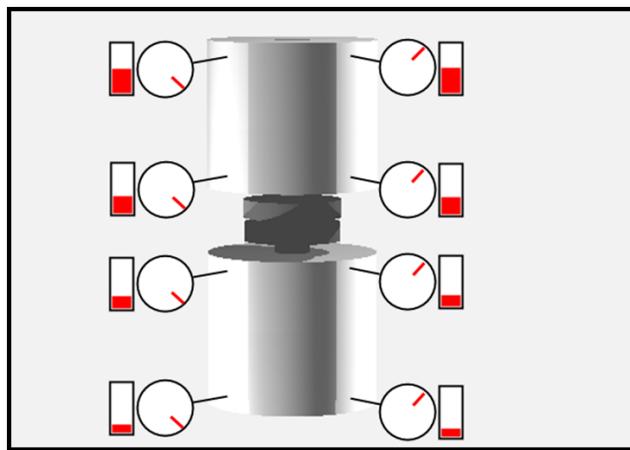


Figura 5-68

Las lecturas de amplitud deben ser más altas hacia la parte superior de la máquina. La máquina normalmente tendrá una mayor rigidez en una dirección (normalmente en línea con el tubo de descarga), por lo que las lecturas de amplitud serán más bajas en ese eje.

### ***Desbalance de máquinas en voladizo***

La dinámica de una máquina en voladizo es muy diferente; por lo tanto, nuestro estudio de los niveles de vibración relativos y las lecturas de fase es muy diferente. Las bombas y ventiladores en voladizo son comunes en la industria, por lo que debe examinar la máquina de cerca para

asegurarse de saber si un componente está en voladizo o soportado en ambos lados por rodamientos.

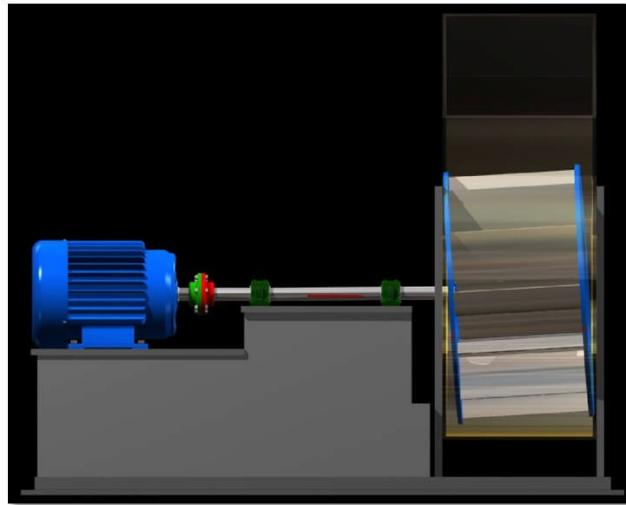


Figura 5-69

En una máquina en voladizo, verá de nuevo un alto nivel de vibración 1X, sin embargo esta vez se observará en la dirección axial, así como en vertical y horizontal. Las mediciones deben tomarse del rodamiento más cercano al impulsor o a las aspas del ventilador.

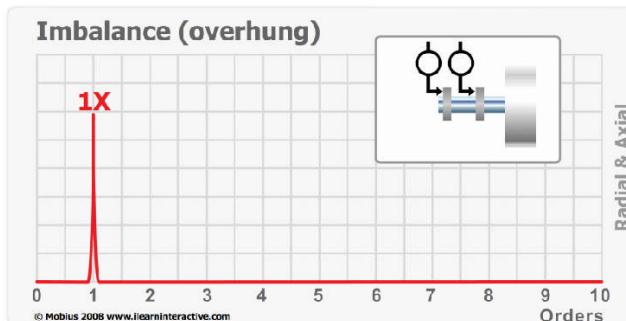


Figura 5-70

Vemos el alto 1X en axial porque el desbalance crea un momento de flexión en el eje, haciendo que la carcasa del rodamiento se mueva axialmente. Las lecturas serán en fase en la dirección axial.

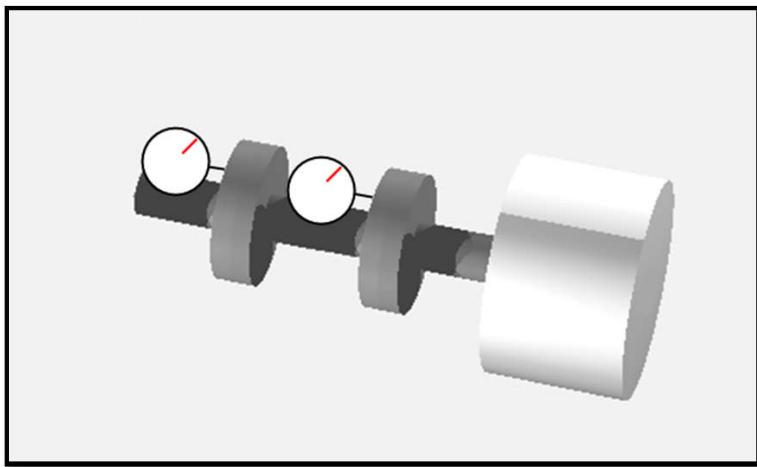


Figura 5-71

Debido al movimiento de flexión habrá en algún lugar entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  entre las dos lecturas horizontales, también entre las lecturas verticales. La diferencia de fase entre las lecturas verticales será similar a la diferencia de fase entre las dos lecturas horizontales.

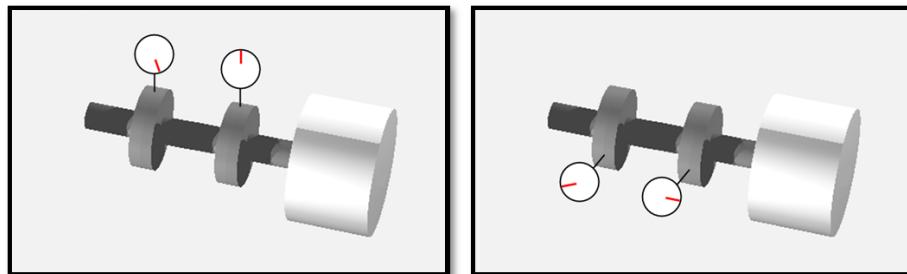


Figura 5-72

Y debido al movimiento circular, habrá aproximadamente  $90^\circ$  entre las lecturas verticales y horizontales.

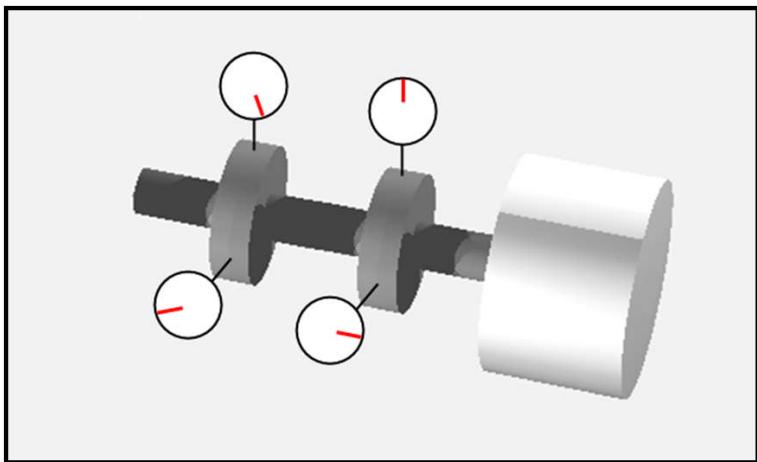


Figura 5-73

## Desalineamiento

Muchas personas tienen reglas simples con respecto a la desalineación. “Si el pico 1X es alto en axial, entonces puede ser desalineación. Si el 2X es alto en radial, entonces puede ser desalineación”. Algunas personas reconocen que un pico 3X o 4X también puede estar presente en el espectro radial, sin embargo, si 1X es alto en radial la suposición es que la máquina está desbalanceada. Eso puede ser una suposición peligrosa. La desalineación también genera 1X en la dirección radial, y la fase se debe utilizar para distinguir entre desbalance y desalineación.

Hemos discutido previamente el movimiento circular que se desarrolla como resultado del desbalance. Como tal, veremos ciertas relaciones de fase cuando comparamos las lecturas verticales con las horizontales, y cuando comparamos las relaciones de fase de un extremo de la máquina con el otro. Si realizamos esas comparaciones y las reglas no siguen aquellas que confirmarían una condición de desbalance, puede sospechar una condición de desalineación.

También hay relaciones de fase que ayudan a confirmar la presencia de desalineación, y a confirmar condiciones como la excentricidad, el eje doblado y el rodamiento torcido que también podrían confundirse con desbalance o desalineación. Discutiremos estas condiciones en las siguientes secciones.

Dado que la condición de desalineación se relaciona con el estado de alineación entre dos componentes, ahora nos interesan las relaciones de fase en más de un componente. Y estamos interesados en cómo cambia el ángulo de fase a través del acoplamiento. Por el contrario, en la sección de balanceo nos centramos en un solo componente que se pensaba que estaba desbalanceado.

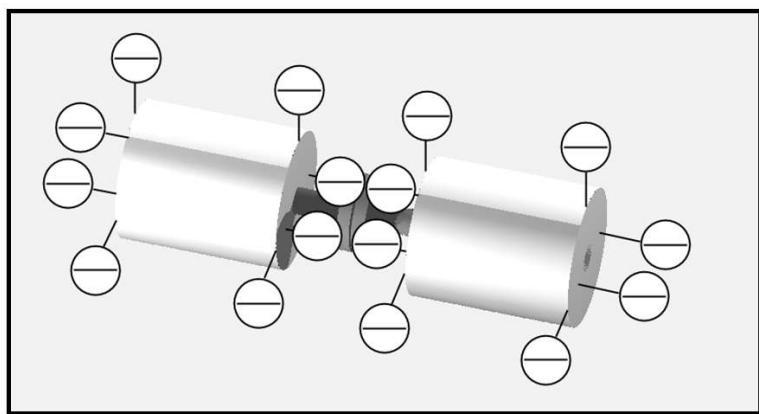


Figura 5-74

### *Revisión rápida:*

Si las líneas centrales de los ejes están desalineadas, son paralelas pero no coincidentes, se dice que la desalineación es una desalineación paralela (offset).

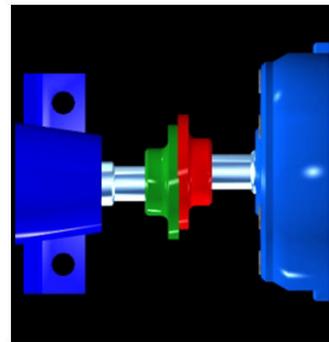


Figura 5-75 Desalineación paralela (offset)

Si los ejes desalineados se encuentran en un punto pero no son paralelos, la desalineación se denomina desalineación angular (gap).

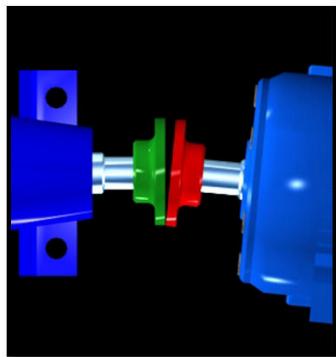


Figura 5-76 Desalineación angular (gap)

Casi todas las condiciones de desalineación que se ven en la práctica son una combinación de estos dos tipos básicos.

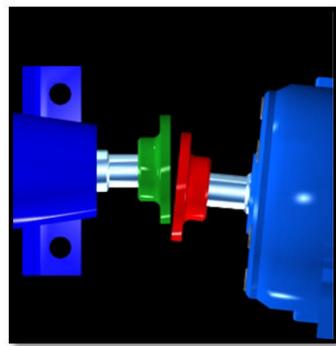


Figura 5-77 Desalineación angular y paralela

La desalineación angular produce un momento de flexión en cada eje, y esto genera una fuerte vibración a 1X y algo de vibración a 2X en la dirección axial en ambos rodamientos. También habrá niveles radiales (verticales y horizontales) 1X y 2X bastante fuertes, sin embargo, estos componentes estarán en fase.

Los componentes desalineados generalmente producirán niveles 1X axiales bastante altos en los rodamientos en el otro extremo de los ejes también. Esto significa que puede colectar la lectura axial en los rodamientos opuestos al acople en el motor o bomba, por ejemplo, y detectar la desalineación.

La desalineación paralela produce una fuerza de corte y un momento de flexión en el extremo acoplado de cada eje. Los altos niveles de vibración en 2X y 1X se producen en las direcciones radiales (verticales y horizontales) en los rodamientos a cada lado del acoplamiento.

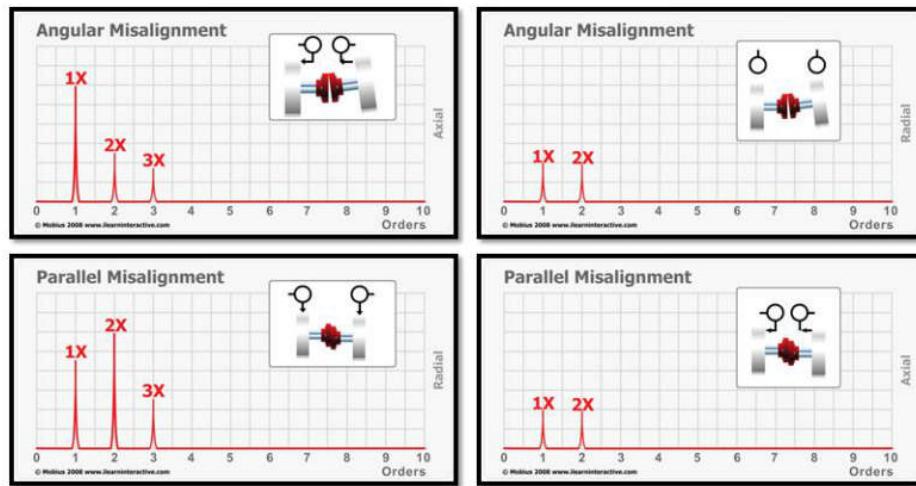


Figura 5-78 Desalineación

La mayoría de los casos de desalineación son una combinación de desalineación paralela y angular. Dependiendo del tipo de acoplamiento y otros factores, es posible que vea picos 3X y 4X, y en algunos casos puede parecer soltura con picos de hasta 8X. Una diferencia con la soltura es que el ruido de piso en el espectro no se elevará.

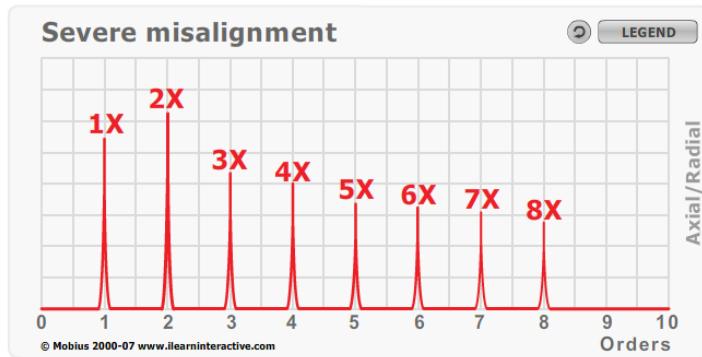


Figura 5-79 Desalineación severa

### *Relaciones de fase:*

Revisemos los cinco temas que hemos analizado en la sección de desbalance y aprendamos cómo se relacionan con la desalineación:

- 1 La relación de fase entre las lecturas verticales y horizontales tomadas en los extremos de la máquina no seguirá las reglas que vimos anteriormente. Debido al movimiento creado con desalineación angular y paralela, y el efecto que diferentes tipos de acoplamiento

tendrán en ese movimiento, el ángulo de fase entre los extremos de la máquina no será coherente en las direcciones vertical y horizontal. Si vimos que la diferencia entre las lecturas verticales era de 180 del eje, entonces podríamos esperar que la diferencia entre las lecturas horizontales podría ser de 0 del eje.

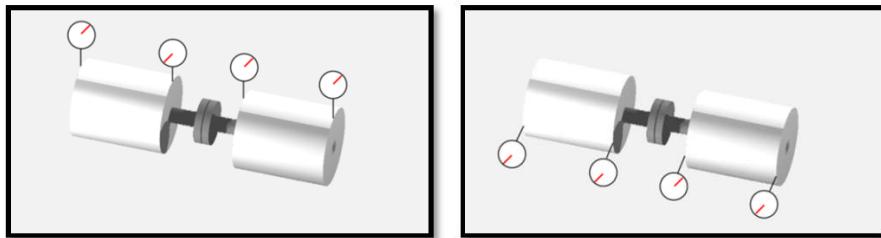


Figura 5-80

2. Si una máquina está desalineada, no esperaríamos ver 90 grados o 270 grados entre las lecturas verticales y horizontales tomadas en el mismo rodamiento. En su lugar, es probable que estén más cerca de 0° o 180°.

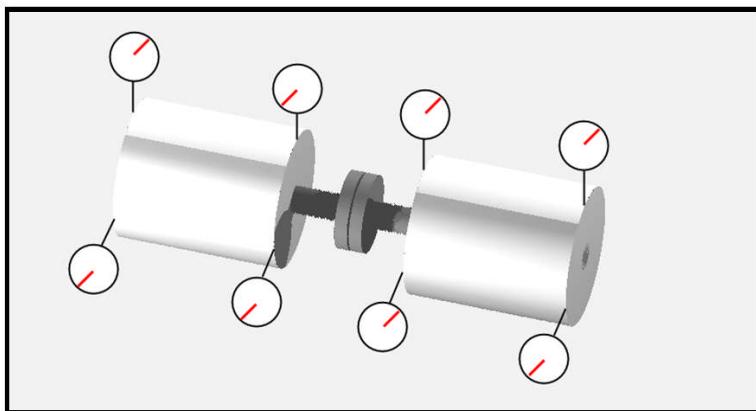


Figura 5-81

3. Las lecturas de amplitud en las direcciones vertical y horizontal siguen reglas muy diferentes a las que aprendimos en la sección de desbalance. En primer lugar, las lecturas verticales pueden ser más altas que las lecturas horizontales – depende de la naturaleza del offset. Se ha observado que hay un offset lateral sustancial, las lecturas de vibración serán bastante altas en la dirección vertical.

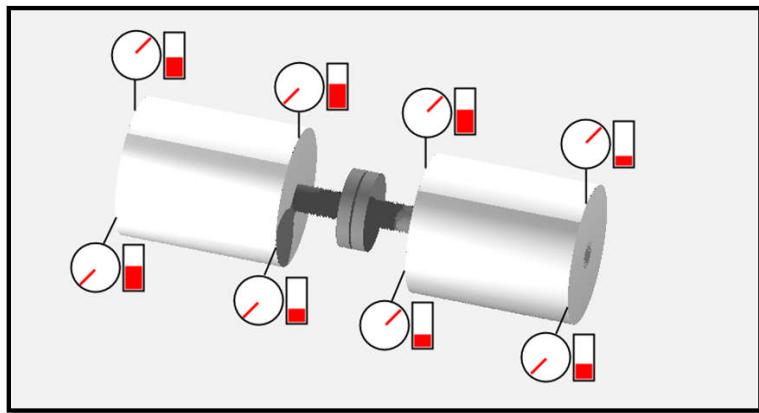


Figura 5-82

4. Si compara la relación entre las amplitudes 1X verticales y horizontales en cada rodamiento, las relaciones serán diferentes si la máquina está desalineada. La vertical puede ser más alta en un caso y más baja en otra.

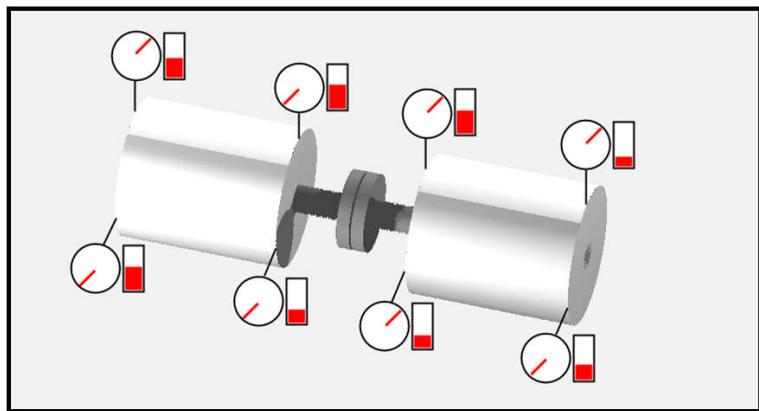


Figura 5-83

5. Las amplitudes relativas de las lecturas axiales podrían variar significativamente. Si hay una desalineación angular sustancial, las lecturas axiales serán altas. Si hay principalmente desalineación paralela, la axial podría ser baja en comparación con las lecturas radiales.

Cuando consideramos las lecturas de fase, tenemos que considerar dos tipos de relaciones: la diferencia de fase de un lado del eje al otro; y la diferencia de fase a través del acoplamiento.

Cuando hay una desalineación angular fuerte, se espera que la lectura de fase sea 180 fuera de fase a través del acoplamiento.

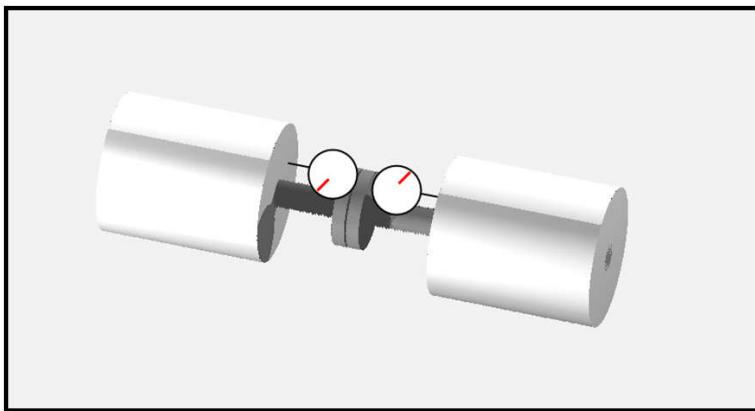


Figura 5-84

Cuando se comparan las lecturas de fase de un lado del eje, las cosas pueden ser un poco interesantes. Si las lecturas a través del acoplamiento (de un componente de la máquina al otro) deben estar fuera de fase, entonces usted esperaría una relación de fase consistente alrededor del eje – con el fin de mantener la relación de acoplamiento cruzado. Sin embargo, debido al tipo de acoplamiento, el diseño de los dos componentes de la máquina y el equilibrio real de desalineación angular y desalineación paralela, las lecturas de fase pueden sorprenderle. En un componente las lecturas pueden estar en fase, pero en el otro pueden estar fuera de fase.

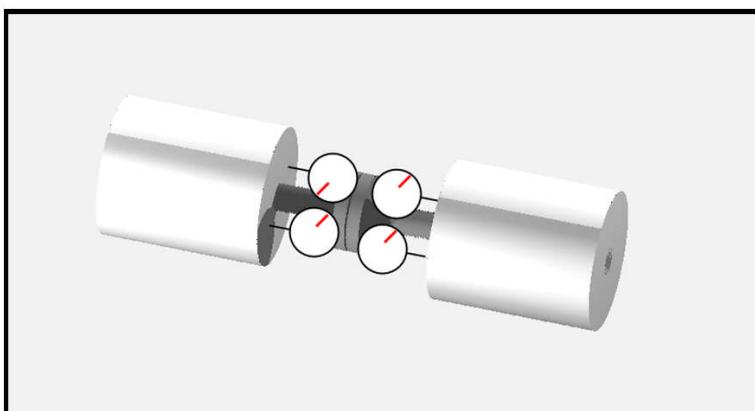


Figura 5-85

## Excentricidad

---

La excentricidad se produce cuando el centro de rotación se desvía de la línea central geométrica de una polea, engranaje, rodamiento o rotor.

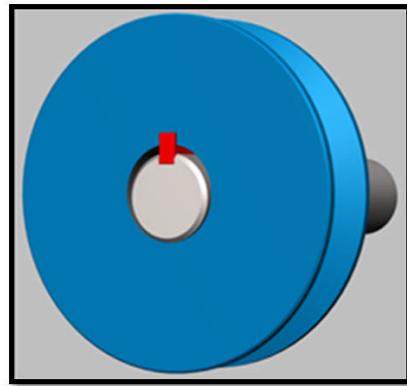


Figura 5-86

Las poleas/engranajes excéntricos generarán componentes radiales 1X fuertes, especialmente en la dirección paralela a las correas/bandas. Esta condición es muy común, e imita el desbalance. La relación de fase, sin embargo, es bastante diferente, porque el movimiento es bastante diferente.

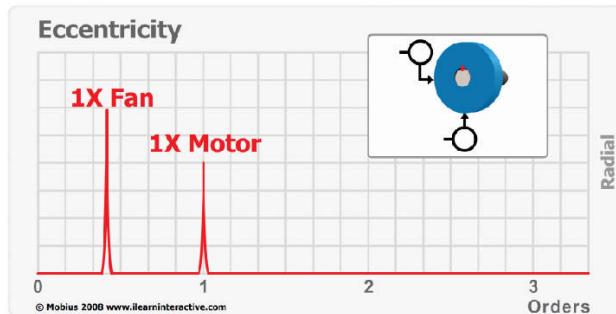


Figura 5-87

En las máquinas accionadas por correa/banda, habrá un alto nivel de vibración 1X en ambos componentes (motor y ventilador, por ejemplo), sin embargo, debido al cambio en la velocidad, estos serán en dos frecuencias diferentes.



Figura 5-88

La vibración más elevada será en dirección de la flecha anaranjada (Figura 5-88), por lo que las mediciones se deben de tomar en esas direcciones. Habrá una diferencia de fase entre las mediciones tomadas en dirección a las flechas y su ángulo recto, a las direcciones de  $0^\circ$  y  $180^\circ$ . Note que no estamos tomando fase en las direcciones literalmente verticales y horizontales. Estamos tomando una medición en línea con las correas, y otra en el ángulo recto de esas direcciones.

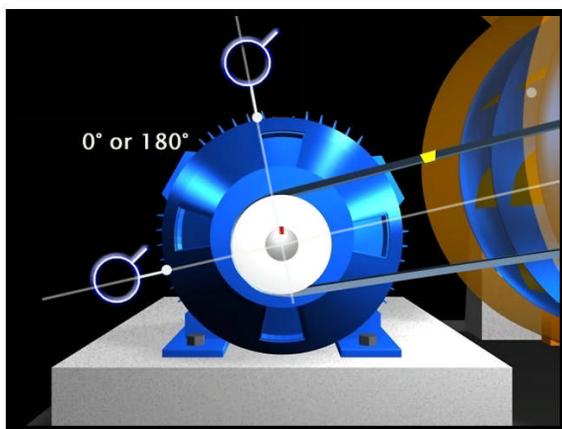


Figura 5-89

## Eje doblado

Un eje doblado causa predominantemente una alta vibración axial 1X. La vibración dominante está normalmente en 1X si la curva está cerca del centro del eje, sin embargo, verá una vibración 2X si la curva está más cerca del acoplamiento. Las mediciones verticales y horizontales también a menudo revelarán picos en 1X y 2X, sin embargo, la clave es la medición axial.

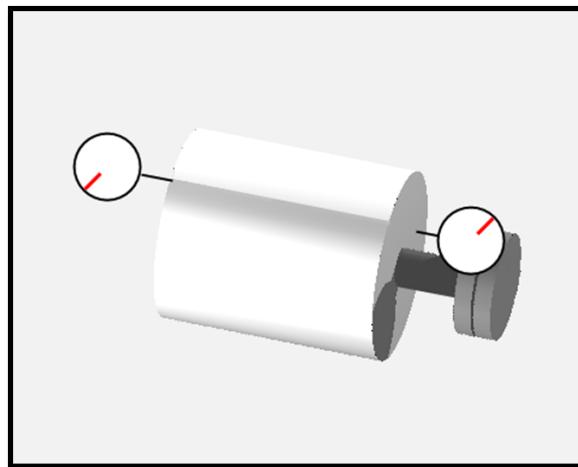


Figura 5-90

La fase también es una buena prueba utilizada para diagnosticar un eje doblado. La fase en IX medida en las direcciones axiales en los extremos opuestos del componente será 180 grados fuera de fase.

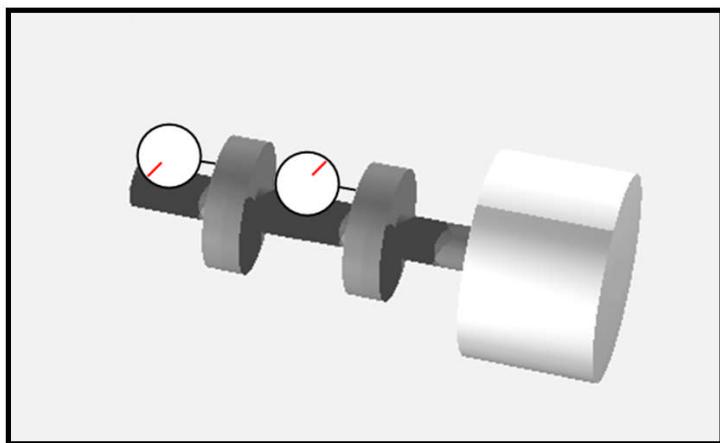


Figura 5-91

También es posible tomar lecturas de fase alrededor del eje – a ambos lados del eje, y por encima y por debajo. Esperamos que todas las lecturas estén en fase.

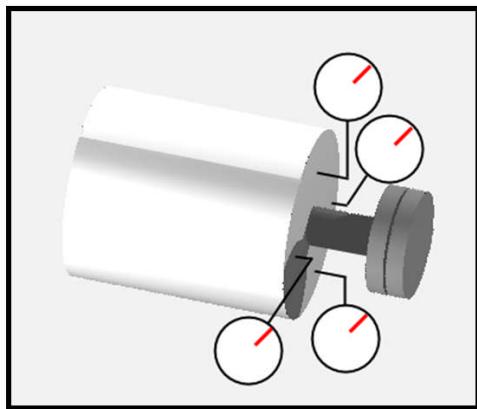


Figura 5-92

## Rodamiento torcido

Un rodamiento torcido, que es una forma de desalineación, generará una vibración axial considerable. Los picos a menudo se verán en 1X y 2X en la dirección axial, e incluso se pueden ver 3X y otros armónicos. Dado que hay una vibración axial tan fuerte, también se puede confundir con desalineación, y con el desbalance en una bomba o ventilador en voladizo. La presencia de picos a 2X (y 3X) en la dirección axial indicaría una condición de rodamiento torcido, distinguiéndose del desbalance.

En realidad, hay dos formas posibles de rodamientos torcidos. Si la pista externa del rodamiento está torcida, las lecturas de fase axial indicarán una diferencia de  $180^\circ$  de un lado del eje al otro. Sin embargo, todo depende de cómo esté torcido el rodamiento. La diferencia de  $180^\circ$  se puede ver desde el lado izquierdo hacia la derecha o se puede ver de arriba a abajo, pero no ambos.

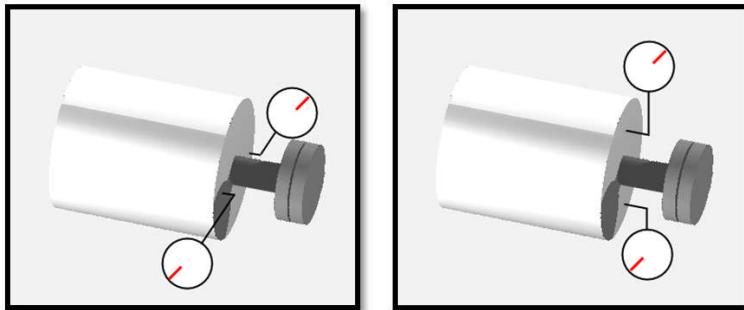


Figura 5-93

Si la pista interna está torcida en el eje, entonces el rodamiento parecerá “menearse” a medida que gira, generando una diferencia de fase giratoria de  $180^\circ$ . Habrá una diferencia de  $90^\circ$  a medida que se mueva de arriba a la derecha, hacia abajo y hacia la izquierda (o de 12:00 a 3:00 a 6:00 a 9:00).

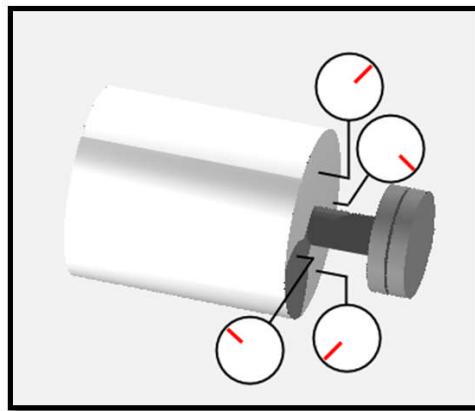


Figura 5-94

## Holgura/soltura

El análisis de fase también se puede utilizar para ayudar a identificar holgura y problemas de cimentación, pero de una manera ligeramente diferente de lo que hemos discutido hasta ahora.

En primer lugar, debido a que la holgura giratoria implica un pico  $1X$  y armónicos, en algunos casos puede confundirse con desalineación e incluso el eje doblado y el rodamiento torcido. Sin embargo, las lecturas de fase no seguirán las reglas que hemos discutido hasta ahora, y serán de naturaleza aleatoria (errática). Así que esto puede ayudarle a distinguir entre las dos condiciones de falla.

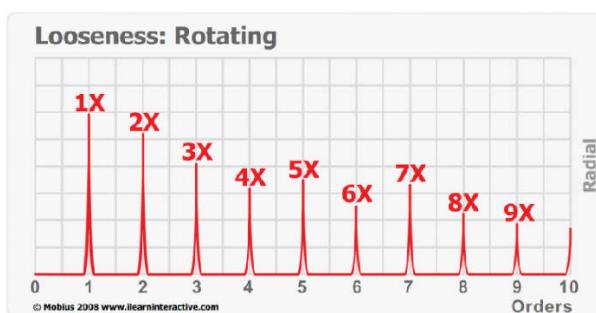


Figura 5-95

En el caso de rotura estructural, donde hay un problema con los cimientos, la fase se puede utilizar de dos maneras.

En primer lugar, si los niveles de vibración son lo suficientemente altos, la máquina puede moverse hacia adelante y hacia atrás. Las lecturas de fase tomadas en la dirección horizontal podrían estar en fase, pero a diferencia del desbalance, no habrá una diferencia de fase de  $90^\circ$  entre vertical y horizontal.

Si hay una grieta en la base o un perno de retención suelto, puede monitorear la fase mientras mueve el acelerómetro de punto a punto. Cuando el acelerómetro se mueve a través de la grieta o el límite suelto, el ángulo de fase cambiará en  $180^\circ$ .

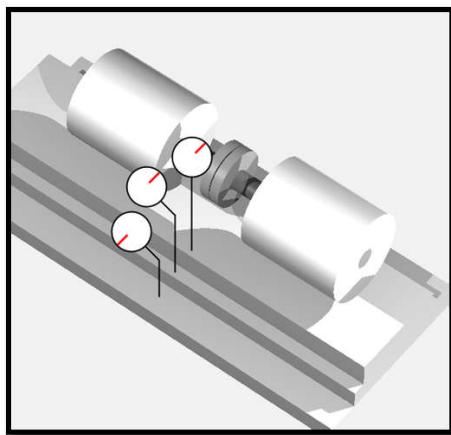


Figura 5-96

## Conclusión

Espero que ahora tengan un renovado interés en el análisis de fase. La fase se puede utilizar para ayudarle a diagnosticar positivamente una amplia gama de condiciones de falla y para visualizar las condiciones de resonancia. Si tiene un recopilador de datos de dos canales, las lecturas de fase no son difíciles de recopilar y deben realizarse con frecuencia.

## Puntos clave

- Los estudiantes deben entender las fallas comunes de la máquina discutidas en esta sección
  - Los estudiantes deben ser capaces de diagnosticar estas fallas usando diagramas de burbujas
- Los estudiantes deben entender cómo se pueden utilizar las relaciones de fase para distinguir entre fallas comunes como excentricidad, desbalance y desalineación
- Los estudiantes deben ser capaces de interpretar diagramas de burbujas y entender cómo la estructura o máquina se está moviendo en función de las lecturas de fase y amplitud